

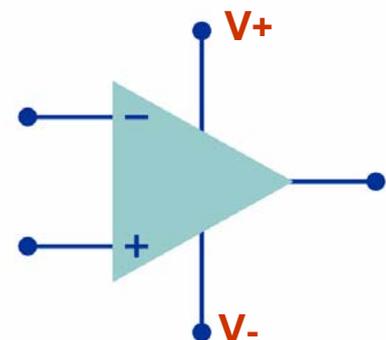
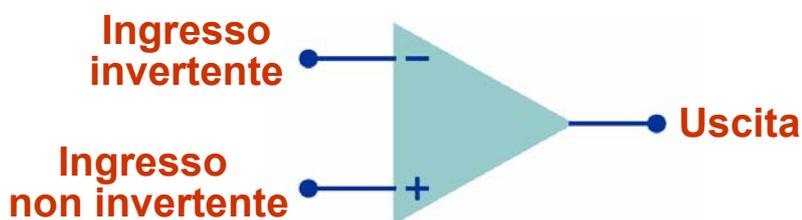
Amplificatori operazionali

Parte 1

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 15-5-2017)

Amplificatore operazionale

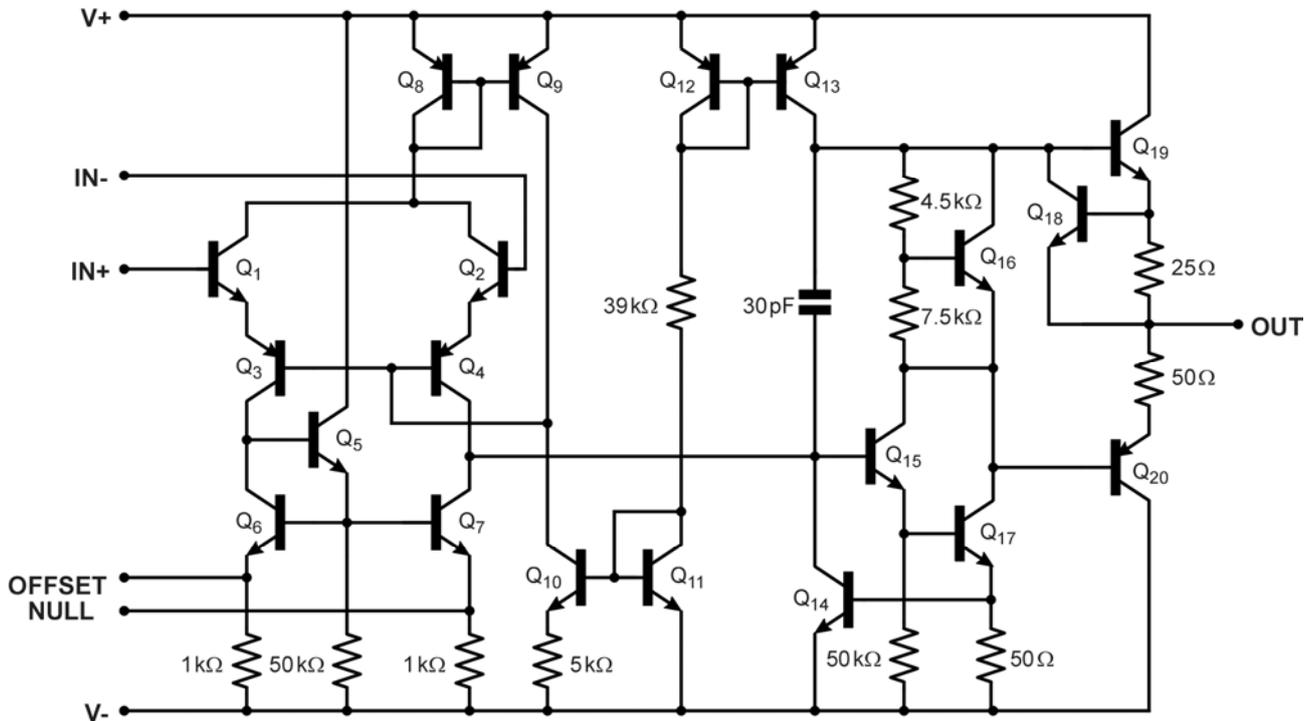
- L'**amplificatore operazionale** è un dispositivo, normalmente realizzato come circuito integrato, dotato di tre terminali



