

La retroazione negli amplificatori elettronici

Sommario argomenti trattati

La retroazione negli amplificatori elettronici.....	1
Introduzione storica	1
Generalità sulla retroazione.....	2
Guadagno di un sistema in retroazione.....	3
Andamento del guadagno in funzione del guadagno d'anello	3
Effetti della retroazione sulle caratteristiche di un amplificatore.....	4
Effetti sul guadagno.....	4
Effetti sulla distorsione.....	5
Effetti sulla banda passante	5
Effetti sui disturbi.....	6
Effetti sulla stabilità del guadagno.....	7
Analisi dell'amplificatore non invertente con op-amp utilizzando la retroazione negativa	8
Configurazioni fondamentali degli amplificatori retroazionati.....	9
Retroazione parallelo-serie	9
Retroazione serie-serie.....	10
Retroazione serie-parallelo	10
Retroazione parallelo-parallelo	11

Introduzione storica

I primi amplificatori elettronici utilizzavano come dispositivo attivo il triodo (o valvola). A causa di problemi di natura tecnologica, connessi principalmente con la difficoltà di effettuare un vuoto sufficientemente spinto all'interno dell'involucro del dispositivo, i primi triodi consentivano di ottenere amplificazioni estremamente ridotte, perciò i primi ingegneri elettronici vollero i loro sforzi ad individuare soluzioni circuitali che consentissero di incrementare il più possibile l'amplificazione, senza dover ricorrere a troppi dispositivi.

Il primo a trovare una soluzione fu Edwin Howard Armstrong, nell'inverno 1912-1913. Tale soluzione consisteva nel riportare in ingresso (griglia) parte della corrente di uscita (corrente anodica) e venne indicata con il termine di "circuito rigenerativo" e più tardi con il termine ora più comune di "retroazione positiva". Grazie a questa soluzione



Fig. 1 E.H. Armstrong (New York
18/12/1890 – 31/01/1954)

circuitali fu possibile realizzare radiorecettori molto sensibili, dando grande impulso alle radiocomunicazioni, non era però molto conveniente il suo utilizzo nelle comunicazioni telefoniche in quanto comportava un aumento della distorsione e rendeva più critico il comportamento del circuito.

Intorno all'inizio degli anni venti, si confermò la possibilità di realizzare la trasmissione di più conversazioni telefoniche contemporanee utilizzando un'unica coppia di conduttori, facendo ricorso alla tecnica FDM (frequency division multiplex). In pratica ogni conversazione veniva trasmessa utilizzando un diverso intervallo di frequenza, cosicché le informazioni risultavano separabili mediante semplici filtri elettrici.

Per effetto della distorsione di non linearità introdotta dagli amplificatori presenti si generavano segnali armonici, producendo interferenze fastidiose fra le varie conversazioni (diafonia per intermodulazione) ed impedendo di utilizzare questa tecnica per un grande numero di conversazioni.



Fig. 2 Harold Stephen Black (14/04/1898 – 1983)

Per risolvere questo problema la Bell, società leader nel campo della telefonia, approntò un gruppo di ricerca. Nel 1921 venne chiamato a far parte del gruppo Harold Stephen Black.

Questi dapprima cercò di realizzare dei triodi a bassissima distorsione, senza però ottenere risultati accettabili, ebbe allora l'intuizione di riformulare i termini del problema: non più realizzare un triodo privo di distorsione ma determinare delle configurazioni circuitali che eliminassero la distorsione presente all'uscita dell'amplificatore. Sulla base di questo nuovo approccio, fu individuata e realizzata nel 1923, una prima soluzione nota come configurazione "feed-forward" o "reazione in avanti", il cui schema a blocchi funzionali è riportato in fig. 3. Le prestazioni ottenute non erano però ancora soddisfacenti, la distorsione non veniva ridotta sufficientemente e la realizzazione risultava notevolmente critica.

Black continuò a studiare il problema per altri anni, ma sempre con approcci matematici troppo complessi. Infine un'analisi matematica lo convinse che in pratica avrebbe potuto ottenere qualsiasi riduzione della distorsione a spese di una diminuzione di amplificazione, semplicemente riportando in controfase all'ingresso una parte del segnale di uscita, questa soluzione prese il nome di "negative feedback" o "retroazione negativa". In breve tempo si approntò un circuito che confermò i risultati teorici. Il 22 aprile del 1932 l'invenzione fu registrata a nome di Black. I fondamentali teorici furono diffusi con la pubblicazione dell'articolo "Stabilized feedback amplifiers" sul numero del gennaio 1934 di "Electrical Engineering". Dopo questa data la retroazione trovò

numerose applicazioni industriali e militari, estendendosi anche a settori della biologia, della fisiologia, della psicologia, dell'etologia e dell'ecologia.

