

# Laboratorio di Elettronica

## *Lezione 5:*

### Circuiti con amplificatori operazionali

Valentino Liberali, Alberto Stabile



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli"

E-mail: [valentino.liberali@unimi.it](mailto:valentino.liberali@unimi.it), [alberto.stabile@unimi.it](mailto:alberto.stabile@unimi.it)

Milano, 4-5 maggio 2022

## 1 Circuiti con amplificatori operazionali in retroazione negativa

- Amplificatore invertente
- Amplificatore non invertente
- Amplificatore della differenza
- Sommatore (invertente)
- Inseguitore (buffer) di tensione
- Circuito derivatore
- Circuito integratore

## 2 Amplificatore operazionale non ideale

## 3 Circuiti con amplificatore operazionale senza retroazione o con retroazione positiva

- Comparatore di tensione
- Trigger di Schmitt
- Multivibratore astabile

# Circuiti con amplificatori operazionali in retroazione negativa

Se l'amplificatore operazionale è retroazionato negativamente, si risolve il circuito applicando il principio di terra virtuale:

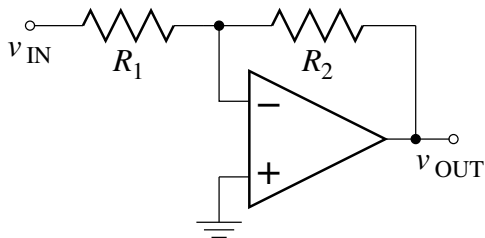
$$V^+ - V^- = 0$$

e si scrivono le KCL ai nodi  $+$  e  $-$ , ricordando che:

$$I^+ = I^- = 0$$

(Quest'ultima relazione vale sempre, anche quando il principio di terra virtuale non vale.)

# Amplificatore invertente



Circuito con un solo amplificatore operazionale ideale, rete di retroazione passiva tra uscita e segnale applicato al ramo dell'ingresso invertente.

La retroazione è negativa, quindi possiamo applicare il principio di terra virtuale. Scriviamo anzitutto le relazioni:  $V^- = V^+ = 0$  e  $I^- = I^+ = 0$ .

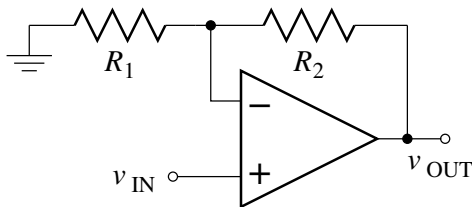
Il circuito si risolve applicando la KCL all'ingresso invertente:  $I_1 = I_2$

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

da cui si ricava:

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

## Amplificatore non invertente - primo esempio



La rete di retroazione è identica al caso dell'amplificatore invertente; la retroazione è negativa e possiamo applicare il principio di terra virtuale.

$$V^- = V^+ = v_{IN} \quad \text{e} \quad I^- = I^+ = 0$$

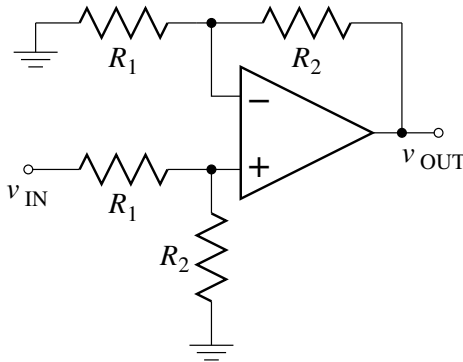
Procedendo come nel caso precedente, dalla KCL  $I_1 = I_2$  si ricava:

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

e il risultato finale è:

$$v_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{IN}$$

## Amplificatore non invertente - secondo esempio (1/2)

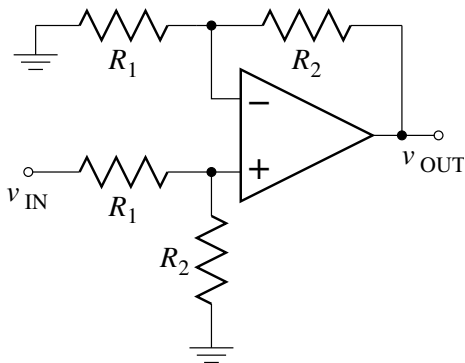


La retroazione è negativa. Usiamo le relazioni:  $V^- = V^+$  e  $I^- = I^+ = 0$ . Siccome in questo circuito nessuno dei due ingressi (+) e (-) dell'amplificatore è collegato alla tensione di ingresso o ad una tensione costante, bisogna calcolare la corrente nella maglia di ingresso, e quindi la tensione all'ingresso +:

$$V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{IN} = V^-$$

che è uguale alla tensione all'ingresso - per il principio di terra virtuale.

## Amplificatore non invertente - secondo esempio (2/2)



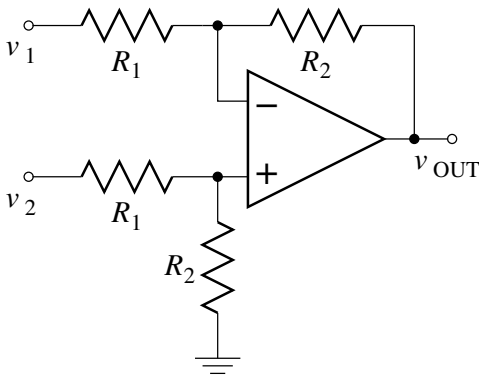
Dalla KCL all'ingresso (-), si ricava:

$$\frac{1}{R_1} \cdot \frac{-v_{IN} R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{R_2} \cdot \left( \frac{v_{IN} R_2}{R_1 + R_2} - v_{OUT} \right)$$

e si ottiene il risultato:

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

## Amplificatore della differenza (1/2)

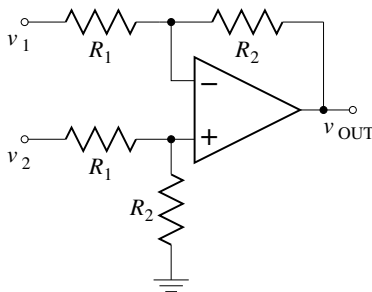


Questo circuito è un amplificatore della differenza. Procedendo come per il circuito precedente, si ricava:

$$I^+ = I^- = 0 \quad \text{e} \quad V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_2 = V^-$$



## Amplificatore della differenza (2/2)



Quindi si può scrivere:

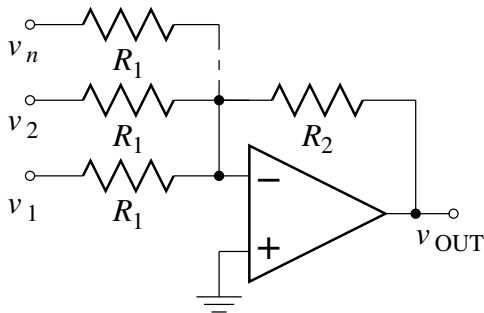
$$\frac{1}{R_1} \cdot \left( v_1 - \frac{v_2 R_2}{R_1 + R_2} \right) = \frac{1}{R_2} \cdot \left( \frac{v_2 R_2}{R_1 + R_2} - v_{OUT} \right)$$

da cui si ricava il risultato:

$$v_{OUT} = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

che giustifica il nome di amplificatore della differenza.

## Sommatore (invertente)

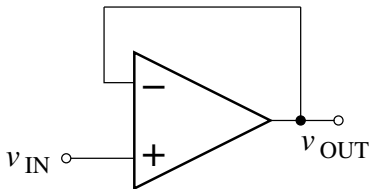


Il circuito è un sommatore invertente. Poiché vale il principio di terra virtuale  $V^+ = V^- = 0$  si può ricavare immediatamente il risultato applicando il principio di sovrapposizione degli effetti. Infatti, spegnendo tutti i generatori di ingresso tranne uno, si vede che nelle resistenze collegate ai generatori spenti non passa corrente perché la differenza ai loro capi è nulla; quindi il circuito si riduce ad un amplificatore invertente quando uno solo degli ingressi è acceso.