- Per il suo funzionamento richiede un'alimentazione (di solito duale) che viene fornita mediante altri due terminali (che spesso negli schemi vengono sottintesi)
 - ◆ I valori della tensione di alimentazione vanno solitamente da 5 V a 24 V (un valore tipico è 15 V)
- Possono essere presenti anche altri terminali per scopi particolari (collegamento a circuiti esterni di azzeramento o compensazione)

Esempio

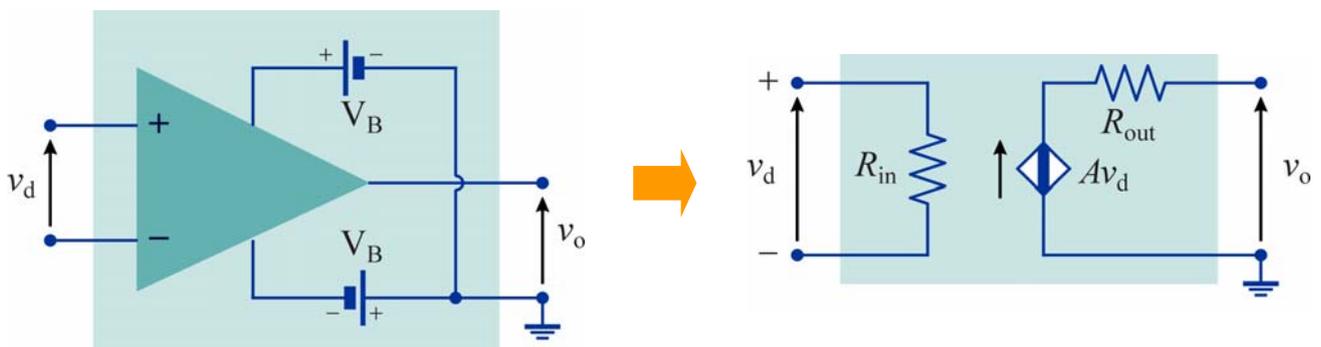
Schema dell'amplificatore operazionale $\mu A741$



3

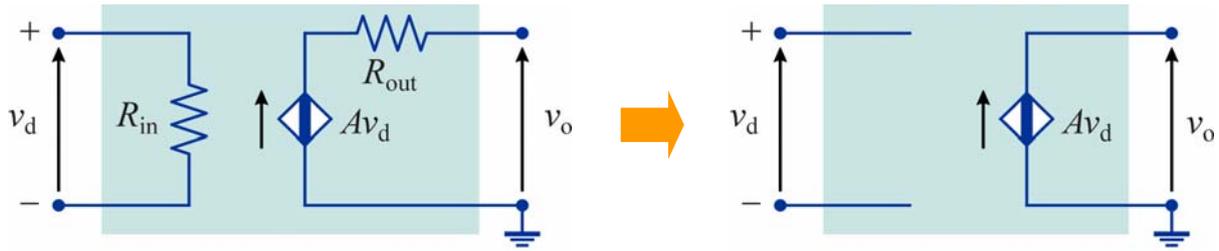
Amplificatore operazionale

- L'amplificatore operazionale può essere rappresentato come un dispositivo a due porte
- La porta di ingresso ha come terminali l'ingresso non invertente e l'ingresso invertente
 - ◆ La tensione v_d è detta **tensione differenziale di ingresso**
- La porta di uscita ha come terminali l'uscita e la massa, rappresentata dal nodo a cui sono collegati i due generatori di alimentazione (l'amplificatore operazionale non ha terminali collegati a massa)



