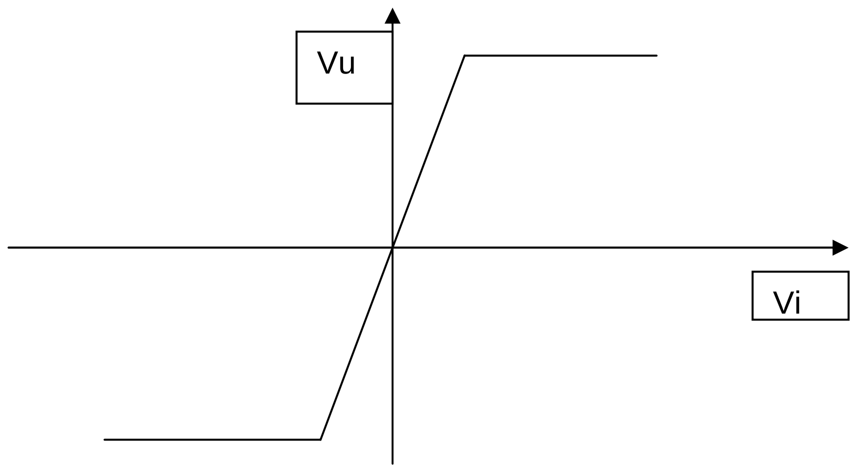
AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

I costruttori normalmente forniscono nei loro data sheet le caratteristiche del componente

Non tutti i costruttori danno le caratteristiche misurate nelle stesse condizioni

Il grafico relativo alla caratteristica di trasferimento di un A.O. è quello riportato in figura



le grandezze relative all'asse delle ascisse sono diverse da quelle relative alle ordinate (in genere si hanno volt nelle ordinate e mV o addirittura μV per le ascisse)

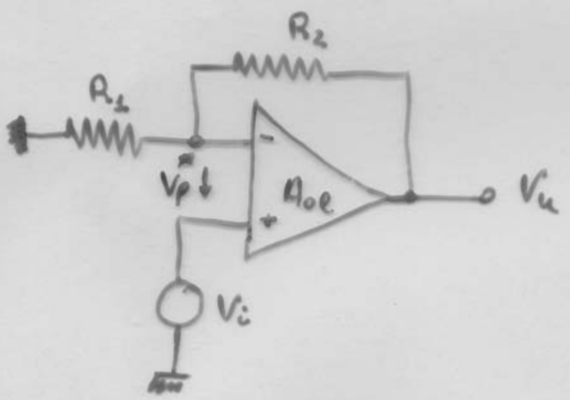
$$A_{ol} = \frac{\Delta V_u}{\Delta V_i}$$

anche per segnali di tipo continuo

curva di trasferimento è relativa ad una situazione a catena aperta

L' A.O. è essenzialmente un amplificatore differenziale

NON INV



$$V_u = A_{ol}\left(V_i - V_f\right)$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_f = V_u \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \beta V_u$$

$$V_u = A_{ol}\left(V_i - \beta V_u\right) = A_{ol} V_i - \beta A_{ol} V_u$$

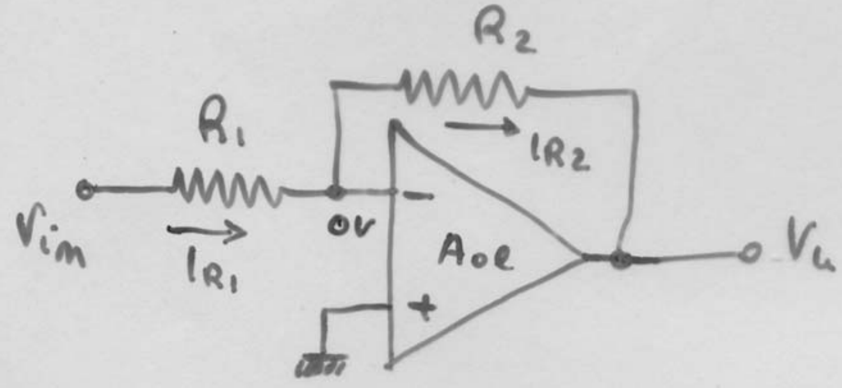
$$V_u\left(1 + \beta A_{ol}\right) = A_{ol} V_i$$

$$V_u = V_i \frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}} \Rightarrow \frac{V_u}{V_i} = \frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}}$$

$A_{ol} \Rightarrow \infty$ $\quad \beta =$ finito $\quad \beta A_{ol} >> 1$

$$\frac{V_u}{V_i} \simeq \frac{A_{ol}}{\beta A_{ol}} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