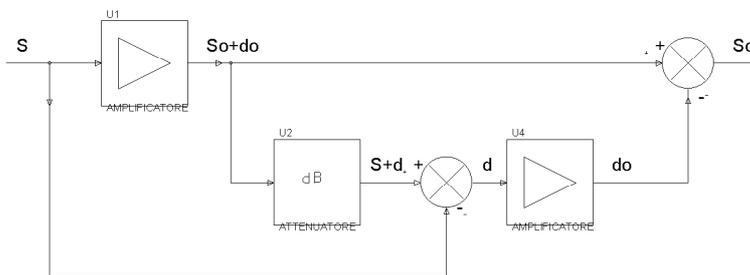


Fig. 3 Schema a blocchi configurazione feed-forward

Generalità sulla retroazione

La retroazione è una tecnica utilizzata ampiamente anche al di fuori del campo elettronico, perciò ne effettueremo un'analisi che risulti il più possibile generale. In fig. 4 vediamo la struttura di sistema in retroazione

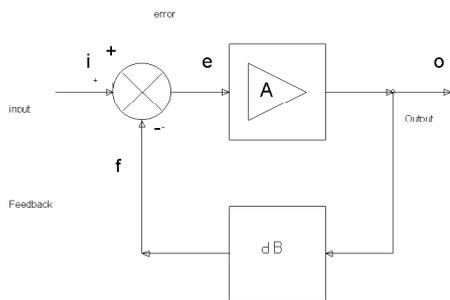


Fig. 4 Schema a blocchi di un sistema in retroazione negativa

aritmeticamente, dando luogo ad un segnale errore e *più grande* del segnale d'ingresso *i*, allora si ha retroazione **positiva**.

Nella realizzazione degli amplificatori elettronici attualmente si utilizza la retroazione negativa, mentre la retroazione positiva è utilizzata per realizzare generatori di segnali o circuiti a scatto.

Guadagno di un sistema in retroazione

Supposto noti A e β , che nel caso generale assumono il significato di funzione di trasferimento dei rispettivi blocchi, determiniamo il guadagno complessivo A_f definito, come al solito, pari al rapporto tra uscita ed ingresso. Dall'analisi dello schema a blocchi si ha:

$$o = A e; \quad e = i - f; \quad f = \beta o$$

segue: sostituendo l'espressione di f nell'espressione di e :

$$e = i - \beta o$$

$$o = A e = A (i - \beta o) = A i - A \beta o$$

portiamo a primo membro tutti i termini con la o e si ha:

$$o (1 + A \beta) = A i; \text{ da cui si può ricavare } A_f:$$

$$\text{Eq. 1} \quad A_f = \frac{o}{i} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad \text{Guadagno di un sistema in retroazione.}$$

La quantità $A\beta$ viene chiamata *guadagno d'anello* e la quantità $(1 + A\beta)$ *fattore di retroazione*.

Se risulta soddisfatta la relazione $A\beta \gg 1$ detta **condizione di desensibilizzazione totale**, si ha:

$$\text{Eq. 2} \quad A_f = \frac{1}{\beta} \quad \text{Guadagno in condizioni di desensibilizzazione totale}$$

il guadagno del sistema in retroazione dipende esclusivamente dal blocco di retroazione e non dal blocco diretto, nel caso degli amplificatori elettronici ciò significa che il comportamento dell'intero circuito è determinato solo dal quadripolo passivo di retroazione e non dipende dall'amplificatore. Un quadripolo passivo si può realizzare facilmente con bassissima distorsione, ottima precisione e stabilità nei confronti delle variazioni delle condizioni ambientali (temperatura, umidità, ecc.) e dell'invecchiamento dei componenti, perciò utilizzando la retroazione negativa è possibile realizzare semplicemente ottimi amplificatori elettronici, basta soddisfare la condizione $A\beta \gg 1$, il che richiede solo di disporre di amplificatori ad alto guadagno.

Andamento del guadagno in funzione del guadagno d'anello

Ricaviamo dapprima il valore del segnale errore in funzione del segnale d'ingresso:

$$e = i - \beta o = i - A \beta e$$

raccogliendo a primo membro i termini con il segnale errore

$$e + A \beta e = i$$

$$e (1 + A \beta) = i$$

$$\text{Eq. 3} \quad e = \frac{i}{1 + A\beta} \quad \text{Espressione del segnale errore in funzione del segnale d'ingresso.}$$

Possiamo tracciare l'andamento del guadagno del sistema in retroazione in funzione del guadagno d'anello e l'andamento del segnale errore in funzione del guadagno d'anello, così da poter stabilire a colpo d'occhio i vari tipi di retroazione.

