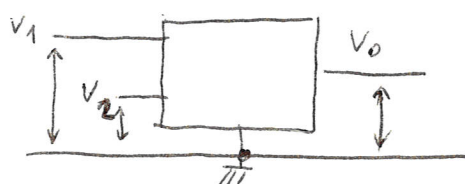


Lezione 10: Amplificatore operazionale

- L'amplificatore operazionale (OpAmp) è un particolare tipo di amplificatore a due ingressi, che amplifica (molto) solo la differenza tra i due segnali

1. Amplificatore a due ingressi:



$$v_0 = A_1 v_1 + A_2 v_2$$

Amplificatore differenziale: $A_1 \approx -A_2$

Usiamo $v_d = v_1 - v_2 \rightarrow$ tensione differenza

$v_c = (v_1 + v_2)/2 \rightarrow$ modo comune

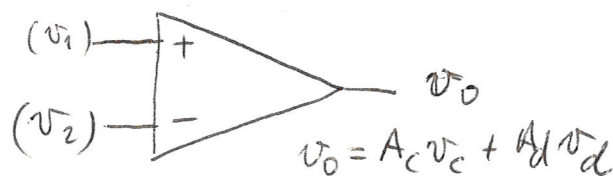
$$v_1 = v_c + v_d/2 \quad v_2 = v_c - v_d/2$$

Sostituendo $\rightarrow v_0 = (A_1 + A_2) v_c + \frac{(A_1 - A_2)}{2} v_d \equiv A_c v_c + A_d v_d$

$A_c = A_1 + A_2 =$ amplificazione di modo comune (piccola)

$A_d = (A_1 - A_2)/2 =$ amplificazione di modo differenziale (grande)

Rappresentazione circuitale



Raccogliendo:

$$v_0 = A_d \left(v_d + \underbrace{\left(\frac{A_c}{A_d} \right)}_{\rho} v_c \right) = A_d \left(v_d + \frac{v_c}{\rho} \right)$$

$\rho = \text{CMRR (Common mode rejection ratio)}$

Componenti commerciali: $A_d \sim 10^5 - 10^6$
 $\rho \sim 100 \text{ dB } (= 10^5)$

