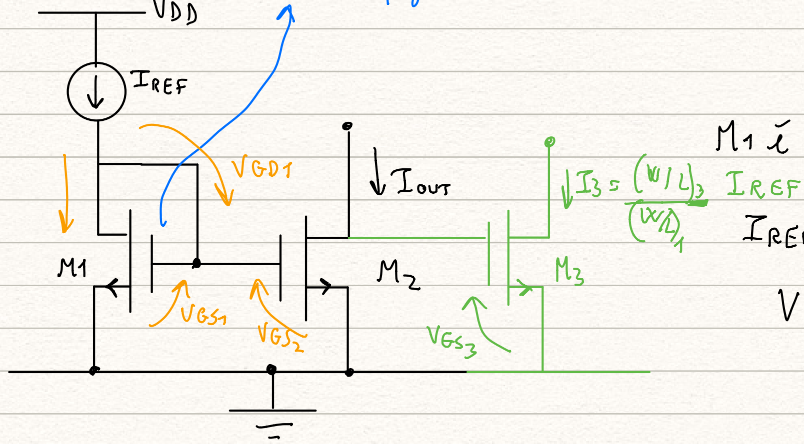
SPECCHI DI CORRENTE E STADIO DIFFERENZIALE CON CARICO A SPECCHIO:

nMOS:

in configurazione "trans-diodo"



come tutti i transdiodi

M1 è sicuramente SATURO $\quad V_{GD_1} = 0$

$$I_{REF} = K_{n_1} (V_{GS_1} - V_{Tn})^2$$

$$V_{GS_2} = V_{GS_1}$$

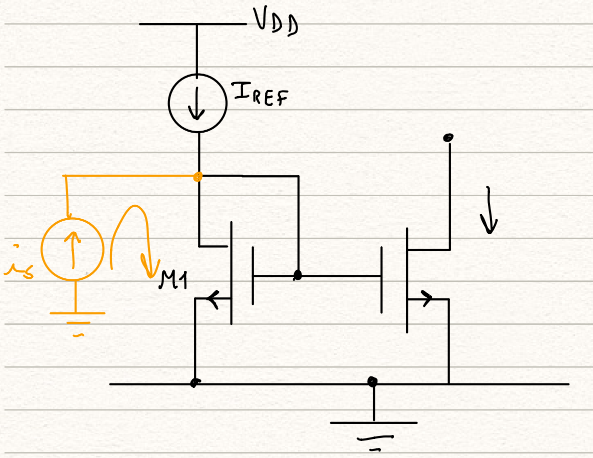
Hp: M2 sia SATURO

$$I_{OUT} = K_{n2}(V_{GS2} - V_{Tn})^2 = K_{n2}(V_{GS1} - V_{Tn})^2 = \frac{K_{n2}}{K_{n1}} I_{REF} = \frac{\cancel{1/2\, \mu_n C_{ox}} \left(\frac{W}{L}\right)_2}{\cancel{1/2\, \mu_n C_{ox}} \left(\frac{W}{L}\right)_1} I_{REF} =$$

$$= \boxed{\frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1} \cdot I_{REF}}$$

→ la corrente in ingresso esce specchiata in uscita, proporzionale al rapporto delle $\frac{W}{L}$ dei transistor

SU SEGNALE



$$v_{gs_1} = i_s \, 1/g_{m1}$$

$$v_{gs_2} = v_{gs1}$$

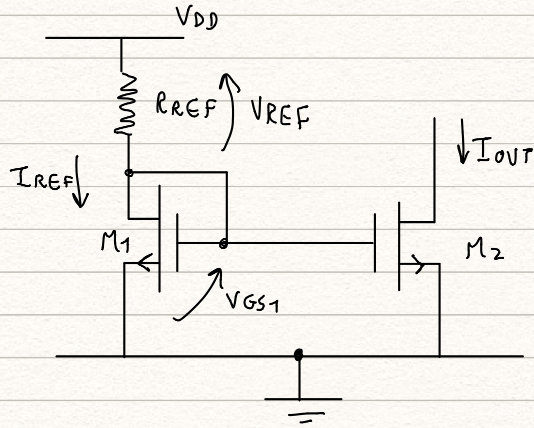
$$i_{out} = g_{m2} v_{gs2} - g_{m2} v_{GS1} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_s =$$

