

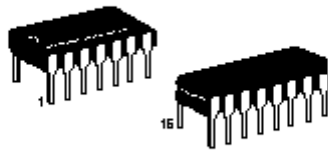
ISTITUTO PROFESSIONALE DI STATO PER L'INDUSTRIA L'ARTIGIANATO
CON SEZIONI DI SCUOLA PER LE ATTIVITA' MARINARE
63039 SAN BENEDETTO DEL TRONTO (Ascoli Piceno)
Distretto N.16

Classe VA T.I.E.E.

Anno Scolastico 1995/96

Docente: prof. Franco Tufoni

REAZIONE



-2- LA REAZIONE

Il guadagno di un amplificatore dipende fortemente dai parametri differenziali dei dispositivi attivi che lo compongono e quindi dal loro punto di riposo. Per tanto tale guadagno varia al variare del punto di riposo dei singoli stadi. Il punto di riposo dei dispositivi attivi può essere sensibilmente diverso da quello previsto a causa della dispersione delle loro caratteristiche e può variare nel tempo per molte cause, principalmente perché variano la temperatura oppure la tensione di alimentazione. Di conseguenza, all'atto della realizzazione di un amplificatore, da un lato il guadagno realmente ottenuto può essere sensibilmente diverso da quello previsto, dall'altro tale guadagno varia nel tempo. Si pone allora il problema di realizzare amplificatori nei quali il guadagno non dipenda praticamente dai parametri dei dispositivi attivi, ma soltanto dai componenti stabili nel tempo (es: reti resistive oppure quadripoli R-L-C, reti passive). Una tecnica circuitale comunemente utilizzata a tale scopo si basa sul principio generale della reazione ovvero sulla teoria dei sistemi ad anello chiuso, che riveste particolare importanza anche nei processi di controllo automatico. La reazione si divide in negativa e positiva:

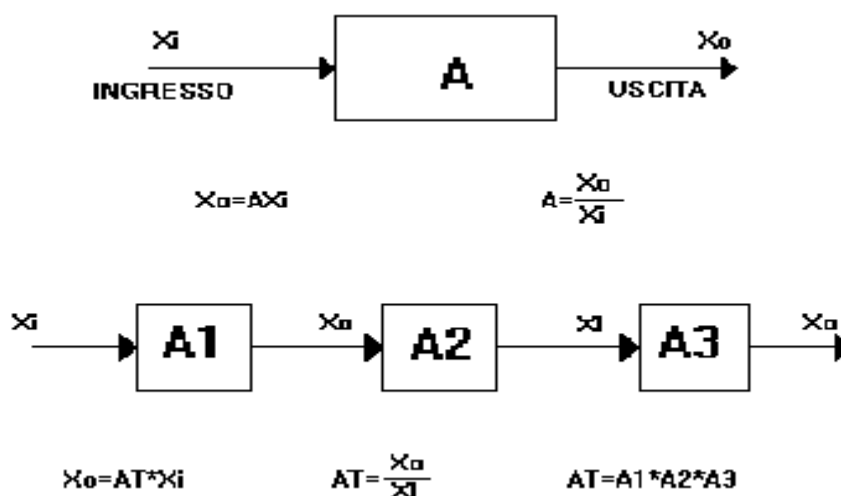
- 1) REAZIONE NEGATIVA: guadagno stabile e prevedibile (es: con circuiti con op-amp).
- 2) REAZIONE POSITIVA : circuiti capaci di generare un segnale a forma d'onda.

CONTROLLI AUTOMATICI

Per controllo automatico si intende il processo, o l'insieme di processi, che permette di far variare nel modo voluto una determinata grandezza fisica (es: la velocità di un motore) senza l'intervento di un uomo.

SISTEMA A CATENA APERTA

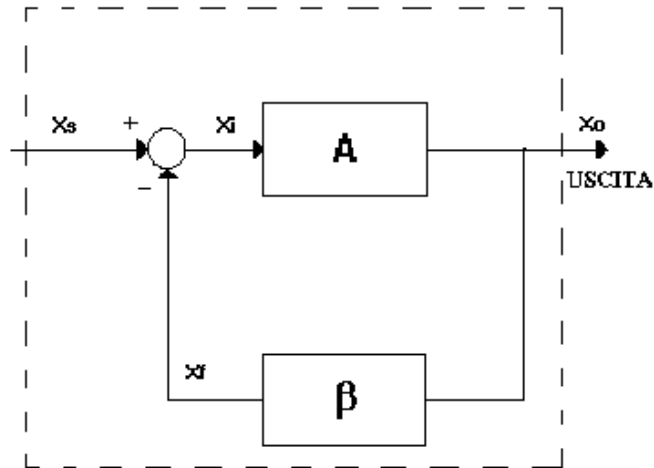
Un sistema a catena aperta (OPEN-LOOP) è composto da uno o più blocchi collegati in cascata; in tal caso la dipendenza dell'uscita dall'ingresso non è sottoposta ad alcun controllo.



In questi sistemi la funzione di trasferimento e di conseguenza il segnale d'uscita X_o dipendono fortemente dai parametri differenziali dei componenti attivi dei singoli blocchi. E' perciò preferibile ricorrere ad un controllo automatico.

SISTEMI A CATENA CHIUSA O A RETROAZIONE.

Per poter far sì che l'ingresso venga informato dell'uscita da esso stesso generata occorre trasformare la successione dei blocchi in una catena chiusa (CLOSED LOOP). Si ottengono così i sistemi a retroazione (FEED BACK), che possono essere rappresentati come in figura.



I diversi elementi del circuito formano un anello che può essere suddiviso in due catene: la catena di andata o diretta, nella quale il segnale passa dall'ingresso all'uscita attraverso il blocco con funzione di trasferimento A, e quella di ritorno o inversa, mediante la quale il segnale viene riportato dall'uscita all'ingresso attraverso il blocco con funzione di trasferimento β .

Gli amplificatori a retroazione utilizzano la retroazione per mantenere costante, istante per istante, il rapporto fra il segnale d'uscita e quello d'ingresso, in modo da riprodurre quest'ultimo fedelmente. La catena diretta è formata dall'amplificatore A, la catena di ritorno da un attenuatore β .

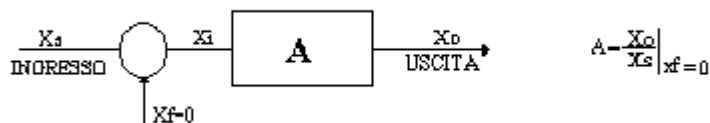
Se i segnali nel blocco di confronto, si sottraggono la retroazione viene chiamata negativa e se si sommano positiva.

$$X_i = X_s - X_f \text{ ----> REAZIONE NEGATIVA ----> } |X_i| < |X_s|$$

$$X_i = X_s + X_f \text{ ----> REAZIONE POSITIVA ----> } |X_i| > |X_s|$$

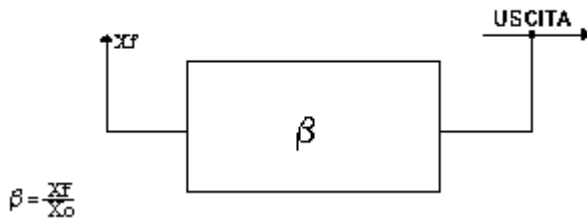
AMPLIFICAZIONE AD ANELLO APERTO.

L'amplificazione ad anello aperto è il rapporto fra X_o e X_s che si ha in assenza di reazione ($X_f=0$).



FUNZIONE DI REAZIONE.

Il quadripolo di reazione β è di norma una rete passiva (elementi R,L,C). Con β si indica la funzione di reazione, ovvero la funzione di trasferimento del quadripolo espressa come:



Non di rado il quadripolo β di reazione è puramente resistivo, per cui β assume un valore reale e viene chiamato semplicemente FATTORE DI REAZIONE.

AMPLIFICAZIONE AD ANELLO CHIUSO.

E' la funzione di trasferimento definita come:

$$A_f = \frac{X_o}{X_s}$$

L'espressione si A_f viene agevolmente ricavata in base allo schema e in base all'amplificazione ad anello aperto (A) e alla funzione di reazione (β).

$$A_f \begin{cases} A = \frac{X_o}{X_s} \Big|_{X_f=0} \\ \beta = \frac{X_f}{X_o} \end{cases}$$

$$X_o = A * X_i = A * (X_s - X_f) = A * (X_s - \beta X_o)$$

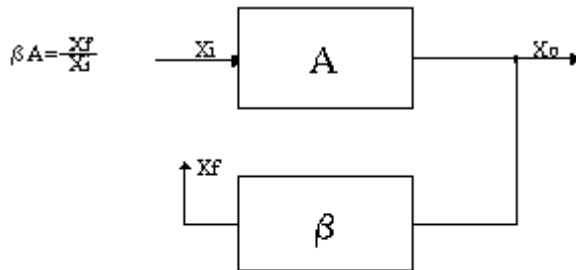
$$X_o = A * X_s - \beta A X_o \Rightarrow X_o + \beta A X_o = A X_s \Rightarrow X_o (1 + \beta A) = A X_s \Rightarrow \frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

$$\frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1 + \beta A} \Rightarrow \boxed{A_f = \frac{A}{1 + \beta A}}$$

Reazione

GUADAGNO AD ANELLO.

Il prodotto βA che compare a denominatore nell'equazione A_f viene chiamato il guadagno d'anello (LOOP GAIN) e risponde alla seguente definizione:



$$\beta A = \frac{X_f}{X_i}$$

$$A = \frac{X_o}{X_i}$$

$$\beta = \frac{X_f}{X_o}$$

$$\Rightarrow \beta A = \frac{X_f}{X_o} \cdot \frac{X_o}{X_i} = \frac{X_f}{X_i}$$

Il termine βA indica l'amplificazione applicata al segnale lungo il percorso dell'anello di reazione.



FATTORE O TASSO DI RETROAZIONE

Il termine $1+\beta A$ nel secondo membro dell'equazione A_f ($A_f = A/1+\beta A$) viene chiamato fattore o tasso di retroazione e può essere considerato un numero "magico" poiché interviene a caratterizzare l'espressione analitica di ogni proprietà della retroazione .
 esempio:

$$\beta A \gg 1 \Rightarrow 1 + \beta A = \beta A \Rightarrow A_f = \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta} \Rightarrow \boxed{A_f = \frac{1}{\beta}}$$

se $\beta A \gg 1 \Rightarrow A_f = 1/\beta$ quindi l'amplificazione del sistema retroazionato non dipende dai parametri differenziali dell'amplificatore A , ma dipende solo da β (es. circuiti con AMP. OP.); per ottenere una risposta fedele e stabile è pertanto sufficiente che il blocco β sia formato da elementi che offrono una grande affidabilità e precisione.

REAZIONE NEGATIVA

Dall'espressione $\beta A = \frac{X_f}{X_i}$ si ricava l'espressione di $1 + \beta A$

$$1 + \beta A = 1 + \frac{X_f}{X_i} = \frac{X_i + X_f}{X_i} = \frac{X_s}{X_i}$$

$$1 + \beta A = \frac{X_s}{X_i} = D \quad \rightarrow \text{fattore di retroazione}$$

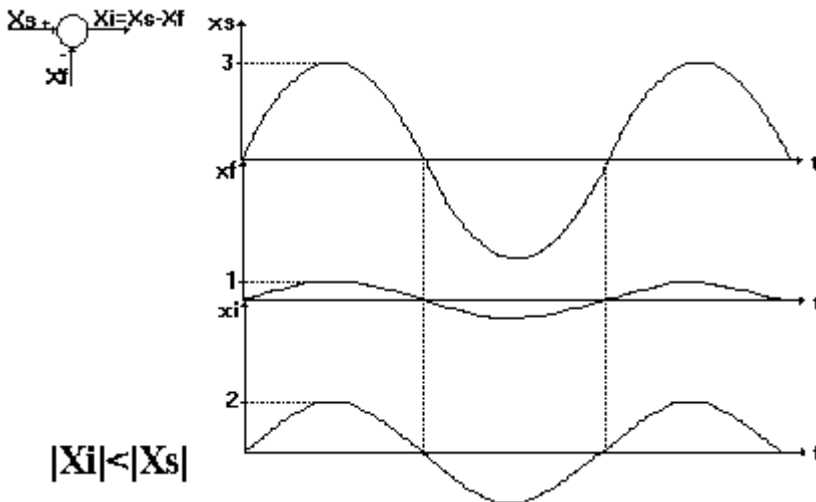
$D = 1 + \beta A = \frac{X_s}{X_i}$	$\beta A = \frac{X_f}{X_i}$
-------------------------------------	-----------------------------

$$|X_i| < |X_s| \Rightarrow \text{R. negativa} \Rightarrow |1 + \beta A| > 1$$

L'amplificazione $A_f = \frac{A}{1 + \beta A}$ risulta minore di $A \Rightarrow |A_f| < |A|$

La reazione negativa, causa una riduzione dell'amplificazione in quanto fa diminuire il segnale (X_i) applicato all'ingresso dell'amplificatore base (A); per questo motivo viene spesso detta degenerativa alle medie frequenze (in cui trascuriamo gli effetti capacitivi, capacità di accoppiamento e capacità parassite dei componenti attivi).