2. OpAmp

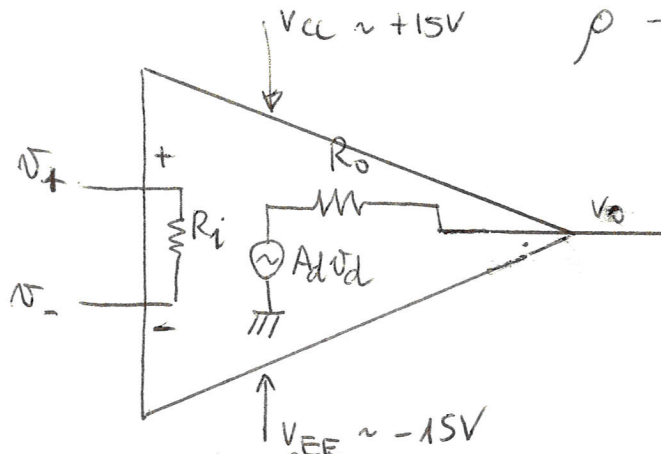
Nell' opAmp ideale

$$A_d \rightarrow \infty$$

$$R_i \rightarrow \infty$$

$$\rho \rightarrow \infty$$

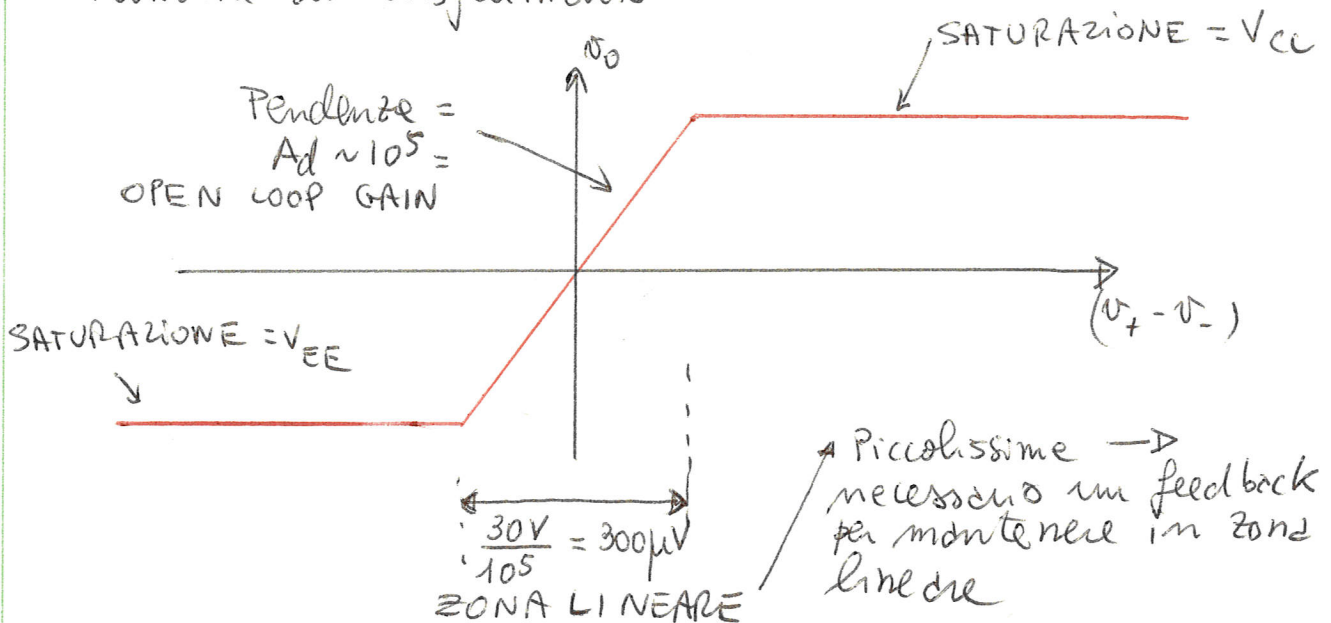
$$R_o \rightarrow 0$$



$$v_o = A_d (v_+ - v_-) + \frac{A_d (v_+ + v_-)}{2\rho}$$

si trascura.

Funzione di trasferimento



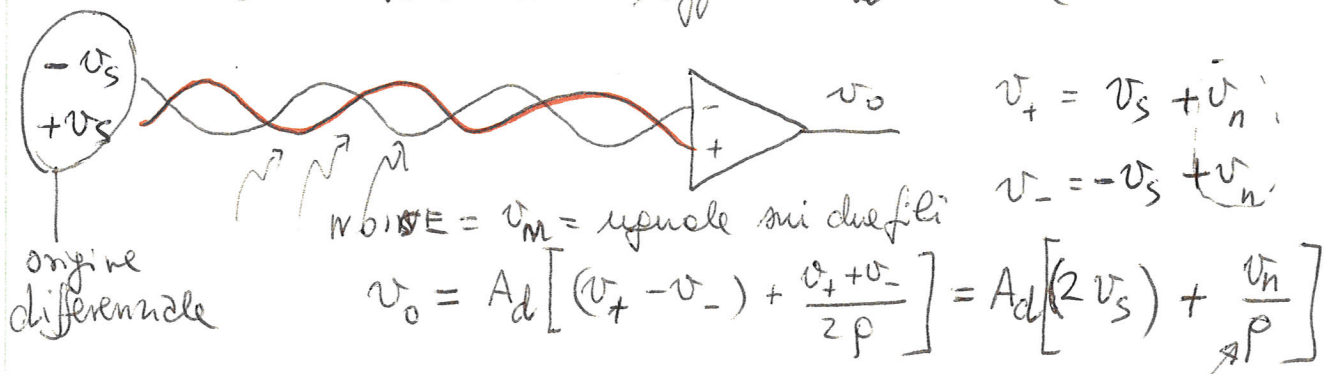
Applicazioni:

1. Sistemi lineari: feedback negativo per mantenere $v_+ \approx v_-$
amplificatore, sommatore, derivatore, integratore
2. Sistemi non lineari a soglia: usato tra le due zone di saturazione $v_+ > v_-$ o $v_+ < v_-$
discriminatore, trigger di Schmidt, multivibatore
3. Oscillatori: feedback positivo per creare sistemi instabili
oscillatori a spostamento, a punto di Wien

3. Applicazioni

a- Amplificatore differenziale

Linea di trasmissione soggetta a rumore



Linee di trasmissione "twisted cable" = doppino telefonico. Rumore Spresso

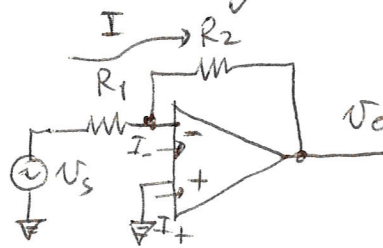
Altro metodo: coassiale

schermaggio con gabbia di Faraday: costoso e non utilizzabile su grandi distanze.

- Se $A_d \sim 10^5 = 100 \text{ V/mV}$ qualunque piccolo segnale parte in saturazione \rightarrow Necessario Feedback negativo

b- Amplificatore invertente

- Effetto: se $v_o \uparrow$, la tensione $v_- \uparrow$ e tende a far scendere $v_o \downarrow$
 \rightarrow feedback negativo



- Analisi: 1. Per un opAmp ideale $R_i = \infty \rightarrow$ non entra corrente negli ingressi $I_- = I_+ = 0$
- 2. La corrente della sorgente v_s passa da R_1 e poi da R_2 ed entra (o esce) dall'uscita v_o

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{v_s - v_-}{R_1} &= \frac{v_- - v_o}{R_2} \\ v_o &= A_d (v_+ - v_-) = -A_d v_- \end{aligned} \right.$$

Assunto: $R_i = \infty$
 $R_o = 0$
 $\rho = \infty$

Soluzione: $v_- = -\frac{v_o}{A_d} \rightarrow -v_s \frac{R_2}{R_1} = v_o - v_- \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

$$v_o \left[1 + \frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right] = -\frac{R_2}{R_1} v_s$$

Quando $A_d \rightarrow \infty \rightarrow \begin{cases} v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_s \\ v_- = 0 \end{cases}$

METODO DEL CORTOCIRCUITO VIRTUALE

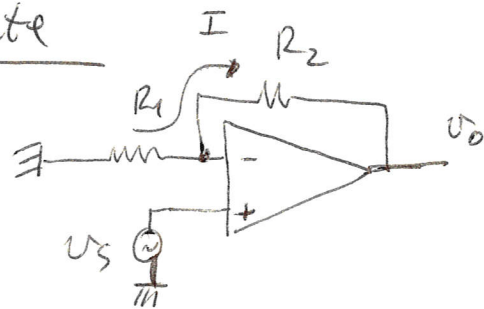
- Quando c'è feedback negativo, l'opamp regolerà la propria uscita v_o in modo da mantenere sempre $v_+ = v_-$
- I circuiti si risolvono imponendo $v_+ = v_-$
 $I_+ = I_- = 0$, Funziona se $A_d \rightarrow \infty$ per le frequenze di interesse.

c) Amplificatore Non invertente

$$v_+ = v_- = v_s$$

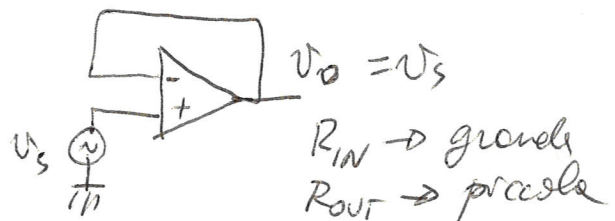
$$\frac{0 - v_s}{R_1} = \frac{v_s - v_o}{R_2} = I$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_s \rightarrow \text{amplificatore non invertente.}$$



