

Amplificatore operativo

Prof. Hajj Ali

<https://digilander.libero.it/alihajj/>

<https://www.youtube.com/@alihajj9994>

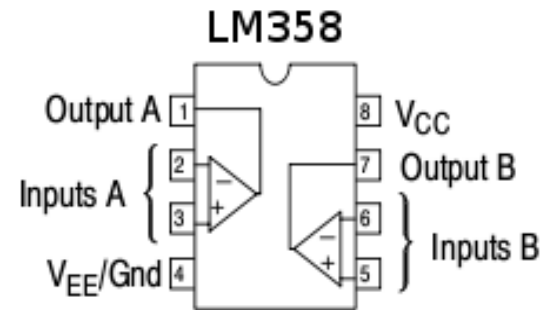
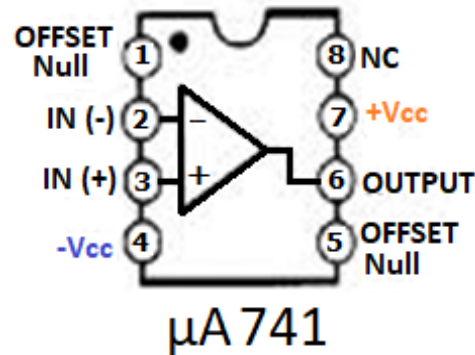
Per info

hajjali2000@yahoo.it

Definizione

L'amplificatore operazionale (**Amp Op** oppure **A.O.**) è un circuito integrato di tipo lineare.

PIN CONNECTIONS



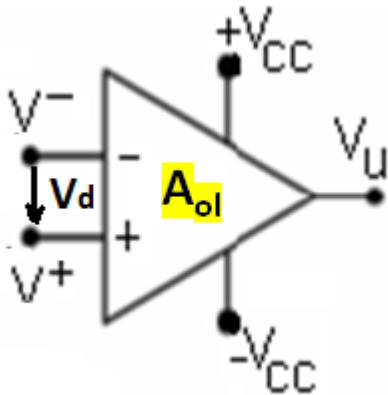
Il nome operazionale:

L'A.O. è un **amplificatore differenziale** utilizzato in elettronica per realizzare molte **operazioni** o applicazioni matematiche (somma, differenza, comparazione, logaritmo ...).

Definizione

SCHEMA DI PRINCIPIO DI UN A. O. "OPEN LOOP - ANELLO APERTO"

Simbolo



dettaglio e spiegazioni

V^- tensione invertente sul morsetto invertente (negativo)
 V^+ tensione non invertente sul morsetto non invertente (positivo).

$\pm V_{cc}$: tensione di alimentazione duale in corrente continua che può variare **tra 5V e 35 V**; è necessaria per il funzionamento del dispositivo.

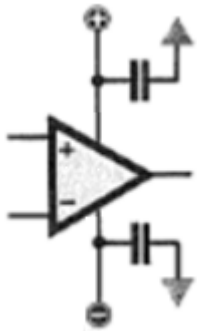
A_{ol} : il guadagno ad anello aperto (open loop)

L'amp op è un **amplificatore differenziale** di tipo **lineare**.
Esso fornisce una tensione d'uscita V_u proporzionale alla differenza fra le due tensioni V^+ e V^- applicate agli ingressi.
 $V_u = A_{ol} \cdot (V^+ - V^-) = A_{ol} \cdot V_d$

La tensione V_u è sempre inferiore alla tensione V_{cc}

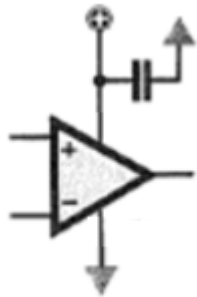
NOTA IMPORTANTE

Simbolo



dettaglio e spiegazioni

In una alimentazione duale e per evitare eventuali auto oscillazione, si dovrà sempre applicare tra I due piedini di alimentazione e la massa un condensatore da 47 nF o ancor meglio da 100 pF.

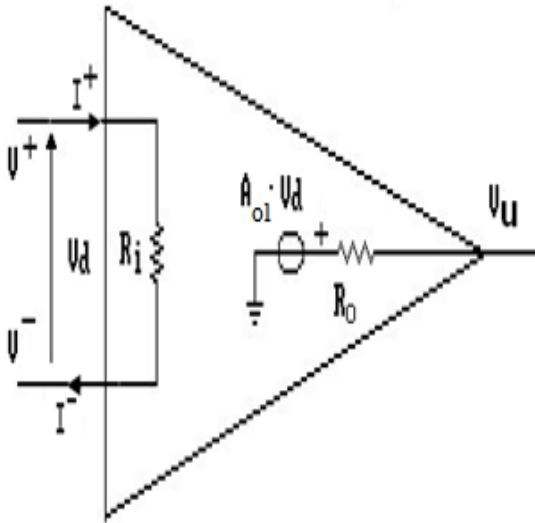


Se utilizziamo un'alimentazione singola, applicheremo questo condensatore solamente tra Il terminale positivo e la massa

Amplificatore reale-proprietà

Circuito equivalente reale

Proprietà fondamentali



Ri, è la resistenza di ingresso elevata, ossia la resistenza presente tra l'ingresso non invertente e l'ingresso invertente; valori tipici **> 1MΩ**.

