

Fondamenti di Elettronica

03

Amplificatore operazionale



Enrico Zanoni
enrico.zanoni@unipd.it

508717

L'amplificatore operazionale : caratteristiche ideali

Segnale differenziale e di modo comune

Guadagno ad anello aperto e ad anello chiuso

Configurazione invertente

Effetto del guadagno ad anello aperto finito

Miglioramento del compromesso tra A_v e R_{in} : rete di feedback a T

Circuito sommatore

Configurazione non invertente

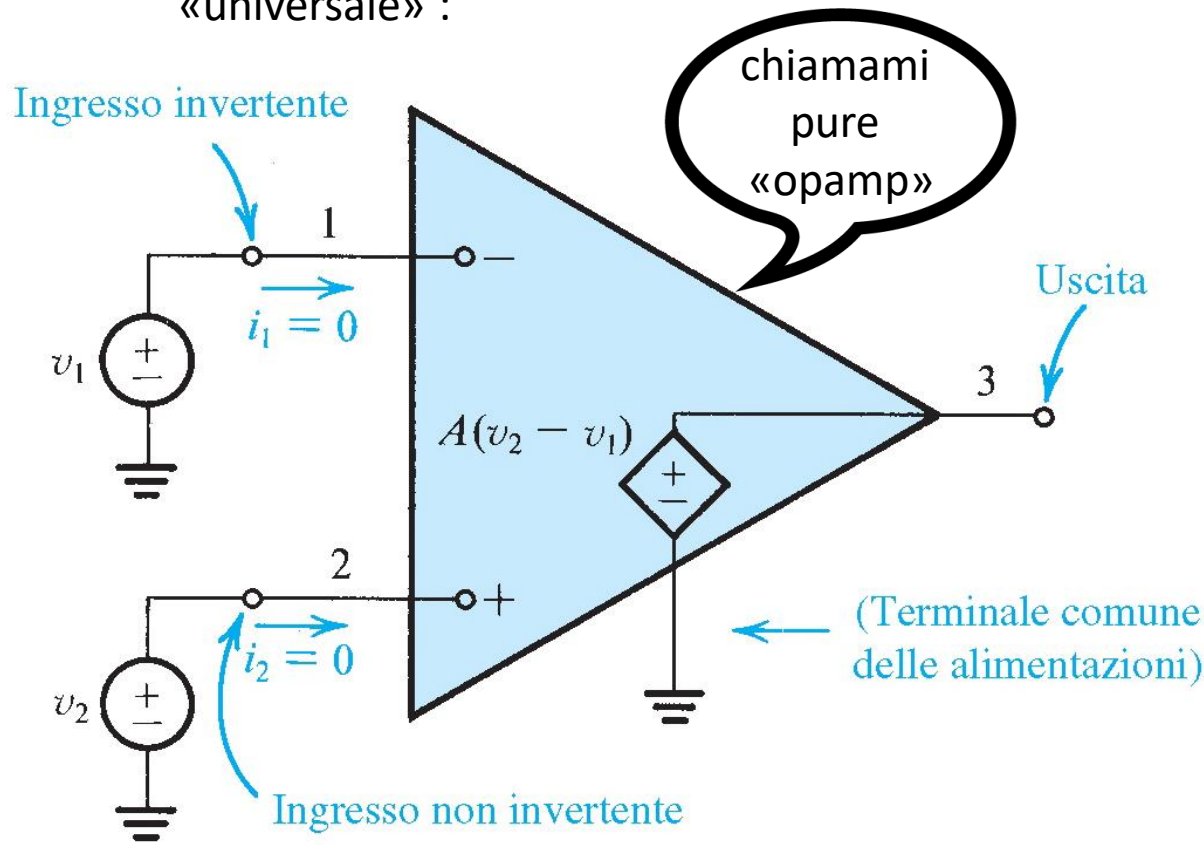
Effetto del guadagno ad anello aperto finito

Inseguitore di tensione

L'amplificatore operazionale

Un **amplificatore di tensione ideale** ha **resistenza di ingresso R_i infinita** e **resistenza di uscita R_o nulla**.

Partiamo da queste caratteristiche ideali per definire un blocco analogico «universale» :

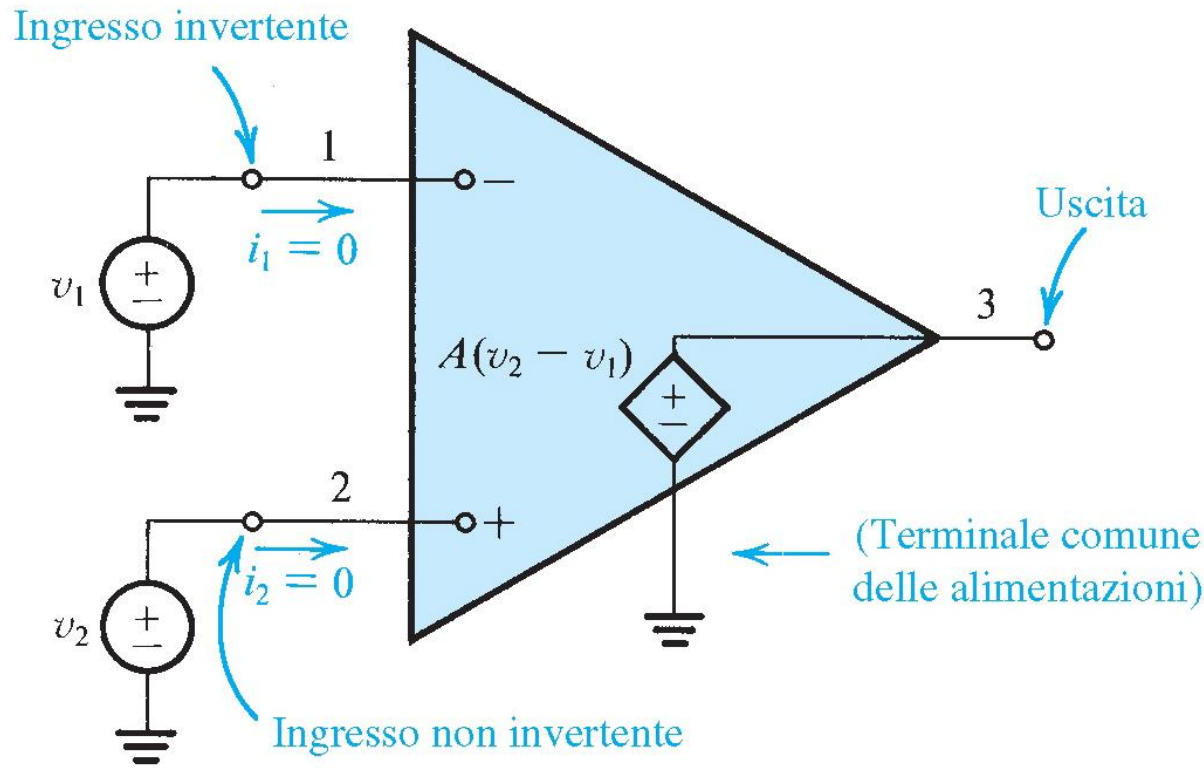


- non è stata considerata l'alimentazione DC
- **2 ingressi**: uno «invertente» e l'altro «non-invertente» in modo da poter **amplificare differenze** tra segnali
- La **resistenza di ingresso**, per entrambi gli ingressi, è **infinita**; di conseguenza **la corrente entrante è nulla**

L'amplificatore operazionale

Un amplificatore di tensione ideale ha resistenza di ingresso R_i infinita e resistenza di uscita R_o nulla.