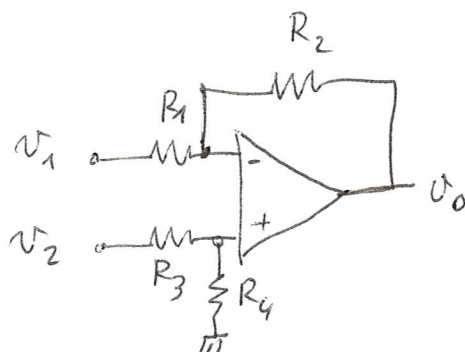
Altro metodo: dal partitore $R_1/R_2 \rightarrow v_- = v_o \frac{1}{1 + R_2/R_1} = v_s$

d) Voltage follower $R_1 \rightarrow \infty$
 $R_2 \rightarrow 0$



e) Amplificatore differenziale (con guadagno controllato)

Sovrapposizione di inverteente
+ non-inverteente:



$$v_o = -v_1 \frac{R_2}{R_1} + v_2 \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)} \rightarrow \text{guadagno NON-INV}$$

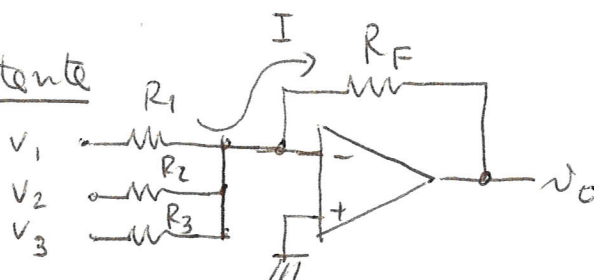
(se $v_2 = 0$) (se $v_1 = 0$) partitore R_3/R_4 .

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} \left(v_2 \frac{1 + R_1/R_2}{1 + R_3/R_4} - v_1 \right) = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

se $R_1/R_2 = R_3/R_4$

f) Sommatore invertente

$$v_- = v_+ = 0$$



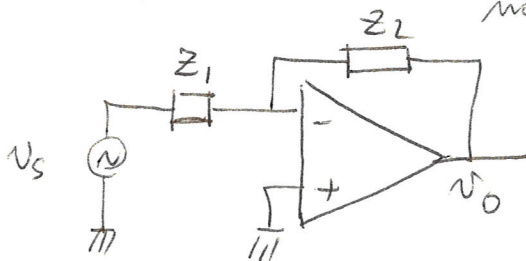
$$I = I_1 + I_2 + I_3 =$$

$$= \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} = - \frac{v_o}{R_F}$$

$$\rightarrow v_o = - \left(\frac{R_F}{R_1} v_1 + \frac{R_F}{R_2} v_2 + \frac{R_F}{R_3} v_3 \right)$$

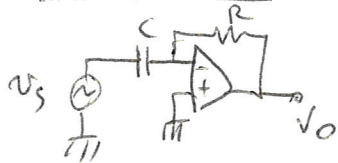
g) Impedenze complesse

Stesso procedimento (almeno se lo sfasamento non supera i 180° !)



$$v_o = - \frac{Z_2}{Z_1} v_s$$

h) Derivatore



$$Z_1 = \frac{1}{sC} = 1/sC$$

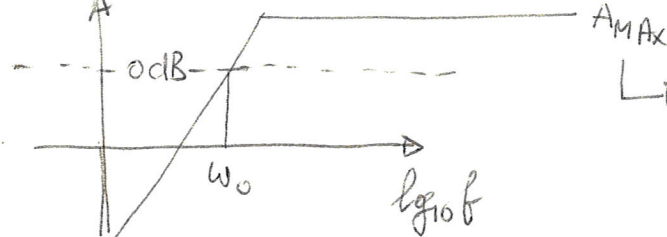
$$Z_2 = R$$

$$\frac{v_o}{v_s} = - \frac{Z_2}{Z_1} = -sCR$$

$$|A| = |s|CR = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\text{con } \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

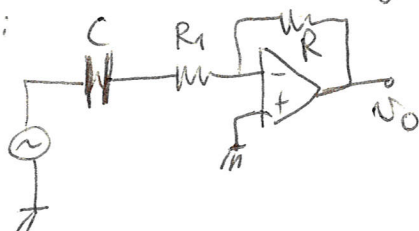
$|A|(dB)$



↳ corrisponde al guadagno max dell'op Amp

Problemi: teoricamente divergente per alte frequenze
e limitato dal guadagno dell'op Amp.