Ri elevata, significa che i morsetti di ingresso assorbono poca corrente (dell'ordine dei μA).

Ro, la resistenza di uscita bassa, ossia la resistenza misurata tra il morsetto d'uscita e massa quando in ingresso la tensione applicata V_d è uguale a zero;

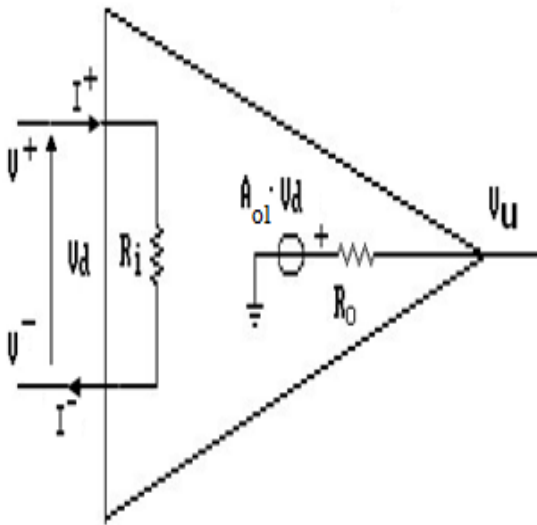
Con valori inferiore a 100 Ω

Ro bassa, comporta che la tensione di uscita dipende poco dal carico

Amplificatore reale-proprietà

Circuito equivalente reale

Proprietà fondamentali

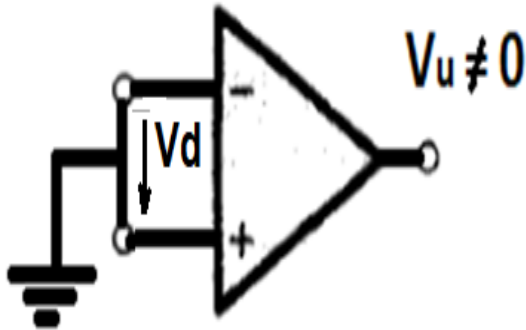


A_{ol} , guadagno differenziale o ad anello aperto (open loop gain), rappresenta il rapporto tra la tensione di uscita V_u e la tensione differenziale di ingresso $V_d = (V^+ - V^-)$. **Con valori tipici ($10^5 \div 10^6$ cioè 100 -120 dB)**. Significa che una piccola differenza tra V^+ e V^- , porta l'A.O. in saturazione.

la banda passante di un amp. Op. ad anello aperto (B) è stretta (da 0 a 10 Hz) per via dell'elevato guadagno, tale banda comprende anche i segnali in continua ($f = 0$ Hz).

Amplificatore reale-proprietà

Tensione di offset



V_{os} : Tensione offset in ingresso fuori-zero è $\neq 0$,

ossia $V_u \neq 0$ per $V_d = 0$.

Dovuta alla non simmetria circuitale tra i due terminali d'ingresso dell'A.O.

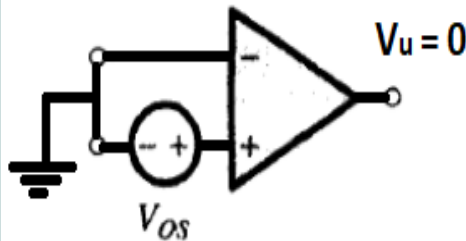
Se si applica un segnale nullo all'ingresso di un amplificatore operazionale, la tensione di uscita risulta diversa da zero.

L'amplificatore operazionale si comporta come se internamente fosse presente un generatore di tensione V_{OS}

Amplificatore reale-proprietà

Circuito equivalente reale

Proprietà fondamentali



La tensione di uscita può essere azzerata collegando un generatore di tensione di valore V_{OS} (**tensione di offset**) con opportuna polarità ad uno degli ingressi (la polarità di V_{OS} non è nota a priori)

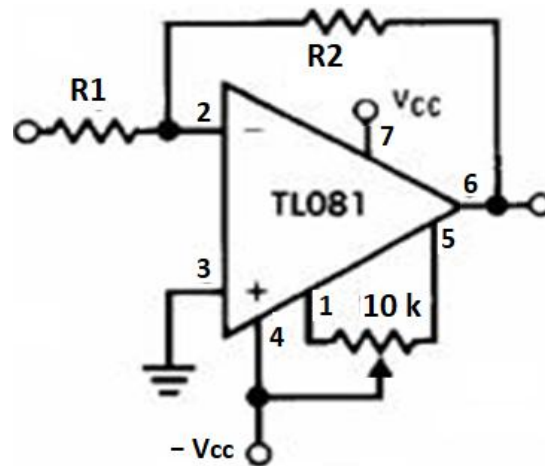
In pratica, V_{OS} può essere trascurato se è molto più piccolo della tensione di ingresso V_{in} . Oppure mantenendo limitato il rapporto *del guadagno di retroazione* e quindi il guadagno ad anello chiuso dell'amplificatore.