βA deve essere reale e positivo, quindi i segnali X_s e X_f sono in fase.

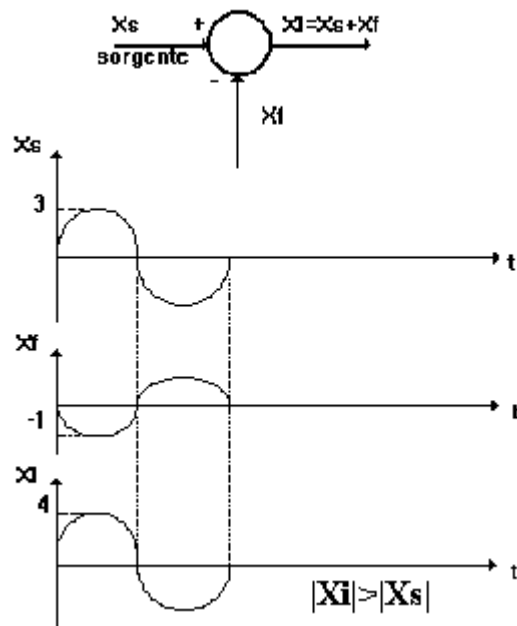


REAZIONE POSITIVA

Nella reazione positiva il $|X_i| > |X_s|$ quindi il termine $|1 + \beta A| < 1$ dall'espressione di $A_f = A / (1 + \beta A)$ risulta che $|A_f| > |A|$.

La reazione positiva determina un incremento dell'amplificazione in quanto il segnale X_f , sommandosi a quello della sorgente X_s aumenta il livello del segnale X_i all'ingresso dell'amplificatore base A .

Alle medie frequenze risulta per tanto $\beta * A$ reale negativo mentre i segnali X_f e X_s sono in antifase.



si noti che l'apparente vantaggio raggiunto con la reazione positiva (detta anche rigenerativa) viene raramente sfruttata nel progetto degli amplificatori perchè ad essa corrisponde una maggiore instabilità dell'amplificatore nel tempo e un rischio più alto di oscillazioni spontanee. Notevole interesse riveste infine il caso in cui $1+\beta A = 0$ e conseguentemente $A_f = A / (1+\beta A)$ tende ad infinito che consente di ottenere un segnale in uscita anche in assenza di X_s .

L'amplificatore si trasforma in un oscillatore ($\beta A = -1$) (generatore di segnale ad una determinata frequenza) , questo fenomeno indesiderato per un amplificatore viene invece utilizzato nella generazione di segnali sinusoidali .

RIEPILOGO REAZIONE POSITIVA E NEGATIVA

NEGATIVA : $|X_i| < |X_s| \Rightarrow |1+\beta A| > 1 \Rightarrow |A_f| < |A|$

POSITIVA : $|X_i| > |X_s| \Rightarrow |1+\beta A| < 1 \Rightarrow |A_f| > |A|$

OSCILLATORE : $\beta A = -1 \Rightarrow |1+\beta A| = 0 \Rightarrow |A_f| = \infty$

TASSO DI REAZIONE (N)

Si definisce tasso di reazione o grado di reazione il rapporto tra l'amplificazione ad anello chiuso A_f e quella ad anello aperto A , normalmente espresso in dB, secondo la relazione:

$$N = 20 \log \left| \frac{A_f}{A} \right| = 20 \log \left| \frac{\cancel{A}}{1+\beta A} \frac{1}{\cancel{A}} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{1+\beta A} \right|$$

$$N = 20 \log \left| \frac{1}{1+\beta A} \right|$$

NELLA REAZIONE NEGATIVA : $|1 + \beta A| > 1 \Rightarrow N_{dB} < 0$

NELLA REAZIONE POSITIVA : $|1 + \beta A| < 1 \Rightarrow N_{dB} > 0$

Se ad esempio un amplificatore con $A=1000$ e $\beta=0,005$, il tasso di reazione sarà uguale:

$$\begin{array}{l} A = 1000 \\ \beta = 0,005 \end{array} \Rightarrow N_{dB} = 20 \log \left| \frac{1}{1+\beta A} \right|$$

$$N = 20 \log \left| \frac{1}{1+\beta A} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{1+50} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{51} \right| = -34 \text{ dB}$$

PROPRIETA' DELLA RETROAZIONE NEGATIVA

La retroazione negativa (controreazione) viene utilizzata negli amplificatori per modificarne il funzionamento in modo da ottenere uno o più, dei seguenti effetti:

- 1) Maggiore stabilità dell'amplificazione
- 2) Stabilizzazione del punto di riposo
- 3) Allargamento della banda passante (modificazione della risposta in frequenza)
- 4) Modificazione della resistenza di ingresso e della resistenza di uscita
- 5) Riduzione degli effetti di un disturbo
- 6) Riduzione della distorsione armonica

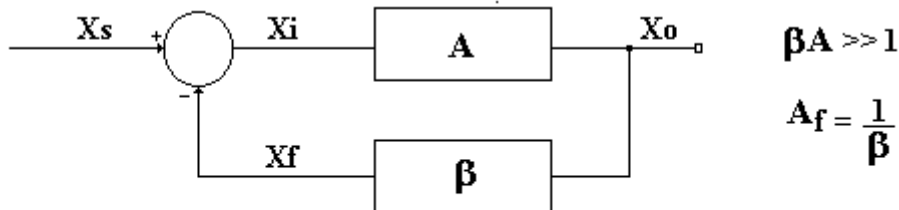
Reazione

1) MAGGIORE STABILITA' DELL' AMPLIFICAZIONE

Le cause principali di instabilita' sono :

- Variazioni termiche.
- Invecchiamento dei componenti con relativa variazione dei loro parametri.
- Variazione della tensione di alimentazione.
- Dispersione delle caratteristiche (sostituzione del componente).

Il miglioramento apportato alla stabilita' della reazione negativa puo essere facilmente compresa osservando lo schema di figura.



$$\uparrow A \rightarrow \uparrow X_o \rightarrow \uparrow X_f = \beta X_o \rightarrow \downarrow X_i = X_s - X_f \rightarrow \downarrow X_o$$

Ad analoga conclusione si perviene, ipotizzando una diminuzione di A.

$$\downarrow A \rightarrow \downarrow X_o \rightarrow \downarrow X_f = \beta X_o \rightarrow \uparrow X_i = X_s - X_f \rightarrow \uparrow X_o$$

Un quantificazione del vantaggio raggiunto puo essere fatta confrontando tra di loro le variazioni relative dell' amplificazione in assenza e in presenza di controreazioni (reazione negativa). Si vuole ora determinare l' espressione della sensibilita' di un amplificatore a retroazione (reazione negativa) alle variazioni del guadagno A (anello aperto).

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{dA_f}{dA} = \frac{d}{dA} \cdot \left(\frac{A}{1+\beta A} \right) = \frac{1(1+\beta A) - \beta A}{(1+\beta A)^2}$$

$$\boxed{\frac{dA_f}{dA} = \frac{\Delta A}{A} \frac{1}{1+\beta A}}$$

La stabilita' cresce con l' aumentare del tasso di contro reazione introdotto. L' equazione ottenuta ha carattere differenziale ma per variazioni finite si puo assumere la seguente formula:

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

ESEMPIO N° 1

Un amplificatore con guadagno $A = 1000 (\pm 20\%)$ viene reazionato con $\beta = 0,05$. Si determini la fascia di variazione di A_f %.

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

$$A = \pm 0,2 A = \pm 200$$

$$\uparrow \pm 20\%$$

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} \pm \frac{200}{1000} \frac{1}{1 + (0,05 + 1000)} = \pm \frac{200}{51000} = \pm 0,0039$$

$$\left(\frac{\Delta A_f}{A_f} \right) \% = \pm 0,39 \%$$

ESEMPIO N° 2

Un amplificatore con guadagno $A = 5000 (\pm 10\%)$ viene reazionato con un $\beta = 0,02$. Si determini la fascia di variazione di A_f %.

$$\Delta A = \pm 0,1 A = \pm 500$$

$$\uparrow \pm 10\%$$

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{\Delta A}{A} \frac{1}{1 + \beta A} = \frac{500}{5000} \frac{1}{1 + (5000 \cdot 0,02)} = \pm 0,1(0,0099) = \pm 0,0009$$

$$\left(\frac{\Delta A_f}{A_f} \right) \% = \pm 0,09 \%$$

Ripetere il calcolo raddoppiando β .

$$\beta_1 = 2\beta = 0,02 \cdot 2 = 0,04$$

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{\Delta A}{A} \frac{1}{1 + \beta_1 A} = \frac{500}{5000} \frac{1}{1 + (5000 \cdot 0,04)} = \pm 0,1 \cdot 0,0049 = \pm 0,00049$$

$$\left(\frac{\Delta A_f}{A_f} \right) \% = 0,049 \%$$

Aumentando β diminuisce la variazione percentuale di A_f quindi aumenta la stabilita' ad anello chiuso

DIMOSTRAZIONE DI $\frac{dA_f}{A_f}$

$$\frac{dA_f}{A_f} \longrightarrow \frac{DA_f}{A_f}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} \longrightarrow \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1 \cdot [1 + \beta A] - A \cdot \beta}{(1 + \beta A)^2}$$

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{1 + \beta A} \quad \text{moltiplicando 1° e 2° membro per } \frac{dA}{A_f}$$

$$\frac{dA}{A_f} * \frac{dA_f}{dA} = \frac{dA}{A_f} * \frac{1}{(1 + \beta A)^2} \longrightarrow \frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{A_f} * \frac{1}{(1 + \beta A)^2}$$

Sostituendo ad A_f la sua espressione si ottiene (solo al secondo membro) :

$$\frac{DA_f}{A_f} = \frac{DA}{\frac{A}{1 + \beta A}} * \frac{1}{(1 + \beta A)^2} \longrightarrow \frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{A} * \frac{1}{1 + \beta A}$$

Per variazioni finite non troppo elevate l'espressione diventa

$$\frac{DA_f}{A_f} = \frac{DA}{A} * \frac{1}{1 + \beta A}$$

$\frac{\Delta A}{A}$ rappresenta la variazione ad anello aperto, mentre

$\frac{\Delta A_f}{A_f}$ rappresenta la variazione ad anello chiuso

essendo nella reazione negativa $1 + \beta A > 1$ $\frac{\Delta A_f}{A_f} < \frac{\Delta A}{A}$

Il termine $1 + \beta A$ viene anche chiamato fattore di *desensibilizzazione* perchè si caratterizza come l'indice di insensibilità dell'amplificatore reazionato alle variazioni di A .

L'espressione $\frac{\Delta A_f}{A_f}$ oppure $\frac{dA_f}{A_f}$ si chiama sensibilità di un amplificatore a retroazione.

Reazione

ESERCIZIO N°1

La variazione relativa del guadagno di un amplificatore è del 4%.

Si reazioni l' amplificatore e si trovi il guadagno ad anello necessario per ottenere una variazione del guadagno contenuto nello 0,05%.

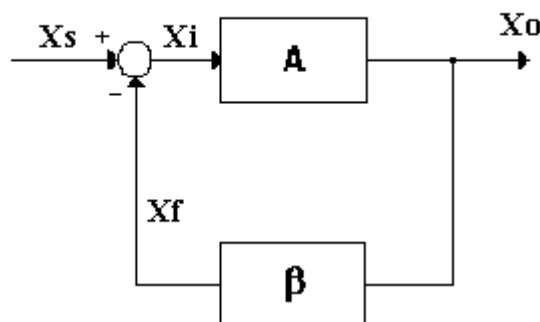
$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{\Delta A}{A} \cdot \frac{1}{1 + \beta A}$$

$$\beta A = \frac{\Delta A}{A} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta A_f}{A_f}} - 1 = 0,04 \cdot \frac{1}{0,05} - 1 = 79$$

$$\beta A = 79$$

ESERCIZIO N° 2

Calcolare il valore dell' uscita X_o in un generico amplificatore reazionato.



