UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

Laboratorio di Elettronica

Marco Aglietta – Ernesto Migliore

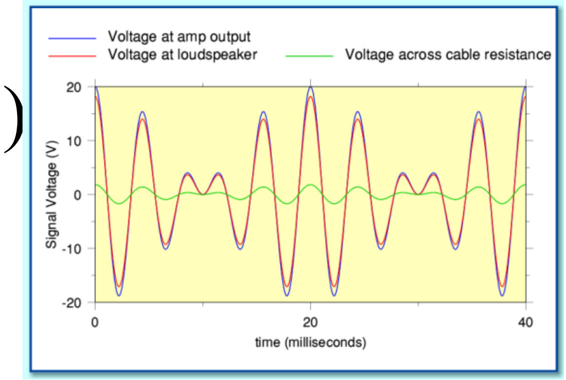
aglietta@to.infn.it migliore@to.infn.it

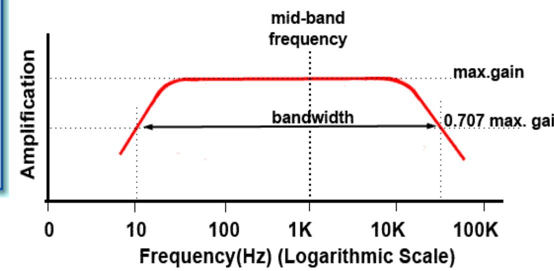
CFU 6 - A.A. 2021/22

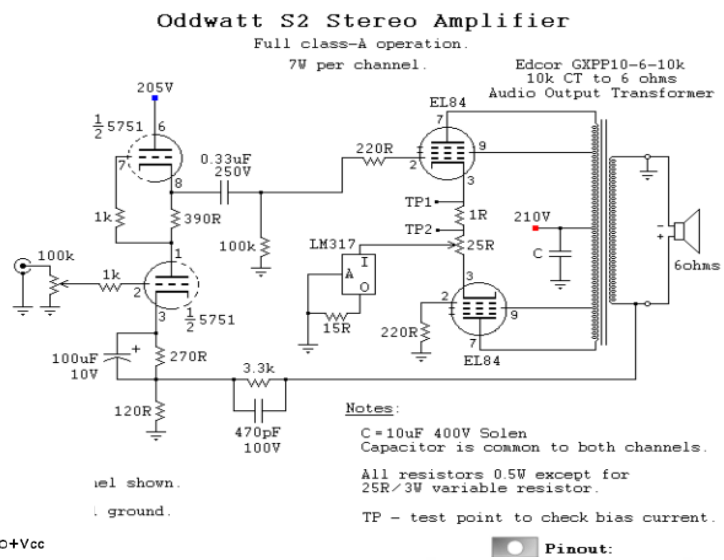
Corso di laurea in Fisica

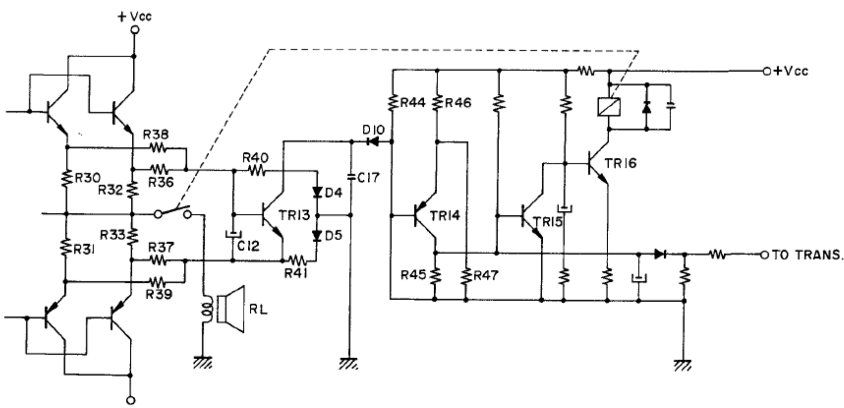
AMPLIFICATORI (audio)

BW 20Hz – 20 KHz

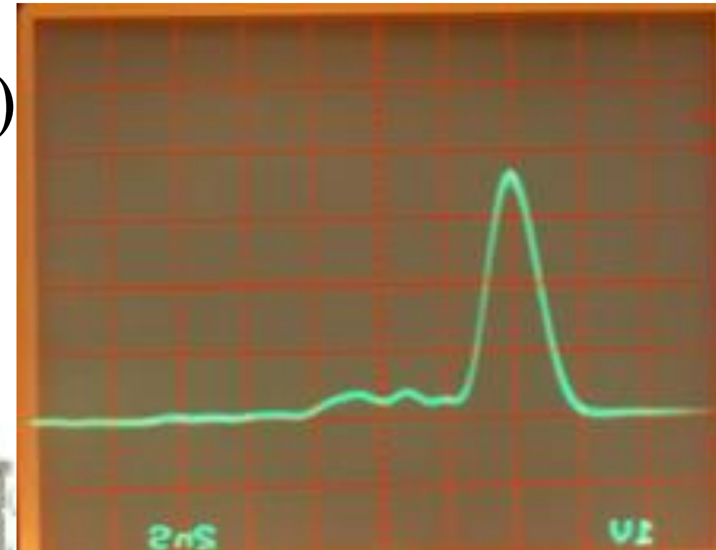


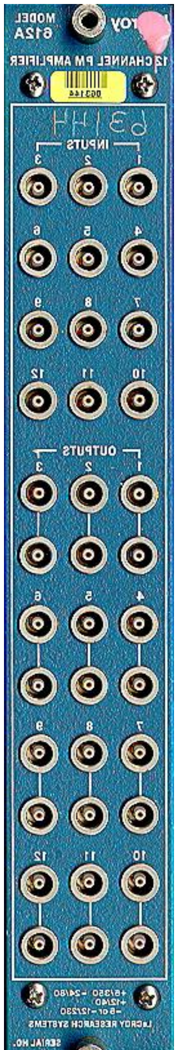






AMPLIFICATORI (di impulsi veloci)





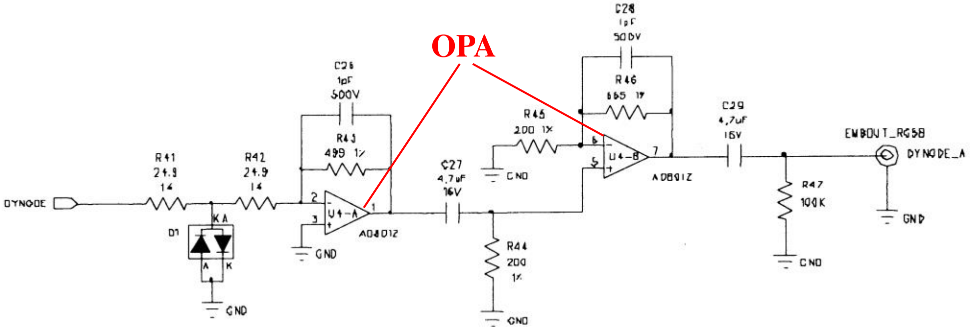
612A 12 CHANNEL, FIXED GAIN PHOTOMULTIPLIER AMPLIFIER

612AM 6 CHANNEL, VARIABLE GAIN PHOTOMULTIPLIER AMPLIFIER
200 MHz Bandwidth
Direct Coupled
2.5X to 40X Gain
5 V Linear Range
Two Outputs Per Channel

V974
4 Channel Variable Gain Fast Amplifier

Input bandwidth up to 170 MHz
x10 adjustable gain with x1 steps
50 Ohm Input Impedance
±2 V output dynamics
Drives 50 Ohm Loads
Cascadeable Channels
Rise/fall time <3 ns
I/O delay <3 ns

Auger SD PMTs dynode preamplifier



Classificazione degli amplificatori

- **Amplificatore di tensione**
- **Amplificatore di corrente**
- **Amplificatore di transresistenza**
- **Amplificatore di transconduttanza**

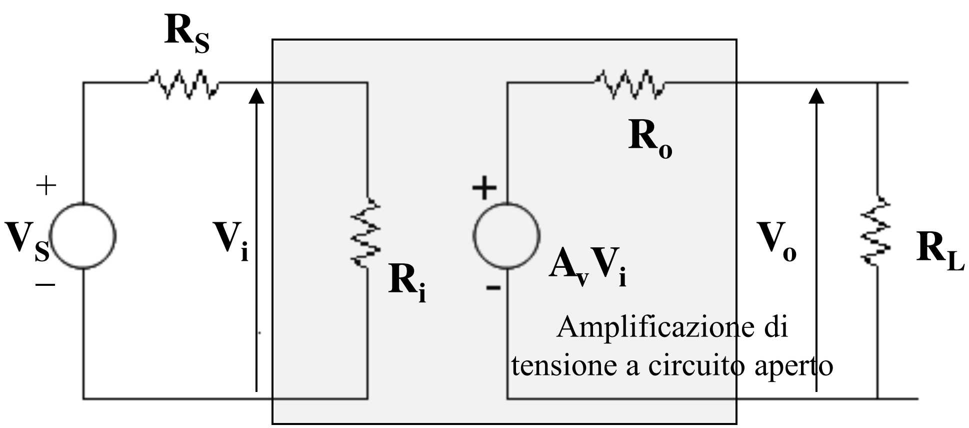
$\Rightarrow$ $\mathbf{R_i, R_o}$ vs $\mathbf{R_S, R_L}$

La classificazione e' basata sul confronto tra il valore delle impedenze di ingresso ed uscita dell'amplificatore rispetto alle impedenze del generatore ed il valore del carico