Partiamo da queste caratteristiche ideali per definire un blocco analogico «universale» :

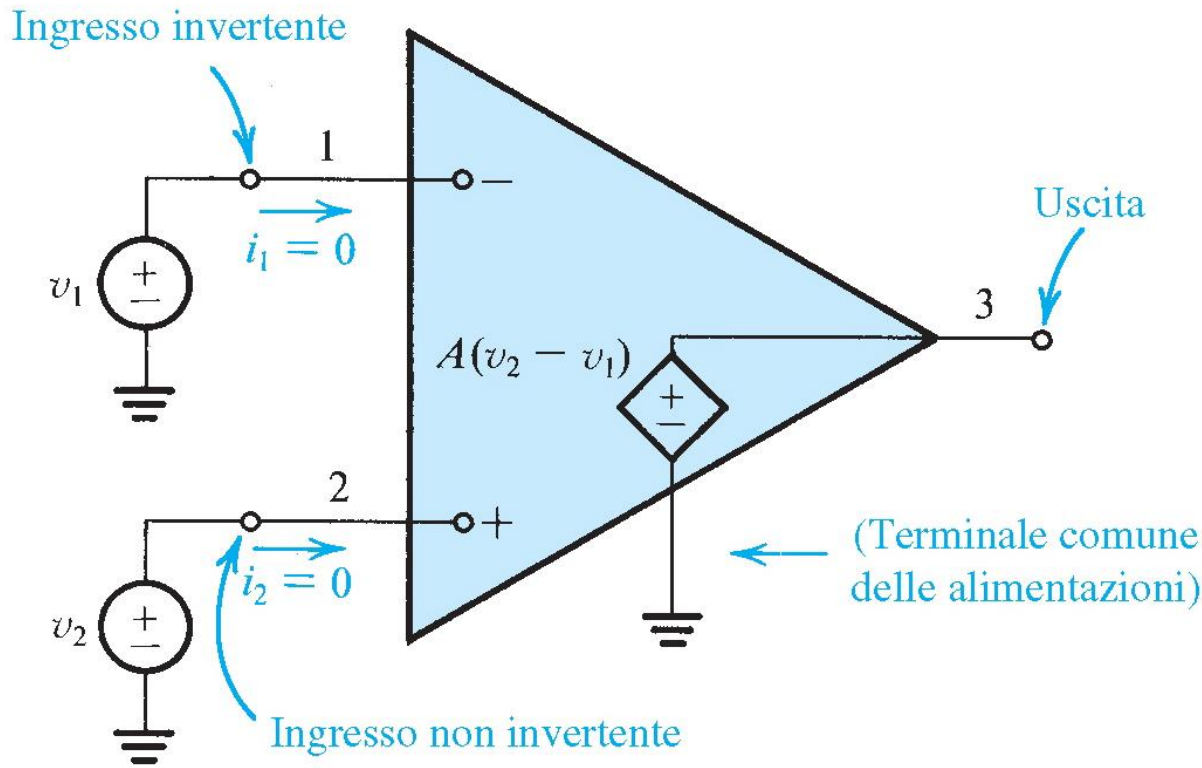


- la **resistenza di uscita è nulla**. Il circuito di uscita è un generatore di tensione di Thevenin ideale
- La tensione di uscita è pari a **$v_o = A(v_2 - v_1)$** , dove A è il **guadagno differenziale** (di tensione) dell'amplificatore operazionale
- Tutte le tensioni sono riferite a massa
- L'uscita è in fase con v_2 e in opposizione di fase con v_1

L'amplificatore operazionale

Un amplificatore di tensione ideale ha resistenza di ingresso R_i infinita e resistenza di uscita R_o nulla.

Partiamo da queste caratteristiche ideali per definire un blocco analogico «universale» :



- il guadagno è **differenziale**: i **segnali comuni** a v_2 e v_1 non vengono amplificati «**reiezione di modo comune**»
- l'**ingresso** è **differenziale** (due terminali); l'**uscita** è **singola**, o **single-ended** (riferita a massa)
- Il **guadagno è costante** da 0 a ∞ Hz. **La banda passante è infinita**
- **Il guadagno A è infinito (!?!)**

Guadagno differenziale infinito – cosa significa ?

Il guadagno «ad anello aperto» di un amplificatore operazionale è molto elevato, idealmente infinito.

Se si utilizza l'amplificatore senza prendere ulteriori precauzioni, basta un segnale di ampiezza minima perchè l'amplificatore «saturi».

L'opamp si utilizza quindi in una configurazione «ad anello chiuso» nella quale è presente una controreazione, o feedback negativo, che permette il funzionamento del circuito come amplificatore e amplia l'intervallo di tensioni di ingresso per il quale il comportamento del circuito è lineare.

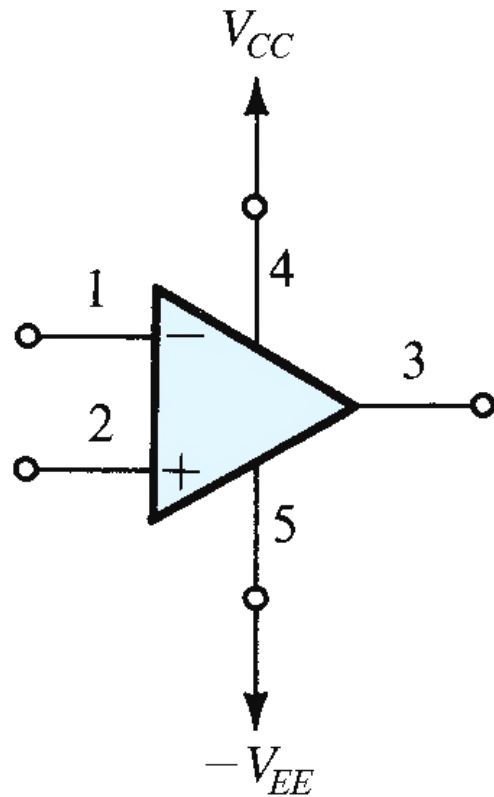
Se esiste una controreazione tale che:

- $v_o = A(v_2 - v_1)$, dove A è il guadagno ad anello aperto che tende a ∞
- la tensione di uscita v_o è finita
- allora $v_2 - v_1$ è infinitesima e $\rightarrow 0$ per $A \rightarrow \infty$
- a relazione tra v_o e $v_2 - v_1$ è lineare

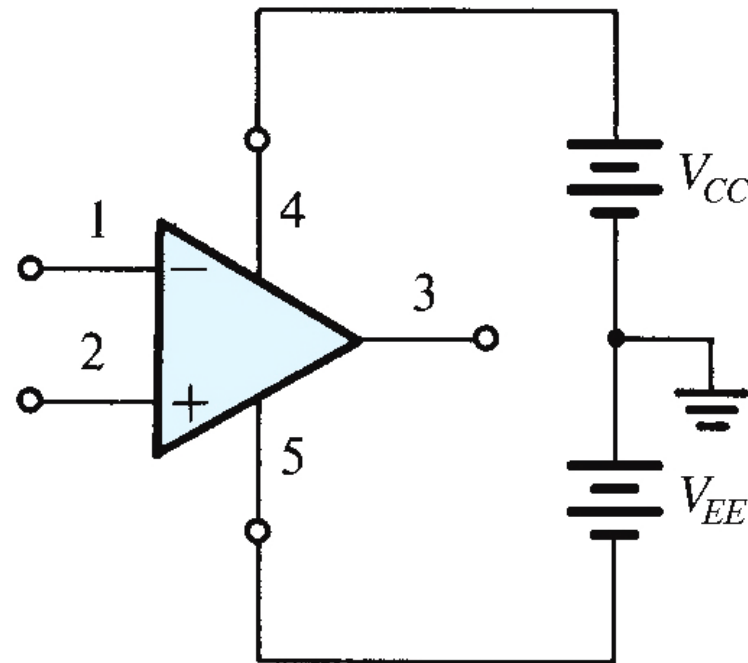
Con queste condizioni (=in presenza di feedback negativo) vale il

«PRINCIPIO DI MASSA VIRTUALE» = «la differenza di tensione tra ingresso + (non invertente) e - (invertente) è SEMPRE NULLA.

L'amplificatore operazionale con alimentazione duale

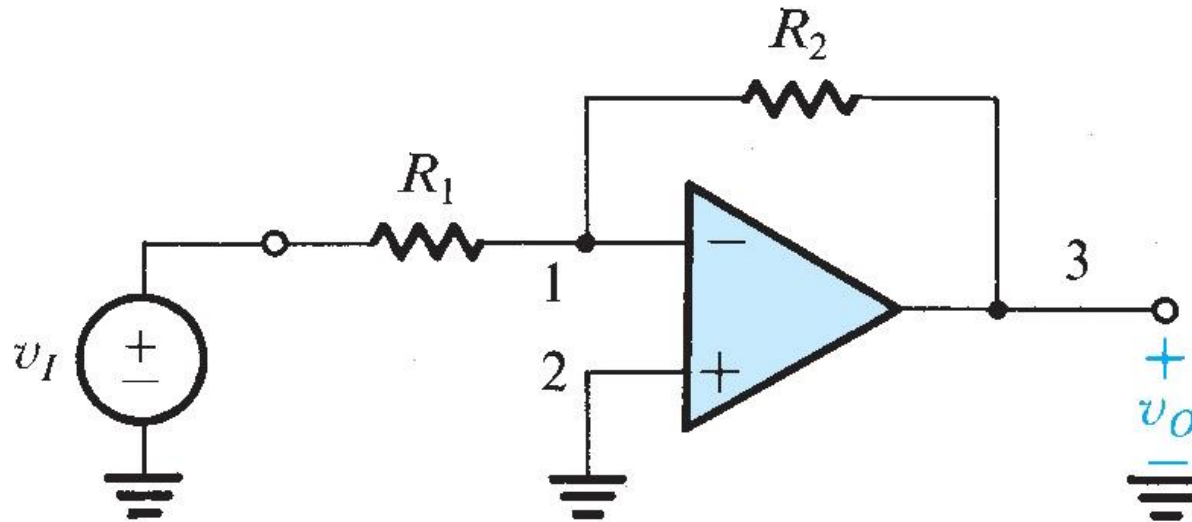


(a)