$V_{GS2} = V_{GS1}$

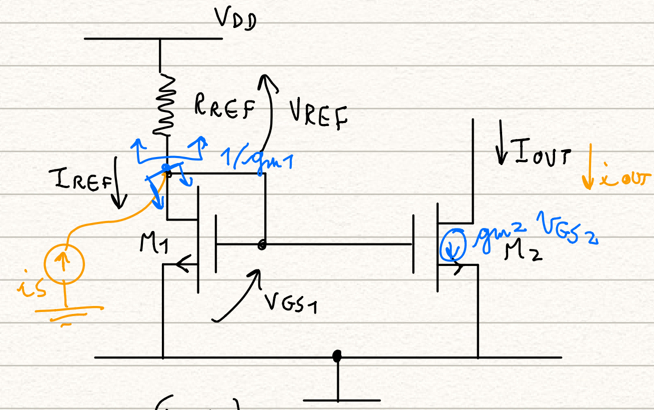
$$= \frac{2K_{n2}(V_{GS2} - V_{Tn})}{2K_{n1}(V_{GS1} - V_{Tn})} i_s = \frac{K_{n2}}{K_{n1}} i_s = \frac{\cancel{1/2\, \mu_n C_{ox}} \left(\frac{W}{L}\right)_2}{\cancel{1/2\, \mu_n C_{ox}} \left(\frac{W}{L}\right)_1} i_s =$$

$$= \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1} i_s$$

is corrente di piccolo segnale



$$\begin{cases} I_{REF} = k_{n1}\,(V_{GS1} - V_{Tn})^2 \\ V_{DD} = I_{REF}\,R_{REF} + V_{GS1} \end{cases}$$



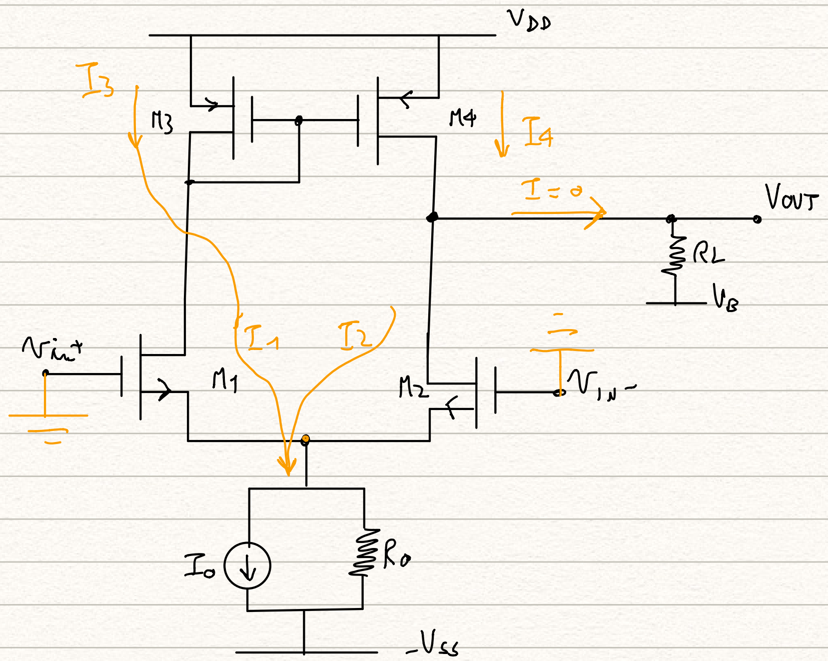
<u>in segnale:</u>

nodo A partizione di corrente

$$i_{M1} = \frac{R_{REF}}{R_{REF} + 1/g_{m1}}\, i_s$$

$$i_{out} = g_{m2} V_{GS2} = g_{m2} v_{gs1} = \frac{g_{m2}\, i_{M1}}{g_{m1}} = \underbrace{\frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}}_{\text{FATTORE DI SPECCHIAMENTO}} \cdot \frac{R_{REF}}{R_{REF} + 1/g_{m1}}\, i_s$$

STADIO DIFFERENZIALE CON CARICO A SPECCHIO:



M_1, M_2 coppia differenziale

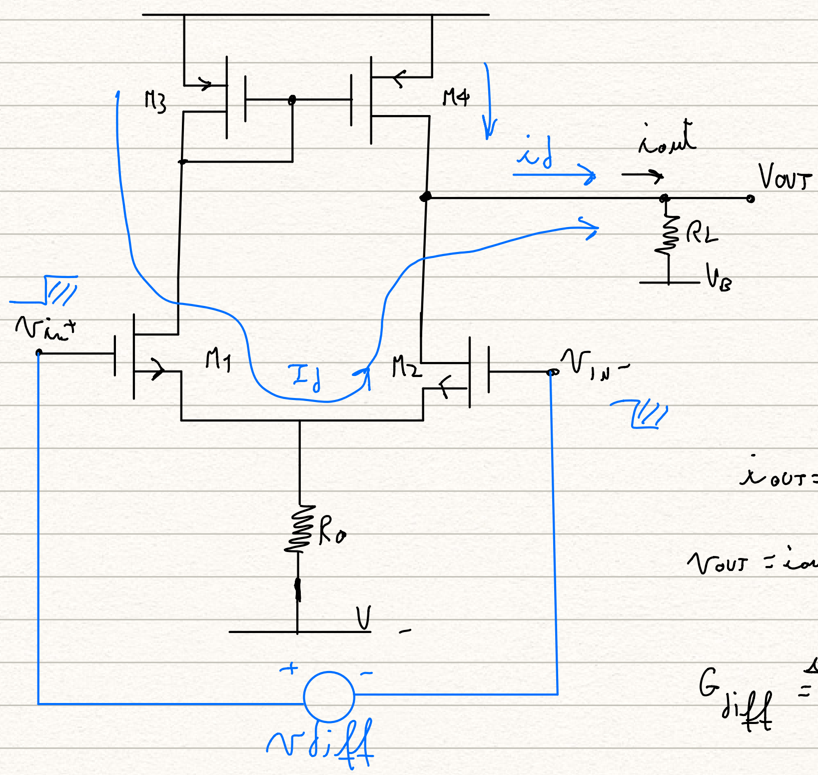
M_3, M_4 carico a specchio

Ⓐ POLARIZZAZIONE (—)

$I_3 = I_1 = I_4 = I_2 \rightarrow I = 0$; $V_{OUT} = V_3$

devo garantire che M2 e M4 siano saturi

(B) SEGNALE DIFFERENZIALE



$g_{m1} = g_{m2} = g_m$

$$i_d = \frac{v_{diff}}{1/g_{m1} + 1/g_{m2}} = \frac{v_{diff}}{2/g_m} = g_m \frac{v_{diff}}{2}$$

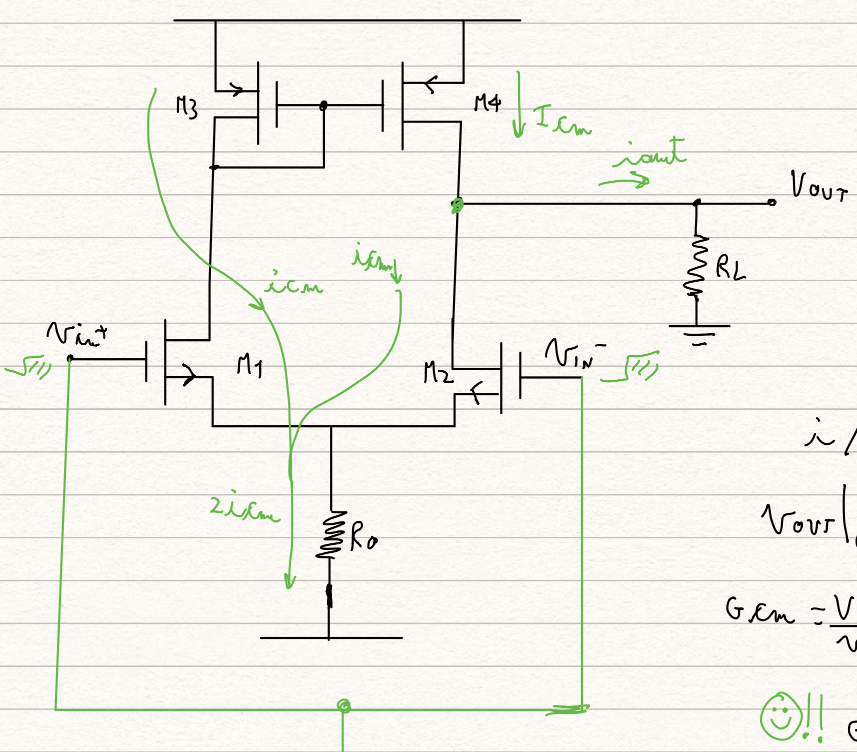
$$i_{OUT} = i_d + i_d = 2 i_d$$

$$v_{OUT} = i_{out} R_L = 2 i_d R_L = 2 g_m \frac{v_{diff}}{2} R_L$$

$$G_{diff} \stackrel{\Delta}{=} \frac{v_{OUT}}{v_{diff}} = g_m R_L$$

☺ $G_{diff} = g_m R_L$ pur uscendo single ended (guadagno un fattore 2 rispetto alla condizione di carico resistivo!)