Studio della risposta in frequenza di un amplificatore

Classificazione degli amplificatori

1) Amplificatore di tensione : si rappresenta attraverso il circuito equivalente di Thevenin di una rete a 2 porte



Deve presentare all'uscita una tensione proporzionale a quella del segnale in ingresso indipendentemente dai valori di R_S ed R_L

$\mathbf{R_i \gg R_S}$ Tutta la tensione del generatore si presenta all'ingresso del dispositivo

$\mathbf{R_o \ll R_L}$ La caduta di tensione sulla resistenza di uscita e' trascurabile

$$V_o = A_v V_i \frac{R_L}{R_L + R_O} = A_v V_S \frac{R_i}{R_i + R_S} \frac{R_L}{R_L + R_O} \sim A_v V_S$$

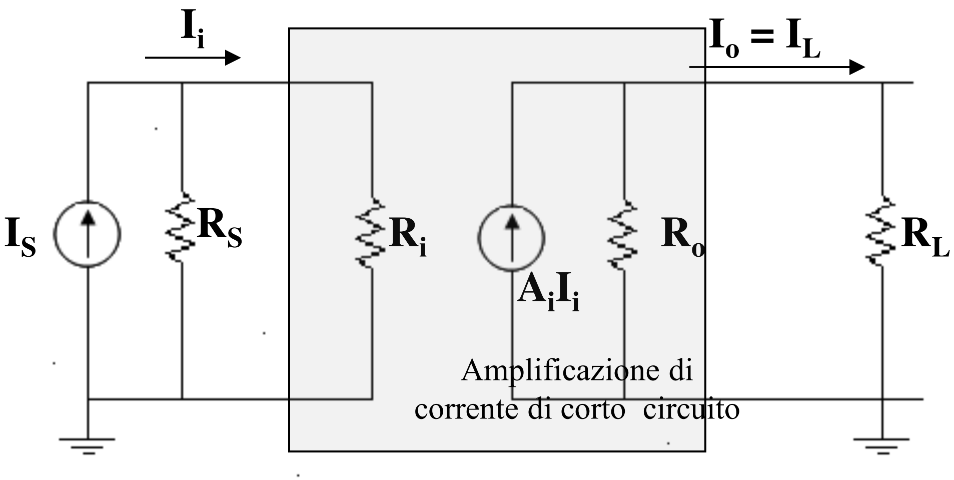
L'amplificazione non dipende dal valore delle resistenze del generatore e del carico

$$V_i = V_S \frac{R_i}{R_i + R_S}$$

Nel caso ideale $R_i = \infty$ ed $R_o = 0$ si ha che l'amplificazione $A_V = V_o/V_S$ eguaglia quella a circuito aperto $A_v = V_o/V_i$

$$A_V = V_o/V_S = A_v \quad \text{se} \quad R_i = \infty \text{ ed } R_o = 0$$

2) Amplificatore di corrente : si rappresenta attraverso il circuito equivalente di Norton di una rete a 2 porte



Deve presentare all'uscita una corrente proporzionale a quella del segnale in ingresso indipendentemente dai valori di R_S ed R_L

$$R_i << R_S$$

Tutta la corrente del generatore entra nel dispositivo

$$R_o >> R_L$$

Tutta la corrente passa al carico

$$I_o = A_i I_i \frac{\cancel{R_L} R_o}{(R_L + R_o)\cancel{R_L}} = A_i I_S \frac{R_S}{R_i + R_S} \frac{R_o}{R_L + R_o} \sim A_i I_S$$

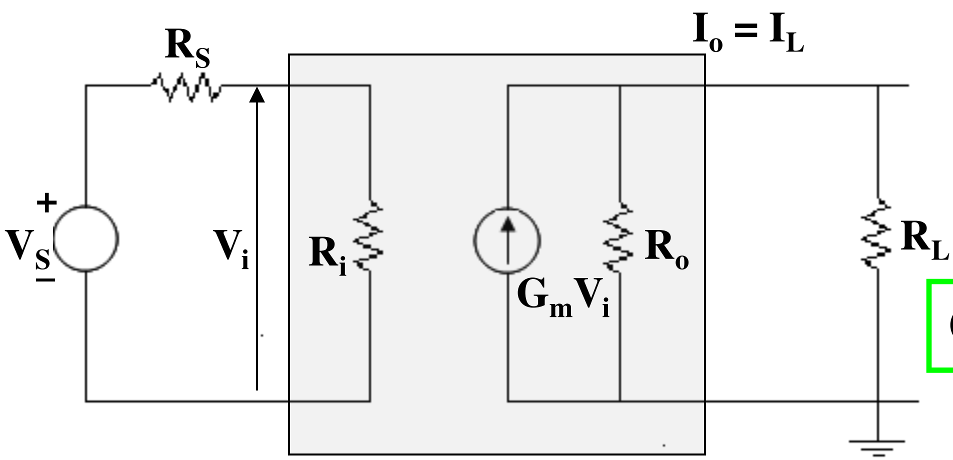
L'amplificazione non dipende dal valore delle resistenze del generatore e del carico

$$I_i = I_S \frac{\cancel{R_i} R_S}{(R_i + R_S)\cancel{R_i}}$$

Nel caso ideale $\mathbf{R_i = 0}$ ed $\mathbf{R_o = \infty}$ si ha che l'amplificazione $\mathbf{A_I = I_o/I_S}$ eguaglia quella di corto circuito $\mathbf{A_i = I_o/I_i}$

$$\mathbf{A_I = I_o/I_S = A_i} \quad \text{se} \quad \mathbf{R_i = 0} \ \text{ed} \ \mathbf{R_o = \infty}$$

3) Amplificatore di transconduttanza: (G_m non e' un numero puro [1/R])

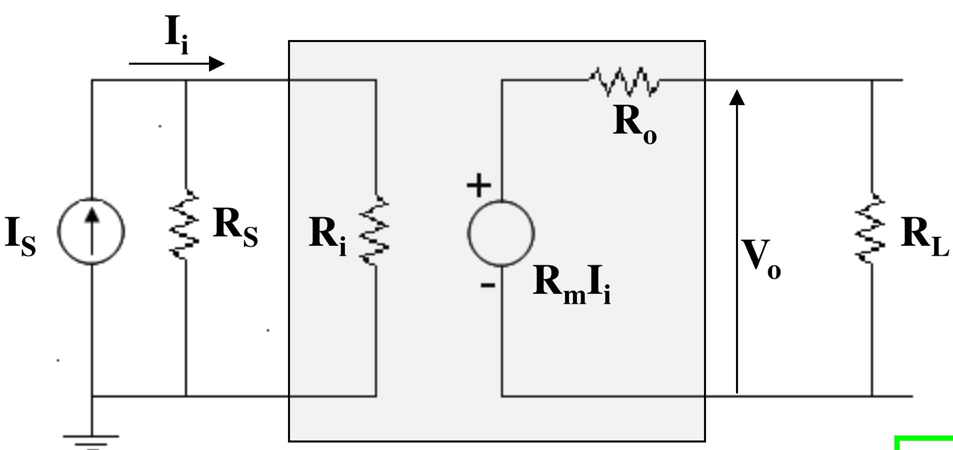


$V_i \sim V_s \longrightarrow R_i >> R_S$

$I_o \sim G_mV_i \longrightarrow R_o >> R_L$

$$\boxed{G_M = I_o/V_S = G_m \text{ se } R_i = \infty \text{ ed } R_o = \infty}$$

4) Amplificatore di transresistenza: (R_m non e' un numero puro [R])



$I_i \sim I_s \longrightarrow R_i << R_S$

$V_o \sim R_mV_i \longrightarrow R_o << R_L$

$$\boxed{R_M = V_o/I_S = R_m \text{ se } R_i = 0 \text{ ed } R_o = 0}$$

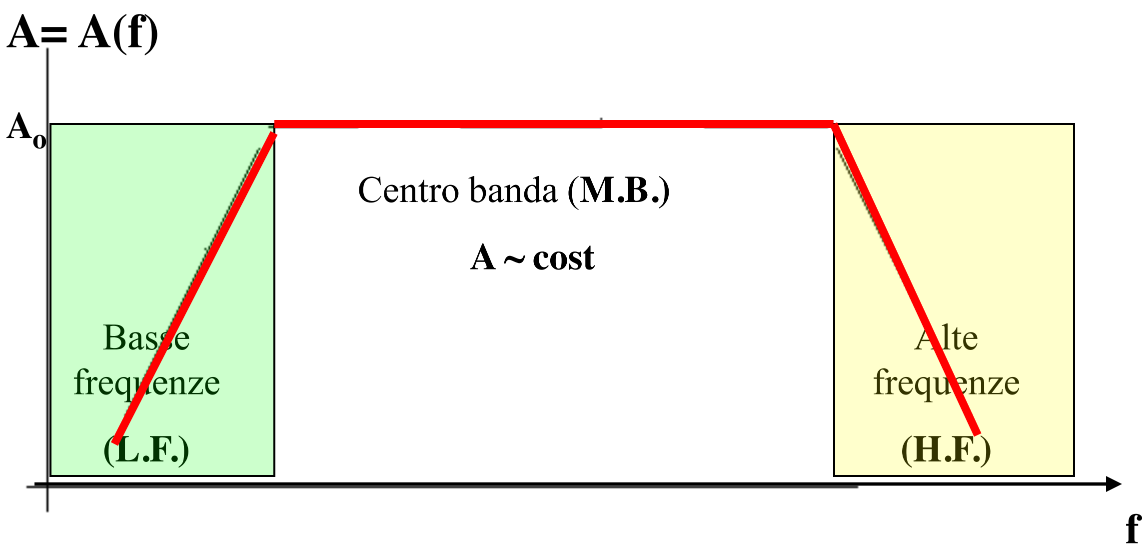
Risposta in frequenza di un amplificatore

A causa delle capacita' interne dei dispositivi (transistors) utilizzati per realizzare un amplificatore, oppure anche a causa delle capacita' associate al circuito di accoppiamento al carico od al carico stesso (carico reattivo) , segnali di frequenza diversa vengono generalmente amplificati differentemente.