INV

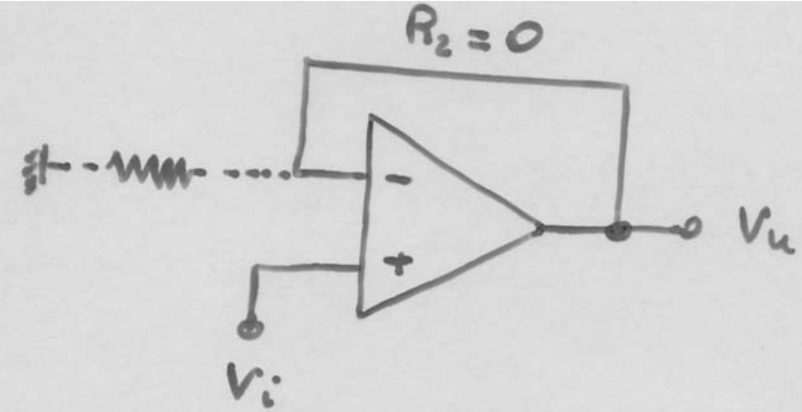


$$I_{R1} = I_{R2} \qquad I_{ing.} = 0$$

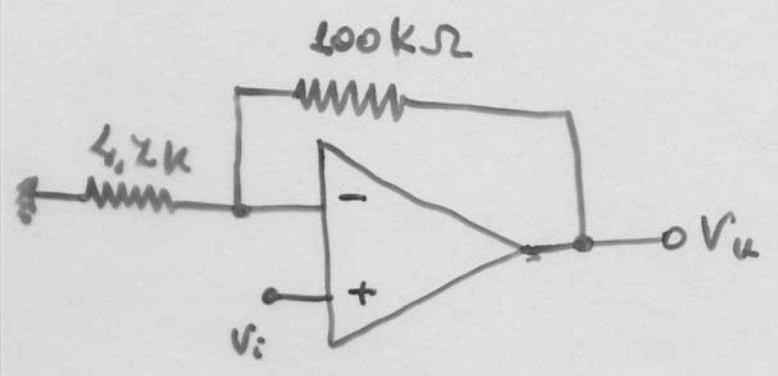
$$I_{R1} = \frac{V_i}{R_1} \qquad I_{R2} = -\frac{V_u}{R_2}$$

$$-\frac{V_u}{R_2} = \frac{V_i}{R_1} \Rightarrow \frac{V_u}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

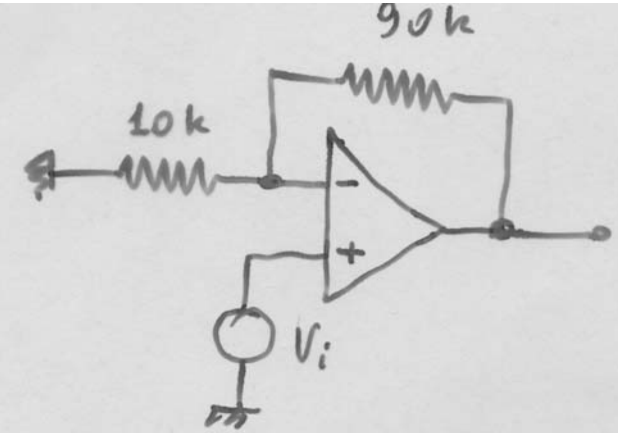
$$A = \frac{V_u}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



$$\frac{V_u}{V_i} = 1 + \frac{0}{R_{in}} \simeq 1$$

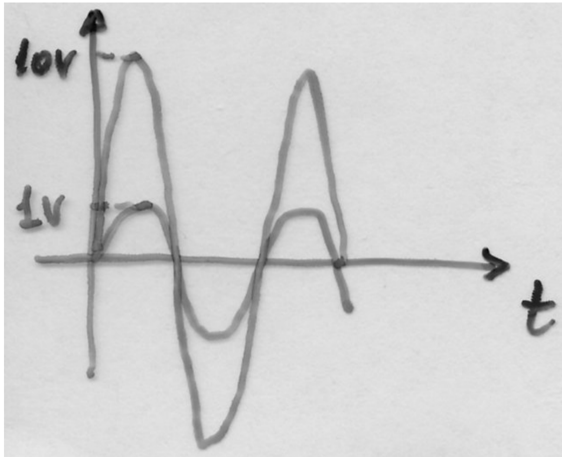


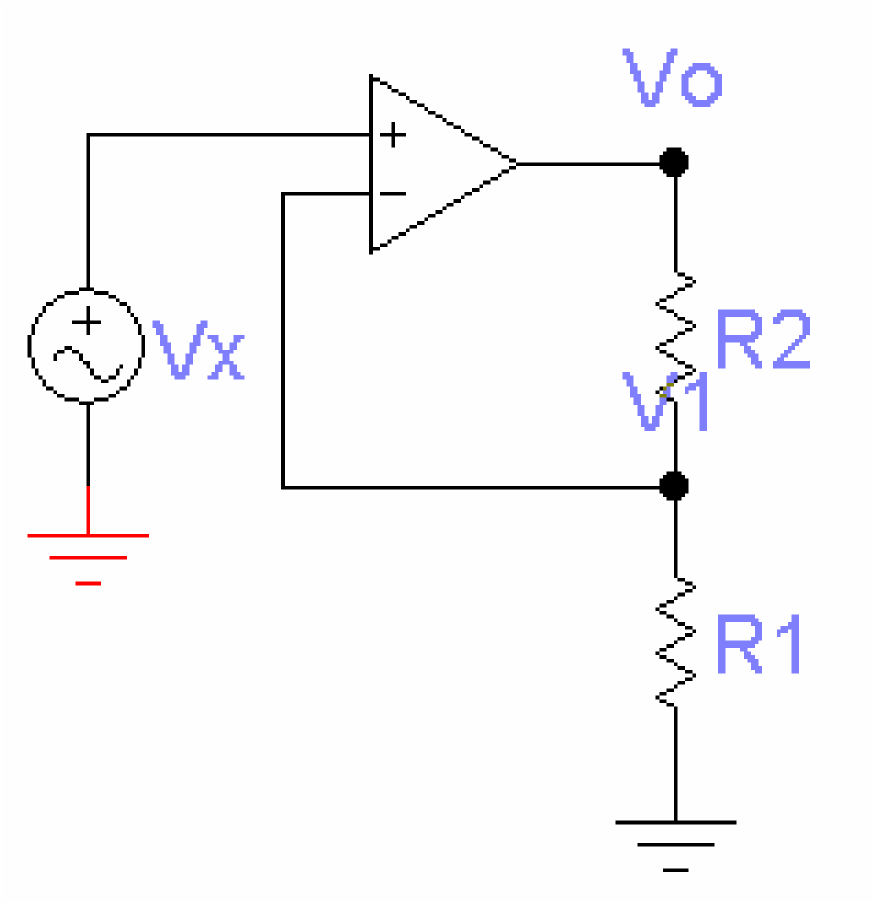
$$V_u = A\, V_i = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{100k}{4{,}2k} = 22{,}3$$