Dati

$$A = 100$$

$$\beta = 13$$

$$X_s = 14$$

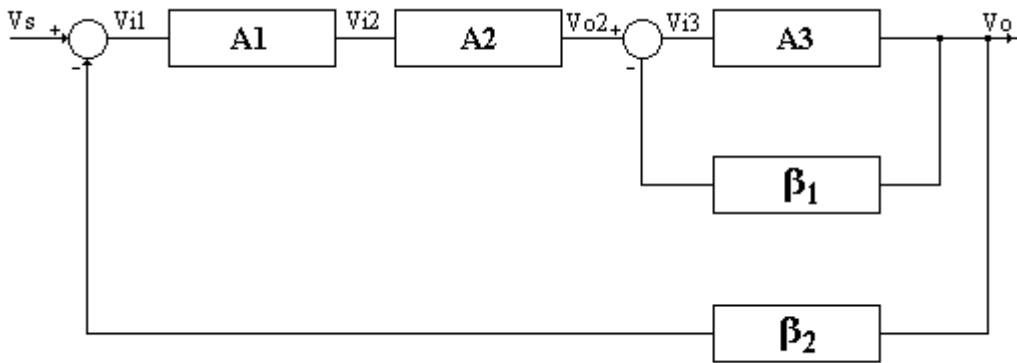
$$\frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1 + \beta A} \Rightarrow X_o = \frac{A}{1 + \beta A} \cdot X_s$$

$$X_o = \frac{100}{1 + 100 \cdot 13} \cdot 14 = 1,076$$

$$\boxed{X_o = 1,076}$$

ESERCIZIO N° 3

Un amplificatore di tensione può essere schematizzato secondo la struttura a blocchi di figura :

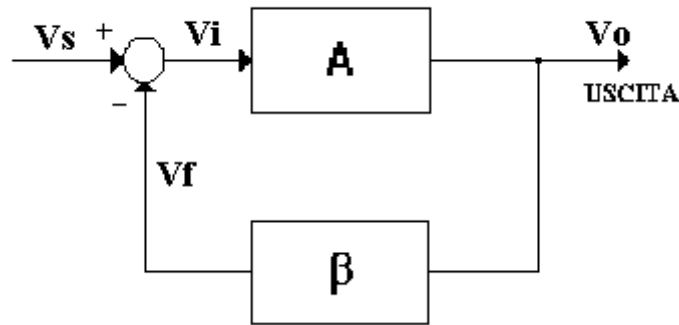


Semplificare lo schema riducendolo a quello di un amplificatore retroazionato base. Calcolare, il valore di A , β , il guadagno di anello, il tasso di reazione.

Verificare in oltre che $Af = \text{circa } 1/\beta_2$.

Dati:

$A_1 = -60$ $A_2 = -100$ $A_3 = 100$ $\beta_2 = 0,01$ $\beta_1 = 1$



$$A = A_1 A_2 A_{f3} \quad A_{f3} = \frac{A_3}{1 + \beta_1 A_3} = \frac{100}{1 + 100} = 0,99$$

$$A = A_1 A_2 A_{f3} = 60 \cdot 100 \cdot 0,99 = 5940 \quad A = 5940$$

$$\beta = \beta_2 = 0,01 \quad \beta = 0,01$$

$$Af = \frac{1}{1 + \beta A} = \frac{1}{1 + 59,4} = 98,34 \quad \beta A = 0,01 \cdot 5940 = 59,4$$

$$N = 20 \log \left| \frac{1}{1 + \beta A} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{1 + 59,4} \right| = -35,62 \text{ dB}$$

$$\frac{1}{\beta_2} = \frac{1}{0,01} = 100 \quad \frac{1}{\beta_2} \cong Af$$

RIDUZIONE DEGLI EFFETTI DI DISTURBO (AUMENTO DEL RAPPORTO SEGNALE / DISTURBO [S/N])

Un limite alle prestazioni è costituito dalla presenza al loro interno di segnali estranei, detti genericamente disturbi (noise), che si sovrappongono al segnale utile. L'origine di questi disturbi può essere di natura esterna:

- a)-** Campi elettromagnetici parasassiti;
- b)-** Ripple dell'alimentatore.

Oppure interna:

- a)-** Derive termiche negli amplificatori;
- b)-** Rumore dei componenti.

L'incidenza di questi disturbi sul corretto funzionamento dell'amplificatore viene comunemente valutata utilizzando come parametro di riferimento il rapporto segnale / disturbo (S/N espresso in decibel dB).

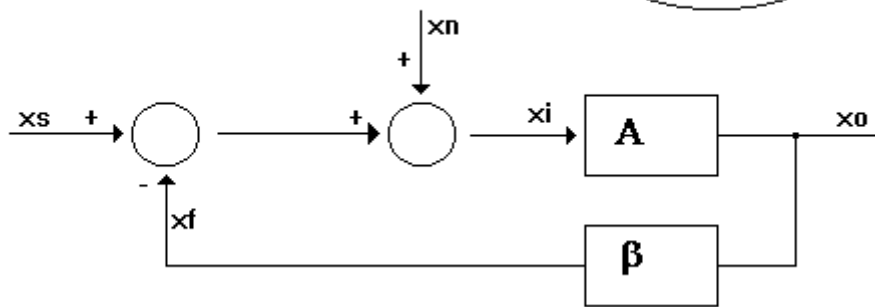
Appare alquanto ovvia l'esigenza di avere un valore di S/N il più elevato possibile. Confrontando fra loro il rapporto segnale-disturbo con o senza retroazione si può stabilire in che modo la retroazione agisce sul disturbo.

Poiché il disturbo è un segnale, sia pure indesiderato, esso viene rappresentato con un generatore X_n introdotto in un punto qualsiasi della catena amplificatrice.

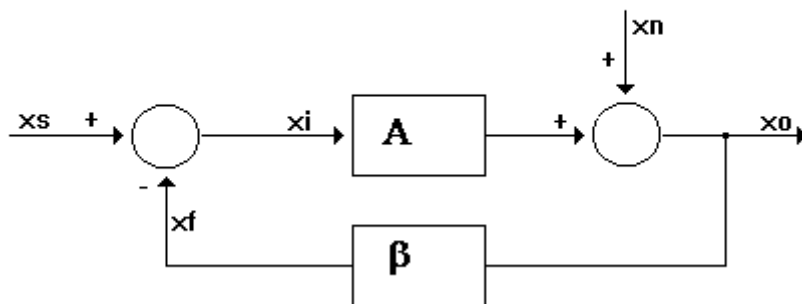
I casi principali sono tre:

- 1-** disturbo introdotto all'ingresso;
- 2-** disturbo introdotto all'uscita;
- 3-** disturbo introdotto in uno stadio intermedio.

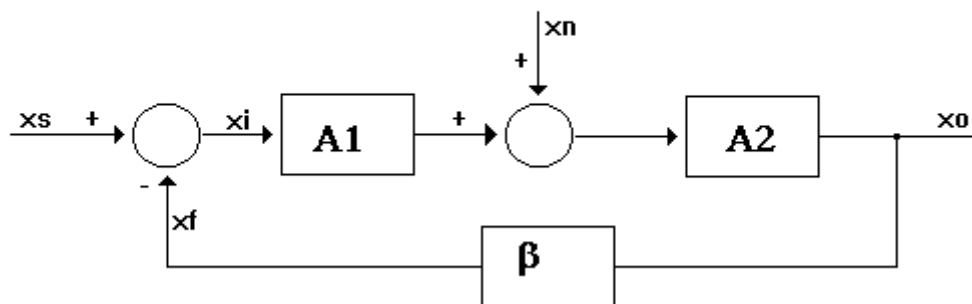
Caso - 1



CASO - 2



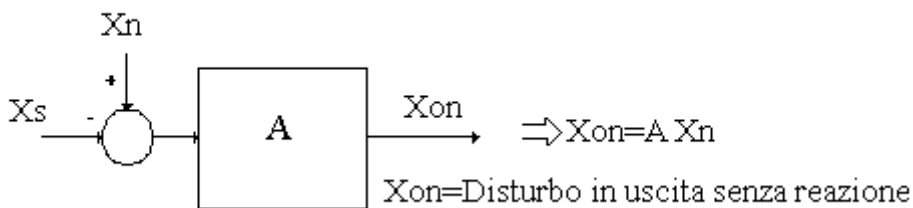
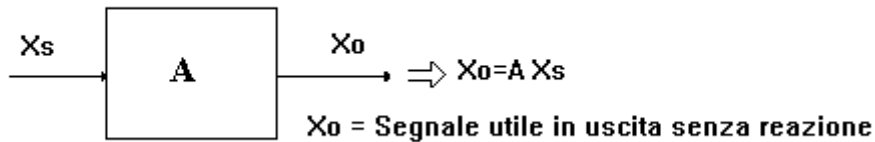
CASO - 3



Caso 1 : disturbo introdotto all'ingresso.

Calcolo del rapporto S/N in assenza di reazione

In assenza di reazione, per il principio di sovrapposizione si ha:



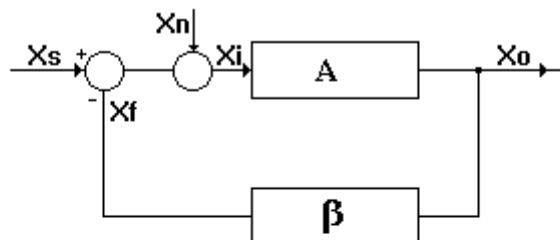
Risulta perciò per il rapporto S/N la seguente espressione:

$$\frac{S}{N} = \frac{X_o}{X_{on}} = \frac{A X_s}{A X_n} = \frac{X_s}{X_n} \Rightarrow \left(\frac{S}{N} \right)_{dB} = 20 \log \frac{X_s}{X_n}$$

Essendo il disturbo introdotto all'ingresso, il rapporto tra il segnale e il disturbo in uscita è uguale in ingresso, perchè entrambi vengono ugualmente amplificati.

Per migliorare tale rapporto occorre pertanto aumentare il segnale utile all'ingresso; ciò però non è sempre possibile perchè contemporaneamente può aumentare il disturbo X_n , oppure apparire una distorsione in uscita.

Calcolo del rapporto S/N in presenza di reazione



$$X_o = \frac{A}{1 + \beta A} X_s \quad X_{on} = \frac{A}{1 + \beta A} X_n$$

$$\frac{S}{N} = \frac{X_o}{X_{on}} = \frac{X_s}{X_n} \quad \left(\frac{S}{N} \right)_{dB} = 20 \log \frac{X_s}{X_n}$$

Reazione

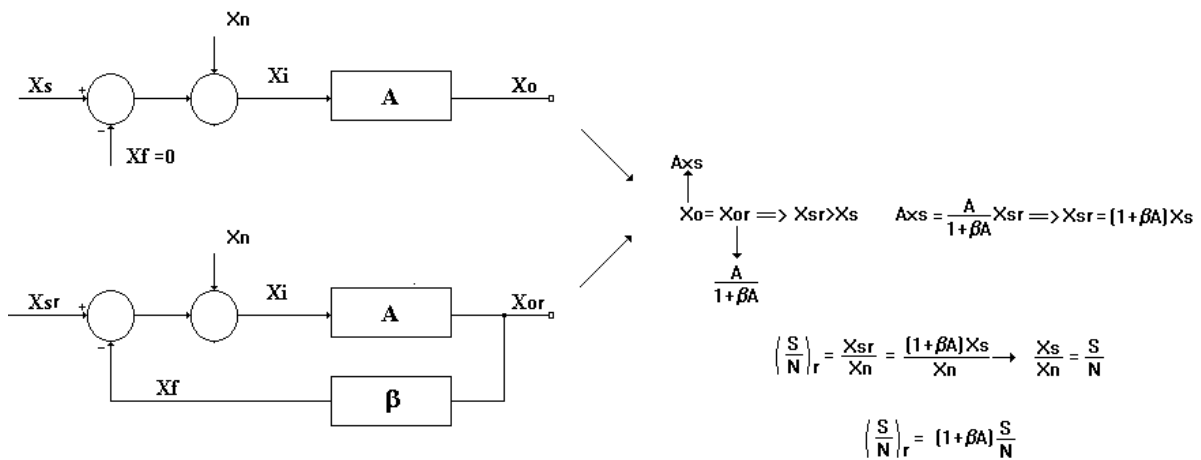
Dal confronto delle formule rapporto segnale rumore con e senza retroazione puo' sembrare che il rapporto segnale rumore non cambia.

Devono essere fatte pero' due considerazioni diverse:

- 1) Segnale di ingresso X_s , uguale con o senza retroazione
- 2) Segnale di uscita X_o , uguale con o senza retroazione.

Nel primo caso, il rapporto segnale disturbo non viene alterato dalla retroazione poiche' essa riduce in egual misura il segnale utile e il disturbo.

Nel secondo caso (uscite uguali con o senza retroazione), la retroazione negativa ($1+\beta A > 1$), migliora il rapporto segnale disturbo.



Il rapporto segnale rumore, risulta in questo caso ignorato di una quantita' pari aquella di cui e' aumentato il segnale di ingresso.

Si puo' pertanto concludere che la retroazione negativa e' conveniente nella misura in cui permette di aumentare il segnale all'ingresso senza che cio' comporti una maggiore distorsione.