(C) SEGNALE DI MODO COMUNE



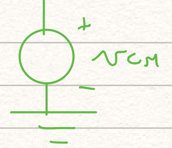
bilancio di corrente al nodo di uscita

$i_{cm} = i_{cm} + i_{OUT} \rightarrow i_{OUT} = 0$!!!

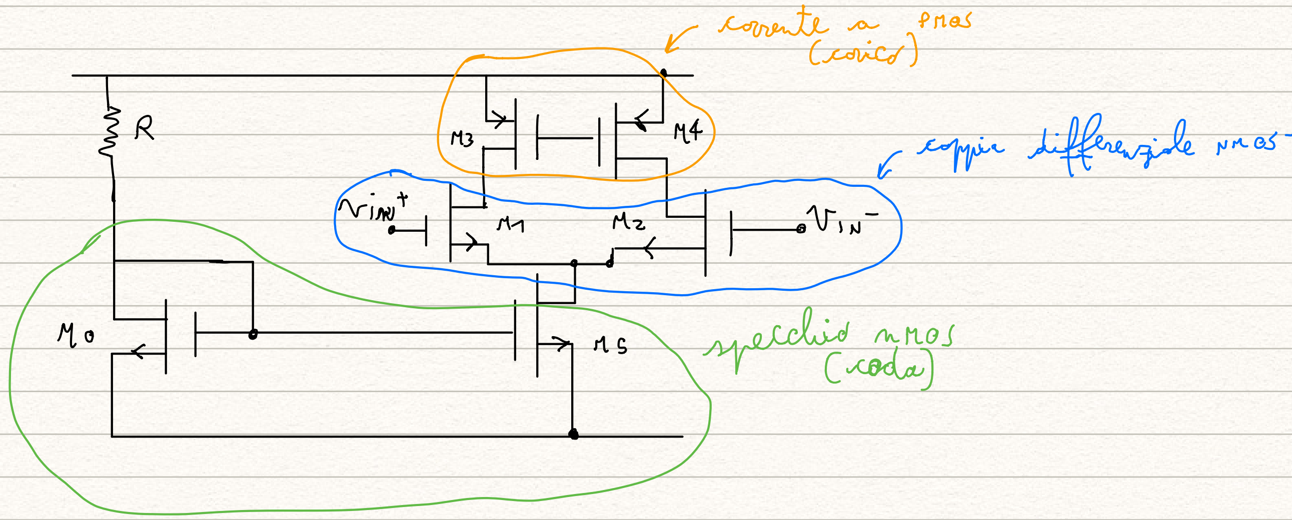
$$v_{OUT}\big|_{CM} = 0$$

$$G_{cm} = \frac{v_{OUT}}{v_{CM}} = 0 \rightarrow CMRR = \left|\frac{G_{diff}}{G_{cm}}\right| = \infty$$

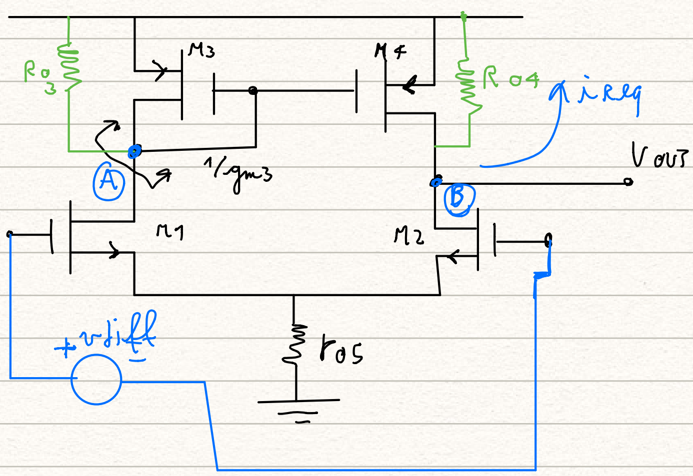
☺!! $G_{cm} = 0$ e $CMRR = \infty$!