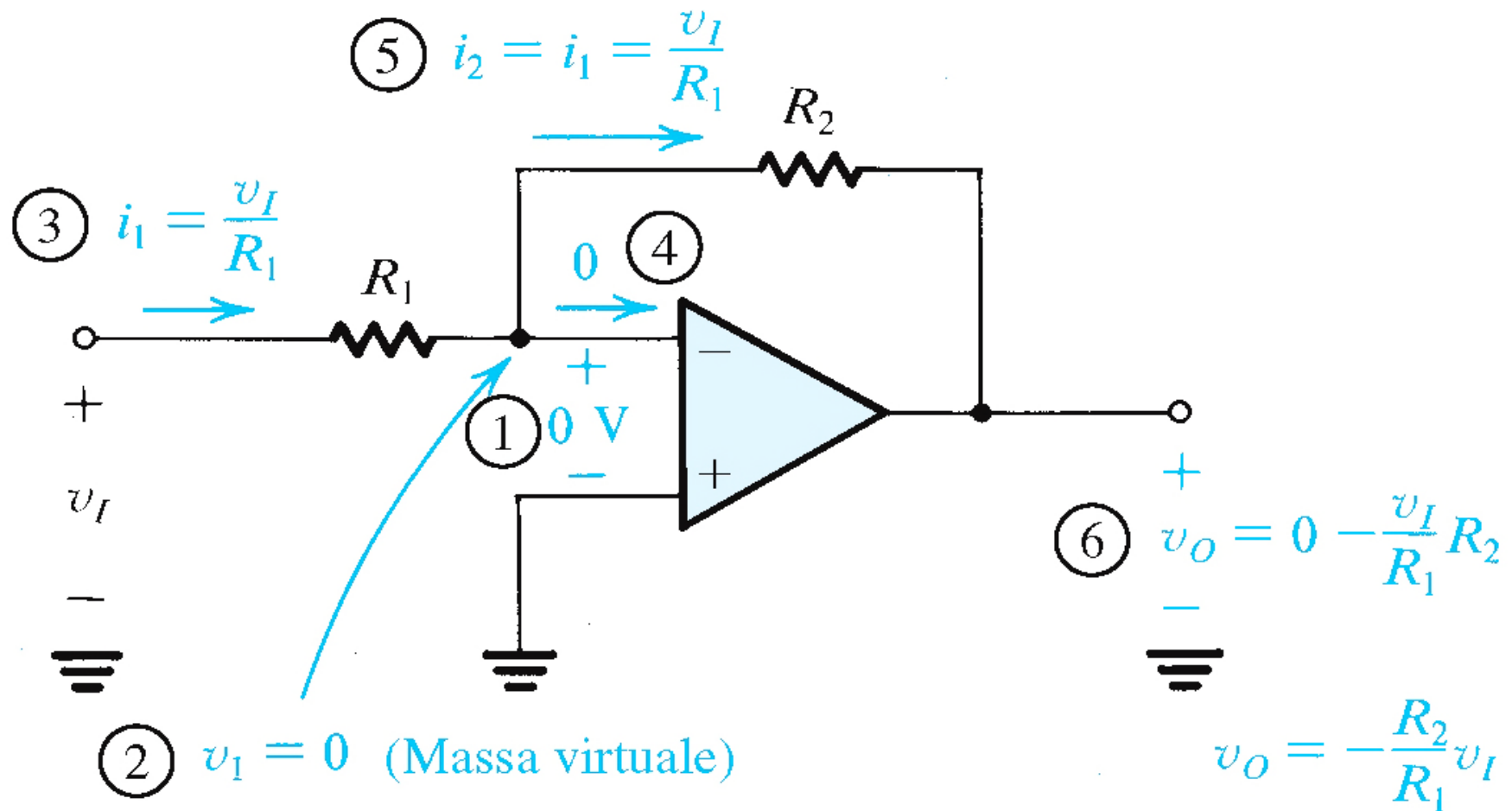
(b)

Amplificatore invertente



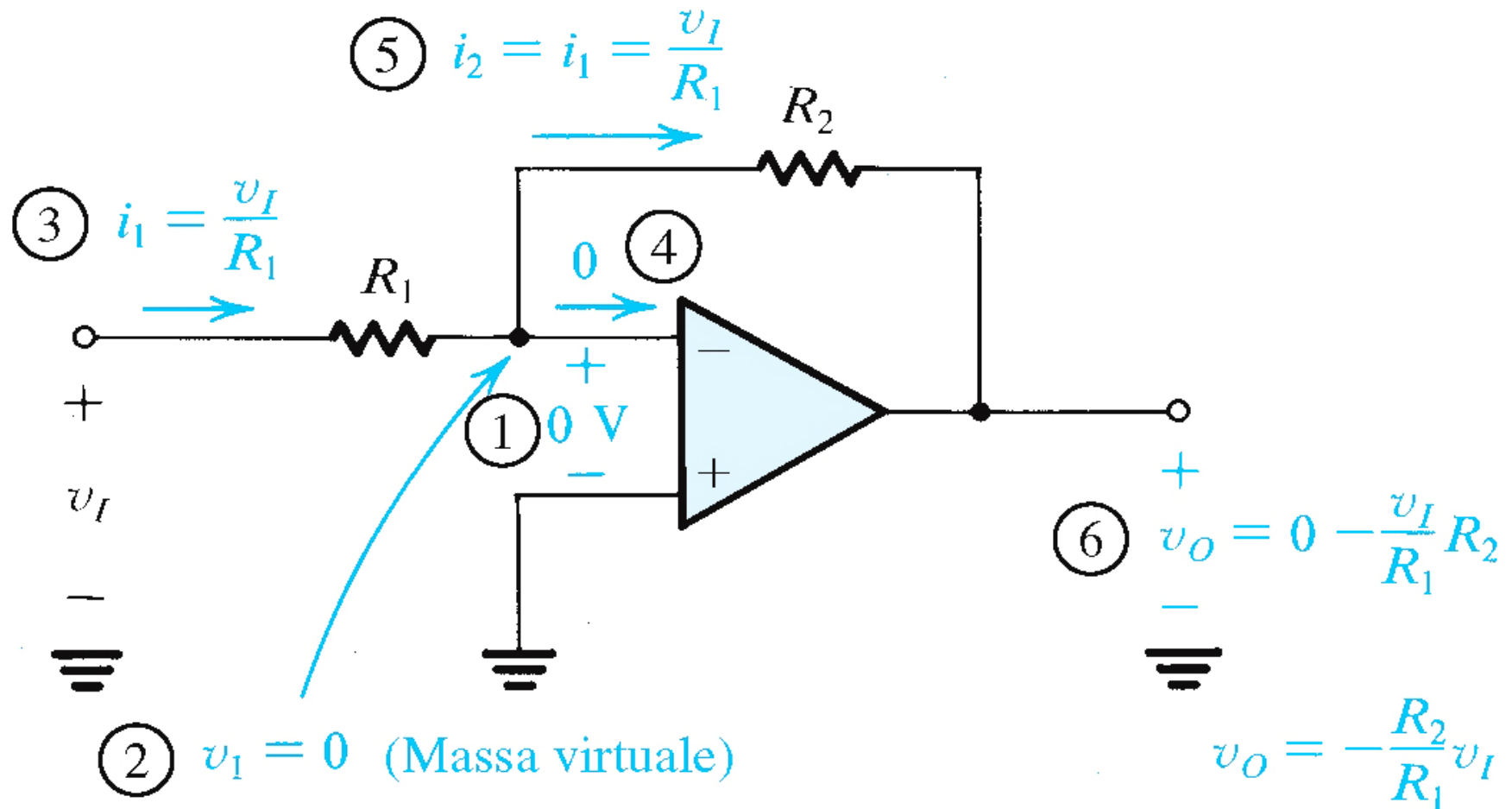
- Considerazioni e ipotesi di partenza:
- R_2 realizza una **retroazione negativa** (se $v_2 - v_1$ aumenta, v_O aumenta, e il prelievo operato da R_2 fa aumentare v_1 , contenendo l'aumento di $v_2 - v_1$)
- v_1 e v_2 sono alla stessa tensione per il principio di massa virtuale «cortocircuito **virtuale**»
- Nei terminali $-$ e $+$ dell'opamp **non entra corrente**: la resistenza di ingresso è infinita