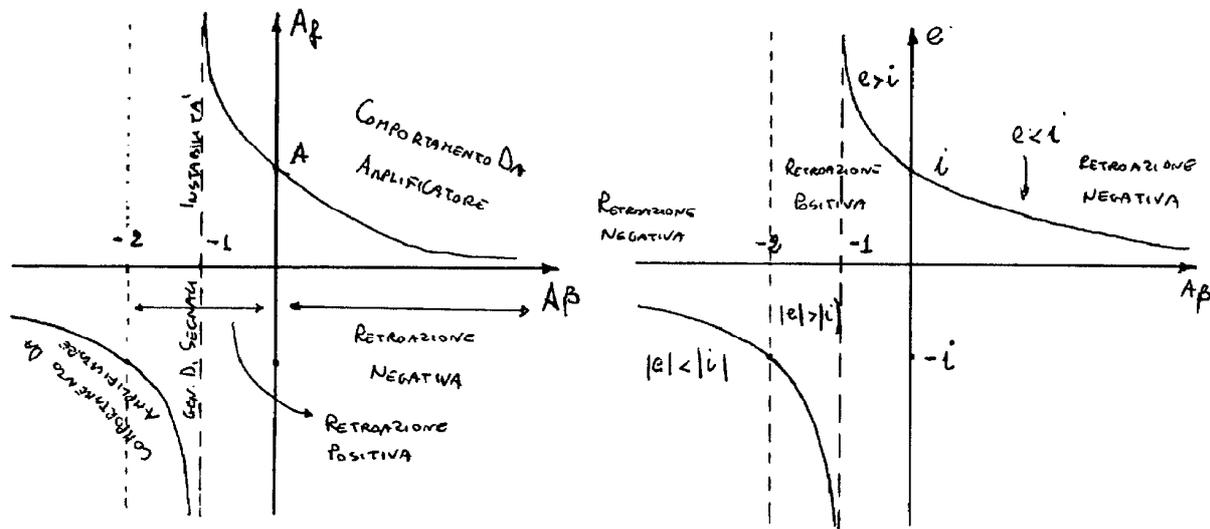


Fig. 5 Andamento del guadagno e del segnale errore in funzione del guadagno d'anello di un sistema in retroazione.

Dal grafico di fig. 5 si può notare come per $A\beta > 0$ il segnale errore è più piccolo del segnale d'ingresso, si ha perciò condizione di retroazione negativa, il guadagno con retroazione A_f diminuisce rispetto al guadagno senza retroazione A .

Per $A\beta = 0$ $e = i$ siamo in condizioni di assenza di retroazione pertanto il guadagno è A .

Per $A\beta$ compreso tra zero e -1 , il segnale errore aumenta rispetto al segnale d'ingresso, siamo in condizioni di retroazione positiva, il guadagno con retroazione aumenta rispetto al guadagno senza retroazione.

Per $A\beta \Rightarrow -1$ il guadagno tende a valori infinitamente grandi, in pratica il sistema non si comporta più da amplificatore ma diventa un generatore di segnali, nel linguaggio dell'Elettronica si dice che il sistema è instabile.

Le situazioni in cui $A\beta < -1$, non interessano in quanto corrispondono a situazioni scarsamente realistiche.

Effetti della retroazione sulle caratteristiche di un amplificatore

Nella tabella seguente vengono riportati i principali effetti introdotti sulle caratteristiche di un amplificatore dai due tipi di retroazione.

Retroazione positiva	Retroazione negativa
Aumenta il guadagno	Diminuisce il guadagno
Diminuisce la stabilità del guadagno	Aumenta la stabilità del guadagno
Diminuisce la BW	Aumenta la BW
Aumenta la distorsione	Diminuisce la distorsione
Aumenta la sensibilità ai disturbi	Diminuisce la sensibilità ai disturbi

Per quanto riguarda la resistenza d'ingresso e la resistenza di uscita, non è possibile dare relazioni generali, è necessario analizzare la specifica situazione circuitale per stabilire se vi è un aumento o una diminuzione.

Effetti sul guadagno

Nel caso di retroazione negativa $A\beta > 0$, allora $(1 + A\beta) > 1$ segue $A_f < A$, il che dimostra che vi è una diminuzione di guadagno. Nella pratica questo non è un grande problema in quanto A è elevatissimo, per cui anche riducendolo si ottengono valori ugualmente notevoli.

Nel caso della retroazione positiva $A\beta < 0$ e nel caso degli amplificatori elettronici è pure $A\beta > -1$, segue $(1 + A\beta) < 1$, allora $A_f > A$, il guadagno aumenta.

Effetti sulla distorsione

La distorsione si può ritenere un segnale di origine esterna che si somma all'uscita dell'amplificatore, è chiaro che ciò è una schematizzazione per comodità di analisi, la distorsione nasce all'interno dell'amplificatore per effetto del comportamento non lineare dei componenti attivi.