$$V_u = \left(1 + \frac{90}{10}\right) V_i =$$

$$= 10 V_i$$





$$V_x = i_x R_{ID} + V_1$$

$$i_x = \frac{V_x - V_1}{R_{ID}} \qquad V_1 = i_1 R_1 \simeq i_2 R_2$$

$$V_1 = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2} \simeq \beta V_o i_1$$

$$V_o = A_{ol} V_{iD} = A_{ol} \left(V_x - V_1 \right)$$

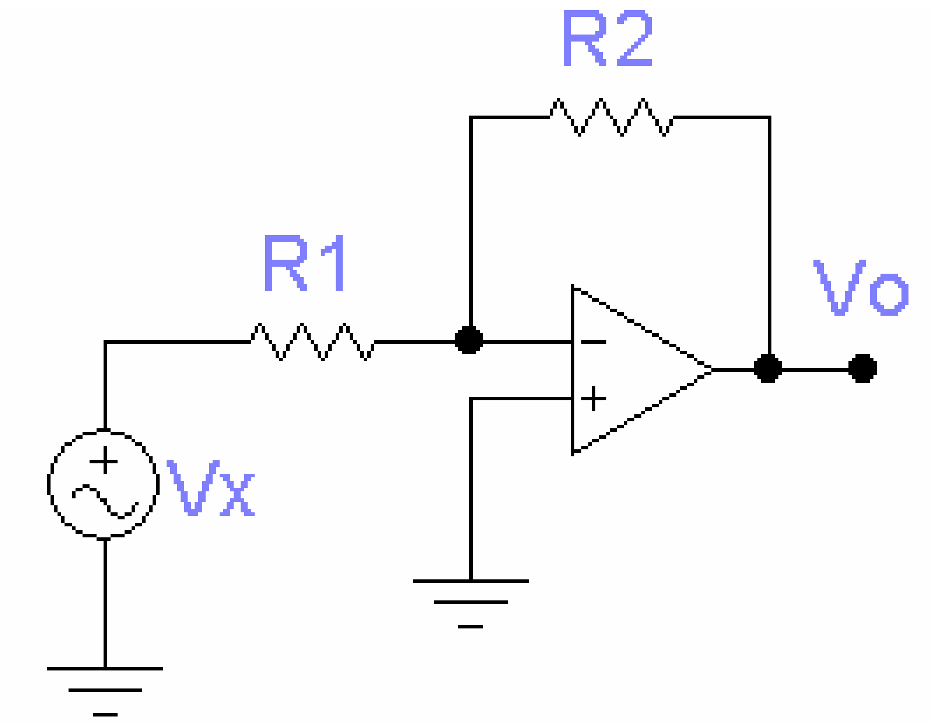
$$V_1 = \beta A_{ol} \left(V_x - V_1 \right)$$

$$V_1\left(1+\beta A_{ol}\right)=\beta A_{ol}V_x$$

$$V_1=\frac{\beta A_{ol}}{1+\beta A_{ol}}V_x$$

$$i_x=\frac{V_x-\frac{\beta A_{ol}}{1+\beta A_{ol}}V_x}{R_{ID}}=\frac{V_x}{R_{ID}\left(\left(1+\beta A_{ol}\right)\right)}$$

$$\frac{V_x}{i_x} = R_{IN} = R_{ID}\left(1 + \beta A_{ol}\right)$$



$$R_{IN} \simeq R_1$$

Consideriamo il comportamento di un amplificatore operazionale nei confronti della frequenza del segnale da amplificare