Analisi dell'amplificatore invertente



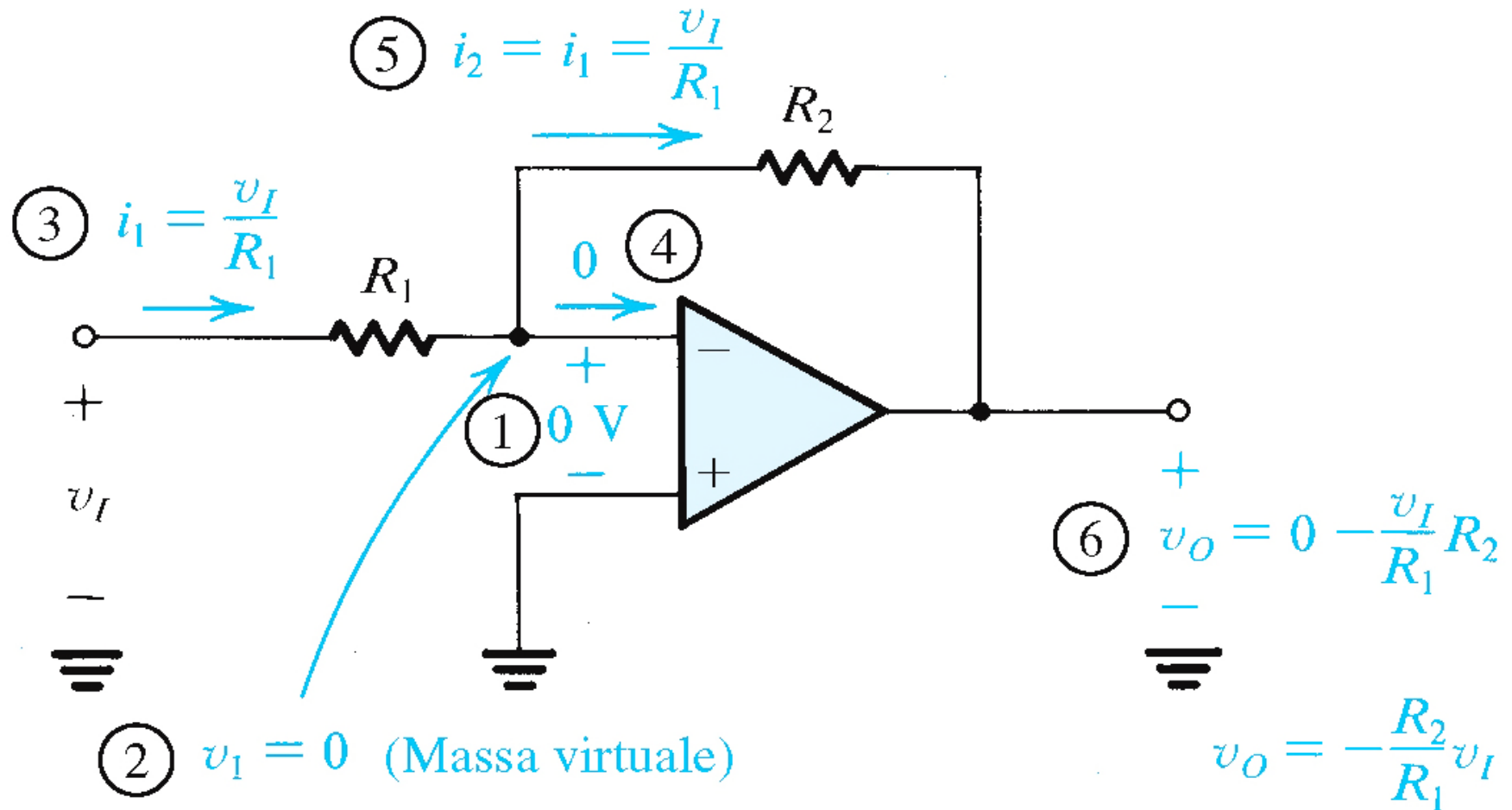
1. per il cortocircuito virtuale tra + e -, $v_+ = v_- = 0$
2. questa è anche la tensione del nodo tra R_2 e R_1

Analisi dell'amplificatore invertente



- la tensione v_1 tra ingresso e massa è la stessa tensione che c'è ai capi di R_1 : $i_i = v_i / R_i$
- la corrente i_i non può entrare nell'operazionale,
- quindi scorre tutta in R_2

Analisi dell'amplificatore invertente



3. alla maglia di uscita $v_o = 0 - (v_i/R_1) \cdot R_2$

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

guadagno dell'amplificatore
invertente con opamp

Amplificatore invertente con opamp

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad \begin{array}{l} \text{guadagno dell'amplificatore} \\ \text{invertente con opamp} \end{array}$$

il cortocircuito tra gli ingressi è **virtuale** : non c'è passaggio di corrente tra i due ingressi e verso l'interno dell'amplificatore

il guadagno è negativo; c'è uno sfasamento di 180° tra uscita e ingresso

- il guadagno in tensione dipende solo dal rapporto di due resistenze
- può essere molto accurato
- è indipendente dalle caratteristiche dell'amplificatore
- è indipendente da variazioni

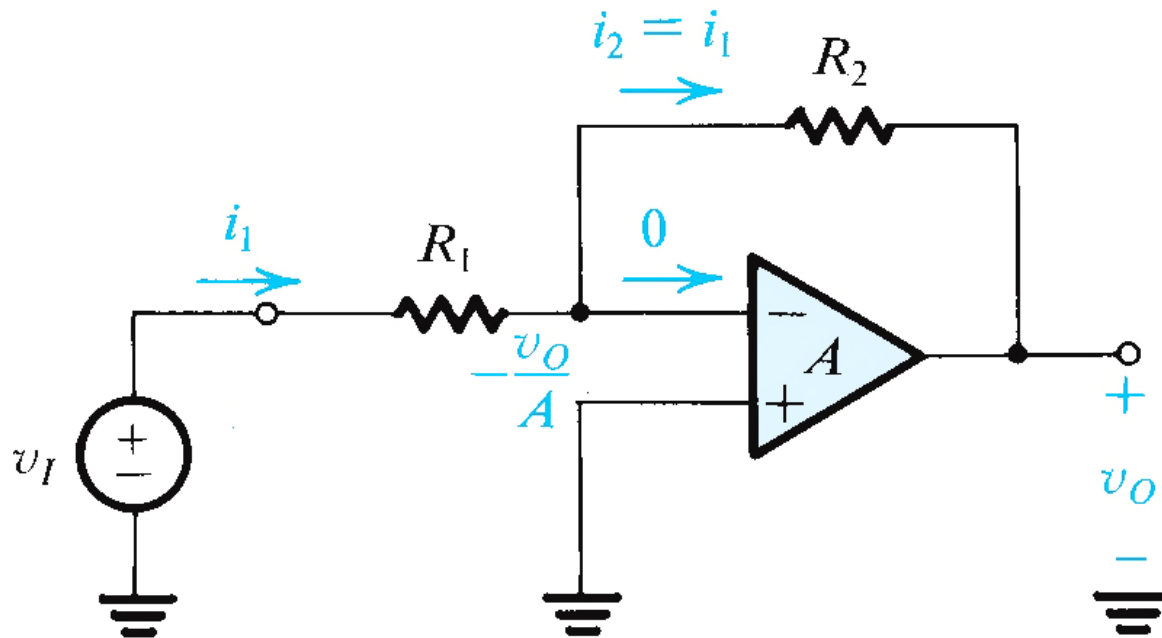
Ad anello aperto il guadagno è alto, ma linearità e stabilità delle caratteristiche sono ridotte

Inserendo una retroazione negativa (R_2) rinunciamo a parte del guadagno, ottenendo un guadagno stabile

Effetto di un guadagno di open-loop finito

Calcolo del guadagno in tensione dell'amplificatore invertente con operazionale a guadagno finito A