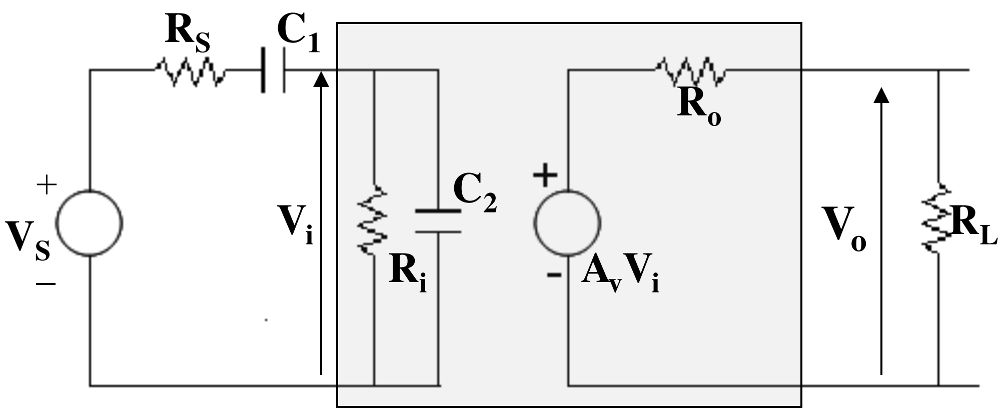
Un segnale (audio, video) che non sia composto da una unica frequenza verra' pertanto DISTORTO

Indipendentemente dal tipo di amplificatore considerato (A_v, A_i, G_m, R_m) l'amplificazione e' in genere un numero complesso la cui ampiezza e fase dipendono dalla frequenza del segnale in ingresso.

Guadagno, risposta in frequenza: si riconoscono tre regioni



Possiamo studiare il comportamento dell'amplificatore al di fuori del centro banda introducendo nello schema base 2 condensatori.
Il comportamento alle basse frequenze sara' condizionato dal circuito **passa-alto** con **C1**, il comportamento alle alte frequenze dal **passa-basso** con $\mathbf{C_2}$.



$$Z_C = \frac{-j}{\omega C} \qquad \omega = 2\pi f$$

f elevata → Z_C bassa → C_1 trasurabile (passa-alto)

f bassa → Z_C elevata → C_2 trasurabile (passa-basso)

Alle basse frequenze possiamo trascurare C_2 (→ circuito aperto, $Z_C \sim\infty$)

$$V_o = A_v V_i \frac{R_L}{R_L + R_O} = A_v V_S \frac{R_i}{R_i + R_S + \frac{-j}{\omega C_1}} \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

$$V_i = V_S \frac{R_i}{R_i + R_S + \frac{-j}{\omega C_1}}$$

$$V_o = A_v V_i \frac{R_L}{R_L + R_O} = A_v V_S \frac{R_i}{R_i + R_S + \dfrac{-j}{\omega C_1}} \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

Dividiamo e moltiplichiamo per la quantita' $\dfrac{R_i}{R_i + R_S}$

$$V_o = V_S \underbrace{A_v \frac{R_i}{R_i + R_S} \frac{R_L}{R_L + R_O}}_{A_{vMB}} \frac{1}{1 + \dfrac{-j}{\omega C_1 (R_i + R_S)}}$$

ponendo $f_{LF} = \dfrac{1}{2\pi C_1 (R_i + R_S)}$

ed essendo $\omega = 2\pi f$

A_{vMB} amplificazione a centro banda

si ottiene per l'amplificazione nella regione di bassa frequenza l'espressione

$$\frac{V_o}{V_S} = A_{vLF} = A_{vMB} \frac{1}{1 - j \dfrac{f_{LF}}{f}} = A_{vMB} \frac{1 + j \dfrac{f_{LF}}{f}}{1 + \left(\dfrac{f_{LF}}{f}\right)^2}$$

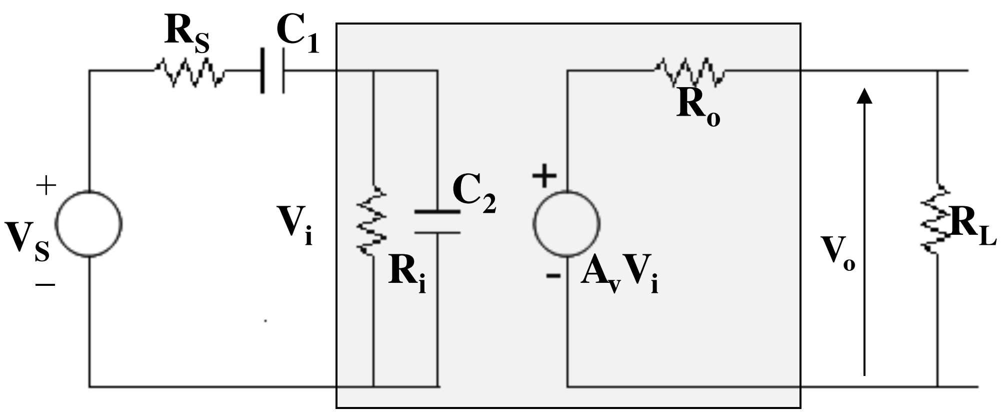
Calcoliamo il il modulo e la fase

$$|A_{vLF}|^2 = \frac{A_{vMB}^2}{\left(1 + \left(\dfrac{f_{LF}}{f}\right)^2\right)^{\cancel{2}}} \cancel{\left(1 + \left(\frac{f_{LF}}{f}\right)^2\right)}$$

$$|A_{vLF}| = A_{vMB} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{f_{LF}}{f}\right)^2}}$$

$$\theta_{LF} = \arctan \frac{f_{LF}}{f}$$

Per studiare il comportamento alle alte frequenze possiamo invece trascurare C_1 (→ corto circuito, $Z_C \sim 0$)



$$Z_C = \frac{-j}{\omega C}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$V_o = A_v V_i \frac{R_L}{R_L + R_O} = A_v V_S \frac{Z_i}{R_S + Z_i} \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

$$V_i = V_S \frac{Z_i}{R_S + Z_i} \quad \text{dove} \quad Z_i = \frac{R_i \dfrac{-j}{\omega C_2}}{R_i + \dfrac{-j}{\omega C_2}} = \frac{R_i}{jR_i\omega C_2 + 1}$$

$$\frac{Z_i}{R_S + Z_i} = \frac{\dfrac{R_i}{jR_i\omega C_2 + 1}}{R_S + \dfrac{R_i}{jR_i\omega C_2 + 1}} = \frac{R_i}{j\, R_S\, R_i\omega C_2 + R_S + R_i} = \frac{R_i/(R_S + R_i)}{1 + j\omega C_2\,(R_S // R_i)}$$

Divido numeratore e denominatore per $(R_S + R_i)$

Sostituendo troviamo:

$$V_o = V_S \underbrace{A_v \frac{R_L}{R_L + R_O} \frac{R_i}{R_S + R_i}}_{A_{vMB}} \frac{1}{1 + j\omega C_2 (R_S // R_i)}$$

ponendo $f_{HF} = \dfrac{1}{2\pi C_2 (R_S // R_i)}$

ed essendo $\omega = 2\pi f$

si ottiene per l'amplificazione nella regione di alta frequenza l'espressione

$$\frac{V_o}{V_S} = A_{vHF} = A_{vMB} \frac{1}{1 + j\dfrac{f}{f_{HF}}} = A_{vMB} \frac{1 - j\dfrac{f}{f_{HF}}}{1 + \left(\dfrac{f}{f_{HF}}\right)^2}$$

Calcoliamo il il modulo e la fase

$$|A_{vHF}|^2 = \frac{A_{vMB}^2}{\left(1 + \left(\dfrac{f}{f_{HF}}\right)^2\right)^2} \left(1 + \left(\dfrac{f}{f_{HF}}\right)^2\right)$$

$$\boxed{|A_{vHF}| = A_{vMB} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{f}{f_{HF}}\right)^2}} \qquad \theta_{HF} = -\arctan \frac{f}{f_{HF}}}$$

$$|A_{vLF}| = A_{vMB}\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f_{LF}}{f}\right)^2}}$$

$$|A_{vHF}| = A_{vMB}\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{HF}}\right)^2}}$$

Per $f = f_{LF}$

$$|A_{vLF}| = A_{vMB}\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$= 0.707$

Per $f = f_{HF}$

$$|A_{vHF}| = A_{vMB}\frac{1}{\sqrt{2}}$$

Il guadagno di un amplificatore solitamente si esprime in **decibel (db)**

$$\boxed{A \rightarrow A(db) = 20\,\mathrm{Log}_{10}\,A}$$

$$|A_{vLF}(db)| = A_{vMB}(db) + 20\mathrm{Log}_{10}\frac{1}{\sqrt{2}}$$

-3db

$$|A_{vHF}(db)| = A_{vMB}(db) + 20\mathrm{Log}_{10}\frac{1}{\sqrt{2}}$$

-3db

f_{LF} e' detta frequenza inferiore di taglio a -3db

f_{HF} e' detta frequenza superiore di taglio a -3db

$$\boxed{f_{HF} - f_{LF}}$$

LARGHEZZA DI BANDA dell'amplificatore

$$|A_{vLF}| = A_{vMB} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f_{LF}}{f}\right)^2}}$$

$$|A_{vHF}| = A_{vMB} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{HF}}\right)^2}}$$