Sommando i risultati parziali, otteniamo:

$$v_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} (v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

# Inseguitore (buffer) di tensione



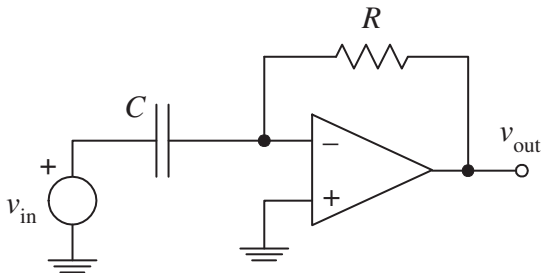
Il circuito è un inseguitore di tensione.

Dal principio di terra virtuale  $V^+ = V^-$  si ottiene immediatamente:

$$v_{OUT} = v_{IN}$$

Siccome  $I^+ = I^- = 0$  l'inseguitore di tensione non assorbe corrente in ingresso, quindi è utile quando bisogna leggere una tensione il cui valore potrebbe essere alterato se si prelevasse una corrente.

## Circuito derivatore (1/2)



Per questo circuito, osserviamo anzitutto vale il principio della terra virtuale. Prendendo le correnti con il verso da sinistra verso destra, la KCL applicata all'ingresso (-) si può scrivere come  $i_C(t) = i_R(t)$ , da cui ricaviamo:

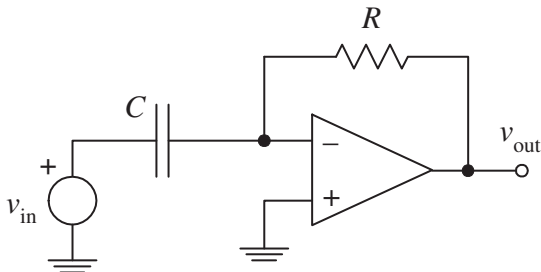
$$C \frac{d(v_{in}(t) - 0)}{dt} = \frac{0 - v_{out}(t)}{R}$$

e risolvendo rispetto a  $v_{out}(t)$  si ottiene:

$$v_{out}(t) = -RC \frac{dv_{in}(t)}{dt} = -\tau \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

**L'uscita è proporzionale alla *derivata* dell'ingresso.**

## Circuito derivatore (2/2)



Se  $v_{in}(t) = V_A \sin 2\pi f_0 t$ , allora:

$$v_{out}(t) = -2\pi f_0 R C V_A \cos 2\pi f_0 t =$$

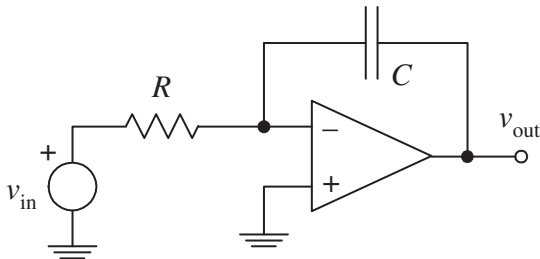
$$v_{out}(t) = 2\pi f_0 R C V_A \sin \left( 2\pi f_0 t + \frac{3\pi}{2} \right)$$

L'ampiezza della tensione è moltiplicata per  $2\pi f_0 R C = 2\pi f_0 \tau$ .

Nel dominio della frequenza, il guadagno aumenta in modo direttamente proporzionale alla frequenza.

Il derivatore ha una risposta in frequenza il cui diagramma di Bode del modulo ha una pendenza costante di  $+20 \text{ dB/decade}$ .