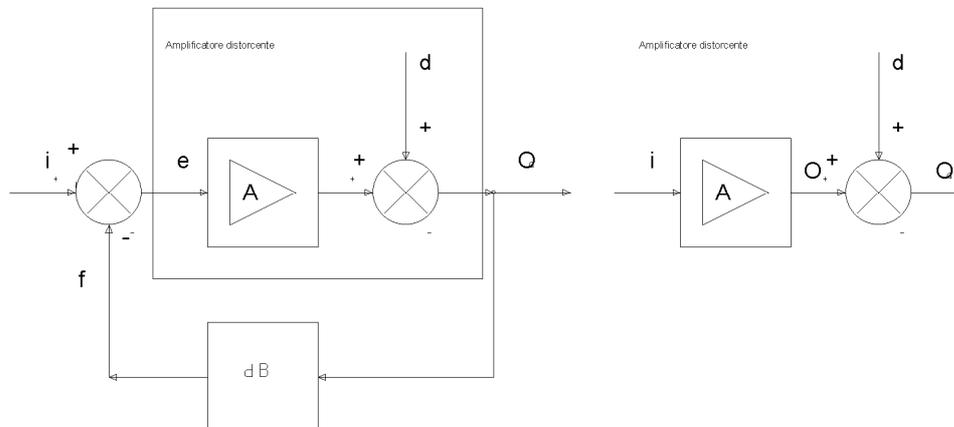


Fig. 6

Influenza della distorsione in un amplificatore con e senza retroazione.

Senza retroazione è:

Eq. 4
$$o_d = o + d$$

Con retroazione si ha: $o_d = o + d = A e + d$, ma $e = i - f = i - \beta o_d$, sostituendo nell'espressione di o_d

$$o_d = A (i - \beta o_d) + d = A i - A \beta o_d + d$$

$$o_d (1 + A \beta) = A i + d \quad \text{ricavo } o_d$$

Eq. 5
$$o_d = \frac{A}{1 + A\beta} i + \frac{1}{1 + A\beta} d$$

da questa relazione noto che si ha sia una riduzione di distorsione che una riduzione di guadagno, sembrerebbe quindi che non si abbia alcun vantaggio, in realtà il confronto va effettuato a parità di tensione di uscita e non a parità di guadagno, in quanto la distorsione non lineare è legata all'ampiezza del segnale, per l'esattezza aumenta all'aumentare dell'ampiezza del segnale. Riscrivendo l'eq. 5 come segue:

Eq. 6
$$o_d = o + \frac{1}{1 + A\beta} d$$

da questa noto che la distorsione è ridotta di una quantità pari al fattore di retroazione, perciò se la retroazione è negativa $(1 + A \beta) > 1$, la distorsione è effettivamente ridotta, mentre se la retroazione è positiva $(1 + A \beta) < 1$ la distorsione viene aumentata. Se consideriamo il parametro THD%, si può dimostrare che:

Eq. 7
$$(THD\%)_f = \frac{THD\%}{1 + A\beta} \quad \text{Distorsione armonica totale in presenza di retroazione.}$$

Effetti sulla banda passante

Per determinare analiticamente questo effetto ipotizziamo che l'amplificatore abbia una risposta in frequenza del tipo di un filtro passa-basso RC (questo è un caso tipico per gli amplificatori operazionali), ossia del tipo:

Eq. 8
$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s\tau}$$

con A_0 guadagno in continua, τ costante di tempo del circuito a cui corrisponde una frequenza di taglio:

Eq. 9
$$f_t = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Determiniamo ora la frequenza di taglio in presenza di retroazione, ipotizziamo per semplicità β un numero reale, ossia il blocco di retroazione composto da soli resistori.

Per determinare la relazione richiesta, cercheremo, con opportune manipolazioni algebriche, di esprimere il guadagno con retroazione nella stessa forma della cq. 8

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{\frac{A_0}{1 + s\tau}}{1 + \frac{A_0}{1 + s\tau}\beta} = \frac{\frac{A_0}{1 + s\tau}}{\frac{1 + s\tau + A_0\beta}{1 + s\tau}} = \frac{A_0}{1 + s\tau + A_0\beta} = \frac{A_0}{(1 + A_0\beta)(1 + \frac{s\tau}{1 + A_0\beta})}$$

posto $\tau_f = \frac{\tau}{1 + A_0\beta}$ e $A_{f0} = \frac{A_0}{1 + A_0\beta}$ si ottiene:

Eq. 10
$$A_f(s) = \frac{A_{f0}}{1 + s\tau_f}$$

a cui corrisponde una frequenza di taglio: $f_{tf} = \frac{1}{2\pi\tau_f}$

se la confrontiamo con la frequenza di taglio senza retroazione, notiamo un incremento pari al fattore di retroazione, ossia:

Eq. 11
$$f_{tf} = f_t(1 + A_0\beta)$$

Ancora se la retroazione è negativa si ha un incremento effettivo, mentre se è positiva si ha una diminuzione.

Nel caso di un amplificatore con risposta in ampiezza di tipo passa-banda, con due frequenze di taglio, una inferiore f_{ti} ed una superiore f_{ts} , è possibile dimostrare, con procedimenti esattamente analoghi a quello sopra riportato, che le frequenze di taglio con retroazione diventano:

Eq. 12
$$f_{tif} = \frac{f_{ti}}{1 + A_0\beta}$$
 Frequenza di taglio inferiore con retroazione

Eq. 13
$$f_{tsf} = f_{ts}(1 + A_0\beta)$$
 Frequenza di taglio superiore con retroazione

Con A_0 guadagno dell'amplificatore alle medie frequenze o centrobanda.