nella realtà uno stadio differenziale con carico a specchio è fatto così:



su segnale:



segnale differenziale

$$i_d = \frac{v_{diff}}{1/g_{m1} + 1/g_{m3}}$$

$$i_3 = \frac{R_{o3}}{R_{o3} + 1/g_{m3}}\, i_d$$ (partizione di corrente al nodo A)

$$i_4 = i_3$$

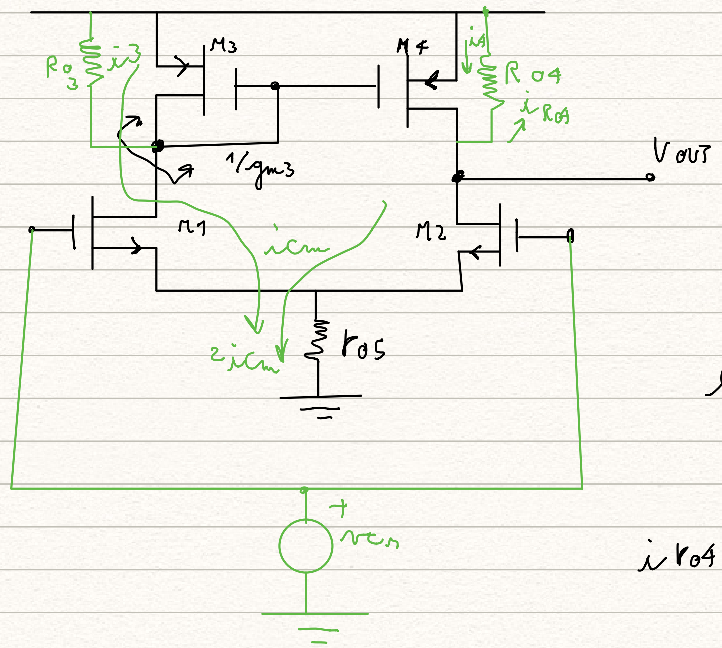
bilancio di corrente al nodo B

$$i_{ro4} = i_4 + i_d \simeq \frac{r_{o3}}{r_{o3} + 1/g_{m3}}\, i_d + i_d = i_d \left[1 + \frac{r_{o3}}{r_{o3} + 1/g_{m3}} \right]$$

↳ tende a 2 se $r_{o3} \to \infty$

$$v_{OUT} = i_{ro4} \cdot r_{o4}$$

segnale di modo comune



$$i_4 = i_3 = i_{cm} \frac{r_{o3}}{r_{o3} + 1/g_{m3}}$$

bilancio di corrente in uscita:

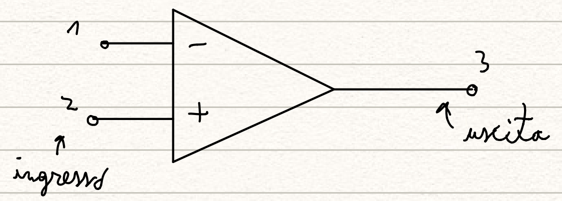
$$i_4 = i_{cm} + i_{r04}$$

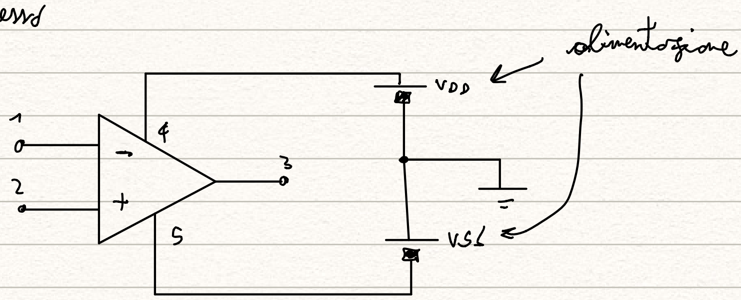
$$i_{r04} = i_4 - i_{cm} = i_{cm} \left[\underbrace{\frac{r_{o3}}{r_{o3}+1/g_{m3}} - 1}_{\to 0 \text{ se } r_{o3} \to \infty} \right]$$

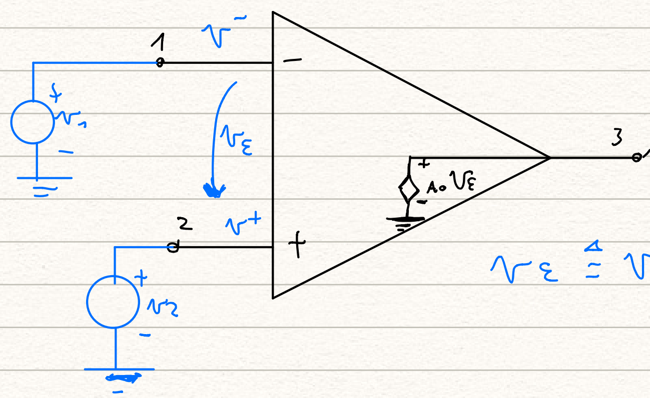
$$V_{OUT} = i_{r04} \cdot r_{04}$$

parallelo delle ro $\quad G_{cm} \neq 0$ anche con carico a specchio

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE:







$$V_{OUT} = A_0 V_\varepsilon = A_0 (v^+ - v^-) = A_0 (v_2 - v_1)$$

$$v_\varepsilon \triangleq v^+ - v^-$$

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE IDEALE:

1) Non assorbe né eroga corrente ai morsetti di ingresso
   ↪ resistenza di ingresso infinita

2) L'uscita è presa ai capi di un generatore di tensione ideale
   ↪ resistenza di uscita nulla

morsetto 2: ingresso non invertente (+)
morsetto 1: ingresso invertente (−)

3) Rigetta qualsiasi segnale di modo comune presente in ingresso
   ↪ $G_{CM} = 0$; $CMRR = \infty$

A_0: Guadagno ad anello aperto (guadagno differenziale)

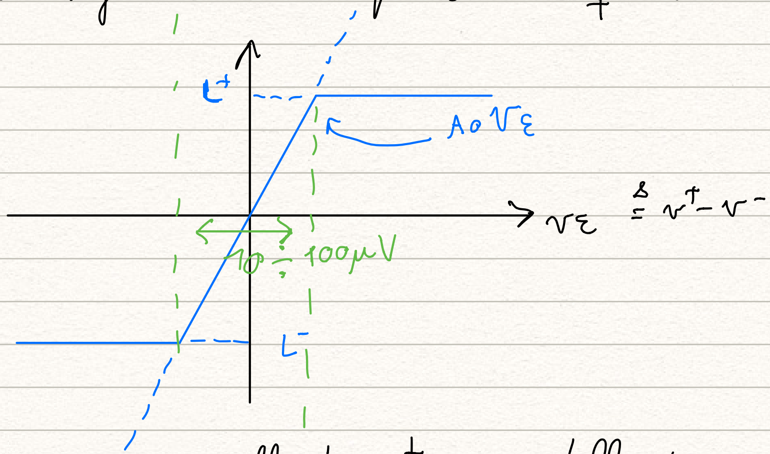
4) A_0 è indipendente dalla frequenza → larghezza di banda infinita

5) $A_0 \to \infty$ (reale Typ $\simeq 10^5 - 10^6$)

$V_{OUT} = A_0 (v^+ - v^-) \longrightarrow 0$
per mantenere V_{OUT} finito

"cortocircuito virtuale tra i morsetti di un operazionale"

v^- segue esattamente quello che fa v^+

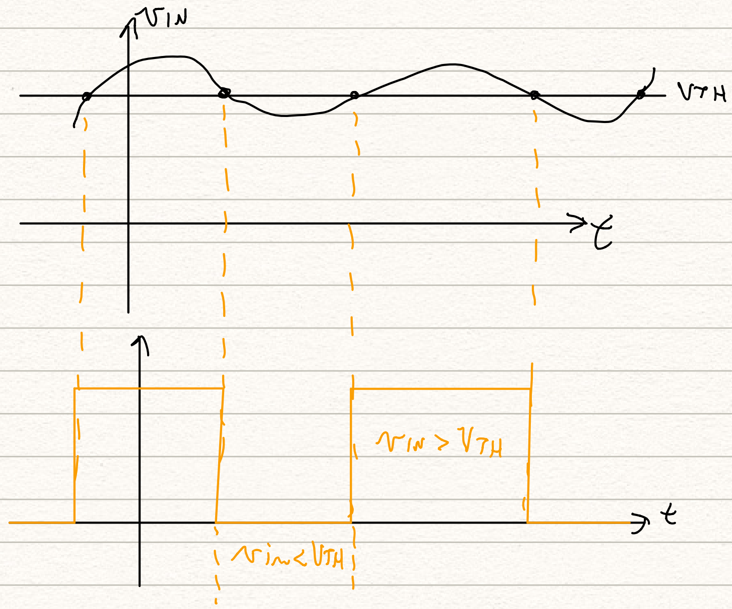


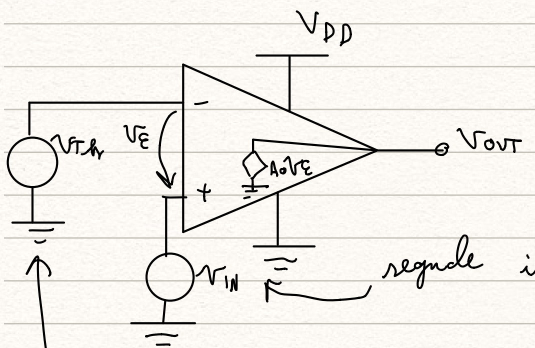
L^+, L^- livello di saturazione della tensione di uscita, legati ai valori della tensione di alimentazione