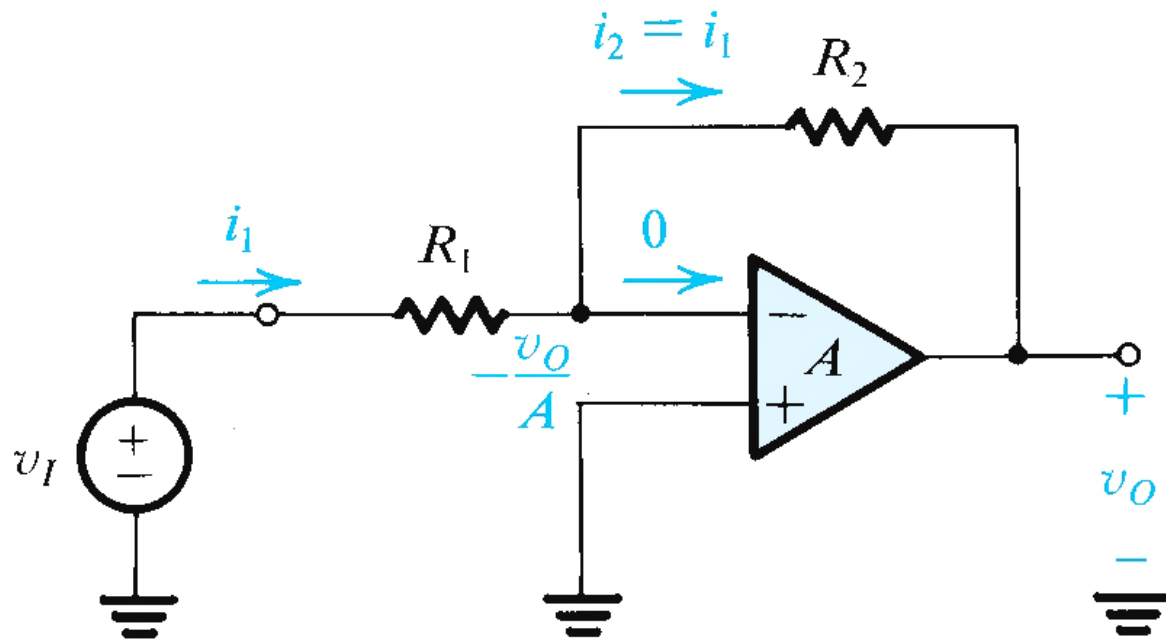
Ora supponiamo che l'amplificatore abbia un **guadagno finito** A (non più $A = \infty$). Di conseguenza **non è più vero che $v_+ = v_-$** , ma sarà $A(v_+ - v_-) = v_o$; poichè $v_+ = 0$, $v_- = -(v_o/A)$



Effetto di un guadagno di open-loop finito

$$i_1 = \frac{v_I - (-v_o/A)}{R_1} = \frac{v_I + (v_o/A)}{R_1}; \quad i_2 = i_1$$

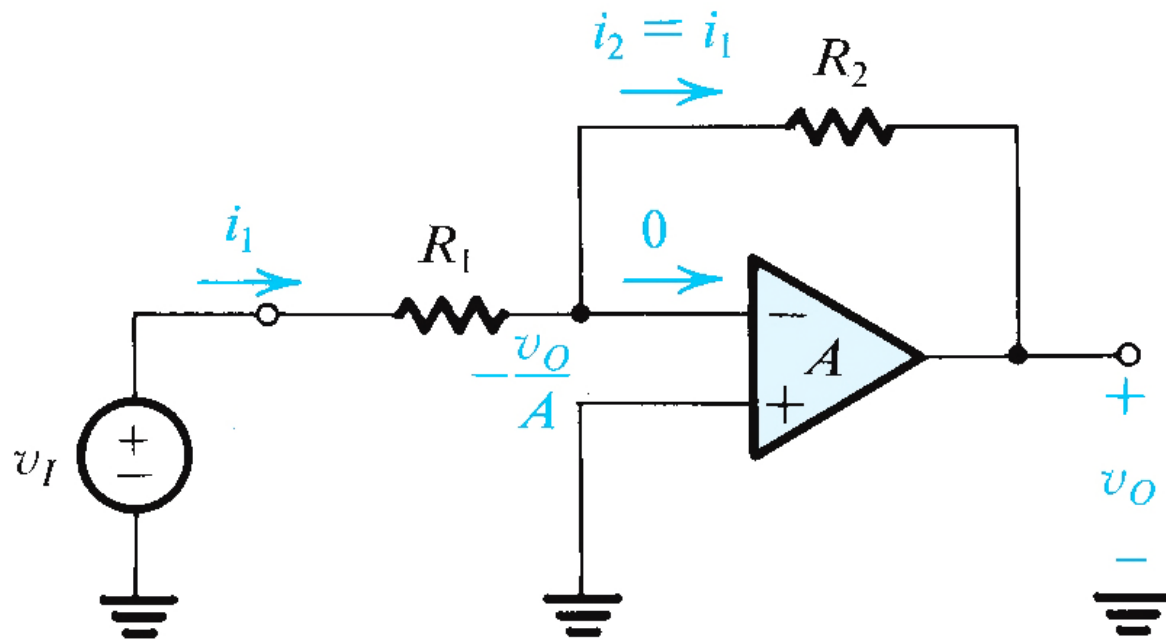
$$v_o = -v_o/A - i_1 R_2 = -v_o/A - \left(\frac{v_I + (v_o/A)}{R_1} \right) R_2$$



Effetto di un guadagno di open-loop finito

$$v_o = -v_o/A - i_1 R_2 = -v_o/A - \left(\frac{v_I + (v_o/A)}{R_1} \right) R_2$$

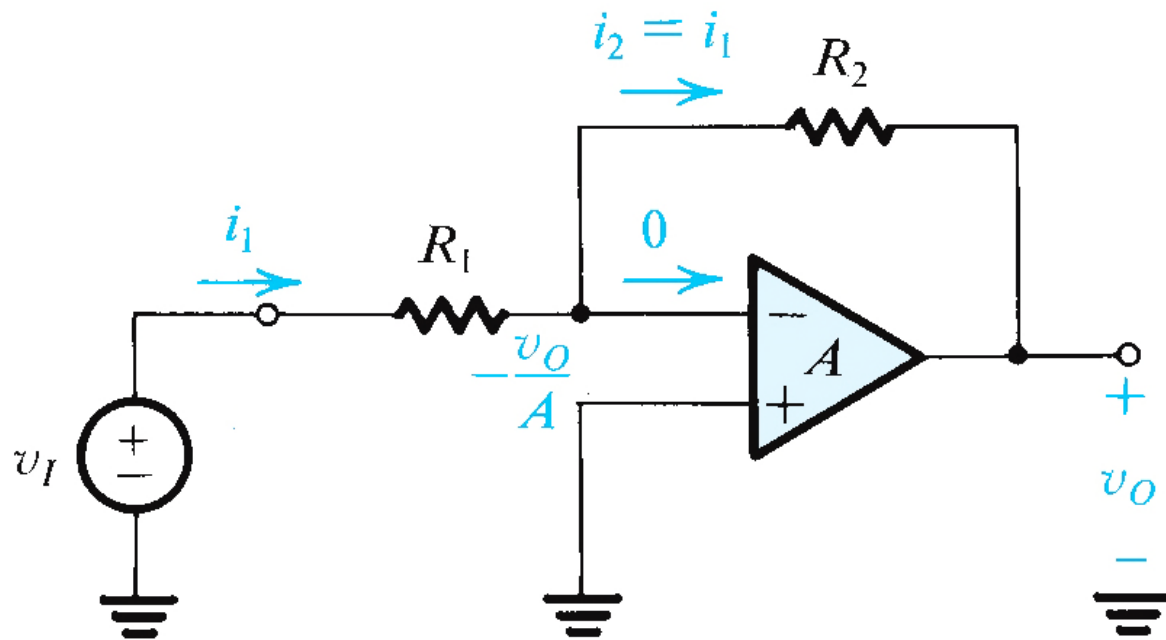
$$v_o = -\frac{v_o}{A} - \frac{v_o R_2}{A R_1} - v_I \frac{R_2}{R_1}$$



Effetto di un guadagno di open-loop finito

$$v_o = -\frac{v_o}{A} - \frac{v_o R_2}{A R_1} - v_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$v_o \left(1 + \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \frac{R_2}{R_1} \right) = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