Amplificatore reale-proprietà

Tensione di offset

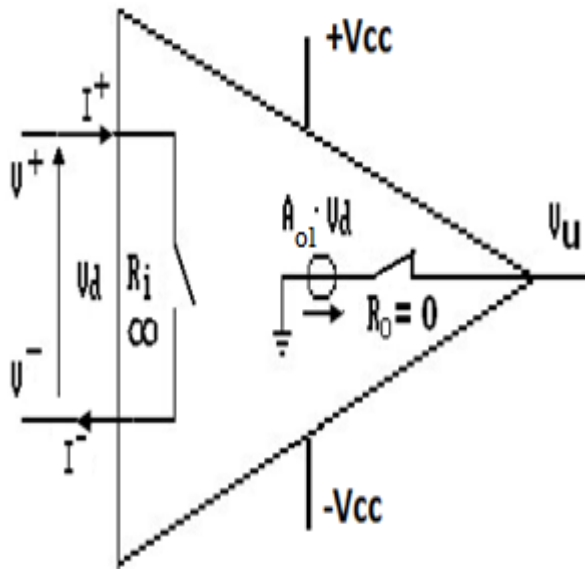
La tensione di offset può a volte essere parzialmente annullata aggiungendo un trimmer (potenziometro), da regolare volta per volta manualmente.

I valori tipici di V_{os} vanno dalle decine di μV ad alcuni mV .



Amplificatore ideale

Circuito equivalente ideale



Proprietà fondamentali

L'A.O. ideale viene trattato al livello didattico per i **grandi benefici** dei calcoli matematici.

Resistenza d'ingresso "infinita", $R_i = \infty$, l'A.O. non assorbe correnti in ingresso: $I^+ = I^- = 0$

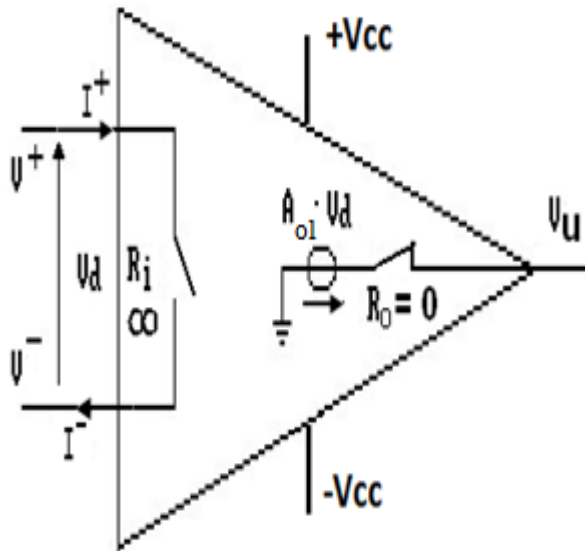
Guadagno open loop "infinito"

$A_{ol} = \infty$, $V_d = V_u / A_{ol}$ con $-V_{sat} < V_u < +V_{sat}$ e allora : un valore finito diviso un valore infinito è uguale a zero $V_d = 0$, si ha $V^- = V^+$ (**equipotenziale**)

$$V_{sat} = V_{cc} - 2$$

Amplificatore ideale

Circuito equivalente ideale



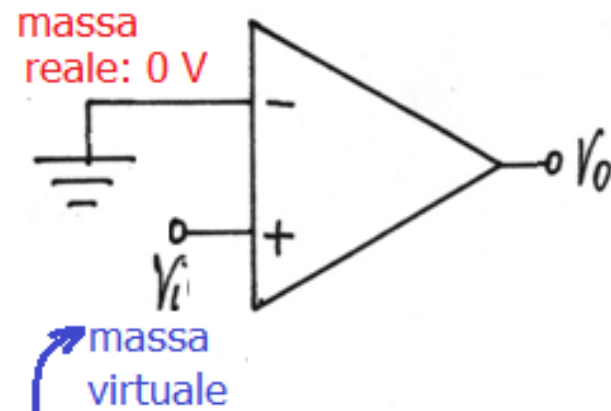
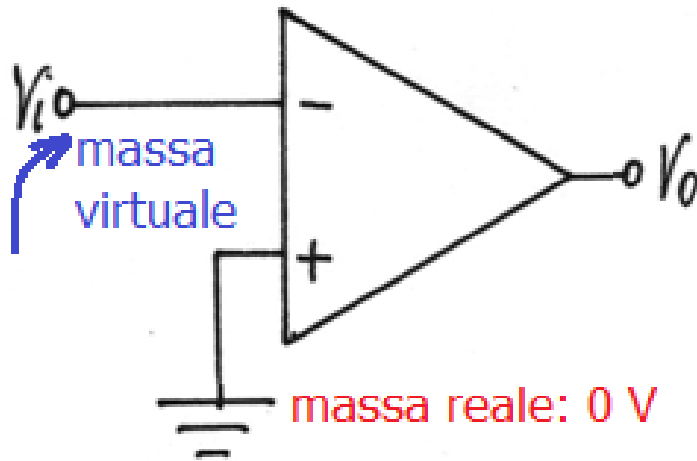
Proprietà fondamentali

Resistenza R_o di uscita è uguale a zero, $R_o = 0$, permettendo all'amplificatore di comportarsi come un generatore ideale di tensione. La tensione di uscita è indipendente dal carico. Evita che il carico influenzi i parametri dell'operazionale.

la banda passante B dell'A. O. è infinita, La banda passante B infinita implica che l'amp op amplifica tutti i segnali con lo stesso guadagno indipendentemente dal valore di frequenza, inclusa la componente continua ($f=0$ Hz).