$V_{OUT} \simeq 10V$; $A_0 = 10^5$

↪ $v_\varepsilon = \dfrac{V_{OUT}}{A_0} \simeq \dfrac{10V}{10^5} = 10 \cdot 10^{-5} V = 10^{-4} V = 100 \mu V$

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE COME COMPARATORE:



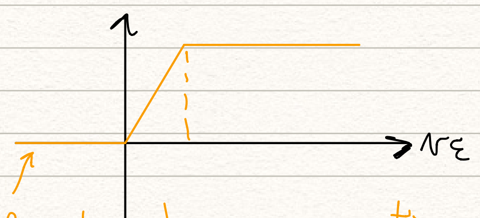


segnale in ingresso che si vuole comparare

TENSIONE DC di riferimento

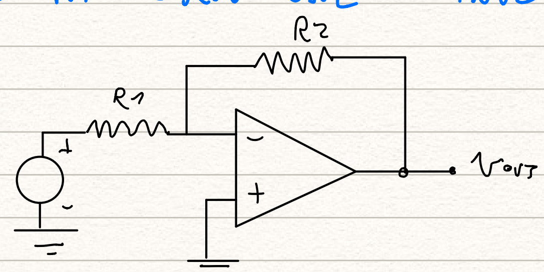
$V_{IN} > V_{Th} \rightarrow V_E > 0$ $\quad$ V_{OUT} satura al livello di saturazione positivo

$V_{IN} < V_{Th} \rightarrow V_E < 0$ $\quad$ V_{OUT} satura al livello di saturazione negativo (zero nel caso considerato)



livello di saturazione negativo posto a 0

CONFIGURAZIONE INVERTENTE:



$$i_1 = \frac{V_{IN} - V^-}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{v^- - v_{OUT}}{R_2}$$

$$\frac{v_{IN}}{R_1} - \frac{v^-}{R_1} = \frac{v^-}{R_2} - \frac{v_{OUT}}{R_2}$$

$$v_{OUT} = A_0\left(v^+ - v^-\right) = -A_0 v^- \qquad v^+ = 0$$

$$v^- = -\frac{v_{OUT}}{A_0}$$

$$\frac{v_{IN}}{R_1} - \frac{\frac{v_{OUT}}{A_0}}{R_1} = -\frac{\frac{v_{OUT}}{A_0}}{R_2} - \frac{v_{OUT}}{R_2}$$

$$\frac{v_{IN}}{R_1} + \frac{v_{OUT}}{A_0 R_1} = -\frac{v_{OUT}}{A_0 R_2} - \frac{v_{OUT}}{R_2}$$

$$v_{OUT}\left[\frac{1}{A_0 R_1} + \frac{1}{A_0 R_2} + \frac{1}{R_2}\right] = -\frac{v_{IN}}{R_1}$$

$$v_{OUT} = -\frac{v_{IN}}{R_1} \frac{1}{\frac{1}{A_0 R_1} + \frac{1}{A_0 R_2} + 1/R_2} = -\frac{v_{IN}}{\frac{1}{A_0} + \frac{R_1}{A_0 R_2} + \frac{R_1}{R_2}}$$

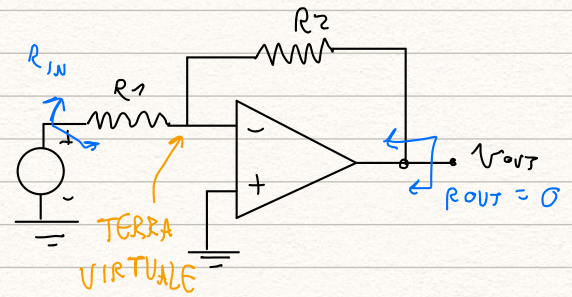
$$G \triangleq \frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = -\frac{1}{\frac{1}{A_0} + \frac{R_1}{A_0 R_2} + \frac{R_1}{R_2}} = -\frac{R_2}{\frac{R_2}{A_0} + \frac{R_1}{A_0} + R_1} = -\frac{R_2/R_1}{\frac{R_2}{R_1 A_0} + \frac{1}{A_0} + 1} =$$

$$= -\frac{R_2/R_1}{1 + \underbrace{\frac{1}{A_0}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}}$$