Analizziamo la funzione di trasferimento nel caso di un solo polo

$$A(f) = \frac{A_o}{1 + j\dfrac{f}{f_p}}$$

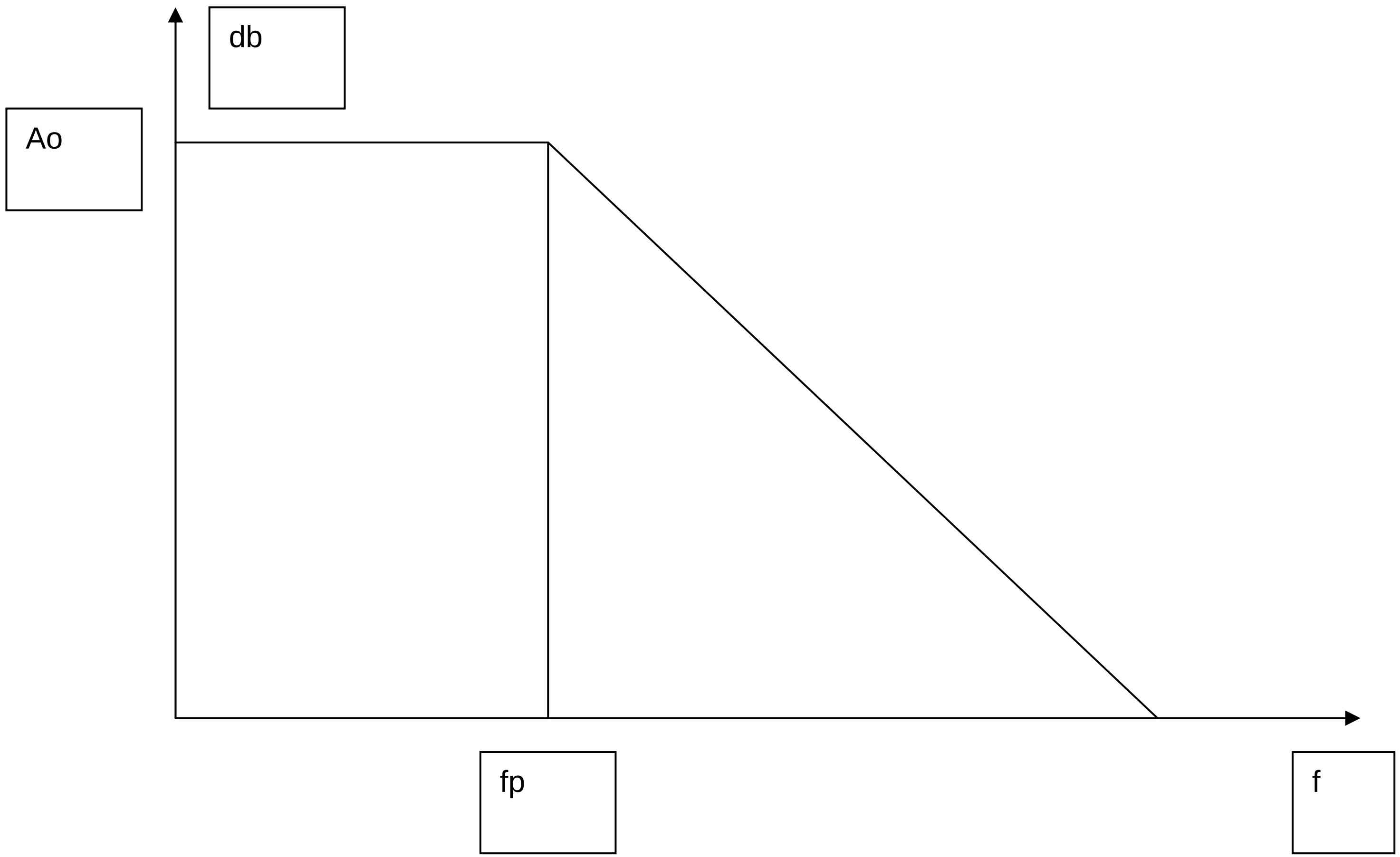
modulo

$$\left|A(f)\right| = \frac{A_o}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{f}{f_p}\right)^2}}$$

$$\left|A(f)\right| db = 20\log A_o - 20\log\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_p}\right)^2}$$

$$20\log A_o \qquad \text{se} \quad f \ll f_p$$

$$20\log A_o - 20\log\frac{f}{f_p} \qquad \text{se} \quad f \gg f_p$$



$$\theta = \theta_N - \theta_D \qquad \theta = -arctg\frac{f}{f_p}$$

$$f \ll f_p - - - - - \theta \to 0^\circ$$

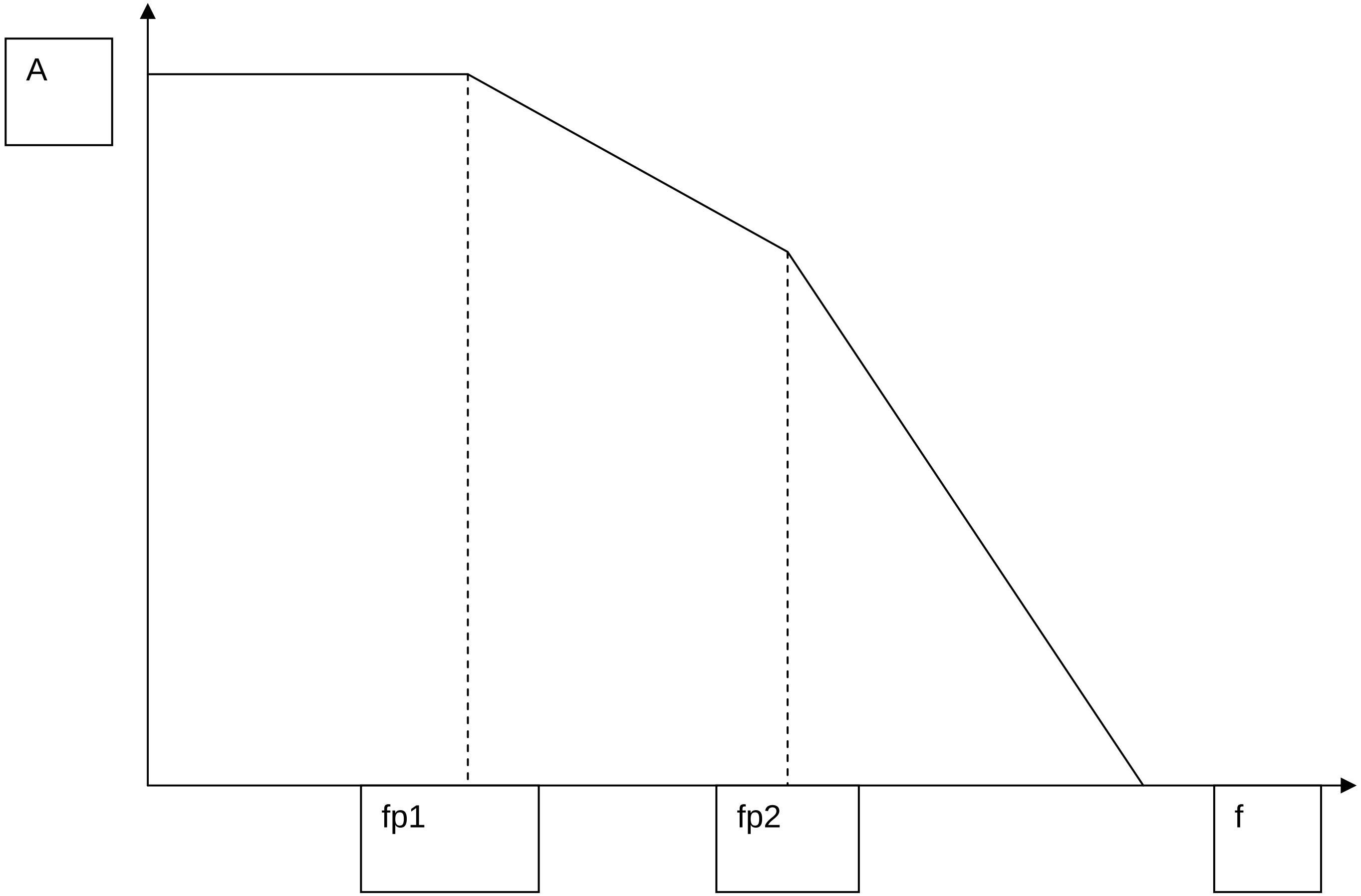
$$f = f_p - - - - - \theta \to -arctg1 = -45^\circ$$