Tipico disturbo introdotto all'ingresso e' il rumore generato nel circuito di ingresso(stadio di alimentazione) del primo stadio di un amplificatore multistadio.

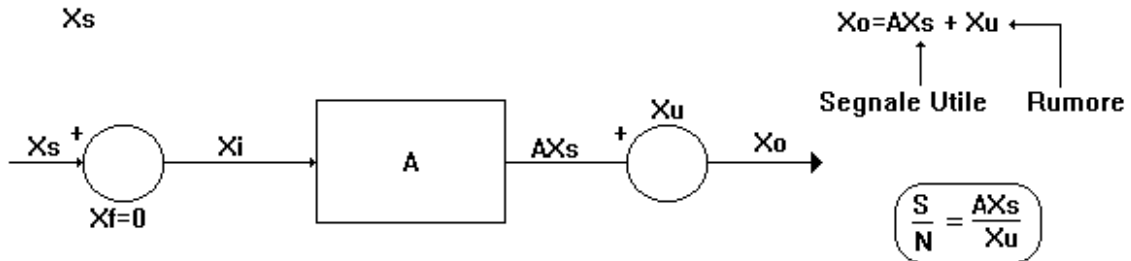
Un altro esempio di rumore e' la deriva(drift), cioe' la lenta variazione del punto di riposo dovuta, ad esempio, alla temperatura.

La deriva (drift) ha soltanto importanza negli amplificatori ad accoppiamento diretto, perche' la variazione del punto di riposo nel primo stadio viene amplificata da tutti quelli successivi.

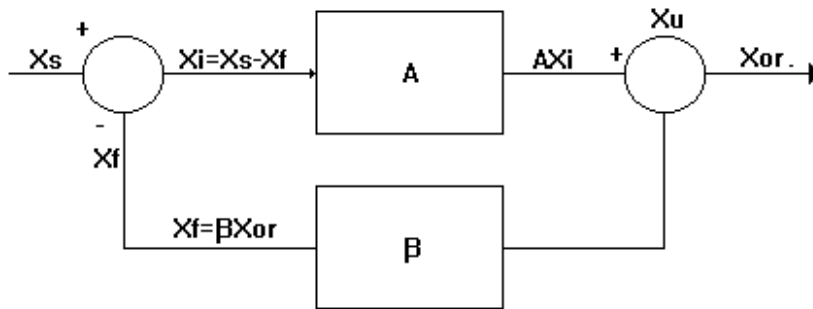
Caso 2 : disturbo introdotto all'uscita

Calcolo del rapporto S/N in assenza di reazione

Si supponga che il disturbo X_n sia introdotto all'uscita (es: Ripple dell'alimentazione in uno stadio finale).



Calcolo del rapporto S/N in presenza di reazione



$$X_{or} = AX_i + X_u = A(X_s - X_f) + X_u = AX_s - AX_f + X_u$$

$$X_{or} = AX_s - A\beta X_{or} + X_u \Rightarrow X_{or} (1 + \beta A) = AX_s + X_u$$

$$X_{or} = \frac{AX_s}{1 + \beta A} + \frac{X_u}{1 + \beta A}$$

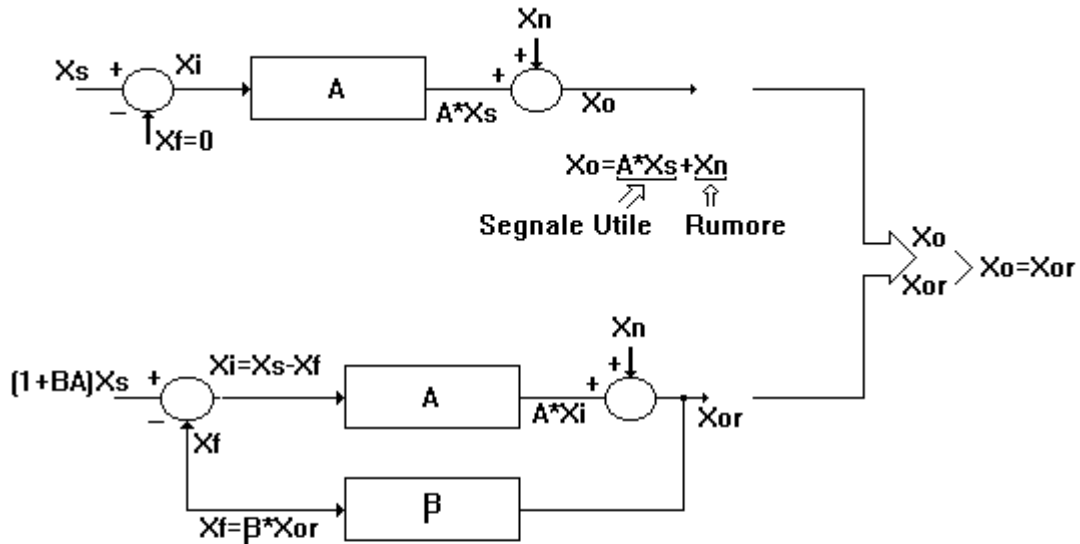
↑ Segnale Utile ↑ Rumore

$$\left(\frac{S}{N} \right)_r = \frac{\frac{AX_s}{1 + \beta A}}{\frac{X_u}{1 + \beta A}} = \frac{AX_s}{X_u}$$

Il rapporto Segnale/Rumore e' uguale a quello ottenuto in assenza di reazione e non vi e' quindi alcun apparente miglioramento.

Si osserva tuttavia che il segnale utile risulta ridotto di $1 + \beta A$ in assenza di reazione. All'atto

pratico questo non accade in quanto, essendo il livello del segnale d'uscita un requisito prefissato, per conservarne immutato il valore in presenza della controeazione $X_o=X_{or}$, occorre aumentare il segnale d'ingresso, preamplificandolo di $1+\beta A$.



$$\left[\frac{S}{N} \right]_r = \frac{A \cdot (1 + \beta A) \cdot X_s}{X_n} = \frac{A \cdot X_s}{X_n} \cdot (1 + \beta A)$$

$$\left[\frac{S}{N} \right]_r = \frac{S}{N} \cdot (1 + \beta A)$$

Si conclude che a parita' di segnale in uscita il rapporto segnale/rumore viene con la controeazione maggiorato del fattore $1+\beta A$, mentre a parita' di segnale d'ingresso il rapporto segnale/rumore non cambia. Si deve pero' sottolineare che il miglioramento raggiunto e' reale solo se la preamplificazione del segnale $(1+\beta A) \cdot X_s$ non comporta l'introduzione di nuovi disturbi.

RIDUZIONE DEGLI EFFETTI DI DISTURBO (AUMENTO DEL RAPPORTO SEGNALE / DISTURBO [S/N])

Un limite alle prestazioni è costituito dalla presenza al loro interno di segnali estranei, detti genericamente disturbi (noise), che si sovrappongono al segnale utile. L'origine di questi disturbi può essere di natura esterna:

- a)-** Campi elettromagnetici parasassiti;
- b)-** Ripple dell'alimentatore.

Oppure interna:

- a)-** Derive termiche negli amplificatori;
- b)-** Rumore dei componenti.

L'incidenza di questi disturbi sul corretto funzionamento dell'amplificatore viene comunemente valutata utilizzando come parametro di riferimento il rapporto segnale / disturbo (S/N espresso in decibel dB).

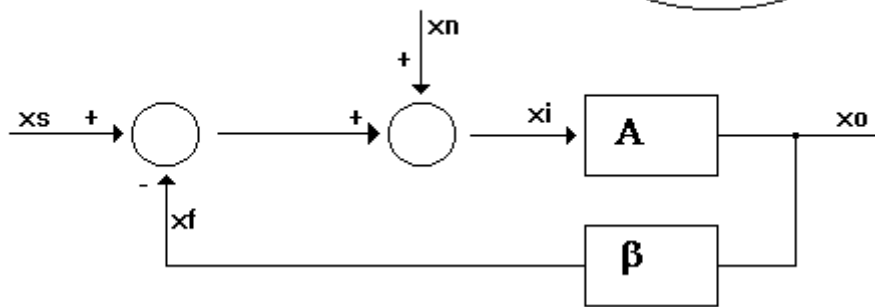
Appare alquanto ovvia l'esigenza di avere un valore di S/N il più elevato possibile. Confrontando fra loro il rapporto segnale-disturbo con o senza retroazione si può stabilire in che modo la retroazione agisce sul disturbo.

Poiché il disturbo è un segnale, sia pure indesiderato, esso viene rappresentato con un generatore X_n introdotto in un punto qualsiasi della catena amplificatrice.

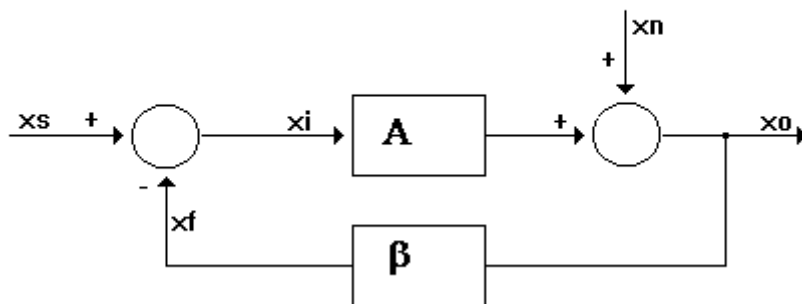
I casi principali sono tre:

- 1-** disturbo introdotto all'ingresso;
- 2-** disturbo introdotto all'uscita;
- 3-** disturbo introdotto in uno stadio intermedio.

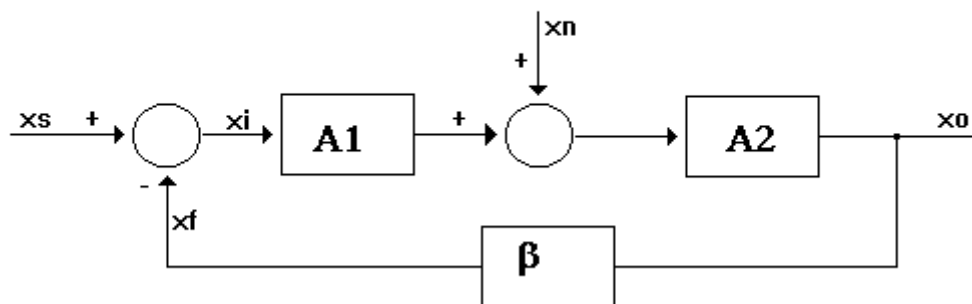
Caso - 1



CASO - 2



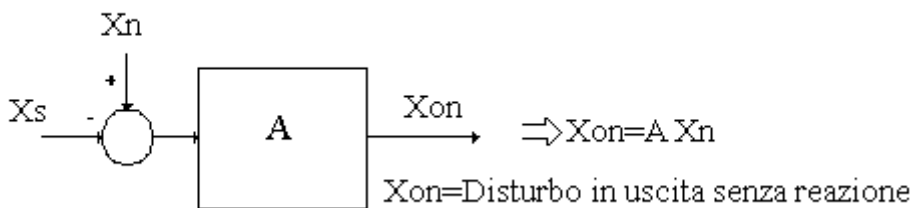
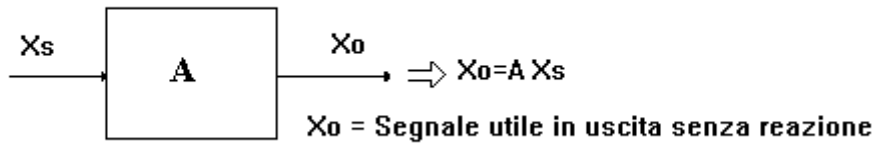
CASO - 3



Caso 1 : disturbo introdotto all'ingresso.

Calcolo del rapporto S/N in assenza di reazione

In assenza di reazione, per il principio di sovrapposizione si ha:



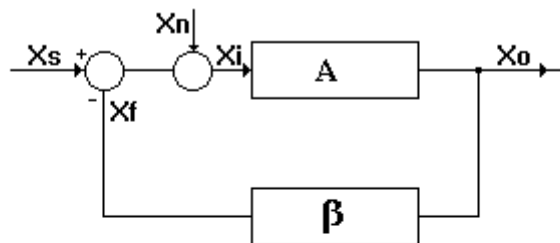
Risulta perciò per il rapporto S/N la seguente espressione:

$$\frac{S}{N} = \frac{X_o}{X_{on}} = \frac{A X_s}{A X_n} = \frac{X_s}{X_n} \Rightarrow \left(\frac{S}{N} \right)_{dB} = 20 \log \frac{X_s}{X_n}$$

Essendo il disturbo introdotto all'ingresso, il rapporto tra il segnale e il disturbo in uscita è uguale in ingresso, perchè entrambi vengono ugualmente amplificati.