## Circuito integratore (1/2)



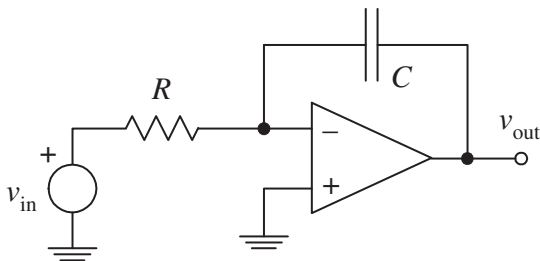
Il circuito integratore si risolve in modo analogo al precedente.

Dalla KCL al nodo di terra virtuale si ha  $\frac{v_{in}(t)}{R} = -C \frac{dv_{out}(t)}{dt}$ , e risolvendo rispetto a  $v_{out}(t)$  si ottiene:

$$v_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in}(t) dt + v(0)$$

L'uscita è proporzionale all'*integrale* dell'ingresso.

## Circuito integratore (2/2)



Se  $v_{in}(t) = V_A \sin 2\pi f_0 t$ , allora:

$$v_{out}(t) = \frac{V_A}{2\pi f_0 RC} \cos 2\pi f_0 t + v(0) = \frac{V_A}{2\pi f_0 RC} \sin \left( 2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2} \right) + v(0)$$

L'ampiezza della tensione è divisa per  $2\pi f_0 RC = 2\pi f_0 \tau$ .

Quindi l'integratore ha una risposta in frequenza che decresce: il diagramma di Bode del modulo ha una pendenza costante di  $-20$  dB/decade.

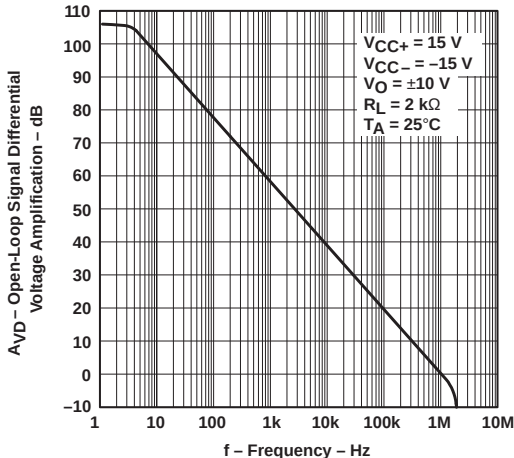
# Guadagno finito

Il guadagno di un amplificatore reale non è infinito; per l'amplificatore uA741 si ha:

$$A_{VD} = 200 \text{ V/mV}$$

cioè 200 000, che corrisponde a 106 dB.

Questo valore elevato del guadagno si ha solo per frequenze molto basse (pochi hertz).



**Figure 7. Open-Loop Large-Signal Differential Voltage Amplification vs Frequency**

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>

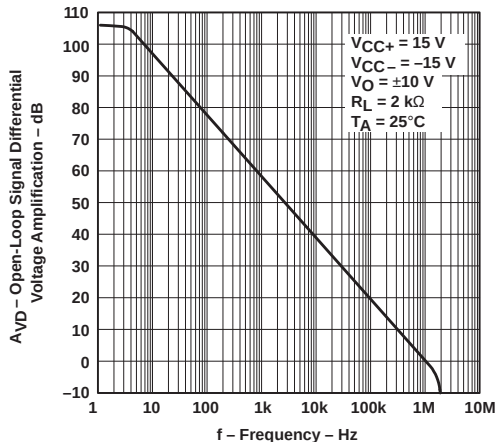


# Banda finita

Per frequenze maggiori di pochi hertz, l'amplificatore reale ha il comportamento di un filtro bassa-basso: il guadagno diminuisce all'aumentare della frequenza, con una pendenza di  $-20$  dB/decade.

La frequenza di guadagno unitario (cioè 0 dB) è circa 1 MHz.