Passando in decibel:

$$A(db) = 20 \, Log_{10} \, A_{vMB} - 20 \, Log_{10} \sqrt{1+\left(\frac{f_{LF}}{f}\right)^2}$$

$$A(db) = 20 \, Log_{10} \, A_{vMB} - 20 \, Log_{10} \sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{HF}}\right)^2}$$

Allora alle basse frequenze ad esempio:

se $f = 1/10 \, f_{LF}$ allora $\sqrt{1+\left(\frac{f_{LF}}{f}\right)^2}$ vale circa 10 e $20 \, Log_{10}(1/10) = -20db$

Analogamente all'altra estremità dello spettro

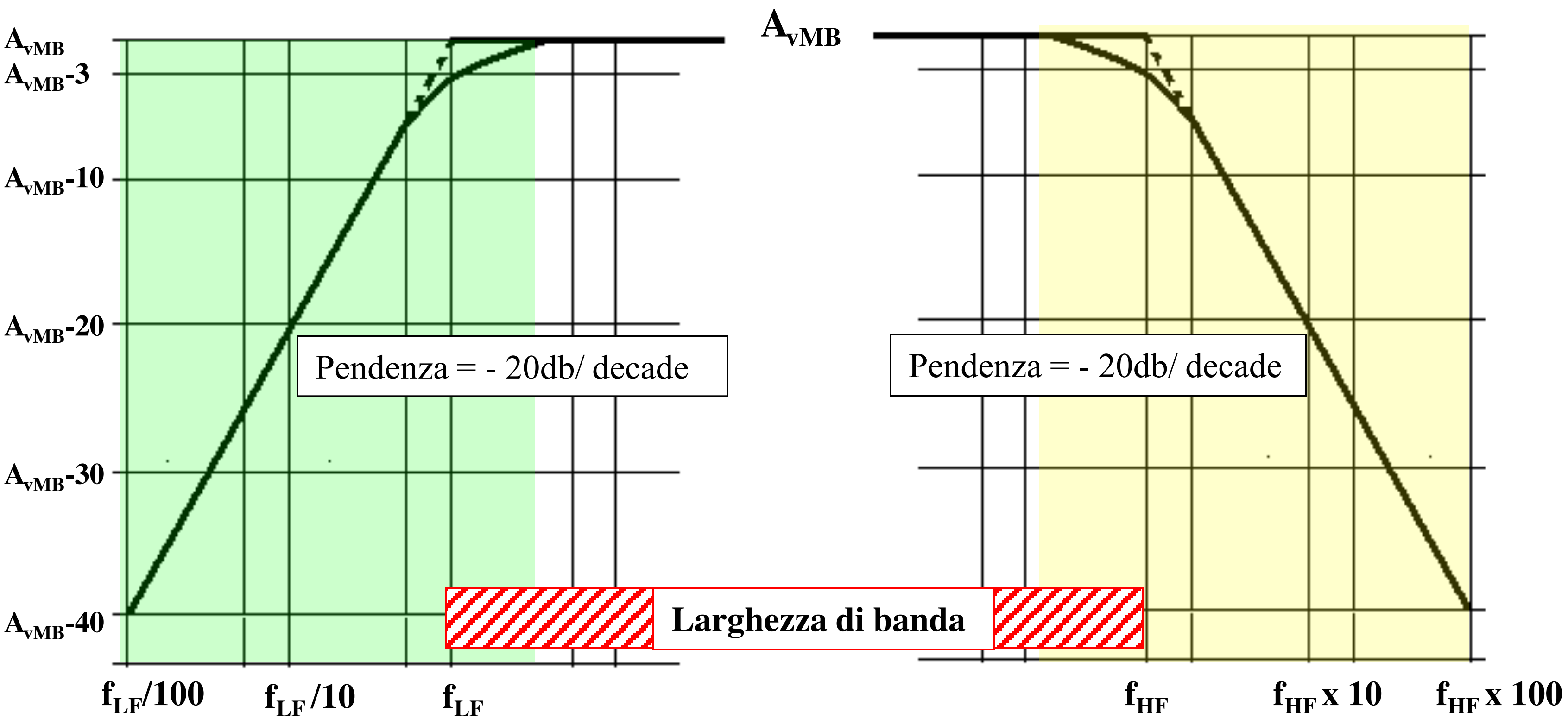
Ss $f = 10 \, f_{HF}$ allora $\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{HF}}\right)^2}$ vale circa 10 e $20 \, Log_{10}(1/10) = -20db$

Diagramma di Bode

Plot in scala semilogaritmica della risposta in frequenza di un amplificatore

$20\ Log_{10}(1/2) = -\ 6db$ $\quad 20\ Log_{10}(1/10) = -\ 20db$

$20\ Log_{10}(1/4) = -\ 12db$ $\quad 20\ Log_{10}(1/100) = -\ 40db$



Amplificatore ideale : **Larghezza di banda infinita**

Un segnale, le cui componenti armoniche di ampiezza apprezzabile si trovino comprese nell' intervallo di frequenze compreso tra f_{hf} e f_{lf} verrà amplificato senza eccessive distorsioni .

La classificazione degli amplificatori in funzione della banda passante include ad esempio:

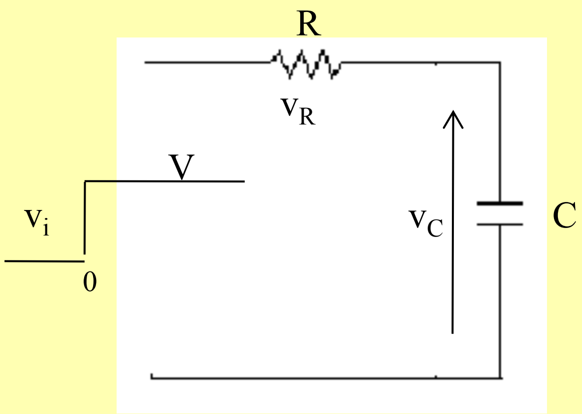
Tipo	Banda passante
Amplificatori Audio	da 20 Hz a 20k Hz
Amplificatori RF	da kHz a centinaia di MHz
Amplificatori UHF	$\geq$ GHZ

Un criterio per valutare la fedeltà di un amplificatore è costituito dallo studio della sua riposta ad un gradino di tensione.

In generale, anche per circuiti amplificatori complicati, esiste una stretta relazione tra la distorsione del fronte di salita di un gradino e la risposta dell'amplificatore alle alte frequenze (come esiste un legame tra la risposta alle basse frequenze e la distorsione della regione piatta dell'impulso).

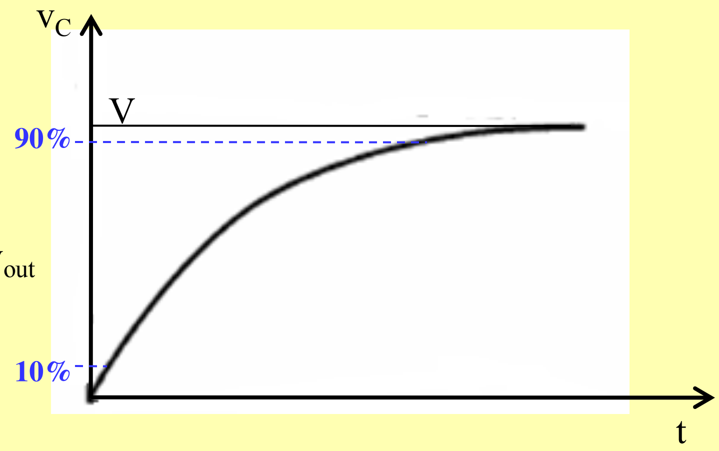
Vediamo meglio questa relazione.

Come abbiamo visto possiamo capire molto della risposta in frequenza di un amplificatore considerando semplicemente la risposta di un circuito RC.
Procediamo allo stessso modo per studiare la risposta ad un gradino di tensione.



$$v_i = v_C + v_R$$

$$v_C = V - V \exp(-t / RC) = v_{out}$$



Il **tempo di salita** del segnale in uscita e' definito come il tempo necessario a passare dal 10% al 90% dell'ampiezza

$$e^{-0.1} \sim 0.9$$

$$t_{10\%} \rightarrow V - V \exp(-t / RC) = 0.1\ V \rightarrow t = 0.1\ RC$$

$$t_{90\%} \rightarrow V - V \exp(-t / RC) = 0.9\ V \rightarrow t = 2.3\ RC$$

$$e^{-2.3} \sim 0.1$$

$$\Rightarrow \boxed{t_r = 2.2\ RC = \frac{2.2}{2\pi f_{HF}} = \frac{0.35}{f_{HF}}}$$

$$f_{HF} = 1/2\pi RC$$

Il tempo di salita dipende direttamente dal valore della banda passante → piu' e' larga minore e' il tempo di salita

Per sapere se si sta visualizzando correttamente il segnale veloce di un rivelatore (ad esempio il segnale di un fotomoltiplicatore) è necessario considerare la banda passante dell'oscilloscopio utilizzato

100 Mhz di banda passante → rise time = $0.35/ 10^8 = 3.5$ ns

350 MHz → $0.35/3.5\ 10^8 = 1$ ns

Consideriamo un impulso di durata t_D.

Quanto deve valere la frequenza di taglio superiore di un' amplificatore per amplificare questo segnale senza una eccessiva distorsione?