$$f \ll f_p - - - - - \theta \to -arctg\infty = -90^\circ$$

$$A(f) = \frac{A_o}{\left(1 + j\frac{f}{f_{p1}}\right)\left(1 + j\frac{f}{f_{p2}}\right)}$$

$$\left|A(f)\right| = \frac{A_o}{\sqrt{\left(1+\left(\frac{f}{f_{p1}}\right)^2\right)\left(1+\left(\frac{f}{f_{p2}}\right)^2\right)}}$$

$$\left|A(f)\right| db = 20\log A_o - 20\log\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{p1}}\right)^2} - 20\log\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{p2}}\right)^2}$$



$$\theta = -arctg\frac{f}{f_{p1}} - arctg\frac{f}{f_{p2}}$$

μA702	μA709	μA1530
Fp1=1Mhz	Fp1=200Khz	Fp1=1Mhz
Fp2=4Mhz	Fp2=1Mhz	Fp2=6Mhz
Fp3=40Mhz	Fp3=8Mhz	Fp1=22Mhz

Un esempio di A.O. compensato, e quindi con polo dominante, è il μA741 con polo a 5 Hz.

La conoscenza dei grafici relativi alla risposta in frequenza (modulo e fase) è di fondamentale importanza per la realizzazione di amplificatori di segnali stabili.

Il segnale che attraversa la catena **amplificatore+rete di reazione** deve risultare, per la stabilità del circuito, con guadagno minore di 1 quando la fase dello stesso segnale risulta sfasata di 360° o in fase (essendo il segnale periodico)

$$\beta A = 1 <-> sfasamento = 360°$$

Nella realtà costruttiva si preferisce attribuire un certo margine di stabilità; di norma si utilizza un margine di fase corrispondente a 45°

Analizziamo gli effetti della reazione negativa sull'andamento del guadagno e della banda passante

$$A(jf) = \frac{A_o}{1 + j\frac{f}{f_p}}$$

funzione di trasferimento ad un solo polo

$$\left|A(f)\right| = \frac{A_o}{\sqrt{1+\frac{f^2}{f_p^2}}}$$

per la frequenza

$$f = f_p$$

$$\left|A\left(f_p\right)\right| = \frac{A_o}{\sqrt{2}}$$

cui corrisponde una attenuazione di 3 dB

Per frequenze superiori a quella di taglio possiamo trascurare l’unità e quindi avremo

$$\left|A(jf)\right| = A_o \frac{f_p}{f}$$

Ci sarà un valore di frequenza che corrisponde all’attraversamento dell’asse delle ascisse, corrispondente ad un guadagno unitario, cioè a zero db.

$$1 = A_o \frac{f_p}{f_T}$$

$$A_o f_p = f_T$$

questo valore prende il nome di "**prodotto guadagno-larghezza di banda**" dell'amplificatore

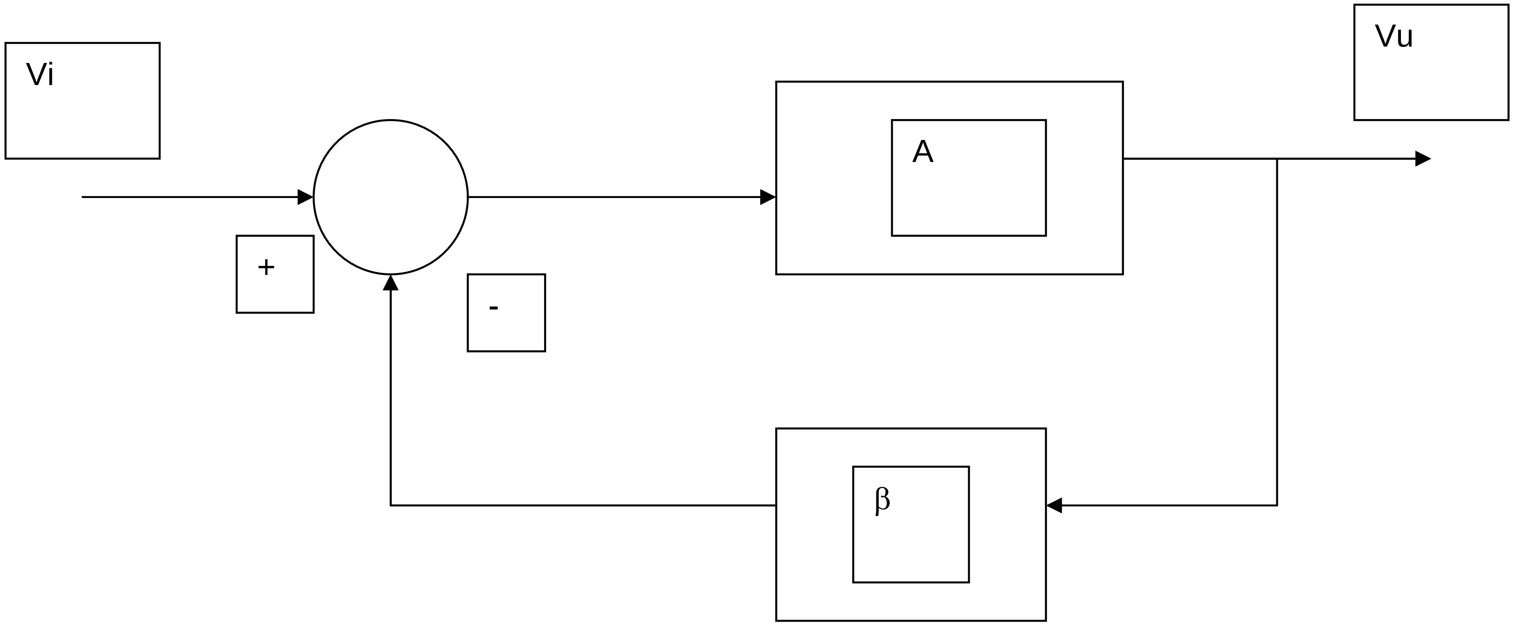
Quanto visto è relativo al comportamento in frequenza dell'A.O. non inserito in alcun circuito