Per migliorare tale rapporto occorre pertanto aumentare il segnale utile all'ingresso; ciò però non è sempre possibile perchè contemporaneamente può aumentare il disturbo X_n , oppure apparire una distorsione in uscita.

Calcolo del rapporto S/N in presenza di reazione



$$X_o = \frac{A}{1 + \beta A} X_s \quad X_{on} = \frac{A}{1 + \beta A} X_n$$

$$\frac{S}{N} = \frac{X_o}{X_{on}} = \frac{X_s}{X_n} \quad \left(\frac{S}{N} \right)_{dB} = 20 \log \frac{X_s}{X_n}$$

Reazione

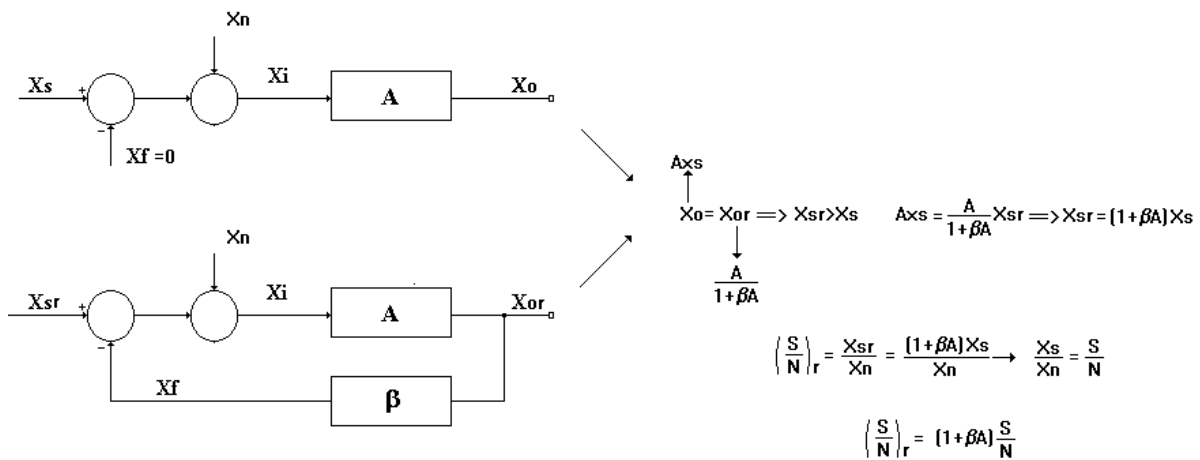
Dal confronto delle formule rapporto segnale rumore con e senza retroazione puo' sembrare che il rapporto segnale rumore non cambia.

Devono essere fatte pero' due considerazioni diverse:

- 1) Segnale di ingresso X_s , uguale con o senza retroazione
- 2) Segnale di uscita X_o , uguale con o senza retroazione.

Nel primo caso, il rapporto segnale disturbo non viene alterato dalla retroazione poiche' essa riduce in egual misura il segnale utile e il disturbo.

Nel secondo caso (uscite uguali con o senza retroazione), la retroazione negativa ($1+\beta A > 1$), migliora il rapporto segnale disturbo.



Il rapporto segnale rumore, risulta in questo caso ignorato di una quantita' pari aquella di cui e' aumentato il segnale di ingresso.

Si puo' pertanto concludere che la retroazione negativa e' conveniente nella misura in cui permette di aumentare il segnale all'ingresso senza che cio' comporti una maggiore distorsione.

Tipico disturbo introdotto all'ingresso e' il rumore generato nel circuito di ingresso(stadio di alimentazione) del primo stadio di un amplificatore multistadio.

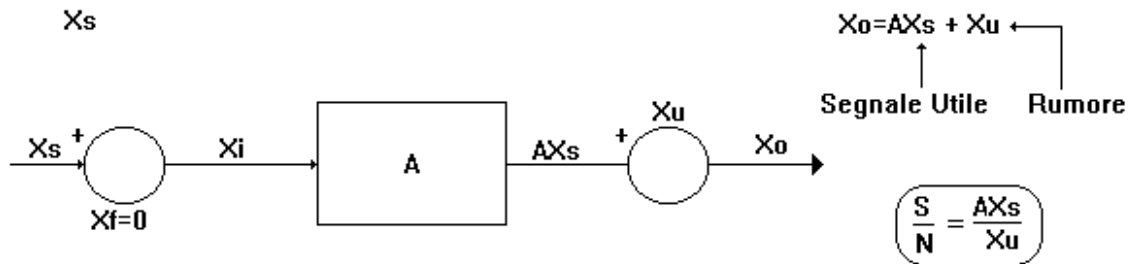
Un altro esempio di rumore e' la deriva(drift), cioe' la lenta variazione del punto di riposo dovuta, ad esempio, alla temperatura.

La deriva (drift) ha soltanto importanza negli amplificatori ad accoppiamento diretto, perche' la variazione del punto di riposo nel primo stadio viene amplificata da tutti quelli successivi.

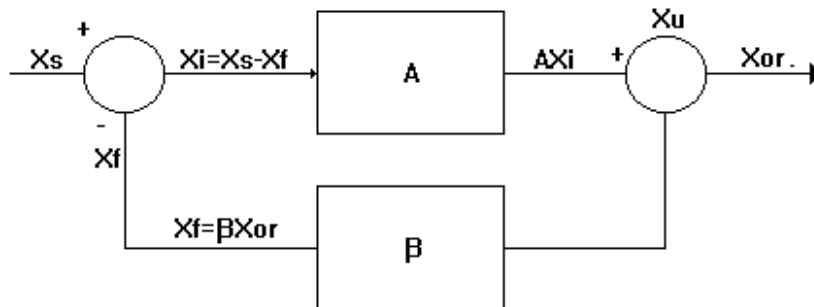
Caso 2 : disturbo introdotto all'uscita

Calcolo del rapporto S/N in assenza di reazione

Si supponga che il disturbo X_n sia introdotto all'uscita (es: Ripple dell'alimentazione in uno stadio finale).



Calcolo del rapporto S/N in presenza di reazione



$$X_{or} = AX_i + X_u = A(X_s - X_f) + X_u = AX_s - AX_f + X_u$$

$$X_{or} = AX_s - A\beta X_{or} + X_u \Rightarrow X_{or} (1 + \beta A) = AX_s + X_u$$

$$X_{or} = \frac{AX_s}{1 + \beta A} + \frac{X_u}{1 + \beta A}$$

Segnale Utile Rumore

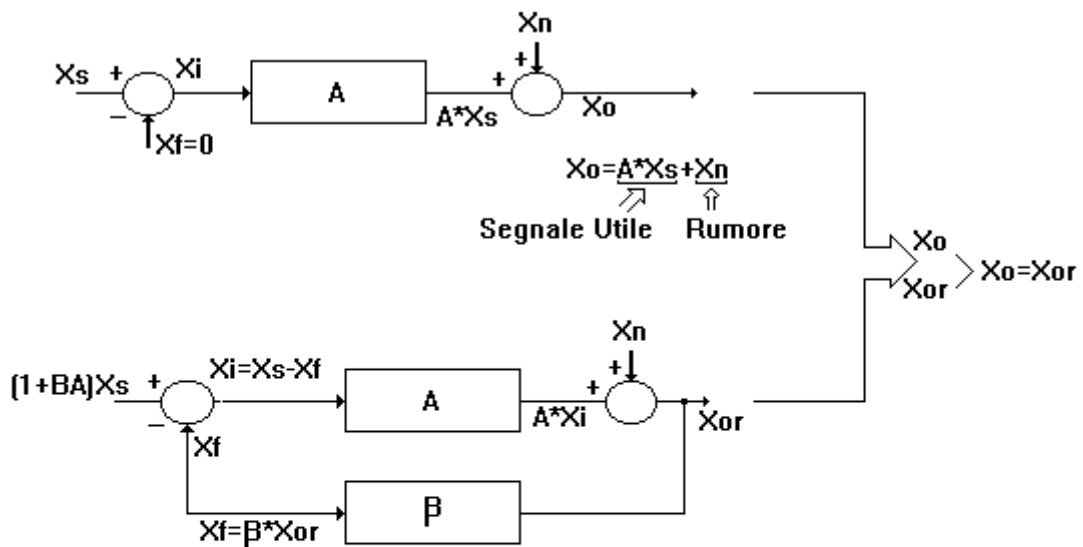
$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{\frac{AX_s}{1 + \beta A}}{\frac{X_u}{1 + \beta A}} = \frac{AX_s}{X_u}$$

Il rapporto Segnale/Rumore e' uguale a quello ottenuto in assenza di reazione e non vi e'

Reazione

quindi alcun apparente miglioramento.

Si osserva tuttavia che il segnale utile risulta ridotto di $1+\beta A$ in assenza di reazione. All'atto pratico questo non accade in quanto, essendo il livello del segnale d'uscita un requisito prefissato, per conservarne immutato il valore in presenza della controreazione $X_o=X_{or}$, occorre aumentare il segnale d'ingresso, preamplificandolo di $1+\beta A$.



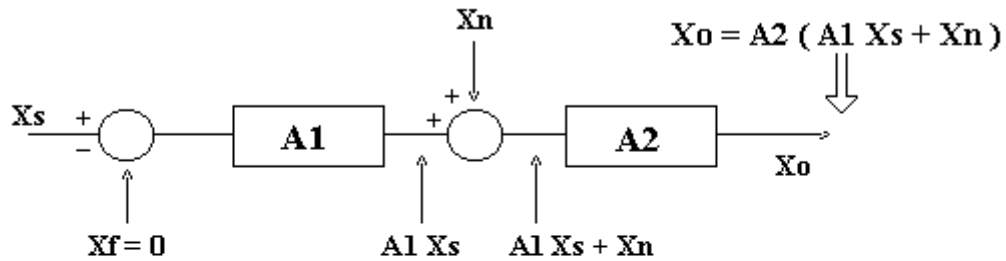
$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{A \cdot (1+\beta A) \cdot X_s}{X_n} = \frac{A \cdot X_s}{X_n} \cdot (1+\beta A)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{S}{N} \cdot (1+\beta A)$$

Si conclude che a parità di segnale in uscita il rapporto segnale/rumore viene con la controreazione maggiorato del fattore $1+\beta A$, mentre a parità di segnale d'ingresso il rapporto segnale/rumore non cambia. Si deve però sottolineare che il miglioramento raggiunto è reale solo se la preamplificazione del segnale $(1+\beta A) \cdot X_s$ non comporta l'introduzione di nuovi disturbi.

Caso 3 : disturbo introdotto ad uno stadio intermedio

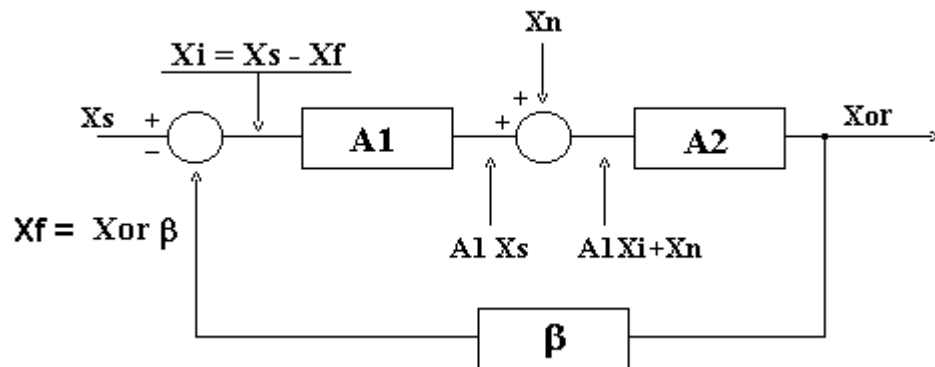
Procedendo come nei due casi precedenti si ottiene:
Calcolo del rapporto S/N in assenza di reazione



$$X_o = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n \implies \frac{S}{N} = \frac{A_1 A_2 X_s}{A_2 X_n} \implies \frac{S}{N} = \frac{A_1 X_s}{X_n}$$

↑ Segnale Utile ↑ Rumore

Calcolo del rapporto S/N in presenza di reazione



$$X_{or} = A_2(A_1 X_i + X_n) = A_2 A_1 X_i + A_2 X_n$$

$$X_{or} = A_2 A_1 (X_s - X_f) + A_2 X_n$$

$$X_{or} = A_2 A_1 (X_s - X_{or} \beta) + A_2 X_n$$

$$X_{or} = A_1 A_2 X_s - \beta A_1 A_2 X_{or} + A_2 X_n$$

$$X_{or} (1 + \beta A_1 A_2) = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

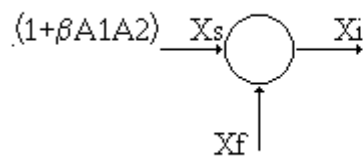
$$X_{or} = \underbrace{\frac{A_1 A_2 X_s}{1 + \beta A_1 A_2}}_{\text{Segnale Utile}} + \underbrace{\frac{A_2 X_n}{1 + \beta A_1 A_2}}_{\text{Rumore}}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{\frac{A_1 A_2 X_s}{1 + \beta A_1 A_2}}{\frac{A_2 X_n}{1 + \beta A_1 A_2}}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{A_1 X_s}{X_n}$$

Valgono ancora le considerazioni dei casi precedenti. A parità di segnale d'ingresso il rapporto segnale rumore non varia, mentre a parità di segnale di uscita $X_o = X_{or}$ migliora di una quantità pari a $1 + \beta A_1 A_2$.