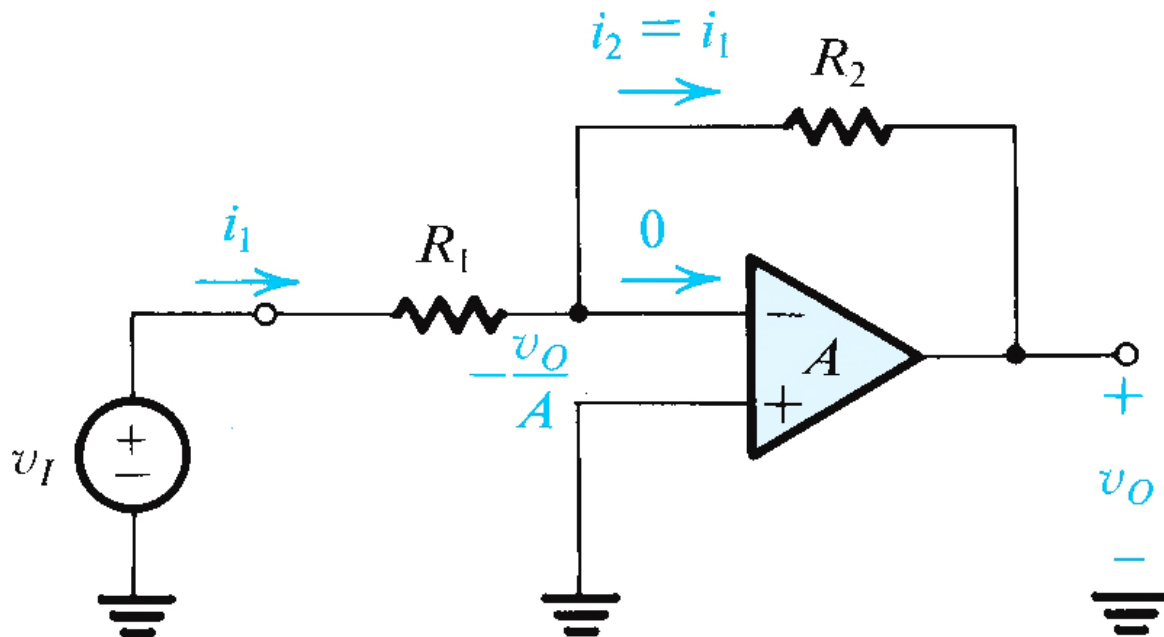


Effetto di un guadagno di open-loop finito

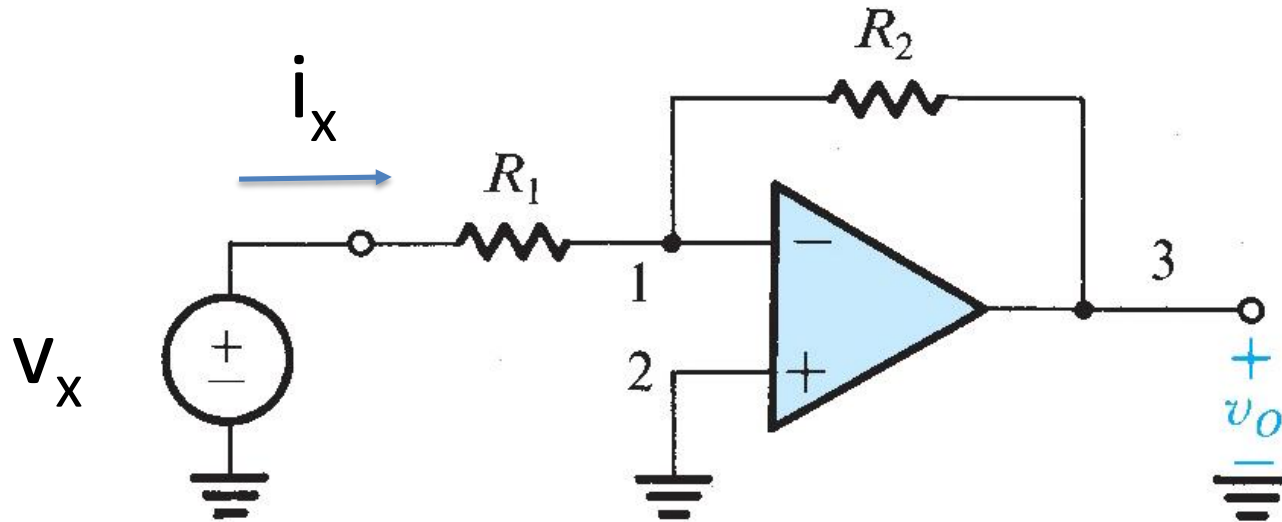
$$v_o \left(1 + \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \frac{R_2}{R_1} \right) = -v_I \frac{R_2}{R_1} \qquad v_o \left(1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right) = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

guadagno in
tensione del
circuito amplificatore

$$G_v = \frac{v_o}{v_I} = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{\left(1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right)} \rightarrow -\frac{R_2}{R_1} \text{ per } A \rightarrow \infty$$



Resistenza di ingresso dell'amplificatore invertente

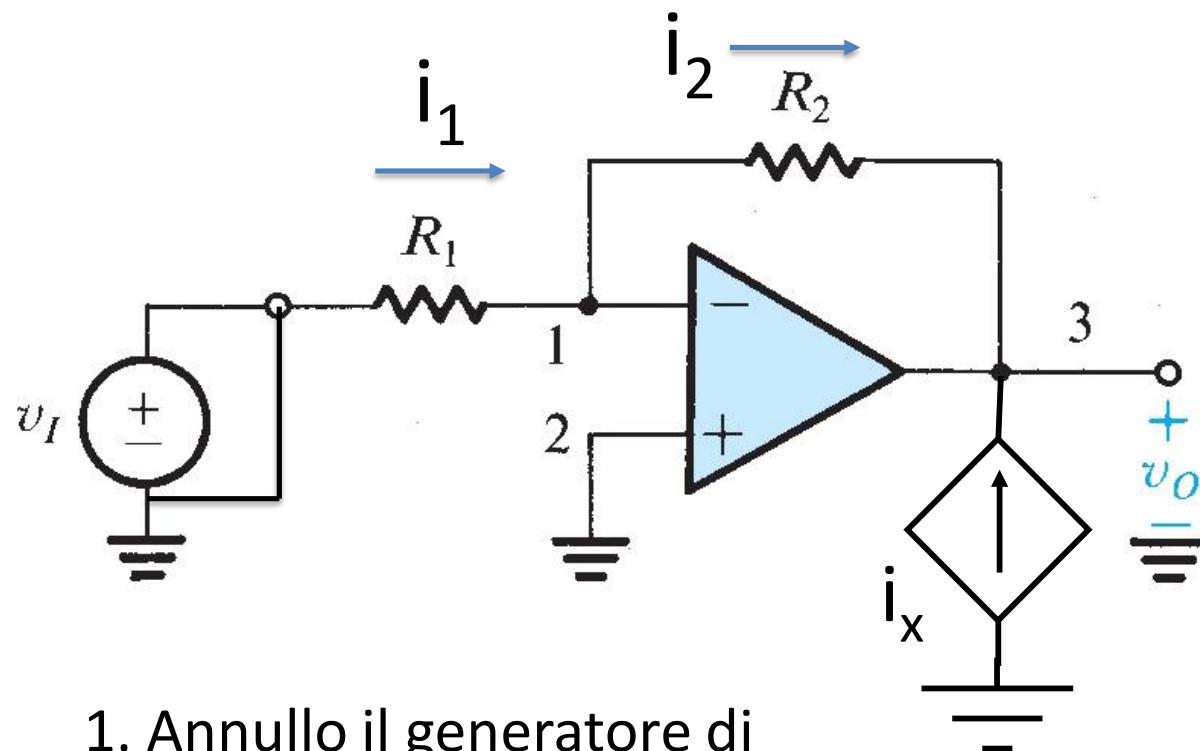


$$v_1 = v_2 = 0; i_x = \frac{v_x}{R_1}; R_i = \frac{v_x}{i_x} = R_1$$

La resistenza di ingresso R_i dell'amplificatore è pari a R_1
Per un amplificatore ideale di tensione, $R_1 = R_i$ dovrebbe essere molto alta. Questo però è in conflitto con il guadagno: $A_v = -R_2/R_1$

La **configurazione invertente** è **caratterizzata da una bassa resistenza di ingresso**

Resistenza di uscita dell'amplificatore invertente



1. Anullo il generatore di ingresso
2. Applico un generatore di corrente in uscita, i_x
3. Valuto v_o
4. Calcolo $R_o = v_o/i_x$