Osserviamo allora cosa succede se inseriamo il nostro A.O. in una rete ad anello chiuso

L’espressione del guadagno ad anello chiuso dell’amplificatore risulta del tipo

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

dove A è il guadagno dell’A.O. e β è la funzione di trasferimento della rete di reazione



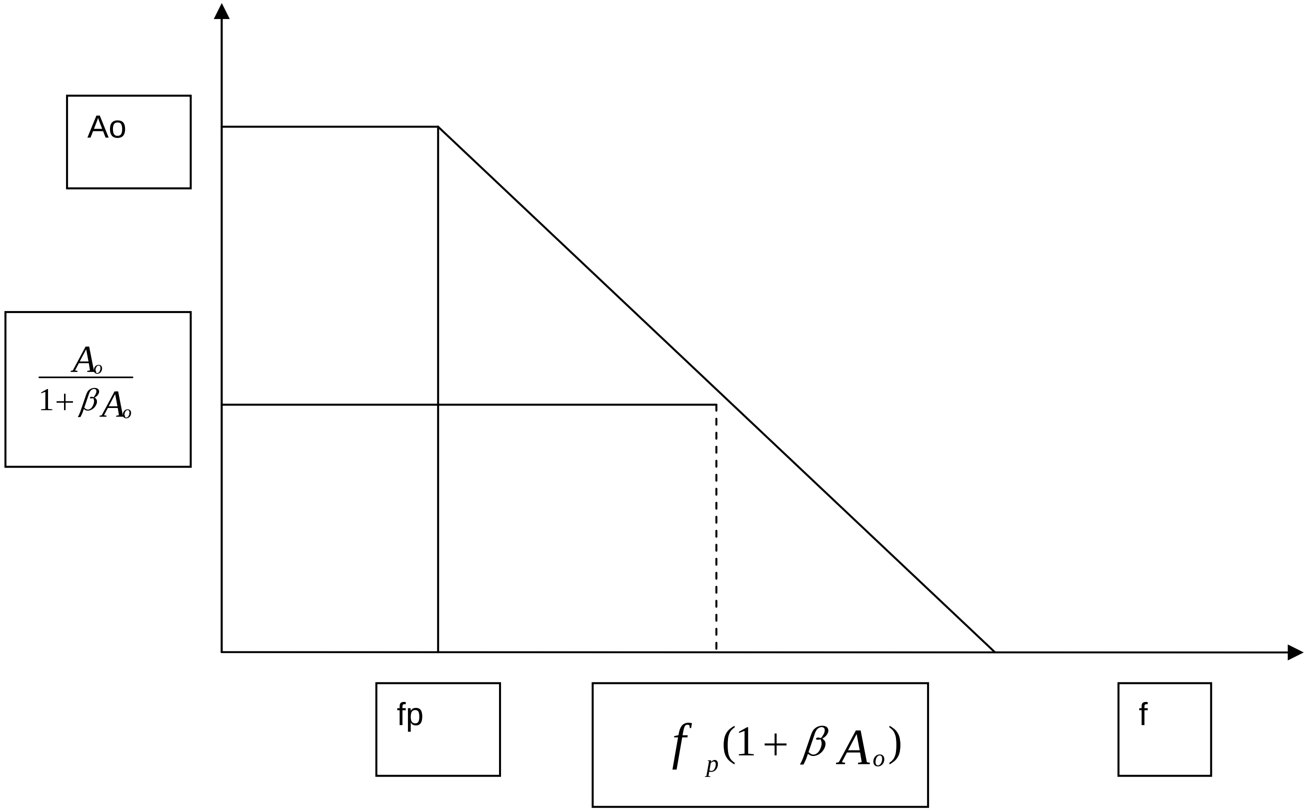
In questo caso reale non possiamo considerare costante l’espressione del guadagno dell’A.O. perché dipende dalla frequenza. Per **analizzare la risposta in frequenza del guadagno dell’amplificatore**, sostituiamo l’espressione del guadagno dell’A.O. funzione della frequenza

$$A_v = \frac{A(f)}{1+\beta A(f)} = \frac{\dfrac{A_o}{1+j\dfrac{f}{f_p}}}{1+\dfrac{A_o}{1+j\dfrac{f}{f_p}}\beta} = \frac{A_o f_p}{jf + f_p(1+A_o\beta)}$$

ponendo $$A_v(o) = \frac{A_o}{1 + A_o\beta}$$

$$f_H = f_p(1 + A_o\beta)$$

$$A_v(f) = \frac{\dfrac{A_o}{(1 + A_o\beta)}}{j\dfrac{f}{f_\beta(1 + A_o\beta)} + 1} = \frac{A_v(o)}{j\dfrac{f}{f_H} + 1}$$



L’effetto della reazione, come si rileva dall’equazione, agisce in modo favorevole sulla larghezza di banda, infatti la frequenza del polo è passata da fp ad fp(1+βA).