Il segnale d'ingresso deve essere preamplificato di $1 + \beta A_1 A_2$.



$$X_0 = X_{0r}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{S}{N} \cdot (1 + \beta A_1 A_2)$$

$$\begin{array}{l} X_0 \longleftarrow X_s \text{ (senza retroazione)} \\ X_{0r} \longleftarrow (1 + \beta A_1 A_2) X_s \text{ (con retroazione)} \end{array}$$

Il Ripple è un tipico disturbo che può agire anche negli stadi intermedi.

CONCLUSIONI: Se il segnale all'ingresso rimane sempre lo stesso, la retroazione negativa non influenza il rapporto segnale rumore .

Se invece il segnale all' ingresso può essere aumentato $1 + \beta A$ volte ($X_o = X_{or}$) senza che ciò comporti un aumento del disturbo (la distorsione sicuramente non varia poiché il segnale in uscita rimane in questo caso invariato) il rapporto segnale rumore (S/N) migliora di $1 + \beta A$ volte.

$$\left(\frac{S}{N}\right)_r = \frac{S}{N} \cdot (1 + \beta A)$$

INFLUENZA DELLA RETROAZIONE SULLA DISTORSIONE

La distorsione è un tipico disturbo degli stadi finali nei quali i segnali sono di notevole ampiezza.

Essa deve essere considerata pertanto un disturbo introdotto in uscita e, inoltre, dipendente dall'ampiezza del segnale in uscita.

La distorsione detta anche armonica è causata dalla non linearità delle caratteristiche dei dispositivi attivi (BJT, MOSFET) e interessa prevalentemente gli stadi finali.

Ciascuna armonica indesiderata si sovrappone al segnale utile, tale ampiezza (disturbo) dipende dal segnale utile.

Il parametro convenzionalmente utilizzato per valutare la distorsione è il rapporto tra il disturbo e il segnale utile, cioè l'inverso di S/N, e si indica in percento. Segue perciò:

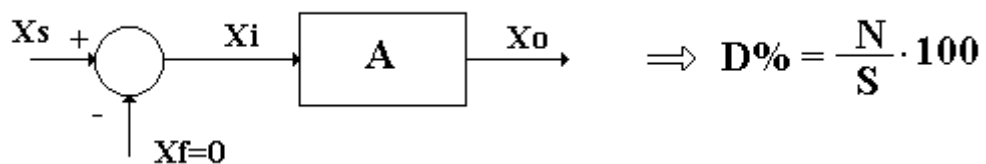
$$D\% = \frac{N}{S} \cdot 100 \implies \text{Distorsione percentuale}$$

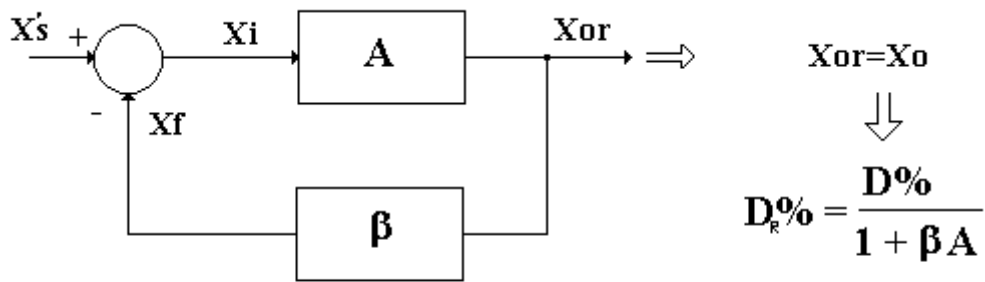
Per quanto esposto in precedenza si può affermare che, a parità di segnale in uscita, con la reazione negativa si ha una riduzione di $1+A\beta$ della distorsione presente in assenza di reazione.

$$D_R\% = \frac{D\%}{1+A\beta}$$

$D\%$ \implies distorsione percentuale senza retroazione;

$D_R\%$ \implies distorsione percentuale con retroazione.





$$X_{or} = X_o \Rightarrow X'_s = X_s \cdot (1 + \beta A)$$

Nell' ipotesi che rimanga invariato il segnale all' ingresso $X_s = X'_s$, la retroazione negativa diminuisce l' ampiezza del segnale in uscita e quindi anche la distorsione.

La retroazione negativa riduce la distorsione non lineare sia a parità di segnale all' ingresso ($X_s = X'_s$) che a parità di segnale d' uscita ($X_o = X_{or}$) in quanto il disturbo interno diminuisce al diminuire della tensione d' uscita.

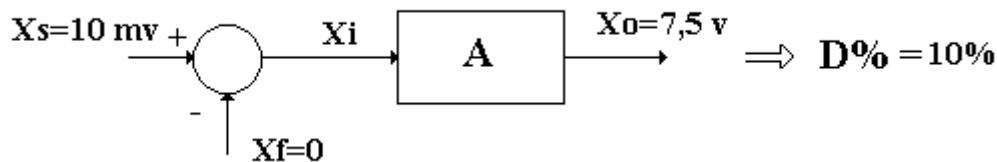
$$\begin{array}{l} X_s = X'_s \\ X_o = X_{or} \end{array} \Rightarrow D_r\% < D\%$$

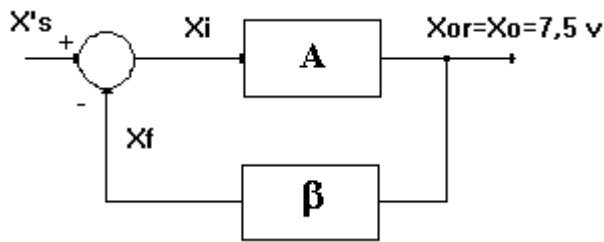
La retroazione si rivela praticamente indispensabile nella progettazione di amplificatori lineari destinati a fornire elevate potenze con basso livello di distorsione armonica. Si pensi ad esempio agli amplificatori HI-FI

Esercizio

Un amplificatore non reazionato al quale viene applicato un segnale sinusoidale di ampiezza 10 mv fornisce in uscita una fondamentale di ampiezza 7,5 v co 10% di distorsione armonica.

Desiderando portare con una controreazione il tasso di distorsione a 0,5% si determini il valore di β e valore del segnale d' ingresso al fine di mantenere inalterata l' ampiezza del segnale in uscita.





CONFIGURAZIONI FONDAMENTALI

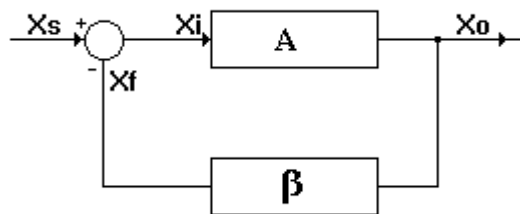
Nello studio generale della retroazione si è fatto riferimento genericamente a un segnale che percorre la rete. (X_s , X_f , X_i , X_o)

Esso può essere indifferentemente una tensione oppure un corrente: anzi la variabile X_i e quella di retroazione X_f possono anche essere diverse, cioè l'una una tensione e l'altra una corrente e viceversa.

Ciò dipende da come sono connessi tra di loro i quadripoli A e β

Pertanto il generico amplificatore a retroazione può avere diverse configurazioni, a seconda del modo di realizzare il confronto all'ingresso ed il campionamento (*sampling*) all'uscita.

Dallo schema generale dell'amplificatore reazionato di figura



si ricavano, a seconda della natura del segnale prelevato in uscita e di quella dei segnali confrontati all'ingresso, i quattro casi fondamentali di controreazione

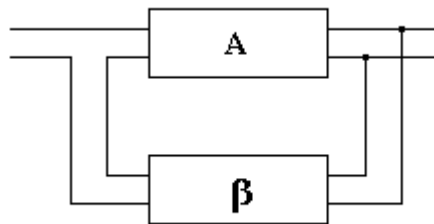
- 1) tensione-serie
- 2) tensione-parallelo
- 3) corrente-serie
- 4) corrente-parallelo

Il quadripolo di reazione è rappresentato nella forma idealizzata che ne evidenzia il

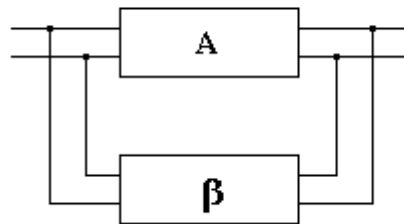
Reazione

funzionamento unidirezionale e la non intergenza con l'amplificatore di base.

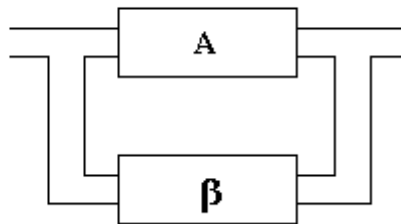
1) Tensione-Serie



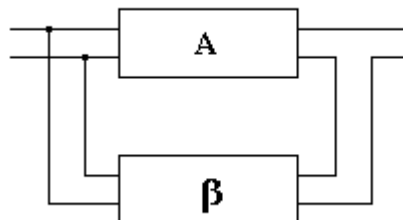
2) Tensione-Parallelo



3) Corrente-Serie



4) Corrente-Parallelo



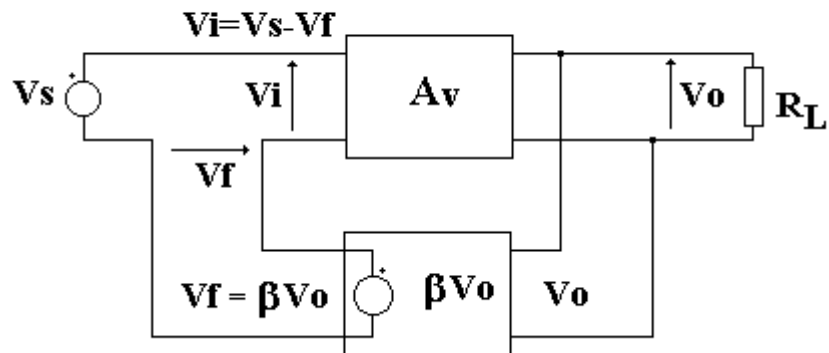
Se la grandezza prelevata in uscita è la tensione v_o presente ai capi del carico RL dell'amplificatore, la *reazione viene detta di tensione* (1, 2).

Ciò significa in pratica che il quadripolo di reazione è collegato in parallelo all'uscita dell'amplificatore base.

Quando invece la grandezza prelevata in uscita è la corrente i_o in RL, ovvero il quadripolo di reazione è connesso in serie all'uscita dell'amplificatore base, la *reazione viene detta di corrente* (3, 4).

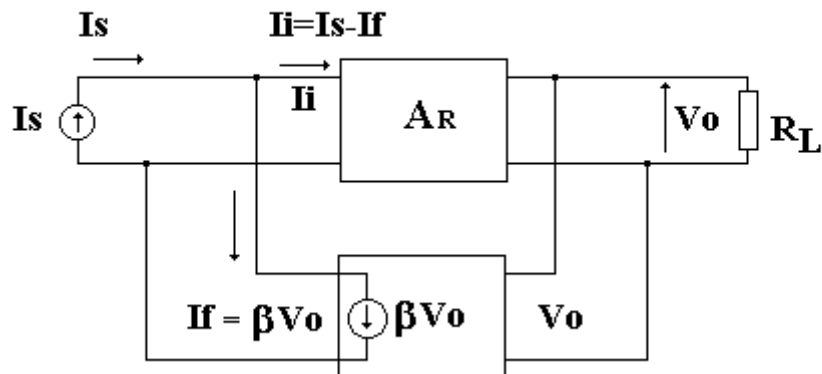
Il confronto dei segnali all'ingresso può avvenire sotto forma di differenza tra tensioni (v_s e v_f) se il circuito di uscita del quadripolo β di reazione e quello di ingresso dell'amplificatore base sono posti in serie, realizzando così una maglia che include anche la sorgente di segnale v_s

1) Tensione - Serie \Rightarrow Reazione di tensione

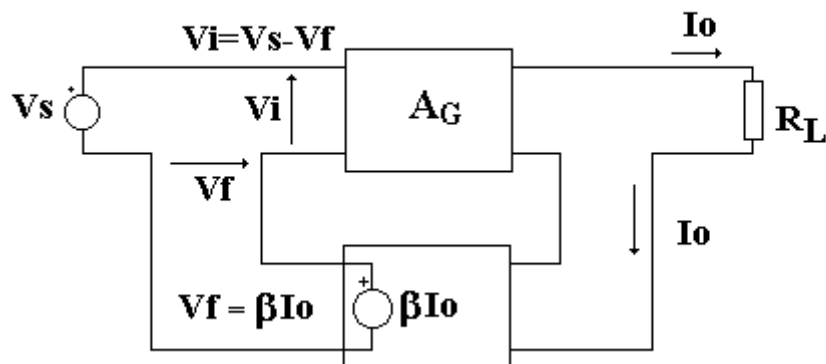


Viceversa il confronto avviene tra correnti quando il collegamento in ingresso dell'amplificatore base con il quadripolo di reazione e di tipo parallelo e da origine ad un nodo dove confluiscono le correnti i_s e i_f .