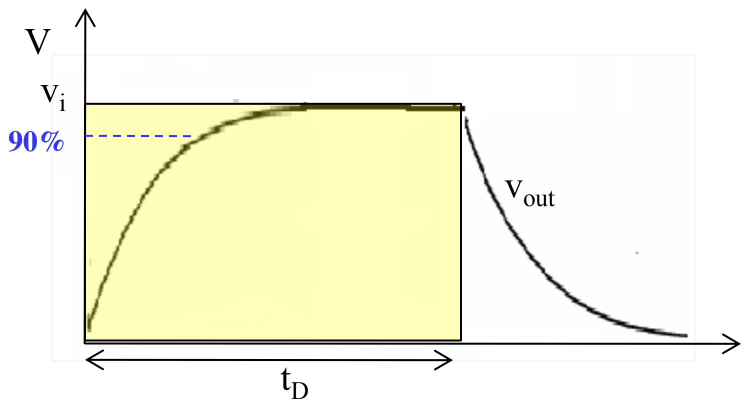
Se si ha un amplificatore con una banda passante tale che:

$$f_{HF} = 1/t_D$$

allora il tempo di salita sarà :

$$t_r = 0.35/ f_{HF} = 0.35\ t_D$$

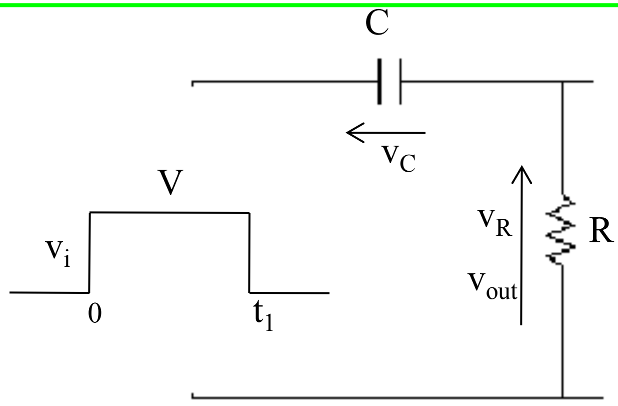
(il fronte di salita dura circa un terzo della durata dell'impulso che risulta quindi molto distorto ma conserva comunque l'aspetto di impulso)

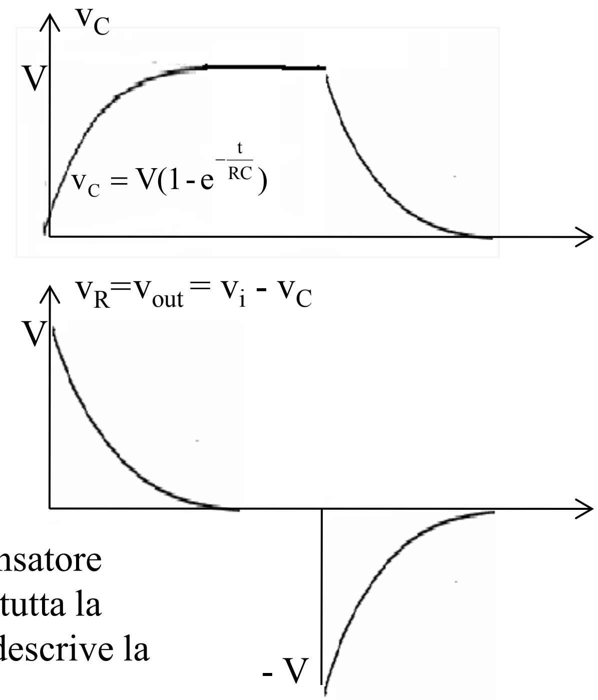


Esempio: visualizzazione di un impulso di durata 10ns su di un ascilloscopio con banda passante 100 Mhz

t_D= 10ns BW = 100 MHz → t_{rise} = 3.5ns

Risposta di un passa alto ad un gradino di tensione





$$\boxed{v_i = v_C + v_R}$$

All' istante $t = 0^+$ la tensione in ingresso passa al valore V. Il condensatore richiede tempo per caricarsi. Istantaneamente sara' pertanto $v_C = 0$ (tutta la tensione in uscita su R). Vediamo come si ottiene l'espressione che descrive la carica del condensatore

$$\mathbf{v_i(t) = V = v_C(t) + v_R(t) = \frac{Q(t)}{C} + i(t)R = \frac{Q(t)}{C} + \frac{dQ(t)}{dt}R} \longrightarrow \quad RC\frac{dQ}{dt} + Q(t) - VC = 0$$

Semplifichiamo l'espressione cambiando variabile, poniamo:

$$Q(t) - VC = x(t) \longrightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dt}$$

Si ha pertanto:

$$RC\frac{dx}{dt} + x = 0 \longrightarrow dt = -RC\frac{dx}{x} \longrightarrow -\frac{1}{RC}\int_0^t dt = \int_0^t \frac{dx}{x} \longrightarrow \ln\frac{x(t)}{x(0)} = -\frac{t}{RC} \longrightarrow x(t) = x(0)e^{-\frac{t}{RC}}$$

Ritornando alle variabili originarie (al tempo zero la carica sul condensatore e' nulla) si ottiene:

$$Q(t) - VC = -VCe^{-\frac{t}{RC}} \Rightarrow Q(t) = VC(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$ da cui finalmente $$\boxed{v_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = V(1 - e^{-\frac{t}{RC}})}$$

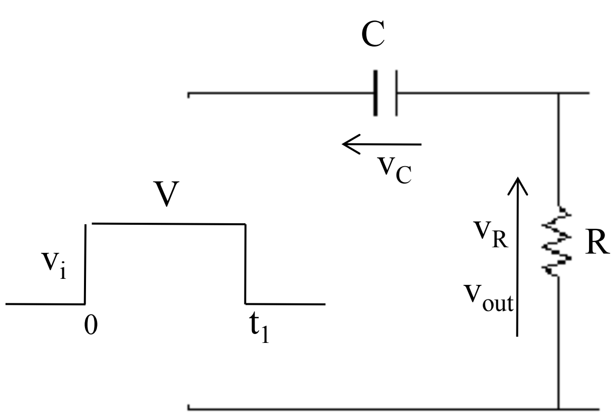
All'istante t_1 il segnale in ingresso torna a zero con una variazione di tensione $\Delta V = -V$.

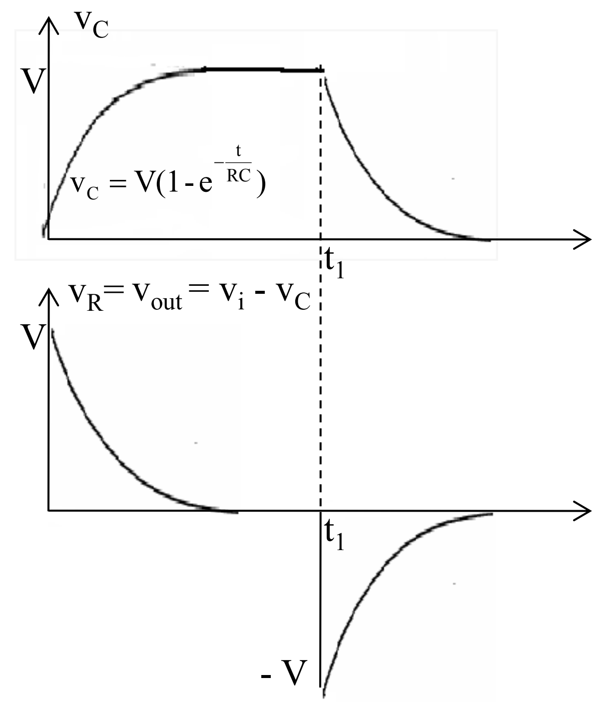
Il condensatore inizia allora a scaricarsi con la costante di tempo RC del circuito.

Dovendo essere in ogni istante valida la relazione

$$v_i = v_C + v_R$$

anche ai capi della resistenza in uscita si avrà un immediato salto di tensione $\Delta V = -V$. Successivamente la tensione in uscita si riporta esponenzialmente a zero seguendo il tempo di scarica del condensatore.





Amplificatori Reazionati

Le caratteristiche di un amplificatore possono essere migliorate riportando all'ingresso una parte del segnale in uscita. Il valore dell'amplificazione viene modificato dalla reazione:

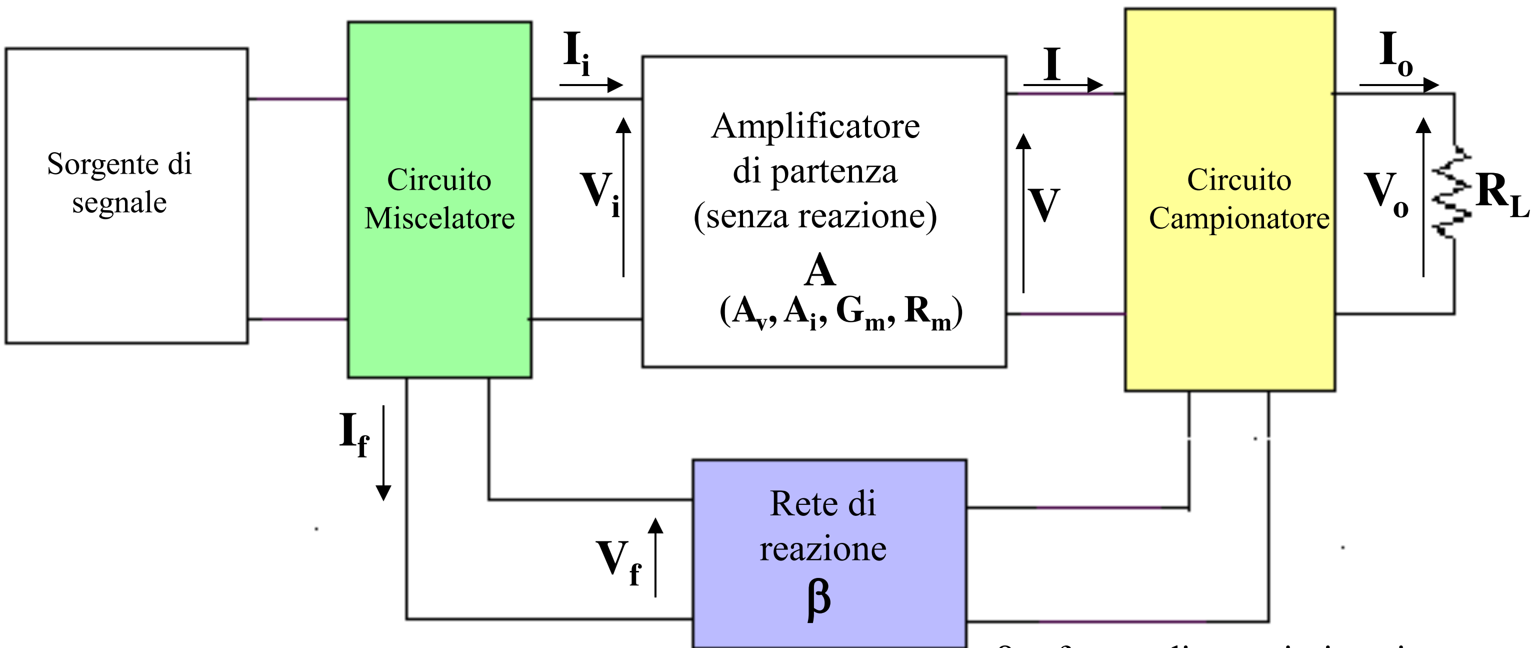
$$\boxed{\mathbf{A \rightarrow A_f}}$$

f sta per feedback

Quando $\mathbf{A_f < A}$ si parla di **Reazione Negativa**

- Migliora i valori delle impedenze di ingresso ed uscita
- Stabilizza l'amplificazione
- Aumenta la banda passante

La tecnica piu' comunemente utilizzata per migliorare le caratteristiche di un amplificatore e' quella di introdurre nello schema una **REAZIONE NEGATIVA**.



β = fattore di trasmissione inversa

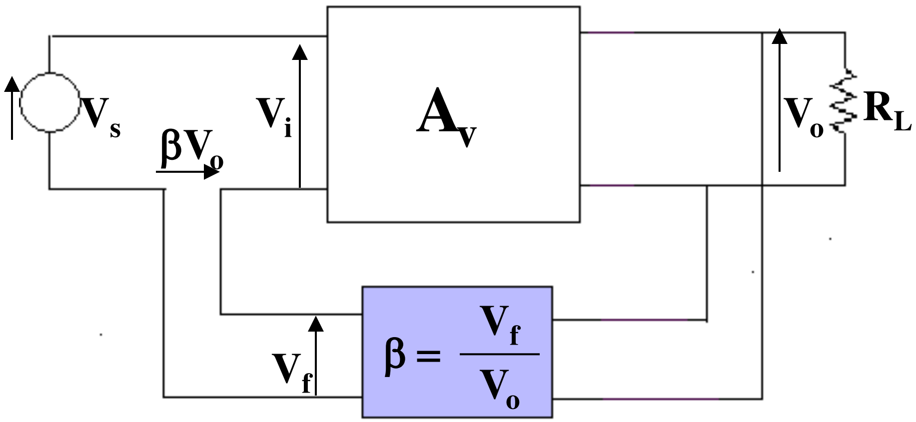
Tre ipotesi fondamentali:

1) Il segnale e' trasmesso dall'ingresso all'uscita solo attraverso l'amplificatore di base → rete di reazione unidirezionale

2) Il segnale di reazione e' trasmesso dall'uscita all'ingresso solo attraverso la rete di reazione → amplificatore di partenza unidirezionale

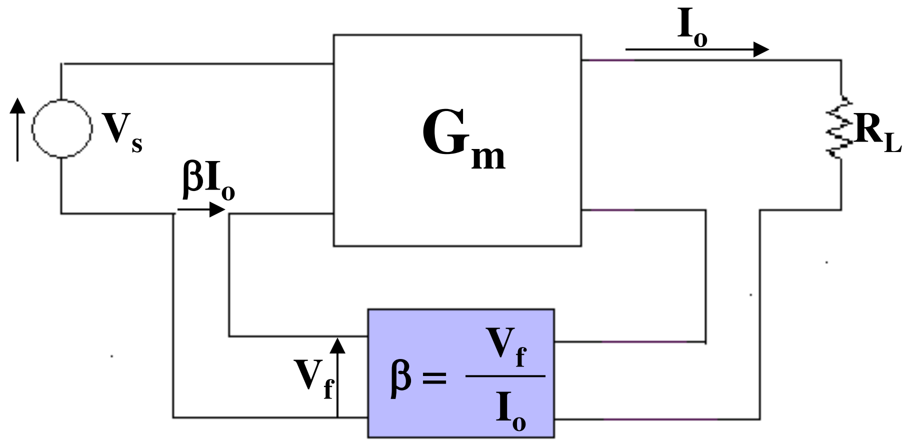
3) Il fattore di trasmissione inversa β e' indipendente dai valori del carico R_L e della resistenza del generatore R_S

Amplificatore di Tensione
Reazione Tensione - Serie



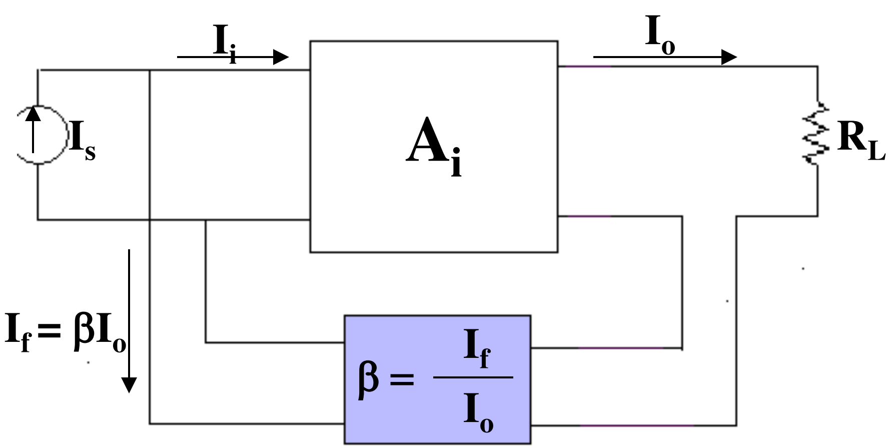
Preleviamo una tensione infatti : $R_L = 0 \rightarrow V_o = 0 \rightarrow V_f = 0$
e V_f e' riportata in serie a V_s

Amplificatore di TransConduttanza
Reazione Corrente - Serie



Preleviamo una corrente infatti : $R_L = \infty \rightarrow I_o = 0 \rightarrow V_f = 0$

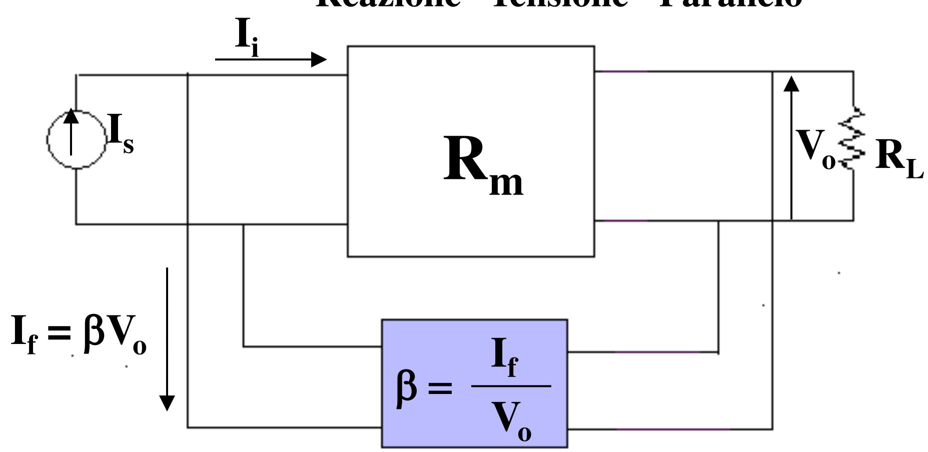
Amplificatore di corrente
Reazione Corrente - Parallelo