Il guadagno, al contrario, a catena chiusa risulta ridotto

Un fenomeno di notevole rilievo è la instabilità

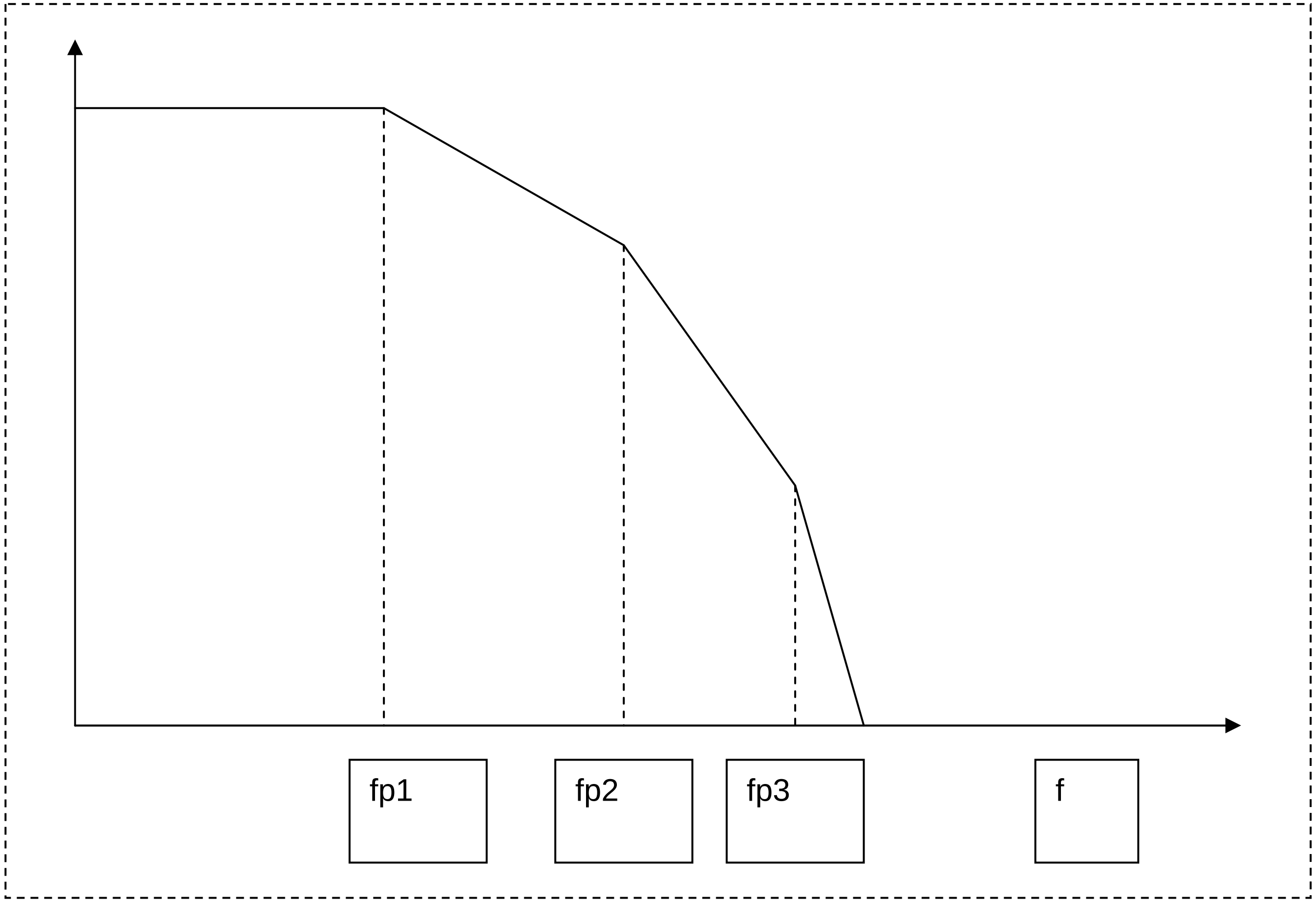
Possiamo quindi dire che un amplificatore con reazione negativa è un amplificatore stabile

Se il segnale presente in uscita riportato verso l'ingresso risulta in fase si ha allora una reazione positiva

Guadagno di anello = β Ao

criteri relativi alla valutazione della stabilità di un amplificatore

AO con tre poli



si evidenziano tre frequenze critiche fp1,fp2,fp3

Per analizzare la stabilità di un amplificatore a catena chiusa occorre considerare il margine di fase