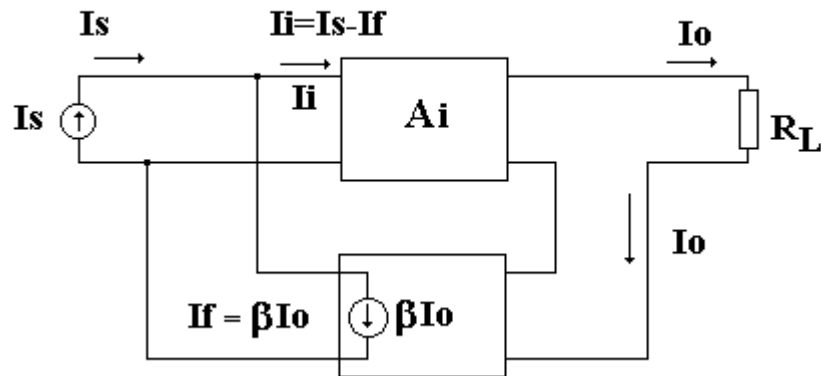
2) Tensione - Parallelo \Rightarrow Reazione di tensione



3) Corrente - Serie \Rightarrow Reazione di Corrente



4) Corrente - Parallelo \Rightarrow Reazione di Corrente



L'abbinamento delle due possibili modalità di prelievo all'uscita con quelle di confronto all'ingresso porta alle quattro configurazioni di reazione schematizzate in forma ideale, denominate rispettivamente:

- 1) tensione-serie
- 2) tensione-parallelo
- 3) corrente-serie
- 4) corrente-parallelo

Si noti la diversa natura assunta in ciascun caso dalla funzione di trasferimento A , che risulta essere rispettivamente A_V , A_R , A_G e A_i .

Pure il fattore di reazione β non è dimensionalmente uniforme per le varie configurazioni ma è tale che il prodotto βA risulti adimensionato.

La tabella presenta il quadro completo del significato dei parametri A , β e A_f per le quattro configurazioni circuitali di controreazione.

Reazione

Tipo di reazione	Grandezza controllata X_o	Grandezza di reazione X_f	$A = \frac{X_o}{X_i}$	$\beta = \frac{X_f}{X_o}$	$A_f = \frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1 + \beta A}$
Tensione-serie	Tensione	Tensione	$A_v = \frac{v_o}{v_i}$	$\frac{v_f}{v_o}$	$A_{vf} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v}$
Tensione-parallelo	Tensione	Corrente	$A_R = \frac{v_o}{i_i}$	$\frac{i_f}{v_o}$	$A_{Rf} = \frac{v_o}{i_s} = \frac{A_R}{1 + \beta A_R}$
Corrente-serie	Corrente	Tensione	$A_G = \frac{i_o}{v_i}$	$\frac{v_f}{i_o}$	$A_{Gf} = \frac{i_o}{v_s} = \frac{A_G}{1 + \beta A_G}$
Corrente-parallelo	Corrente	Corrente	$A_I = \frac{i_o}{i_i}$	$\frac{i_f}{i_o}$	$A_{If} = \frac{i_o}{i_s} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I}$

ESERCIZIO

Per ciascuno degli schemi proposti in figura precisare il tipo di controreazione utilizzato, ricavare β e, nell' ipotesi che sia $\beta A \gg 1$, calcolare l' amplificazione di tensione V_o/V_s . Ritenere trascurabile ogni effetto capacitivo alla frequenza di lavoro.

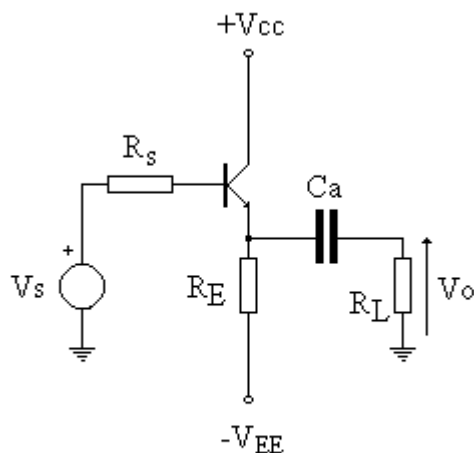


Fig. A

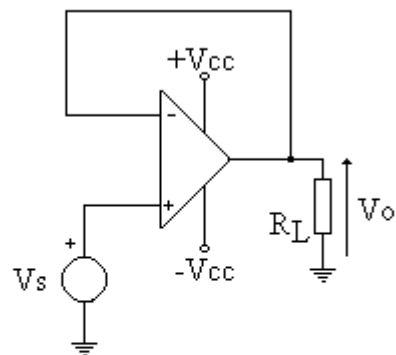
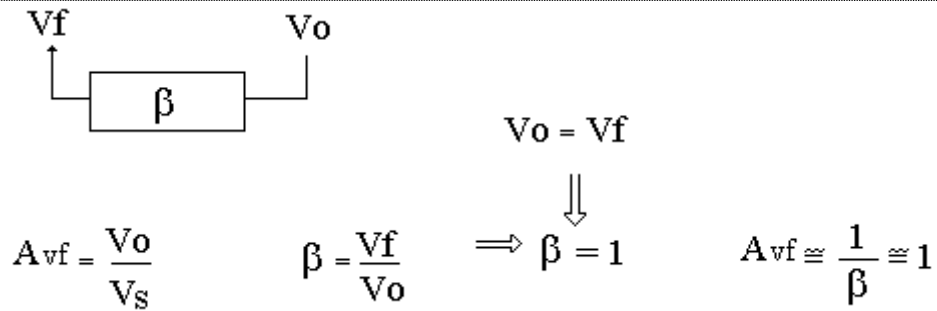
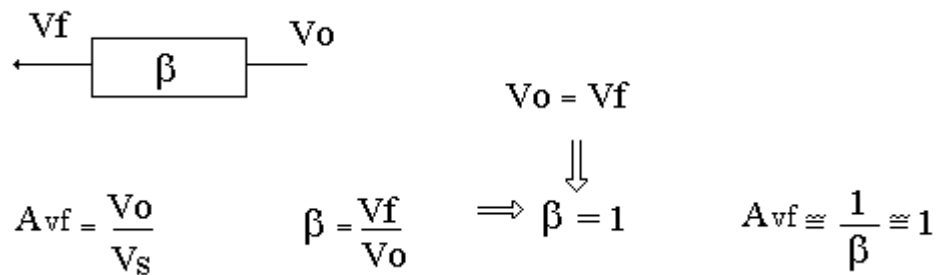


Fig. B

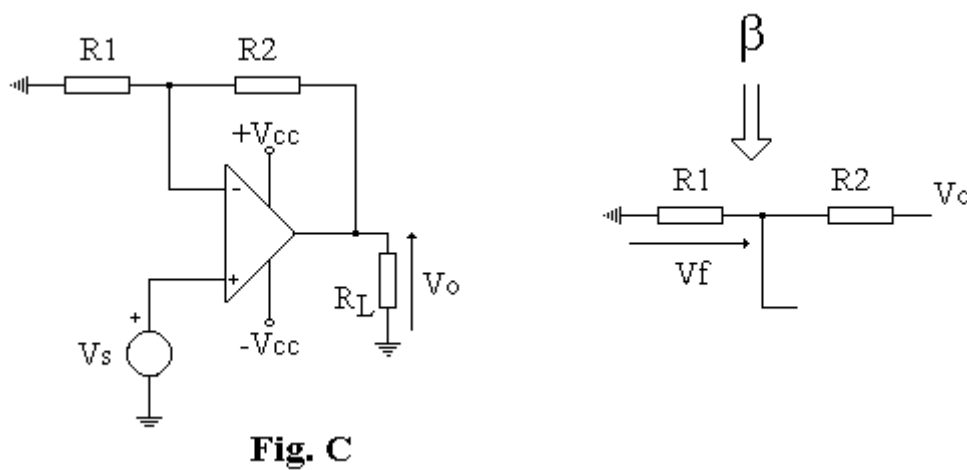
A) Il circuito di Fig.A è uno stadio amplificatore a collettore comune. Esso può però essere pensato come esempio di controreazione *Tensione - Serie*. Considerando come carico dinamico $R'_L = R_L // R_E$, si nota che la tensione V_o , inserita in opposizione a V_s nella maglia di ingresso, costituisce essa stessa il segnale di reazione V_f .



B) Il circuito di Fig.B (Voltage Follower) rappresenta anch' esso un esempio di controreazione *Tensione - Serie*.



C) Il circuito di Fig.C (Amplificatore non invertente) rappresenta anch' esso un esempio di controreazione *Tensione - Serie*.

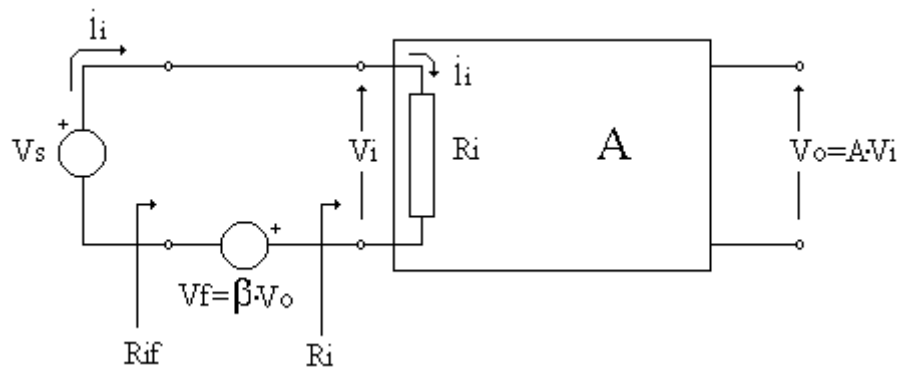


RESISTENZA DI INGRESSO DELL' AMPLIFICATORE REAZIONATO

L' introduzione della reazione negativa modifica sensibilmente il valore della resistenza di ingresso di un amplificatore

- 1) Se il confronto all' ingresso è di tipo serie la resistenza aumenta $R_{if} > R_i$
- 2) Se il confronto avviene in parallelo la resistenza diminuisce

1) Confronto in serie



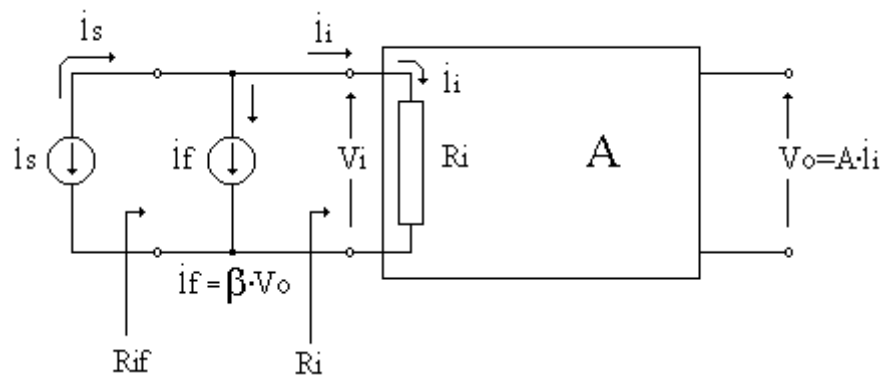
$$\frac{V_i}{i_i} = R_i \quad \Rightarrow \quad R_{if} = R_i \cdot (1 + \beta \cdot A)$$

La resistenza di ingresso aumenta di $1 + \beta A$ volte

La schematizzazione è valida per due configurazioni:

- 1) Tensione - Serie
- 2) Corrente - Serie

2) Confronto in parallelo



$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \beta A}$$

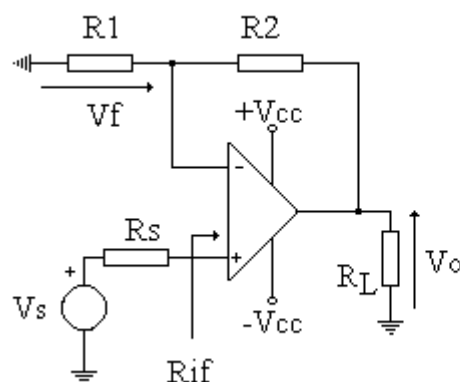
La resistenza di ingresso diminuisce di $1 + \beta A$ volte

La schematizzazione è valida per due configurazioni:

- 1) Tensione - Parallelo
- 2) Corrente - Parallelo

Esercizio

Calcolare la resistenza di ingresso R_{if} dell' amplificatore non invertente di figura.