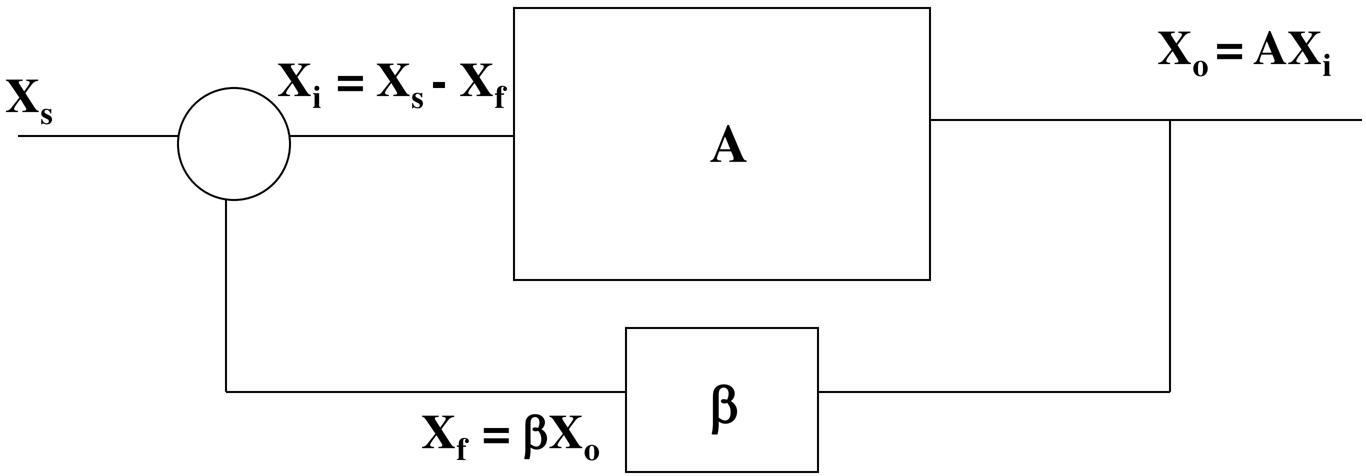
$R_L = \infty \rightarrow I_o = 0 \rightarrow I_f = 0$

e I_f e' riportata in parallelo a I_s

Amplificatore di TransResistenza
Reazione Tensione - Parallelo



$R_L = 0 \rightarrow V_o = 0 \rightarrow I_f = 0$



$\beta = X_f / X_o$ = fattore di trasmissione inverso

$A = X_o / X_i$ = guadagno dell'amplificatore di base (senza reazione, ad anello aperto, o.l.) $= \left.\dfrac{X_o}{X_s}\right|_{X_f = 0}$

$$\boxed{A_f = \frac{X_o}{X_s} = \frac{AX_i}{X_i + X_f} = \frac{AX_i}{X_i + \beta X_o} = \frac{AX_i}{X_i + \beta A X_i} = \frac{A}{1+\beta A}}$$

Gaudagno dell'amplificatore reazionato, ad anello chiuso

Se $|1+\beta A| > 1 \Longrightarrow A_f < A$ **Reazione Negativa**

Se $|1+\beta A| < 1 \Longrightarrow A_f > A$ **Reazione Positiva**

Dato che una reazione negativa riduce l'amplificazione di trasferimento, perche' la si usa?

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

1) Stabilizza il guadagno dell'amplificatore che utilizzando componenti attivi (BJT e FET) e' sempre funzione della temperatura, invecchiamento, sostituzione dei componenti

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{1+\beta A} + \frac{-\beta A}{(1+\beta A)^2} = \frac{1+\cancel{\beta A}-\cancel{\beta A}}{(1+\beta A)^2} = \frac{A}{(1+\beta A)^2 A} = \frac{A_f}{(1+\beta A)\,A}$$

Vale quindi la relazione:

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

In caso di reazione negativa la variazione relativa dell'amplificazione e' ridotta del fattore **$1+\beta A$** rispetto a quella che si avrebbe per l'amplificatore di partenza non reazionato.

$1+\beta A = D$ Fattore di stabilita'

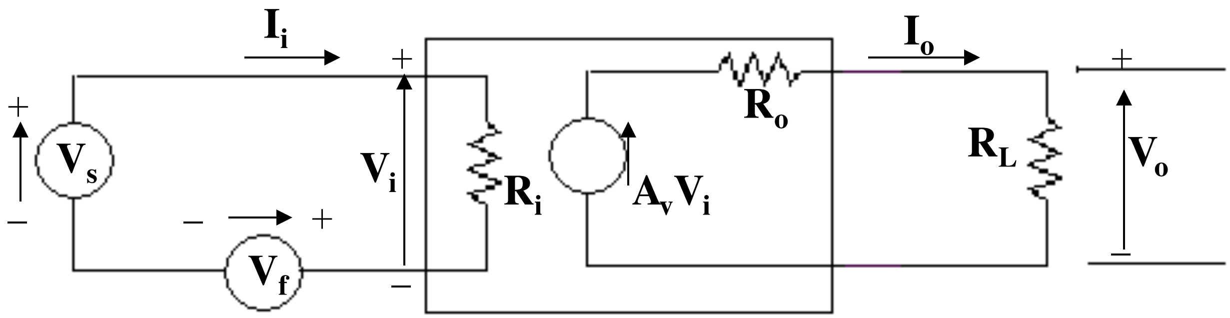
Quindi se vogliamo un amplificatore con G=10 molto stabile iniziamo con il progettare uno stadio con G=100. Introduciamo poi una reazione negativa che riduca l'amplificazione di un fattore 10=D. La stabilita' risulta migliorata dello stesso fattore. Questo sistema funziona perche' in genere la stabilita' dello stadio con G=100 non e' molto peggiore di quella dello stesso stadio con G=10.

Se $|\beta A| \gg 1$ $\quad A_f \sim \dfrac{A}{\beta A} = \dfrac{1}{\beta}$

Non dipende dall'amplificatore di base

Se la rete di reazione e' passiva l'amplificatore reazionato e' molto stabile

2) Migliora i valori delle impedenze di ingresso ed uscita: Vediamo il caso di un **amplificatore di tensione** e quindi di una reazione di tipo **Tensione -Serie**



$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i} = \frac{I_i R_i + V_f}{I_i} = \frac{I_i R_i + \beta V_o}{I_i}$$

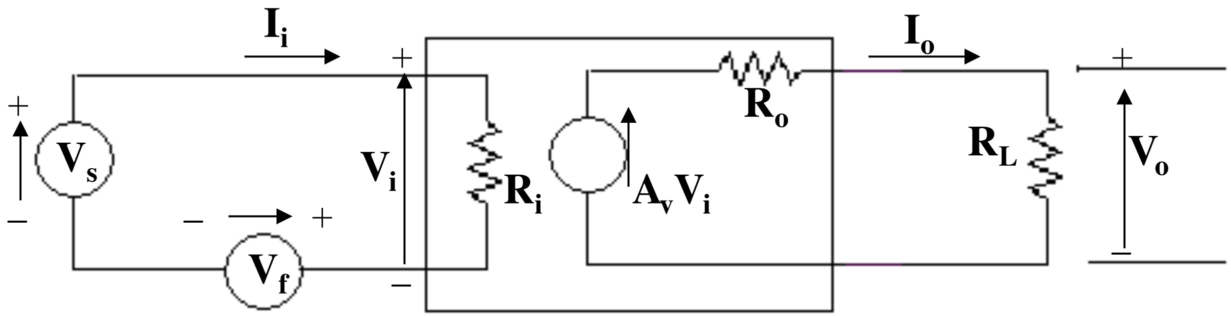
$$V_o = \frac{A_v V_i R_L}{R_L + R_o} = A_V V_i = A_V I_i R_i$$

Dove $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_v R_L}{R_L + R_o}$ e' l'amplificazione di tensione senza reazione ma tenendo conto del carico

Abbiamo quindi trovato che la resistenza di ingresso con reazione si esprime come:

$$\boxed{R_{if} = \frac{I_i R_i + \beta A_V I_i R_i}{I_i} = R_i\,(1 + \beta A_V)}$$

In caso di reazione negativa e mescolamento in serie, la resistenza di ingresso aumenta di valore avvicinando l'amplificatore al caso ideale



Per valutare l'effetto della reazione sulla resistenza di uscita si deve:

Eliminare la sorgente esterna di segnale **(V_s=0)** e supporre **$R_L = \infty$, applicare una tensione V ai morsetti di uscita e calcolare la corrente I alimentata da V. Allora avremo $R_{of} = V/I$**

$$I = \frac{V - A_v V_i}{R_o} = \frac{V + \beta A_v V}{R_o}$$

Infatti $V_i = -V_f = -\beta V$ avendo posto $V_s = 0$

Segue che $R_{of} = V/I$ si scrive come :

$$\boxed{R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta A_v}}$$

In caso di reazione negativa e prelievo di tensione , la resistenza di uscita diminuisce di valore avvicinando l'amplificatore al caso ideale

3) Migliora la risposta in frequenza dell'amplificatore.

Abbiamo visto che la risposta alle basse ed alte frequenze di un amplificatore non reazionato si puo' scrivere come:

$$\boxed{A_{vLF} = \frac{A_{vMB}}{1 - j(f_{LF} / f)}}$$

$$\boxed{A_{vHF} = \frac{A_{vMB}}{1 + j(f / f_{HF})}}$$

Se si applica l'equazione che esprime l'effetto della reazione $A_f = \dfrac{A}{1+\beta A}$ alle alte frequenze si ottiene

$$A_f = \frac{A_{vMB} / [1 + j(f / f_{HF})]}{1 + \beta A_{vMB} / [1 + j(f / f_{HF})]} = \frac{A_{vMB}}{1 + \beta A_{vMB} + j(f / f_{HF})}$$

ho moltiplicato numeratore e denominatore per $1 + j(f / f_{HF})$

Dividendo numeratore e denominatore per il fattore $1 + \beta A_{vMB}$ l'equazione assume la forma:

$$\boxed{A_f = \frac{A_{vMBf}}{1 + j(f / f_{HFf})}}$$

dove

$$A_{vMBf} = \frac{A_{vMB}}{1+ \beta A_{vMB}}$$

$$f_{HFf} = f_{HF} (1+ \beta A_{vMB})$$

$$\boxed{A_f = \frac{A_{vMBf}}{1 + j(f / f_{HFf})}}$$

$$A_{vMBf} = \frac{A_{vMB}}{1+ \beta A_{vMB}}$$

$$f_{HFf} = f_{HF}\,(1+ \beta A_{vMB})$$

Con una reazione negativa l'amplificazione a centro banda dimiinuisce del fattore $1+ \beta A_{vMB}$ mentre la frequenza di taglio superiore a 3 db aumenta dello stesso fattore