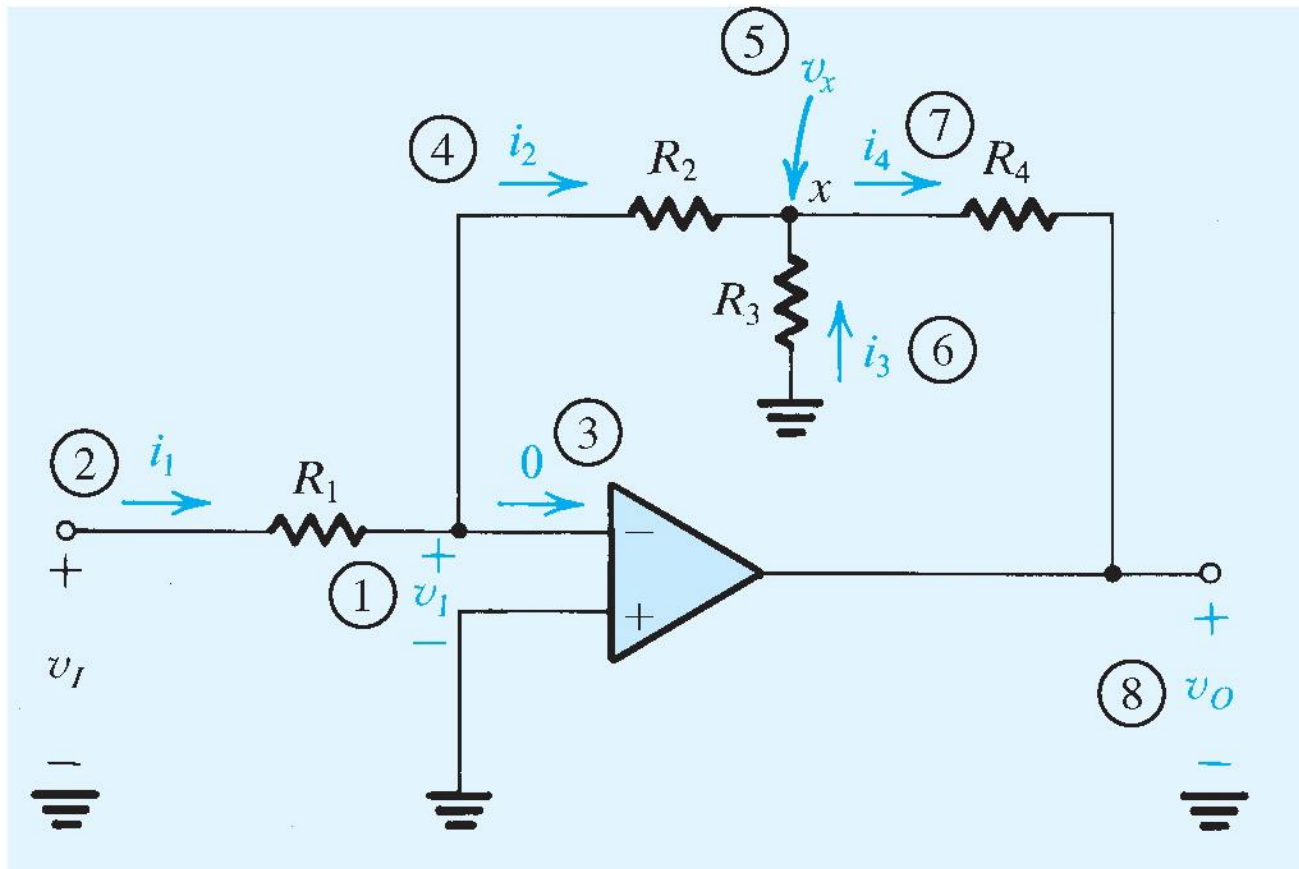
$$v_I = 0 \rightarrow i_1 = 0, i_2 = 0;$$

quindi $v_1 = v_3 = v_o = 0$

$$v_o/i_x = 0 \text{ e } R_o = 0$$

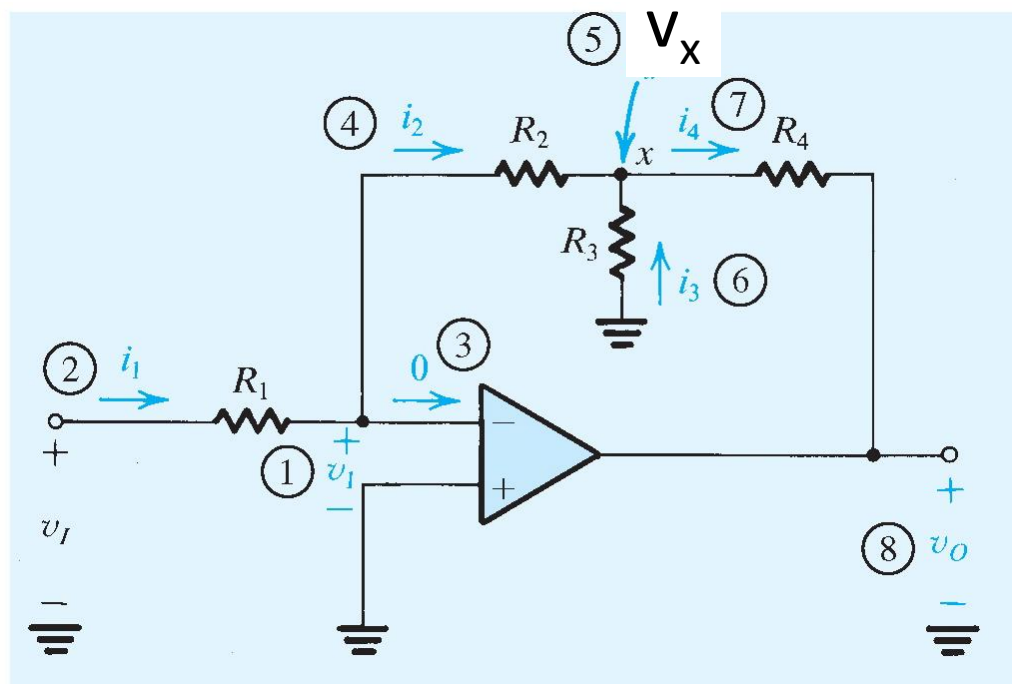
La resistenza di uscita è nulla.

Come migliorare il trade-off tra A_v e R_i nell'amplificatore invertente



Amplificatore con rete di feedback a T: permette di risolvere il conflitto tra resistenza di ingresso e guadagno nell'amplificatore invertente

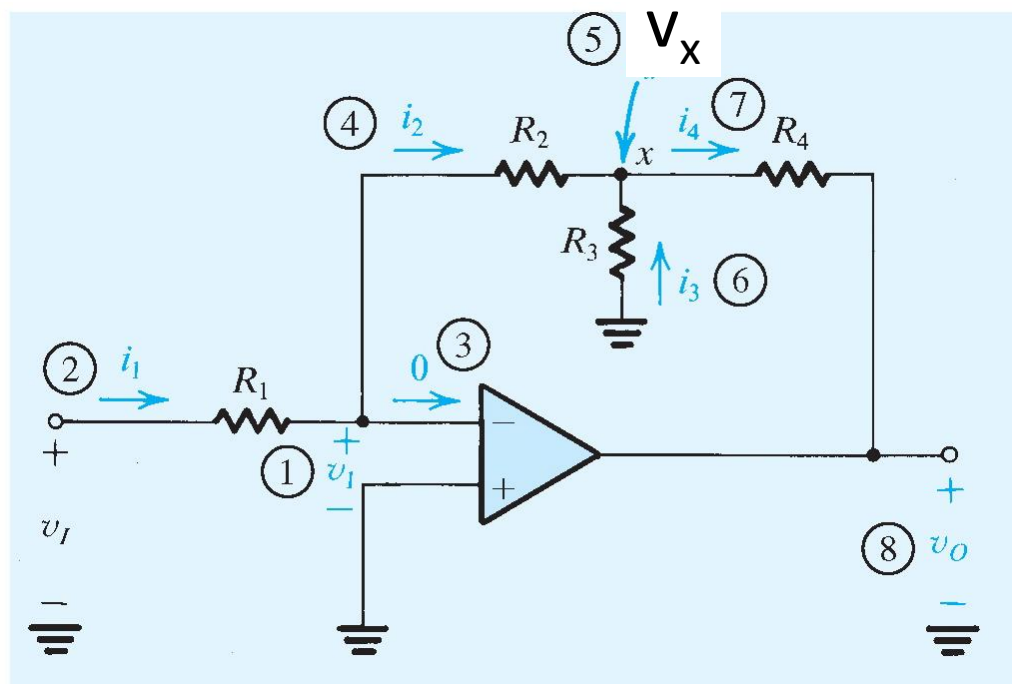
Come migliorare il trade-off tra A_v e R_i nell'amplificatore invertente



$$v_+ = v_- = 0 \Rightarrow i_1 = \frac{v_I}{R_1} = i_2$$

$$v_x = v_+ - i_2 R_2 = -i_2 R_2 = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