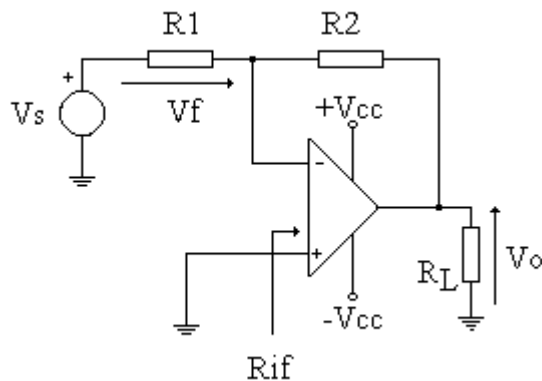
- $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$
- $R_s = 10 \text{ K}\Omega$
- $R_i = 2 \text{ M}\Omega$
- $A_o L = 2 \cdot 10^5$
- $R_L = 10 \text{ K}\Omega$

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2} = \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} = 0,0099$$

$$R_{if} = R_i \cdot (1 + \beta \cdot A) = 2 \cdot 10^6 \cdot (1 + 1980) = 3,9 \cdot 10^9 \Rightarrow R_{if} = 4 \text{ G}\Omega$$

Esercizio

Calcolare la resistenza di ingresso R_{if} dell' amplificatore invertente di figura.



$$\begin{aligned} R1 &= 10 \text{ K}\Omega \\ R2 &= 100 \text{ K}\Omega \\ R_i &= 2 \text{ M}\Omega \\ A_{oL} &= 2 \cdot 10^5 \\ R_L &= 10 \text{ K}\Omega \end{aligned}$$

Esempio di reazione parallelo

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2} = \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} = 0,0099$$

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \beta \cdot A} = \frac{2 \cdot 10^6}{1 + 1980} = 1 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_{if} = 1 \text{ K}\Omega$$

RESISTENZA DI USCITA DELL' AMPLIFICATORE REAZIONATO

L' introduzione della reazione negativa modifica sensibilmente il valore della resistenza di uscita di un amplificatore

- 1) Se la grandezza prelevata in uscita è la tensione, la resistenza di uscita diminuisce al crescere del tasso di reazione $R_{of} < R_o$.
- 2) Se la grandezza prelevata in uscita è la corrente, la resistenza di uscita aumenta al crescere del tasso di reazione $R_{of} > R_o$.

Tale effetto della controreazione, è indipendente dalle modalità del confronto all' ingresso

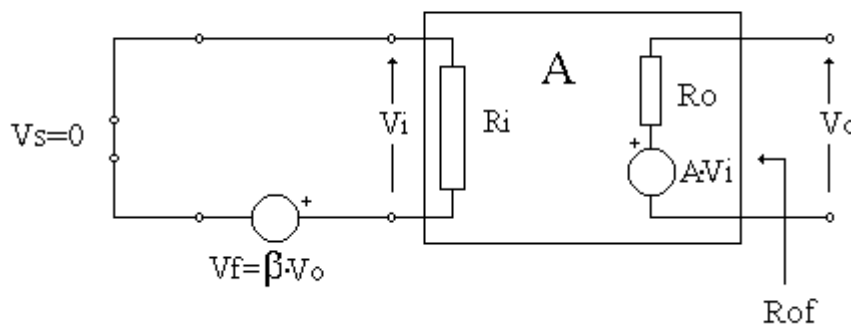
1) Reazione di tensione

Per calcolare la resistenza di uscita si considera nulla la sorgente all' ingresso.

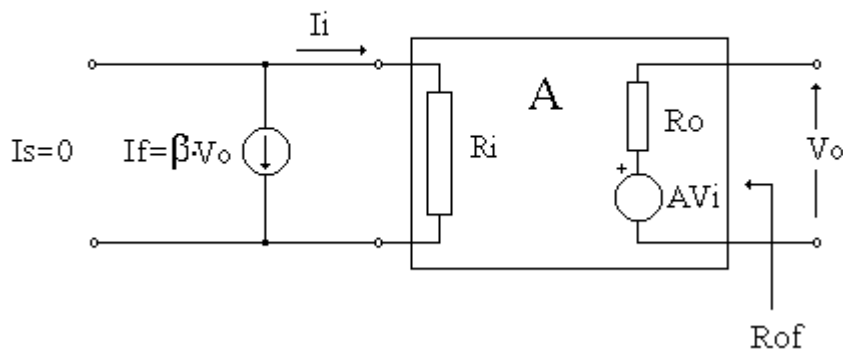
- 1) $V_s=0$ nel caso di reazione Tensione - Serie.
- 2) $I_s=0$ nel caso di reazione di Tensione - Parallelo

Per il calcolo della resistenza di uscita si fa riferimento ai seguenti circuiti equivalenti.

Tensione - Serie ($V_s=0$)



Tensione - Parallelo ($I_s=0$)



$$V_o = R_o I_o - A V_i = R_o I_o - \beta A V_o \implies V_o + \beta A V_o = R_o I_o$$

$$V_o \cdot (1 + \beta A) = R_o I_o \implies \frac{V_o}{I_o} = \frac{R_o}{1 + \beta A} \implies R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta A}$$

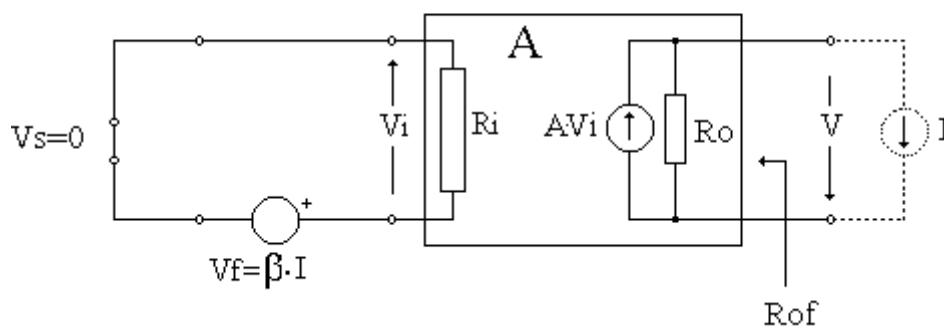
2) Reazione di corrente

Per calcolare la resistenza di uscita si considera nulla la sorgente all' ingresso.

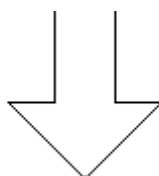
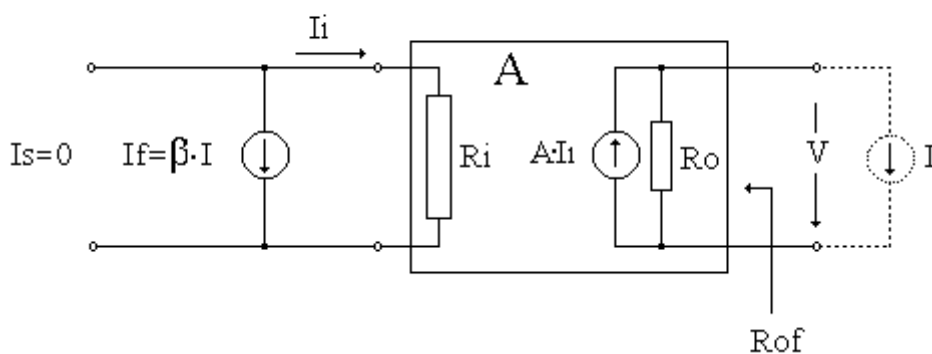
- 1) $V_s=0$ nel caso di reazione Corrente - Serie
- 2) $I_s=0$ nel caso di reazione di Corrente - Parallelo

Per il calcolo della resistenza di uscita si fa riferimento ai seguenti circuiti equivalenti.

Corrente - Serie ($V_s=0$)



Corrente - Parallelo ($I_s=0$)



$$R_{of} = R_o \cdot (1 + \beta A)$$

La tabella fornisce il quadro riassuntivo delle espressioni della resistenza di ingresso e quella

di uscita per le quattro configurazioni fondamentali di controreazione.
 Si noti infine:

- 1) La controreazione tensione - serie, determinando l' aumento della resistenza di ingresso e la diminuzione di quella di uscita, tende a trasformare un amplificatore generico in amplificatore di tensione ideale ($R_{if} = \infty$, $R_{of} = 0$).
- 2) La controreazione tensione - parallelo avvicina all' amplificatore a transresistenza ideale ($R_{if} = 0$, $R_{of} = 0$).
- 3) La controreazione tensione - serie avvicina all' amplificatore a transconduttanza ideale ($R_{if} = \infty$, $R_{of} = \infty$).
- 4) La controreazione corrente - parallelo, tende a trasformare un amplificatore generico in amplificatore di corrente ideale ($R_{if} = 0$, $R_{of} = \infty$).

In questo senso la controreazione (reazione negativa) si dimostra particolarmente utile ai fini dell' adattamento di impedenza.

Tipo di reazione	R_{if}	R_{of}
Tensione - Serie	$R_i (1 + \beta A)$	$\frac{R_o}{1 + \beta A}$
Tensione - Parallelo	$\frac{R_i}{1 + \beta A}$	$\frac{R_o}{1 + \beta A}$
Corrente - Serie	$R_i (1 + \beta A)$	$R_o (1 + \beta A)$
Corrente - Parallelo	$\frac{R_i}{1 + \beta A}$	$R_o (1 + \beta A)$

RISPOSTA IN FREQUENZA DI UN AMPLIFICATORE REAZIONATO

Nei precedenti paragrafi si è considerato il prodotto βA reale positivo, limitando con ciò l'analisi dei vari casi di controreazione all'ambito delle medie frequenze (consideriamo nullo l'effetto delle capacità di accoppiamento e parassite degli elementi attivi).

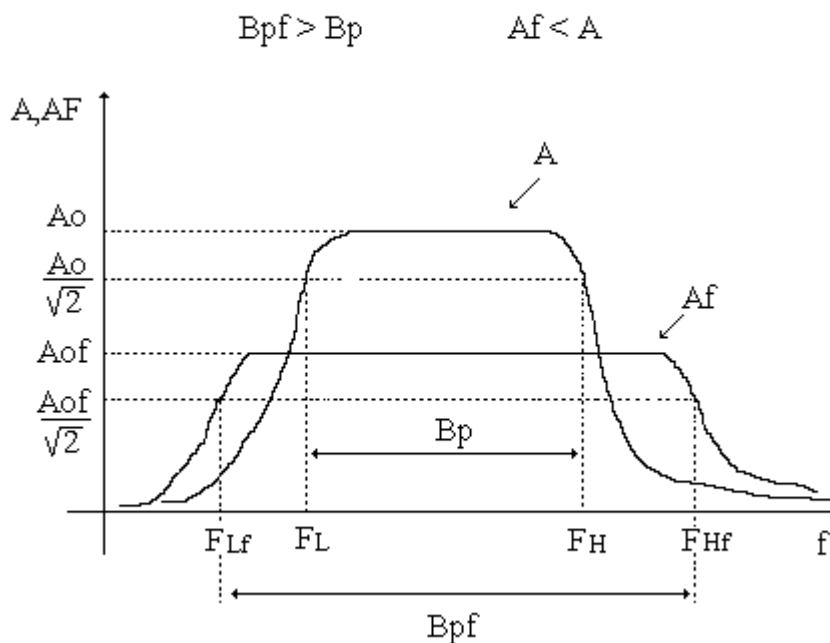
Considerando sempre β reale, il valore di A dipende dalla frequenza, l'amplificazione diminuisce alle basse e alle alte frequenze, per effetto delle capacità di accoppiamento e delle capacità parassite.

La condizione

$$\beta A \gg 1 \Rightarrow A_f \cong \frac{1}{\beta}$$

è verificata solo entro una gamma di frequenze più o meno limitata.

In linea di principio si può comunque affermare che la controreazione porta ad un aumento della larghezza di banda a spese dell'amplificazione.



$$\begin{matrix} F_{L_f} < F_L \\ F_{H_f} > F_H \end{matrix} \Rightarrow B_{p_f} > B_p$$

$$A_f < A$$