Se si analizza l'effetto dello reazione nella regione delle basse frequenze si trova per l'amplificazione con reazione una relazione analoga

$$\boxed{A_f = \frac{A_{vMBf}}{1 + j(f_{LFf} / f)}}$$

$$A_{vMBf} = \frac{A_{vMB}}{1+ \beta A_{vMB}}$$

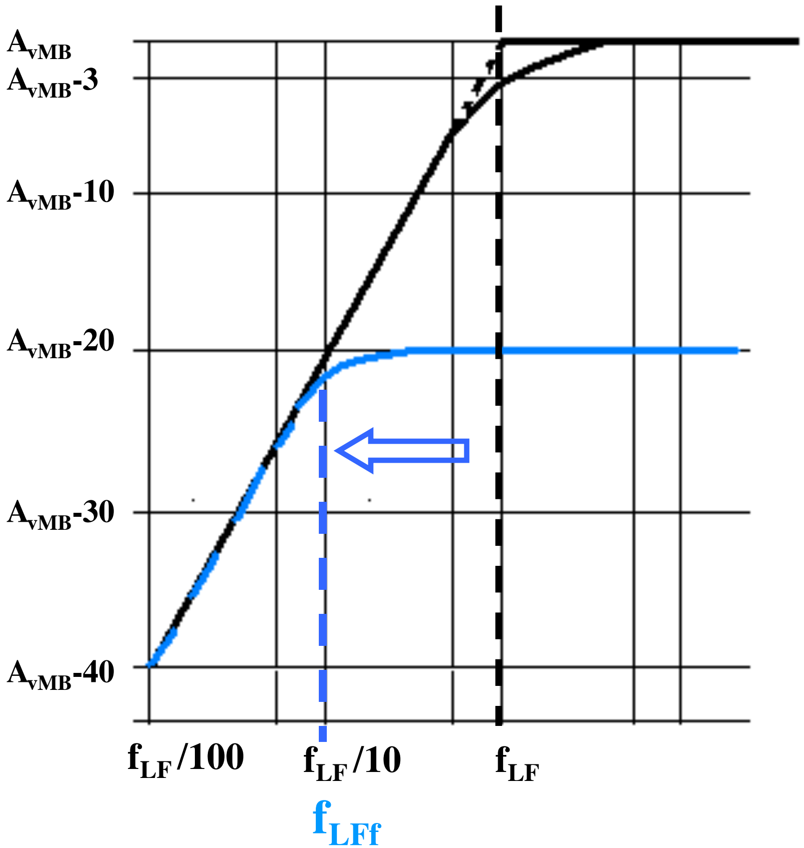
$$f_{LFf} = f_{LF} \,/\, (1+ \beta A_{vMB})$$

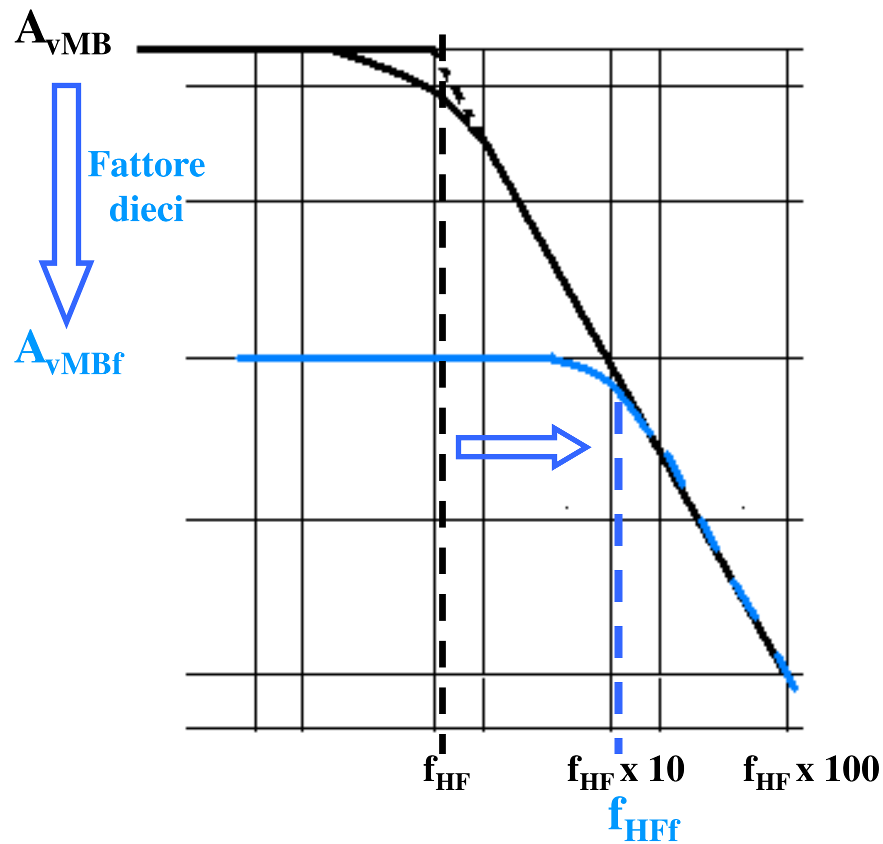
La frequenza di taglio inferiore a 3db diminuisce del fattore $1+ \beta A_{vMB}$

Nel caso si applichino -20 db di reazione :

$$A \rightarrow A(db) = 20 \, Log_{10} A$$

$$A_{vMBf} = \frac{A_{vMB}}{1+\beta A_{vMB}} = \frac{A_{vMB}}{10} \qquad \text{-20 db di reazione}$$





$$f_{LFf} = f_{LF} / (1+ \beta A_{vMB})$$

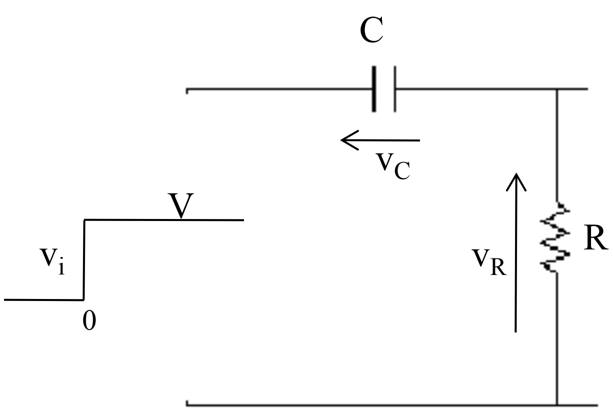
$$f_{HFf} = f_{HF} (1+ \beta A_{vMB})$$

Siamo partiti da un amplificatore con guadagno a centro banda pari a $\mathbf{A_{vMB}}$ e con frequenze di taglio a -3db $\mathbf{f_{LF}}$ e $\mathbf{f_{HF}}$.

Applicando una reazione negativa di -20db otteniamo un amplificatore con amplificazione a centro banda ridotta di un ordine di grandezza ma con larghezza di banda ampliata dello stesso fattore ($f_{HF} >> f_{LF}$).

Il prodotto **Guadagno x Larghezza di Banda** si conserva.

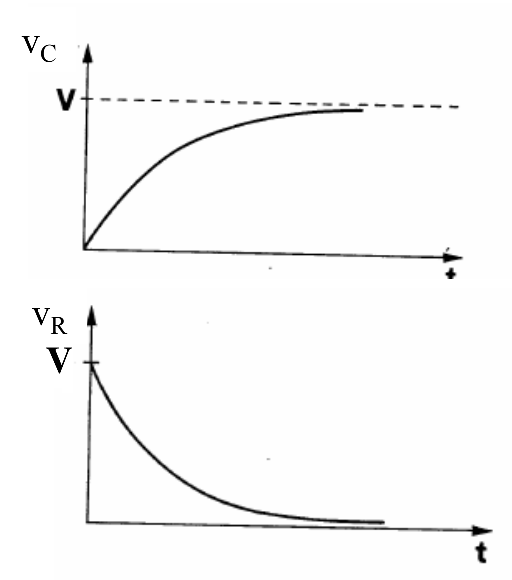
Lo studio del gradino di tensione può anche essere utilizzato per comprendere la risposta di un amplificatore nella regione delle basse frequenze. In questo caso utilizziamo come modello dello stadio di ingresso un semplice passa - alto



$$v_i = v_C + v_R$$

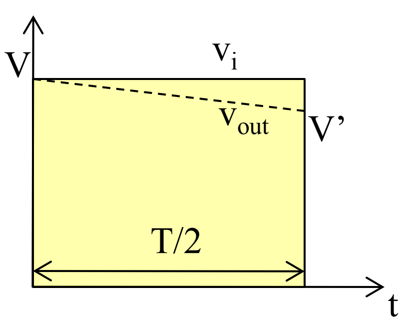
$$v_C = V - V \exp(-t / RC)$$

$$v_R = V \exp(-t / RC) = v_{out}$$



Nel caso la durata del segnale in ingresso sia molto minore di RC si può espandere in serie l'esponenziale ($e^x = 1 + x + x^2/2! + x^3/3!$) e considerare solo i primi termini

$$v_{out} = V\,(1 - t/RC)$$



Per un onda quadra con semi periodo T/2 l' abbassamento percentuale di v_{out} in ciascun semiperiodo sarà:

$$\frac{v_{in} - v_{out}}{v_{in}} = \frac{V - V\,(1 - T/2RC)}{V} = \frac{T}{2RC} = \frac{\pi f_{LF}}{f} \qquad f_{LF} = 1/2\pi RC$$

Abbassamento < 0.1 → $f_{LF} < 0.1 f / 3$ → nel caso di un onda quadra di frequenza 50Hz, avere meno del 10% di riduzione implica una frequenza di taglio inferiore minore di 1.6Hz