Si può affermare che la retroazione negativa incrementa la frequenza di taglio superiore e diminuisce la frequenza di taglio inferiore, portando complessivamente ad una aumento della banda passante. L'esatto opposto si ha per la retroazione positiva.

Effetti sui disturbi

Con il termine *disturbo* (o rumore o noise) si intende un segnale indesiderato che si somma la segnale utile presente nel circuito. I disturbi possono essere di origine esterna o di origine interna.

I disturbi di origine esterna, sono segnali generati da sorgenti esterne che per vari fenomeni sono captati dal circuito in esame. Esempi di disturbo di origine esterna sono :

- il segnale a 50 Hz della rete di alimentazione ed eventuali sue armoniche (100 e 150 Hz);
- segnali generati da relè, contattori ed altri dispositivi elettromagnetici posti in prossimità del circuito (1-100MHz);
- segnali prodotti da trasmettitori radio (da 100kHz a 30 MHz);
- segnali prodotti da vibrazioni meccaniche dell'apparecchio (10-100Hz);
- segnali prodotti da vibrazioni dei cavi coassiali;
- segnali prodotti da circuiti stampati di scarsa qualità (0.01 a 10 Hz).

I disturbi di origine interna, sono costituiti da segnali che nascono all'interno dei componenti utilizzati per realizzare il circuito, a causa di fenomeni fisici. Tra questi ricordiamo il rumore bianco delle resistenze.

I disturbi sommandosi al segnale utile ne alterano l'informazione trasportata, se tale alterazione eccede certi limiti l'informazione potrebbe non essere più riconoscibile. Per avere un parametro quantitativo che mi definisca l'effetto del disturbo sul segnale utile, è stato definito il parametro **rapporto segnale/disturbo (S/N)**:

$$(S/N) = \frac{s_u}{n} \text{ con } s_u \text{ valore efficace del segnale utile e } n \text{ valore efficace del disturbo.}$$

Il rapporto S/N è pure espresso in dB, in modo analogo al guadagno di tensione.

Risulta evidente che maggiore è il rapporto S/N e minore è l'effetto del disturbo sul segnale utile.

Qualità dell'immagine S/N (dB)

Ottima	58
Buona	43
Discreta	34
Scadente	22
Pessima	16

Tab. 1 Valori di S/N per segnali video

Qualità del suono S/N (dB)

Ottimo	65
Buono	60
Discreto	55
Scadente	50
Pessimo	45

Tab. 2 Valori di S/N per segnali audio ad alta fedeltà

Valutiamo ora quali effetti comporta l'introduzione della retroazione. Se il segnale disturbante si sovrappone al segnale utile in ingresso all'amplificatore, è evidente che l'introduzione della retroazione non comporta alcun vantaggio, in quanto l'amplificatore provvederà ad amplificare delle stesse quantità sia il disturbo che il segnale utile, cosicché il loro rapporto rimane invariato.

Se, invece, il disturbo si sovrappone al segnale utile in uscita all'amplificatore, l'introduzione della retroazione può comportare dei miglioramenti. La situazione è del tutto identica alla situazione con distorsione, con la sola differenza che al posto della distorsione d è ora presente il disturbo n . Valgono perciò le relazioni eq. 5 e eq. 6, dove al posto di d va posto n e che qui riportiamo per comodità.

Eq. 14
$$o_d = o + n$$
 Uscita con disturbo e senza retroazione.

Eq. 15
$$o_d = o + \frac{1}{1 + A\beta} n$$
 Uscita con disturbo e retroazione.

Se ragioniamo a parità di tensione di uscita, nel caso di presenza di retroazione il disturbo è variato del solito fattore di retroazione, cosicché è ridotto se si ha retroazione negativa [$(1 + A\beta) > 1$], aumentato se si ha retroazione positiva [$(1 + A\beta) < 1$].

Se consideriamo il parametro S/N, si può dimostrare che:

Eq. 16
$$(S/N)_f = (S/N) \cdot (1 + A\beta)$$
 Rapporto segnale disturbo in presenza di retroazione

Effetti sulla stabilità del guadagno

Con il termine "stabilità del guadagno" si intende l'insensibilità del valore del guadagno dalle condizioni ambientali (pressione, temperatura, umidità, ecc.), dalle tolleranze di fabbricazione dei componenti (indicata nel gergo elettronico con il termine "*dispersione delle caratteristiche*"), dall'invecchiamento dei componenti e da ogni altra causa di variazione.