se $A_0 \longrightarrow \infty \qquad \frac{1}{A}\left(1 + R_2/R_1\right) \longrightarrow 0$

$$G\Big|_{ideale} \triangleq \frac{v_{OUT}}{v_{IN}}\Bigg|_{A_0 \to \infty} = -\frac{R_2}{R_1}$$

tensione di uscita sfasata di 180° rispetto a Vin



$v_{OUT} = A_0(v^+ - v^-) \qquad v^+ - v^- = \frac{v_{OUT}}{A_0} \xrightarrow[A_0 \to \infty]{} 0$

cortocircuito virtuale tra i morsetti dell'opamp

$v^+ = 0 \longrightarrow v^- = 0$

morsetto ⊖ terra virtuale
- $v^- = 0$
- rende disponibile la corrente entrante in un altro ramo del circuito

Grazie al nodo di terra virtuale

- tensione ai capi di R_1 è V_{IN}:

$$i = \frac{V_{IN}}{R_1}$$

- $V_{OUT} = -iR_2 = -V_{IN}\frac{R_2}{R_1}$

$$\boxed{G_{IDEALE} = -\frac{R_2}{R_1}}$$

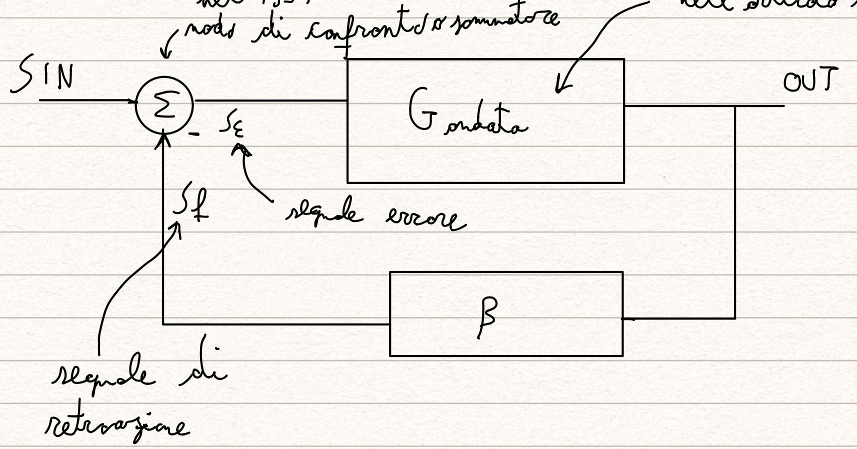
assumendo $A_0 \to \infty$

- resistenza in ingresso $R_{IN} = R_1$

RETROAZIONE NEGATIVA:

elaborato da H.S. Black nel 1934 su un "concetto" di F.Brown del 1909

nell'articolo originale di Black è μ



- $S_f = S_{OUT}\,\beta$
- $S_{OUT} = G_{andata}\,S_\varepsilon$
- $S_\varepsilon = S_{IN} - S_f$

$$S_{OUT} = G_{andata}\,S_\varepsilon = G_{andata}(S_{IN} - S_f) = G_{andata}\left[S_{IN} - S_{OUT}\,\beta\right]$$

$$S_{OUT} = G_{andata}\,S_{IN} - G_{andata}\,\beta\,S_{OUT}$$

$$S_{OUT}\left[1 + G_{andata}\,\beta\right] = G_{andata}\,S_{IN}$$

$$\boxed{\frac{S_{OUT}}{S_{IN}} = \frac{G_{andata}}{1 + G_{andata}\beta}} \rightarrow \text{GUADAGNO AD ANELLO CHIUSO}$$

$$S_f = S_{OUT}\beta = G_{andata} S_\varepsilon \beta - G_{andata}\beta = G_{loop}$$ GUADAGNO D'ANELLO

$$\boxed{\frac{S_{OUT}}{S_{IN}} = \frac{G_{ANDATA}}{1 - G_{loop}}}$$

$$\frac{S_{OUT}}{S_{IN}} = \frac{1}{G_{andata}\beta} \quad \frac{G_{andata}}{\frac{1}{G_{andata}} + 1}$$

$$\frac{S_{OUT}}{S_{IN}} \xrightarrow[G_{andata} \to \infty]{} \frac{1}{\beta}$$

G_{IDEALE} guadagno che si ha con G_{loop} infinito

- GUADAGNO AD ANELLO APERTO
- GUADAGNO D'ANELLO
- GUADAGNO IDEALE
- GUADAGNO DI ANDATA

[retroazione negativa: $G_{loop} < 0$]