Massa virtuale

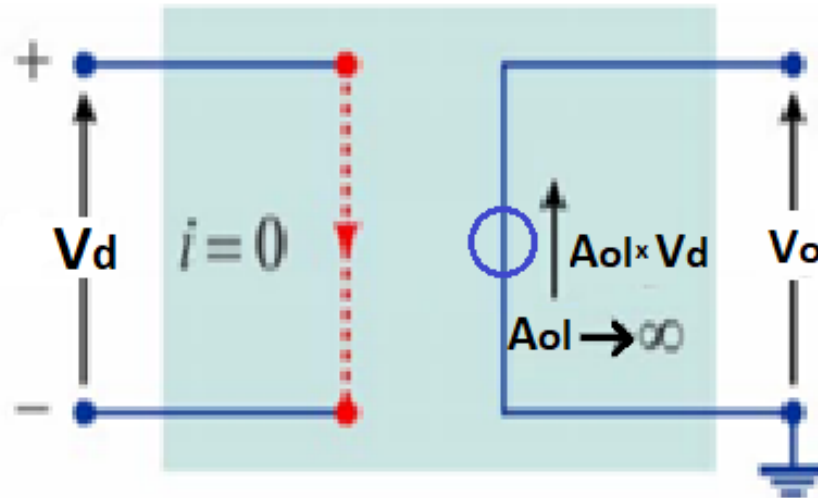
Idealmente l'ingresso invertente (V^-) e l'ingresso non invertente (V^+) sono sempre allo stesso potenziale ($V^- = V^+$), se uno degli ingressi è collegato ad una massa reale ($V=0\text{ V}$), l'altro terminale d'ingresso anch'esso è a zero volt e viene definito **cortocircuito virtuale**



Cortocircuito virtuale

Idealmente l'ingresso invertente (V^-) e l'ingresso non invertente (V^+) sono sempre allo stesso potenziale ($V^- = V^+$) e di conseguenza $V_d = 0$, come se fossero collegati tra loro da un **cortocircuito**.

Le correnti ai due terminali di ingresso sono sempre nulle ($I^+ = I^- = 0$), mentre se i due terminali fossero effettivamente uniti da un cortocircuito si avrebbe, in generale, una corrente diversa da zero. Per questo si dice che i due ingressi sono in **cortocircuito virtuale**



Transcaratteristica reale

La **transcaratteristica o caratteristica di trasferimento**: rappresenta *il grafico* tra l'uscita e l'ingresso dell'amplificatore operazionale.

$$V_u = A_{ol} \cdot (V^+ - V^-) = A_{ol} \cdot V_d$$

- Per $V_u = +V_{sat} \rightarrow V_d = +V_{sat} / A_{ol}$
- Per $V_u = -V_{sat} \rightarrow V_d = -V_{sat} / A_{ol}$

La **zona attiva lineare** è compresa:

$$-V_{sat} \leq V_u \leq V_{sat} \quad -V_{sat}/A_{ol} \leq V_d \leq V_{sat}/A_{ol}$$

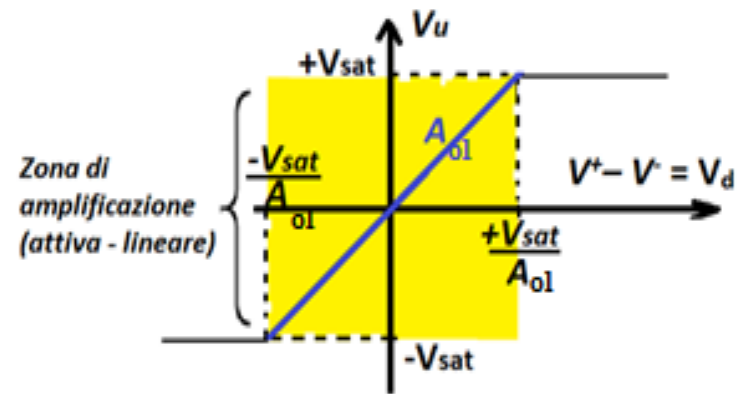
Regione di saturazione positiva:

$$V_u = +V_{sat}$$

Regione di saturazione negativa:

$$V_u = -V_{sat}$$

Il valore massimo di tensione in uscita all'operazionale viene detto **tensione di saturazione**



transcaratteristica reale

Transcaratteristica ideale

La caratteristica ingresso-uscita di un operazionale può essere rappresentata con un andamento lineare a tratti in cui si distinguono tre regioni