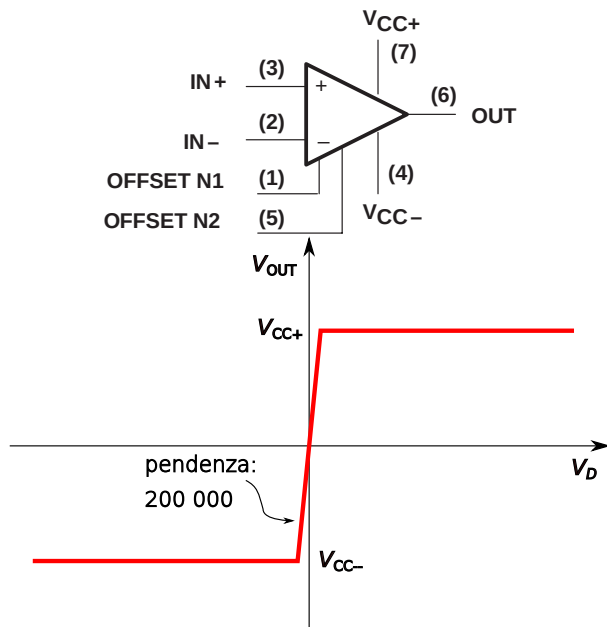
Per gli amplificatori invertente e non invertente e per il derivatore, si può osservare l'effetto della banda finita dell'amplificatore: dopo una certa frequenza il guadagno del circuito diminuisce.



**Figure 7. Open-Loop Large-Signal Differential Voltage Amplification vs Frequency**

# Limitazione della tensione di uscita

La tensione di uscita (pin 6) non può superare l'alimentazione positiva ( $V_{CC+}$  al pin 7) o negativa ( $V_{CC-}$  al pin 4).



# Limitazione della corrente di uscita (slew-rate)

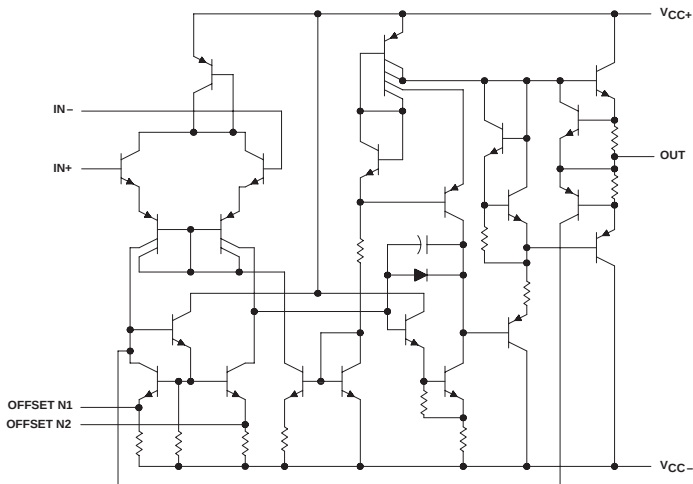
La corrente in uscita non può avere un valore infinito, ma ha un valore massimo  $I_{\max}$ . Poiché l'uscita presenta una capacità  $C$ , la massima derivata della tensione di uscita rispetto al tempo è:

$$\left( \frac{dv_{\text{out}}}{dt} \right)_{\max} = \frac{I_{\max}}{C}$$

Questa limitazione è nota con il nome di “slew rate” e si osserva quando l'uscita invece di essere sinusoidale diventa triangolare.

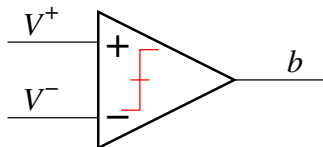
Per l'amplificatore uA741 lo slew rate tipico è  $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ .

# Offset di tensione in ingresso



Se i transistori dei due rami di ingresso non sono perfettamente identici, essi conducono una corrente leggermente diversa e questo provoca uno spostamento di alcuni millivolt della caratteristica ingresso-uscita (“offset” di tensione).