Miglior:

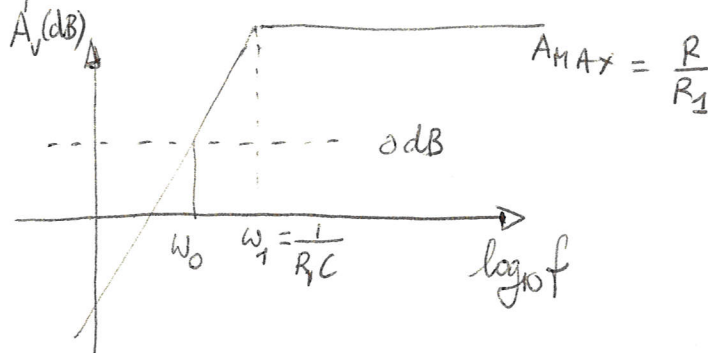
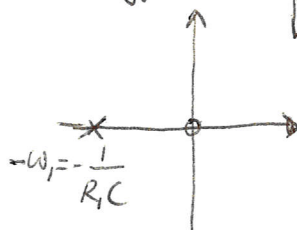


$$\frac{v_o}{v_s} = - \frac{Z_2}{Z_1} = -R \left(\frac{1}{R_1 + \frac{1}{sC}} \right)$$

$$= \frac{-sCR}{1 + sCR_1} \leftarrow \text{zero } s=0$$

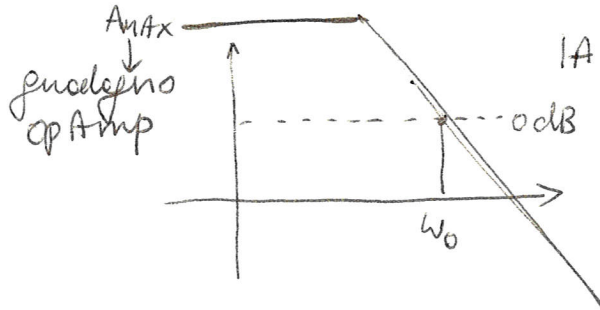
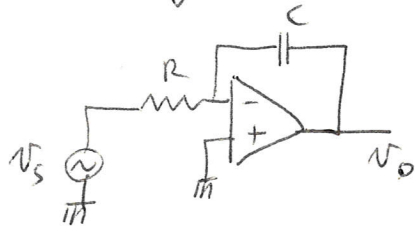
$$\leftarrow \text{pole } s = -\frac{1}{R_1 C}$$

L'aggiunta del polo stabilizza il circuito ad alte frequenze



$$\omega_1 > \omega_0 \rightarrow R_1 < R$$

i) Integratore



$$z_1 = \frac{\infty}{R} = R$$

$$z_2 = \frac{1}{C} = 1/SC$$

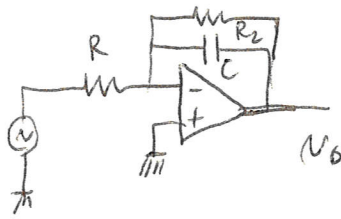
$$v_o/v_s = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{1}{SRC} \rightarrow \text{polo per } s=0$$