La **zona lineare**: $-V_{sat} \leq v_u \leq V_{sat}$ $v_d = 0$

Regione di saturazione positiva:

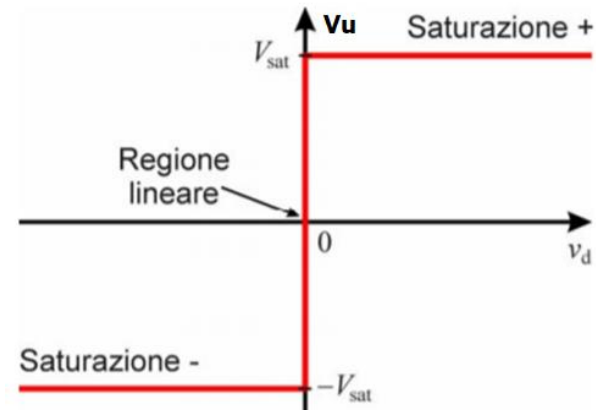
$$v_u = +V_{sat} \text{ con } v_d > 0$$

Regione di saturazione negativa:

$$v_u = -V_{sat} \text{ con } v_d < 0$$

L'amp. Op. in configurazione **ideale ad anello aperto**, non è adatto da utilizzare come amplificatore, perché una piccola variazione di tensione fra V^+ e V^- Si rischia di portarsi in saturazione.

La configurazione "**open loop**" può essere utilizzata soltanto per realizzare **comparatori**.



I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

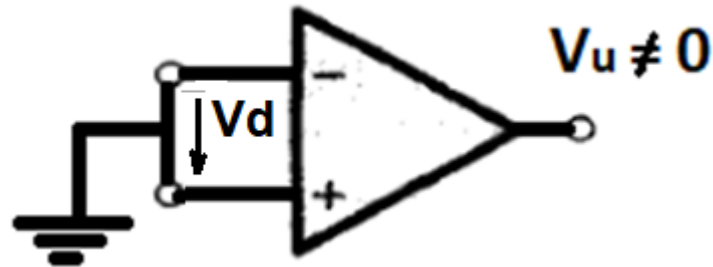
Gli **amplificatori operazionali** disponibili in commercio sono realizzati mediante **circuiti integrati monolitici (solo blocco)** e hanno un funzionamento che si avvicina fortemente a quello dei componenti ideali.

I principali parametri, sono:

V_{os} : tensione di fuori-zero d'ingresso (input offset voltage)

Se si applica un segnale nullo all'ingresso di un amplificatore operazionale, la tensione di uscita risulta diversa da zero.

L'amplificatore operazionale si comporta come se internamente fosse presente un generatore di tensione V_{os}

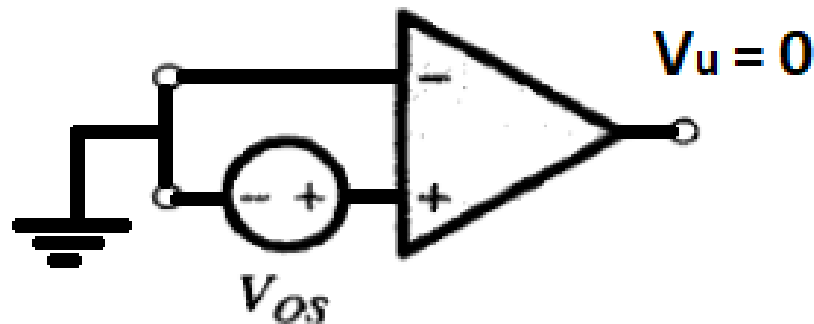


I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Tale **tensione V_{OS}** , detta di **offset (fuori zero)**, è determinata principalmente da sbilanciamenti e da lieve asimmetrie interne tra il morsetto invertente e non invertente dello stadio d'ingresso.

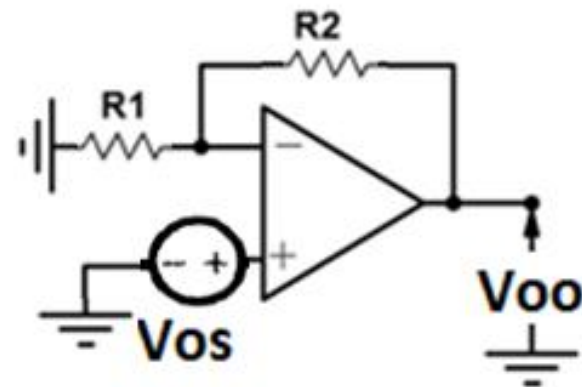
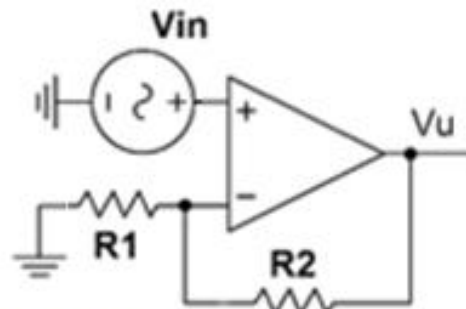
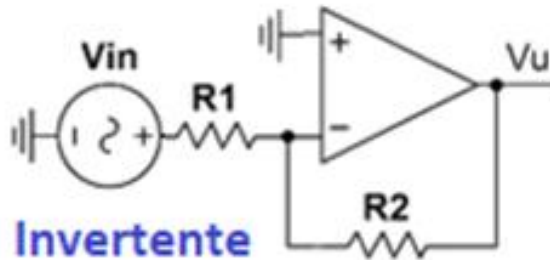
Quando l'operazionale si trova nella regione lineare, la tensione differenziale $V_d = (V^+ - V^-)$ non è nulla ma, è uguale a $-V_{OS}$