Come migliorare il trade-off tra A_v e R_i nell'amplificatore invertente

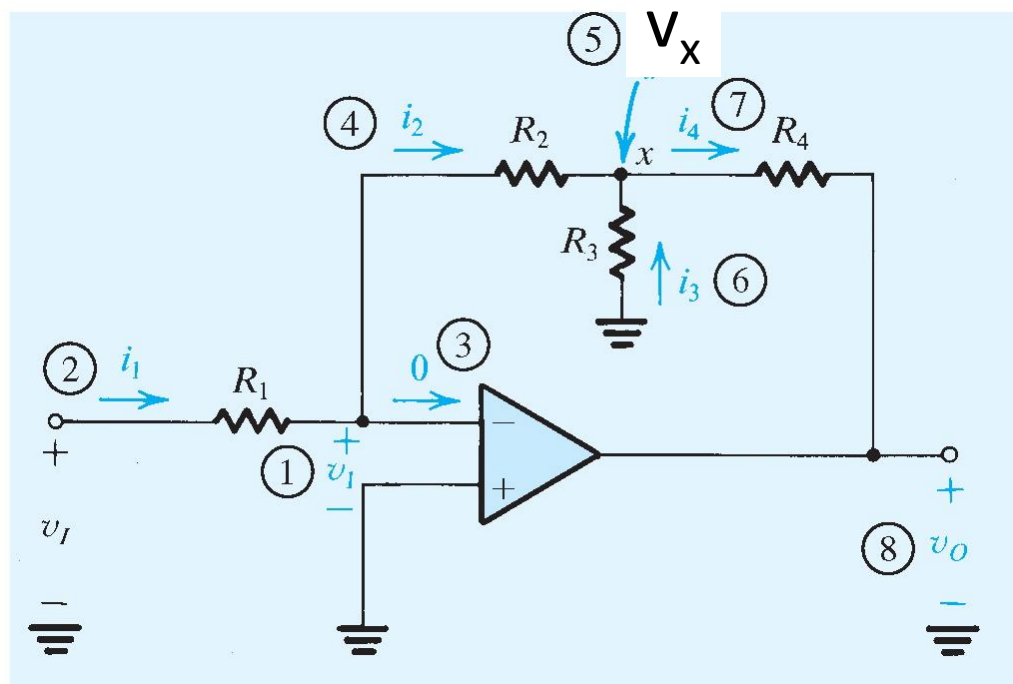


$$v_x = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$i_3 = -\frac{v_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} v_I$$

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{v_I}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} v_I; \quad v_O = v_x - i_4 R_4$$

Come migliorare il trade-off tra A_v e R_i nell'amplificatore invertente

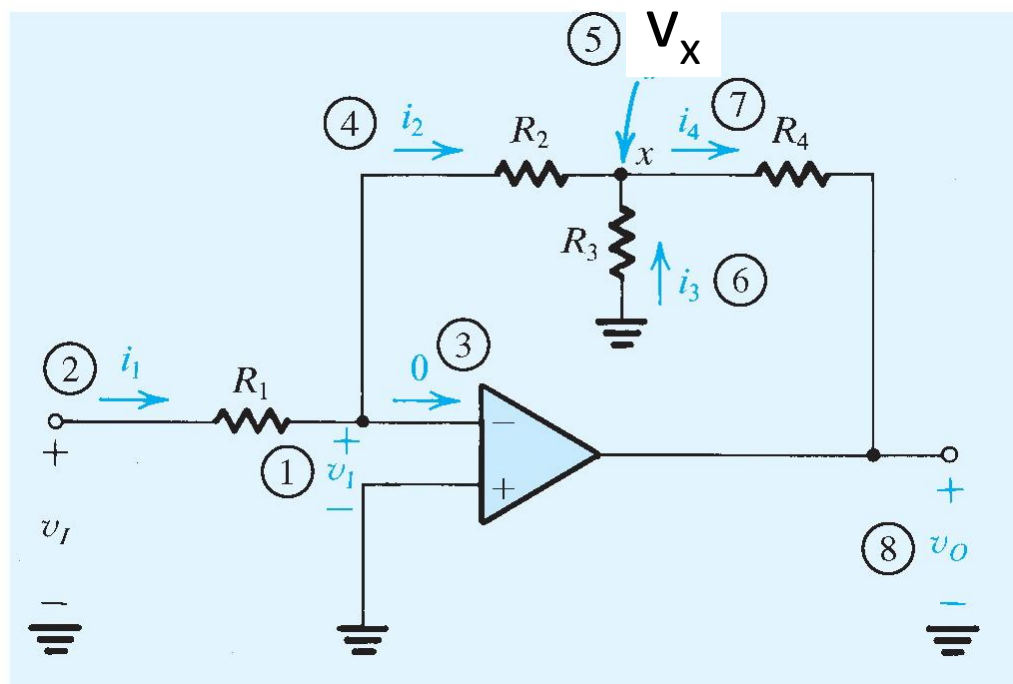


$$v_x = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{v_I}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} v_I;$$

$$v_o = v_x - i_4 R_4 = -\frac{R_2}{R_1} v_I - \frac{R_4}{R_1} v_I - \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} v_I$$

Come migliorare il trade-off tra A_v e R_i nell'amplificatore invertente

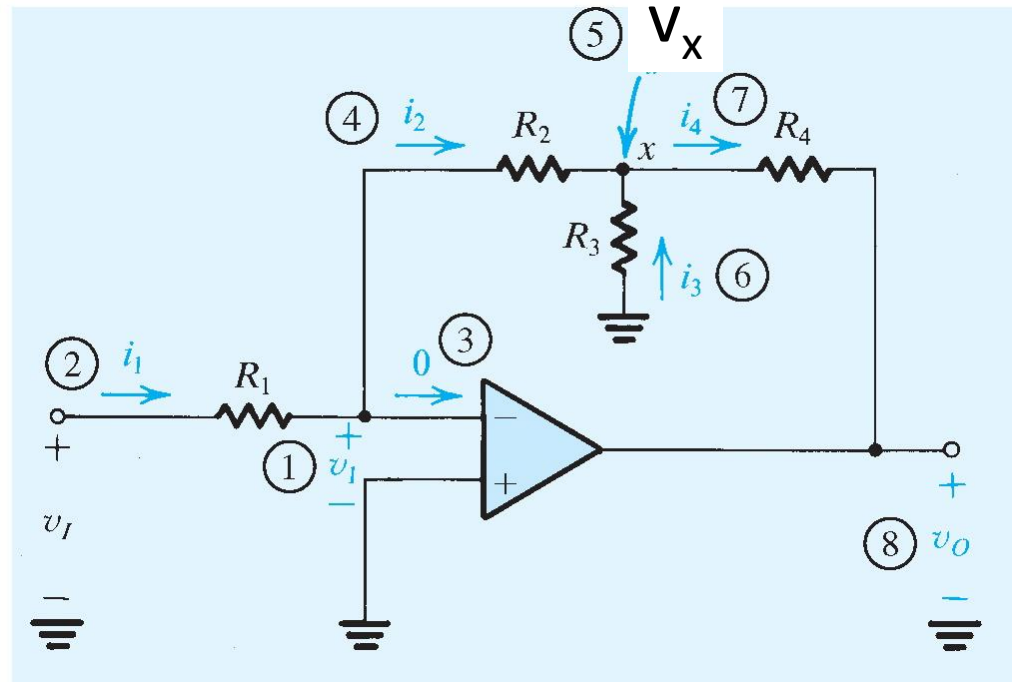


$$v_x = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{v_I}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} v_I;$$

$$v_o = v_x - i_4 R_4 = -\frac{R_2}{R_1} v_I - \frac{R_4}{R_1} v_I - \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} v_I$$

Come migliorare il trade-off tra A_V e R_i nell'amplificatore invertente



$$v_x = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_V = \frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4}{R_1} - \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} = -\frac{R_2}{R_1} \left[1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right]$$

posso aumentare R_1
e recuperare guadagno
aumentando R_4/R_3
indipendentemente da R_1, R_2