In un circuito elettronico gli elementi più sensibili agli effetti di cui si è accennato sono i componenti attivi, ossia i diodi ed i transistori, utilizzati prevalentemente nella realizzazione del blocco amplificatore A. Il blocco di retroazione β , invece, è composto prevalentemente da componenti passivi, perciò presenta caratteristiche di elevata stabilità. Effettuando l'analisi con l'ipotesi di β costante indipendente da ogni agente di variazione, A che subisce una variazione ΔA ovvero una variazione relativa $\Delta A/A$ (detta anche sensitività del guadagno ed indicata con S_A), si può dimostrare che a seguito dell'introduzione della retroazione la variazione relativa del guadagno dell'amplificatore diventa:

Eq. 17 $\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{\frac{\Delta A}{A}}{1 + A\beta}$ **Sensitività del guadagno in presenza di retroazione.**

Ancora la variazione relativa del valore del guadagno diminuisce del fattore di retroazione nel caso di retroazione negativa, aumenta nel caso di retroazione positiva.

Analisi dell'amplificatore non invertente con op-amp utilizzando la retroazione negativa

La fig. 7 mette in evidenza la struttura di circuito retroazionato dell'amplificatore non invertente con op-amp.

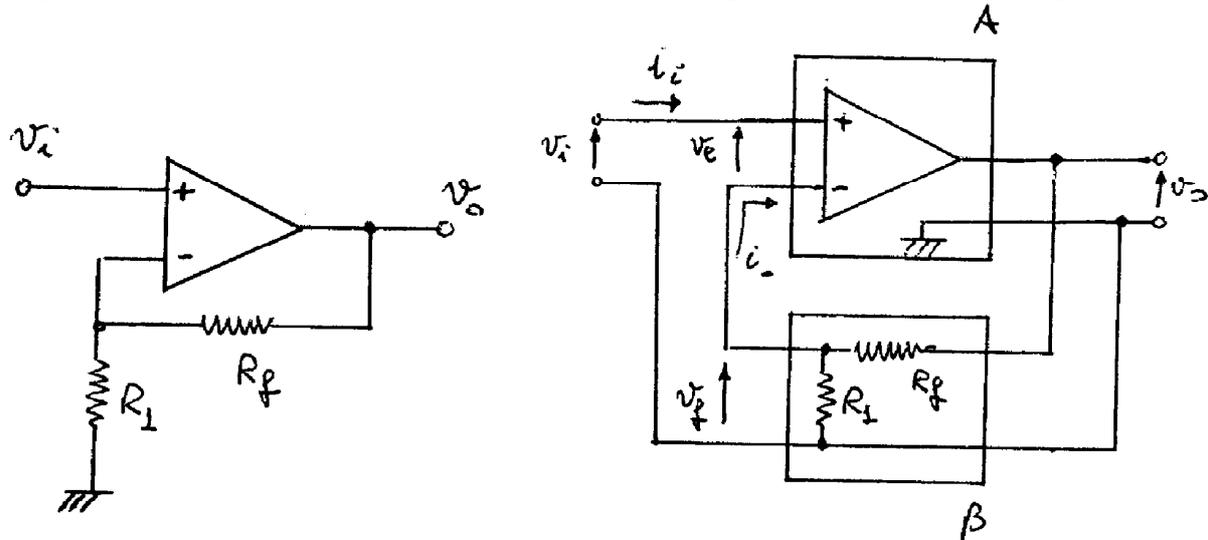


Fig. 7

Si nota che i due quadripoli A e β , sono collegati in serie in ingresso ed in parallelo in uscita, pertanto si parla di retroazione **serie-parallelo**.

Il blocco A è costituito dall'op-amp, il blocco di retroazione β dal partitore resistivo, il nodo sommatore dalla particolare connessione circuitale adottata in ingresso.

Le grandezze i, e, o ed f sono costituite, rispettivamente, dalle tensioni v_i, v_e, v_o e v_f .

In ingresso risulta : $v_e = v_i - v_f$ a conferma della presenza di un nodo sommatore.

Determiniamo l'espressione del guadagno complessivo del sistema con retroazione, dobbiamo perciò determinare il valore di A e β .

Per quanto riguarda A, esso non è altro che il guadagno differenziale A_d dell'op-amp, mentre β coincide con il guadagno del partitore di tensione costituito da R_1 e R_f . (posto di trascurare la corrente assorbita dall'ingresso invertente dell'op-amp, cosa del tutto lecita)

$\beta = \frac{v_f}{v_o}$ ma in base alla regola del partitore è: $v_f = v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$ sostituendo nell'espressione di β e semplificando il termine v_o presente sia a numeratore che a denominatore, si ottiene:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

posso così ricavare il guadagno di tensione con retroazione:

$$A_{vf} = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{A}{1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_f}}$$

espressione del guadagno di un amplificatore non invertente con op-amp, nell'ipotesi

di op-amp con guadagno finito (op-amp reale).

Se consideriamo valida la condizione di desensibilizzazione totale $A\beta \gg 1$, allora risulta:

$$A_{vf} = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

solita relazione vista nello studio nell'ipotesi di op-amp ideale.