La tensione di uscita può essere azzerata collegando un generatore di tensione di valore V_{OS} (**tensione di offset**) con opportuna polarità ad uno degli ingressi (la polarità di V_{OS} non è nota a priori)



I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Nelle **connessioni ad anello chiuso** (**invertente** e **non invertente**) si può rappresentare la **tensione di offset** come un generatore collegato **all'ingresso non invertente**; in assenza di segnale in ingresso l'offset V_{os} provoca una **tensione di offset d'uscita V_{oo}**

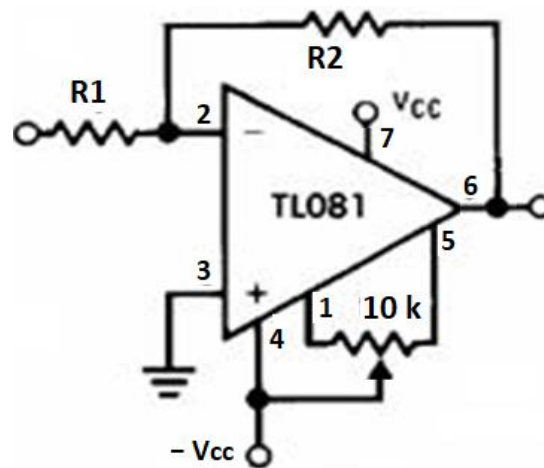


I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

In pratica, V_{OS} può essere trascurato se è molto più piccolo della tensione di ingresso V_{in} . Oppure mantenendo limitato il rapporto $R2/R1$ e quindi il guadagno ad anello chiuso dell'amplificatore.

La tensione di offset può a volte essere parzialmente annullata aggiungendo un trimmer, da regolare volta per volta manualmente.

I valori tipici di V_{OS} vanno dalle decine di μV ad alcuni mV.



I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Slew Rate (SR) o velocità di risposta:

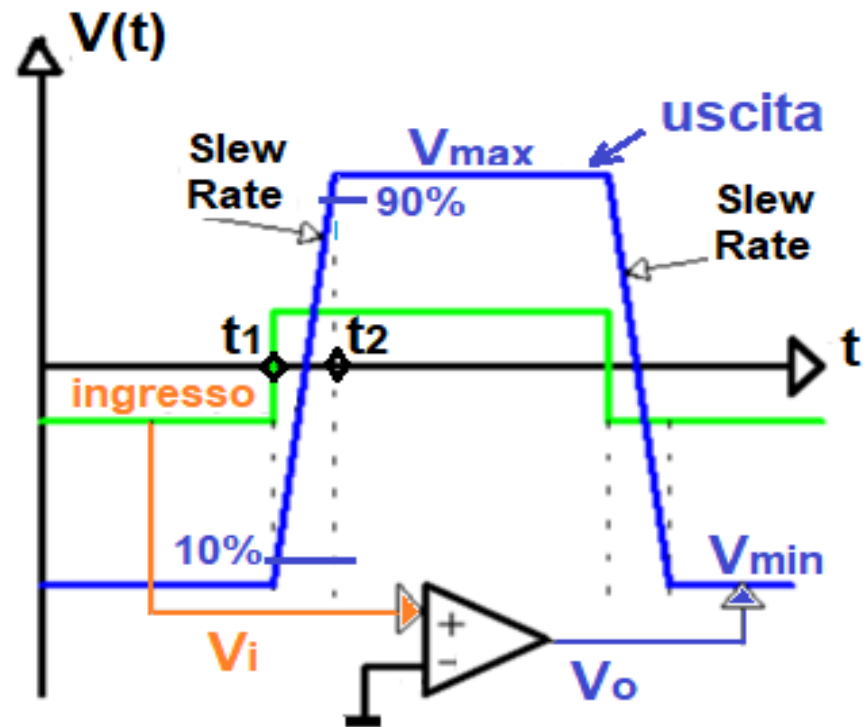
È la massima velocità di variazione della tensione d'uscita, quando all'ingresso differenziale è applicato un segnale a onda quadra di ampiezza adeguata.

$$SR = \Delta V_o / \Delta t \quad [V/\text{micros}]$$

Teoricamente:

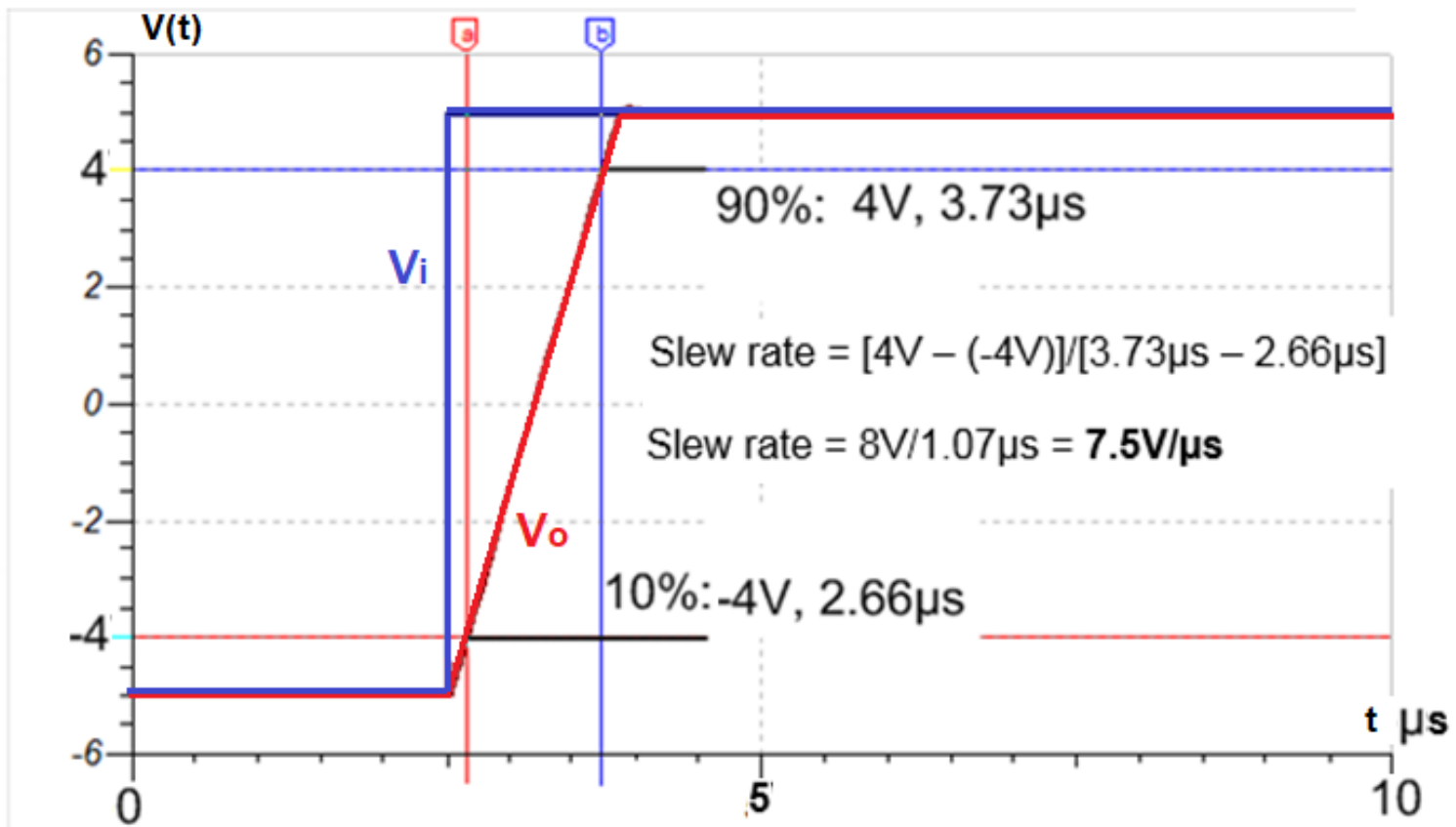
$$\Delta V_o = V_{\max} - V_{\min}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$



I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Praticamente lo Slew Rate (SR) viene misurato tra il 10% e il 90% del fronte di salita o di discesa dell'uscita.



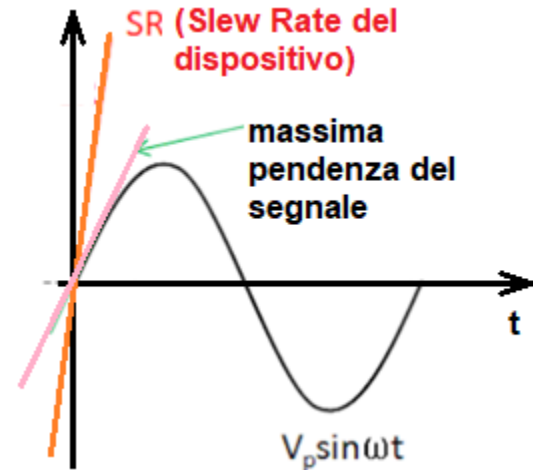
I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Slew Rate (SR) di un segnale sinusoidale:

Lo Slew Rate indica la massima velocità di variazione (**massima pendenza**) della tensione di uscita dell'operazionale quando sull'ingresso è applicato un segnale di una determinata ampiezza.