$$|A| = \frac{1}{w/w_0}$$

Divergente per $w \rightarrow 0$

In pratica basta una piccola componente continua per portare alla saturazione

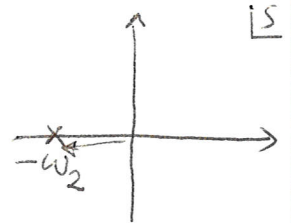
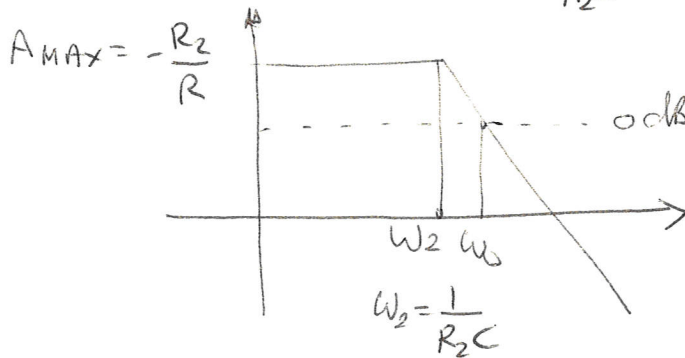
→ Necessario inserire un meccanismo di uscita del C



$$v_o/v_s = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{SC + \frac{1}{R_2}} = -\frac{R_2}{R} \frac{1}{1 + SCR_2}$$

Spostamento del polo da $s=0$

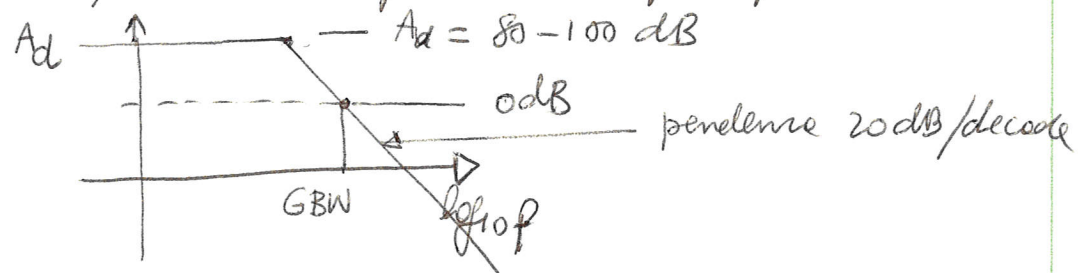
a $s = -\frac{1}{R_2 C} \rightarrow$ stabilizzare il circuito



$$w_2 < w_0 \rightarrow R_2 > R$$

Limiti op Amp reale

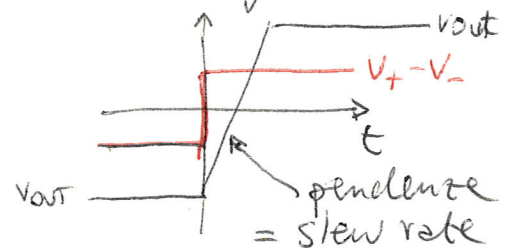
- A_d non è infinito $A_d \sim 10^4 - 10^5$ a bassa freq.
- R_{in} non è infinito $R_i \sim 10^6 - 10^{12} \Omega$
- R_o non \emptyset $R_o \sim 1 - 100 \Omega$
- Guadagno dipende dalle frequenze
GBW product - dipende da op Amp MHz - GHz



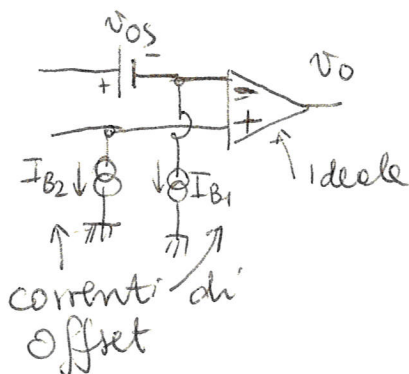
Esempio : se $GBW = 100$ MHz e $A_{d \max} = 10^4 = 80$ dB
 per $f = 4$ decadi sotto $GBW = 10$ KHz il guadagno decresce
 = 4 decadi

- Slew rate : massima velocità con cui può variare l'uscita (V/s)

tipico $\sim 0.01 - 10$ V/ μ s.



- Correnti / tensioni di ingresso non zero



$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \sim 80 \text{ nA} \quad \text{Input bias current}$$

$$I_{IO} = I_{B1} - I_{B2} \sim 20 \text{ nA} \quad \text{Input offset current}$$

$$V_{OS} \sim \text{mV} \quad \text{Input offset voltage}$$