Valutiamo anche l'effetto della retroazione sulla resistenza d'ingresso, ed indichiamo con R_i la resistenza d'ingresso dell'op-amp, con R_{if} la resistenza d'ingresso dell'amplificatore non invertente con op-amp.
Per definizione di resistenza d'ingresso:

$$R_{if} = \frac{v_i}{i_i} \text{ ovviamente } i_i \text{ che coincide con } i. \text{ non va considerata zero.}$$

$v_i = v_e + v_f = v_e + \beta v_o = v_e + A\beta v_e = v_e(1 + A\beta)$ da cui sostituendo nella definizione di R_{if} :

$$R_{if} = \frac{v_e(1 + A\beta)}{i_i} \text{ ricordato che } R_i = \frac{v_e}{i_i} \text{ si ottiene l'importante relazione finale:}$$

Eq. 18 $R_{if} = R_i(1 + A\beta)$ **Resistenza d'ingresso di un amplificatore con retroazione serie-parallelo**

Questa relazione ci dice che l'introduzione della retroazione negativa aumenta la resistenza d'ingresso di una quantità pari al fattore di retroazione, cosicché la resistenza d'ingresso dell'op-amp già elevata diventa ancor più elevata, avvicinandosi ancor più alla situazione di amplificatore di tensione ideale.

Con un procedimento un poco più complesso e che qui omettiamo per brevità, si può valutare la resistenza di uscita in presenza di retroazione in funzione della resistenza di uscita senza retroazione (resistenza di uscita del solo op-amp) e si ottiene:

Eq. 19 $R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$ **Resistenza di uscita di un amplificatore con retroazione serie-parallelo**

Questa relazione ci dice che l'introduzione della retroazione negativa diminuisce la resistenza d'uscita di una quantità pari al fattore di retroazione.

Configurazioni fondamentali degli amplificatori retroazionati

Le configurazioni fondamentali sono quattro e si possono vedere nelle figure seguente i relativi schemi a blocchi.

Retroazione parallelo-serie

In uscita viene prelevata una corrente ed in ingresso si sommano delle correnti. In ingresso ed in uscita si hanno delle correnti, perciò A , β e A_f sono guadagni di corrente, ossia numeri puri, continua a valere la relazione ::

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

Per quanto riguarda le resistenze d'ingresso e di uscita, si possono ricavare relazioni analoghe a quelle viste in precedenza, che qui ci limitiamo a riportare:

Eq. 20 $R_{if} = \frac{R_i}{(1 + A\beta)}$ **Resistenza d'ingresso di un amplificatore con retroazione parallelo-serie**

Eq. 21 $R_{of} = R_o(1 + A\beta)$ **Resistenza d'uscita di un amplificatore con retroazione parallelo-serie**

Questa configurazione è ottima per ottenere amplificatori di corrente.

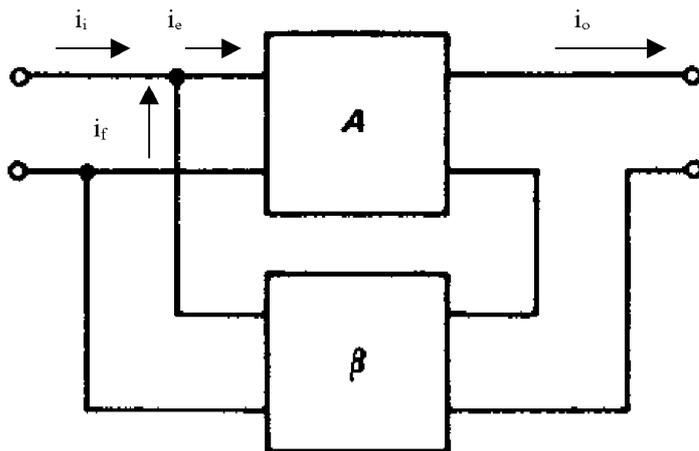


Fig. 8 Retroazione parallelo-serie

Retroazione serie-serie

In uscita viene prelevata una corrente ed in ingresso si sommano delle tensioni. Le grandezze A e A_f sono ora dimensionalmente delle conduttanze e perciò sono dette transconduttanze, viceversa β dimensionalmente è una resistenza e perciò è detta transresistenza, continua a valere la relazione: $A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$.

Per quanto riguarda le resistenze d'ingresso e di uscita, si possono ricavare relazioni analoghe a quelle viste in precedenza, che qui ci limitiamo a riportare:

Eq. 22 $R_{if} = R_i(1 + A\beta)$ Resistenza d'ingresso di un amplificatore con retroazione serie-serie

Eq. 23 $R_{of} = R_o(1 + A\beta)$ Resistenza d'uscita di un amplificatore con retroazione serie-serie

Questa configurazione è ottima per ottenere convertitori tensione/corrente.