SR in variazione di tempo infinitesimo (derivata dell'uscita):

$$SR = \max\left(\frac{dv_o}{dt}\right)$$



La massima pendenza del segnale, corrisponde alla tangente nell'origine, matematicamente corrisponde alla derivata in $t = 0$.

I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

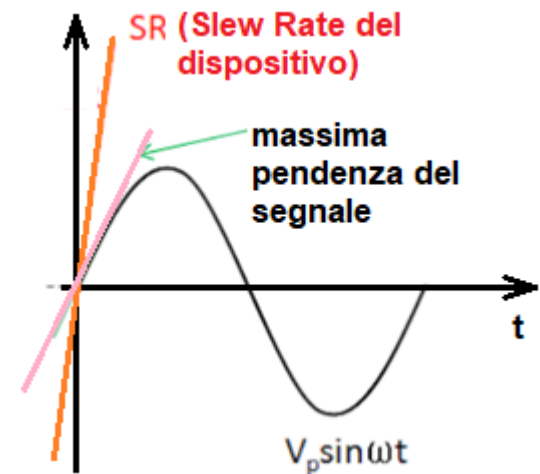
Slew Rate (SR) di un segnale sinusoidale:

$$V_o(t) = V_p \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = \omega \cdot V_p \cdot \text{cos}(\omega t)$$

$$SR = \left. \frac{dV_o(t)}{dt} \right|_{\text{max}} = \left. \frac{dv_u}{dt} \right|_{t=0} = \omega \cdot V_p \cdot \text{cos}(0)$$

$$SR = 2\pi f \cdot V_p$$



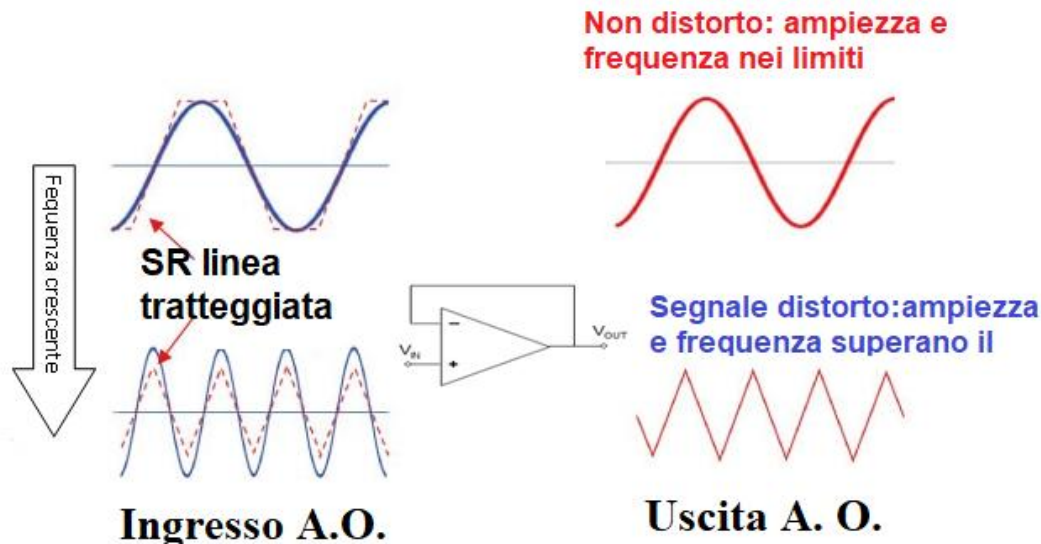
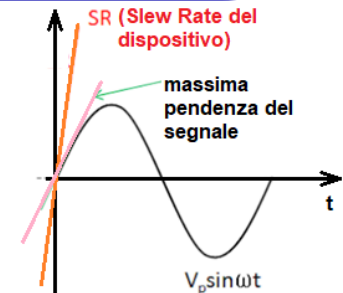
Come si può notare, lo SR dipende sia dalla frequenza che dall'ampiezza massima del segnale.

I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Slew Rate (SR) di un segnale sinusoidale:

Finché la massima pendenza del segnale non supera SR, l'uscita non subirà distorsioni.

Il valore tipico della massima variazione di tensione all'uscita di un amplificatore operazionale, varia nell'intervallo da 0,1 V/μs a 10 V/μs.



I PARAMETRI DI UN AMP OP REALE

Se la velocità di variazione del segnale teoricamente previsto in uscita (in termini di volt al μs) **supera lo slew rate del componente**, il segnale d'uscita risulta distorto perché l'amplificatore operazionale non riesce a seguirne le rapide variazioni.

C: la linea tratteggiata rappresenta la massima velocità di variazione del segnale che il circuito riesce a "inseguire" ovvero rappresenta proprio il suo slew-rate limite.

B viene prodotta in B' senza distorsione, perché ha una pendenza inferiore a C
A viene prodotta in A' segnale distorto, perché la pendenza supera lo SR e il circuito riesce a inseguire la forma d'onda del segnale d'ingresso solo pendenze inferiori (da A a X) mentre le pendenze superiori in linea tratteggiata rappresenta SR.