# Comparatore di tensione



Il comparatore di tensione è un amplificatore operazionale utilizzato senza retroazione, in modo da avere un'uscita che si trova sempre al valore alto ( $V_S^+$ ) oppure al valore basso ( $V_S^-$ ).

Possiamo interpretare l'uscita come un valore **digitale** ad un bit  $b$ :

$$b = \begin{cases} '1' & \text{se } v_{OUT} = V_S^+ \text{ cioè se } V^+ > V^- \\ '0' & \text{se } v_{OUT} = V_S^- \text{ cioè se } V^+ < V^- \end{cases}$$

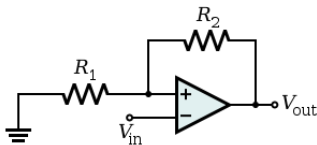
Il **comparatore** converte segnali analogici in segnali digitali.

*Esempio: (1) usare un amplificatore operazionale per estrarre un'onda quadra che corrisponde al segno di una sinusoide a media nulla; (2) aggiungere una componente continua (offset) alla sinusoide e vedere come si modifica l'onda quadra. Convenzionalmente, il bit di segno è 0 per un segnale positivo e 1 per un segnale negativo; quindi si deve applicare il segnale all'ingresso invertente.*

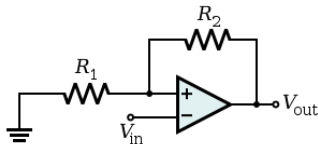
## Trigger di Schmitt (1/2)

Quando l'ampiezza del segnale di ingresso è molto piccola, il '*rumore elettronico*' disturba l'operazione di conversione e può portare ad avere un bit di uscita che varia in modo casuale tra 1 e 0 quando il segnale di ingresso attraversa lo zero. Questo effetto provoca inconvenienti se la variazione del bit in uscita viene interpretata come un segnale (ad esempio, se si deve contare il numero delle transizioni da 0 a 1).

Per ovviare a questo problema, si può utilizzare un comparatore con *isteresi*; l'esempio più semplice è il *trigger di Schmitt*.



## Trigger di Schmitt (2/2)



Il trigger di Schmitt è un circuito con retroazione **positiva**, in cui la retroazione produce un effetto di *memoria*: all'ingresso (+) viene riportata una frazione del segnale di uscita (che può essere positiva o negativa). Se l'ingresso (+) è ad una tensione positiva perché l'uscita è alta, occorre che il segnale di ingresso diventi maggiore per far scattare il comparatore al valore logico basso; dopo di che, l'ingresso (–) si troverà ad un valore negativo e quindi il comparatore non scatterà fino a quando il segnale di ingresso sarà diventato più negativo.

*Esempio: (1) usare un trigger di Schmitt con soglie di scatto a  $\pm 50$  mV per vedere che un rumore di piccola ampiezza non ha effetto; (2) ricavare il diagramma dell'isteresi impostando l'oscilloscopio in modalità XY.*

# Multivibratore astabile

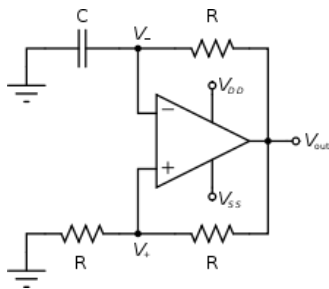


Figura: Multivibratore astabile

Il multivibratore astabile ha due anelli di retroazione. La retroazione positiva produce un effetto di isteresi, come nel trigger di Schmitt; la retroazione negativa attraverso la rete  $RC$  produce una salita (discesa) esponenziale della tensione all'ingresso invertente, e quando questa tensione supera il valore dell'intervallo di isteresi il comparatore scatta.

Cambiando la costante di tempo  $RC$  o il fattore di retroazione positiva si può modificare la frequenza di oscillazione.