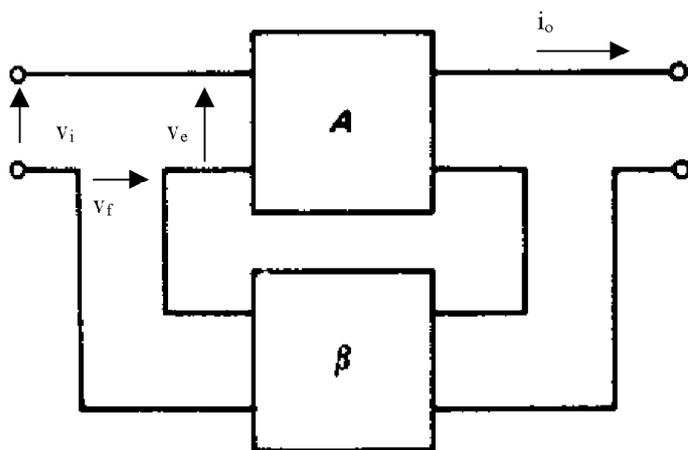


Fig. 9 Retroazione serie-serie

Retroazione serie-parallelo

In uscita viene prelevata una tensione ed in ingresso si sommano delle tensioni. Le grandezze A e A_f sono ora dimensionalmente dei numeri puri, ossia dei guadagni di tensione, continua a valere la relazione: $A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$.

Per quanto riguarda le resistenze d'ingresso e di uscita, si possono ricavare relazioni analoghe a quelle viste in precedenza, che qui ci limitiamo a riportare:

Eq. 24 $R_{if} = R_i(1 + A\beta)$ **Resistenza d'ingresso di un amplificatore con retroazione serie-parallelo**

Eq. 25 $R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$ **Resistenza di uscita di un amplificatore con retroazione serie-parallelo**

Questa configurazione è ottima per ottenere amplificatori di tensione.

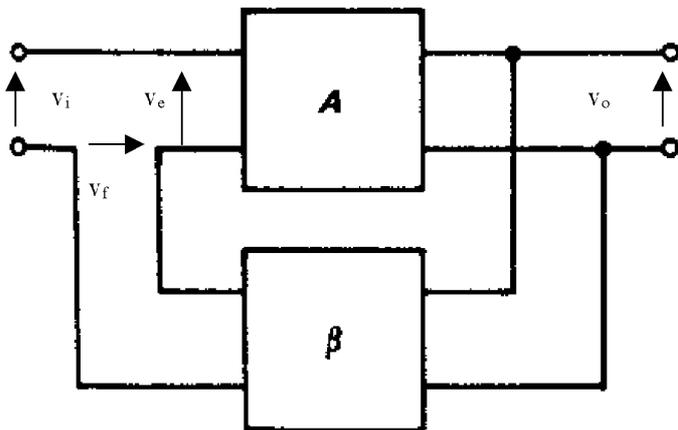


Fig. 10 Retroazione serie-parallelo

Retroazione parallelo-parallelo

In uscita viene prelevata una tensione ed in ingresso si sommano delle correnti. Le grandezze A e A_f sono ora dimensionalmente delle resistenze e perciò sono dette transresistenze, viceversa β dimensionalmente è una conduttanza e perciò è detta transconduttanza, continua a valere la relazione: $A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$

Per quanto riguarda le resistenze d'ingresso e di uscita, si possono ricavare relazioni analoghe a quelle viste in precedenza, che qui ci limitiamo a riportare:

Eq. 26 $R_{if} = \frac{R_i}{(1 + A\beta)}$ **Resistenza d'ingresso di un amplificatore con retroazione parallelo-parallelo**

Eq. 27 $R_{of} = \frac{R_o}{(1 + A\beta)}$ **Resistenza d'uscita di un amplificatore con retroazione parallelo-parallelo**

Questa configurazione è ottima per ottenere convertitori corrente/tensione.

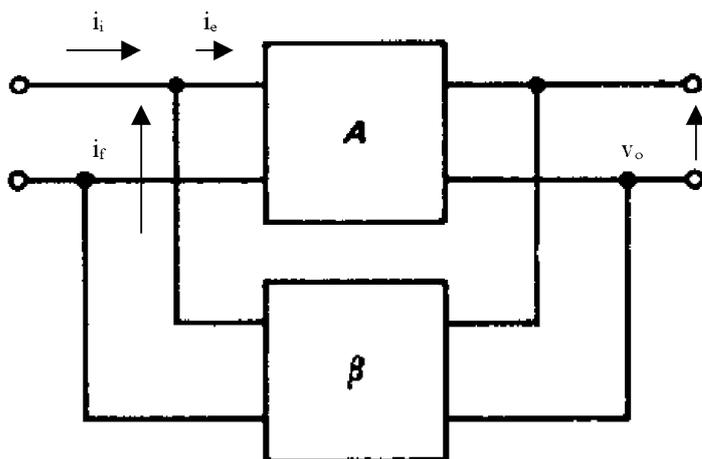


Fig. 11 Retroazione parallelo-parallelo