Supponiamo che la curva a catena chiusa incontri la curva a catena aperta nella zona relativa alla pendenza a 20 db per decade

$$\theta = -arctg\frac{f_x}{f_1} - arctg\frac{f_x}{f_2} - arctg\frac{f_x}{f_3}$$

attribuiamo dei valori numerici alle frequenze dei poli

$$f_1 = 1500Hz$$

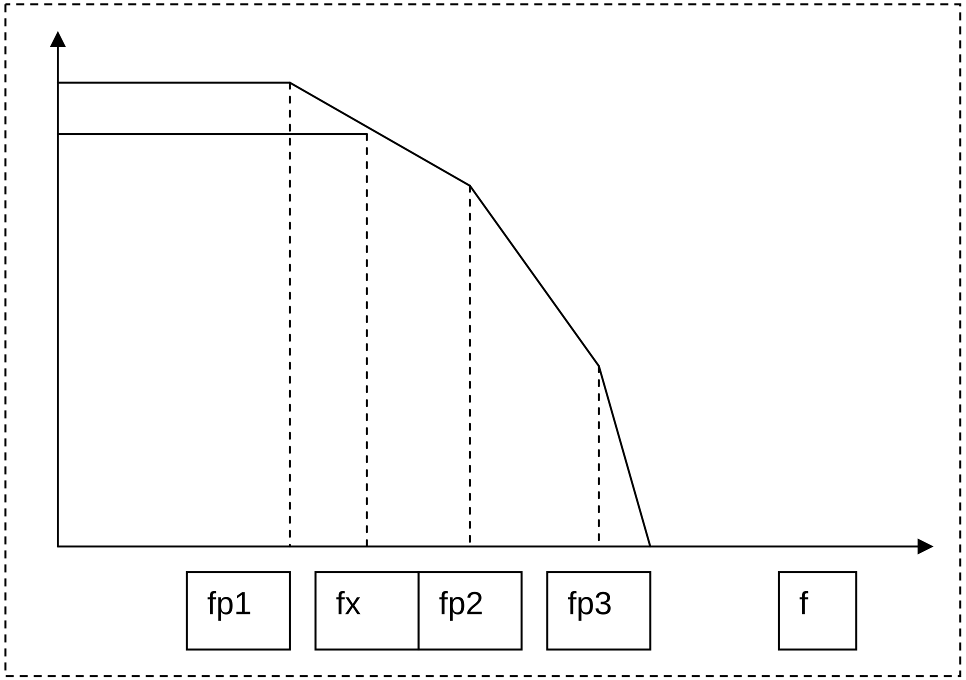
$$f_2 = 15000Hz$$

$$f_3 = 150000Hz$$

Per un valore di fx = 6000 Hz (tratto a 20 db/decade) avremo

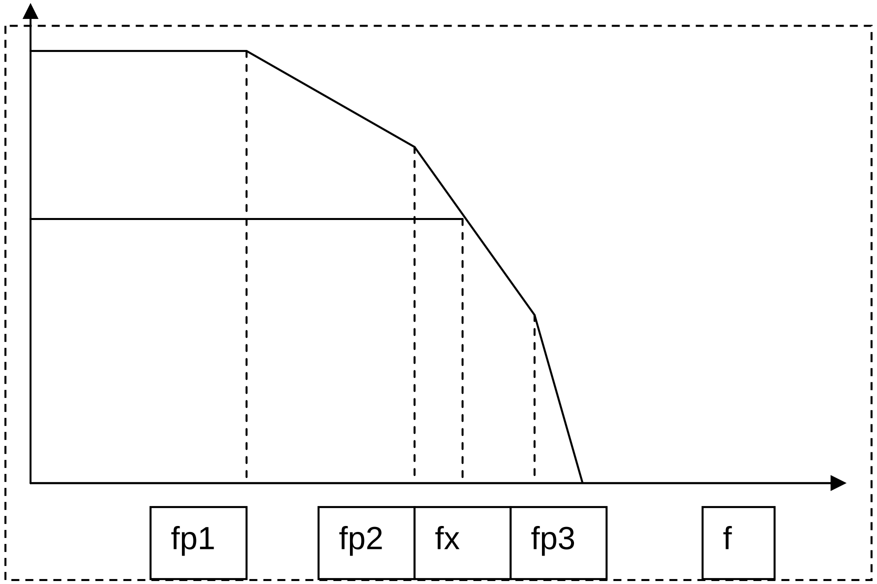
$$\theta = -arctg\frac{6}{1,5} - arctg\frac{6}{15} - arctg\frac{6}{150} =$$

$$= -75,9° - 21,8° - 2,29° = -99,9°$$



$$\theta_p = 180° - 99,9° = 80°$$

il valore, come si vede, è superiore a 45° e positivo; ne risulta perciò un amplificatore stabile a tutte le frequenze curva a **catena chiusa che interseca quella a catena aperta in corrispondenza della pendenza di 40 db per decade**



Per un valore di fx = 40 KHz (tratto a 40 db/decade) avremo

$$\theta = -arctg\,\frac{40}{1,5} - arctg\,\frac{40}{15} - arctg\,\frac{40}{150} =$$

$$= -87,8° - 69,4° - 14,9° = -172,1°$$

$$\theta_p = 180° - 172,1° = 7,9°$$

il valore, come si vede, è ancora positivo; ne risulta perciò un amplificatore stabile a tutte le frequenze, ma con un margine molto ridotto.

curva a **catena chiusa che interseca quella a catena aperta in corrispondenza della pendenza di 60 db per decade**

Per un valore di fx = 300 KHz (tratto a 60 db/decade) avremo

$$\theta = -arctg\frac{300}{1,5} - arctg\frac{300}{15} - arctg\frac{300}{150} =$$

$$= -89,7° - 87,1° - 63,4° = -240°$$

$$\theta_p = 180° - 240° = -60°$$

il valore adesso risulta negativo; ci sarà, quindi, un valore di frequenza in corrispondenza della quale la fase risulterà nulla; avremo quindi un amplificatore non stabile.