4

Amplificatore operazionale

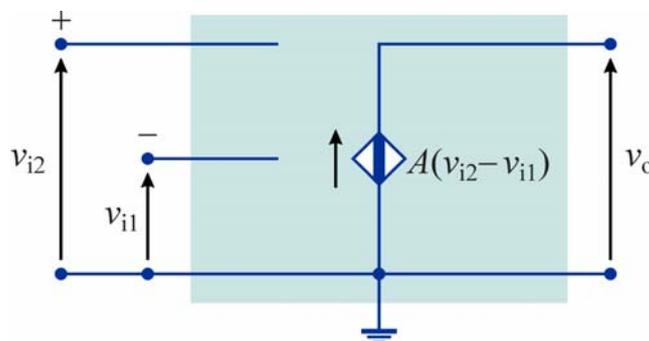


- L'amplificatore operazionale è un amplificatore di tensione con
 - ◆ resistenza di ingresso R_{in} elevata (valori tipici $> 10^6 \Omega$)
 - ◆ resistenza di uscita R_{out} piccola (valori tipici $< 100 \Omega$)
 - ◆ guadagno A elevato (valori tipici 10^5 - 10^6 cioè 100-120 dB)
- A è detto **guadagno ad anello aperto** (*open loop gain*)
- Normalmente è possibile considerare R_{in} praticamente infinita e R_{out} praticamente nulla
 - ➔ la corrente alla porta di ingresso è nulla

5

Amplificatore operazionale

- Un amplificatore operazionale può essere rappresentato anche come un dispositivo a tre porte, mettendo in evidenza le tensioni tra gli ingressi e la massa



- Questa rappresentazione mette in evidenza che l'amplificatore operazionale amplifica la differenza tra le tensioni applicate ai suoi ingressi (cioè si comporta come un **amplificatore differenziale**)

6

Ingresso differenziale e di modo comune

- Quando le tensioni applicate ai due ingressi sono uguali la tensione un uscita è (idealmente) uguale a zero
- In pratica, a causa di inevitabili asimmetrie nel circuito, la relazione tra gli ingressi e l'uscita risulta del tipo

$$v_o = A_2 v_{i2} - A_1 v_{i1}$$

con A_1 e A_2 non esattamente uguali

- Per studiare il comportamento dell'amplificatore in queste condizioni conviene introdurre, oltre alla tensione di ingresso differenziale

$$v_d = v_{i2} - v_{i1}$$

la **tensione di ingresso di modo comune**, definita come

$$v_c = \frac{v_{i2} + v_{i1}}{2}$$

7

Guadagno differenziale e di modo comune

- Le tensioni degli ingressi possono essere espresse in funzione della tensione differenziale e della tensione di modo comune mediante le relazioni

$$v_{i1} = v_c - \frac{v_d}{2} \quad v_{i2} = v_c + \frac{v_d}{2}$$

- Introducendo le espressioni precedenti degli ingressi nella relazione

$$v_o = A_2 v_{i2} - A_1 v_{i1}$$

si ottiene

$$v_o = A_2 \left(v_c + \frac{v_d}{2} \right) - A_1 \left(v_c - \frac{v_d}{2} \right) = \frac{A_2 + A_1}{2} v_d + (A_2 - A_1) v_c = A_d v_d + A_c v_c$$

in cui A_d e A_c sono, rispettivamente, il **guadagno differenziale**, e il **guadagno di modo comune**

$$A_d = \frac{A_2 + A_1}{2} \quad A_c = A_2 - A_1$$

8

Rapporto di reiezione di modo comune

- Il rapporto tra il guadagno differenziale e il guadagno di modo comune è detto **rapporto di reiezione di modo comune** (**CMRR**, *common-mode rejection ratio*)

$$\text{CMRR} = \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

- Di solito il CMRR è espresso in dB

$$\text{CMRR}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

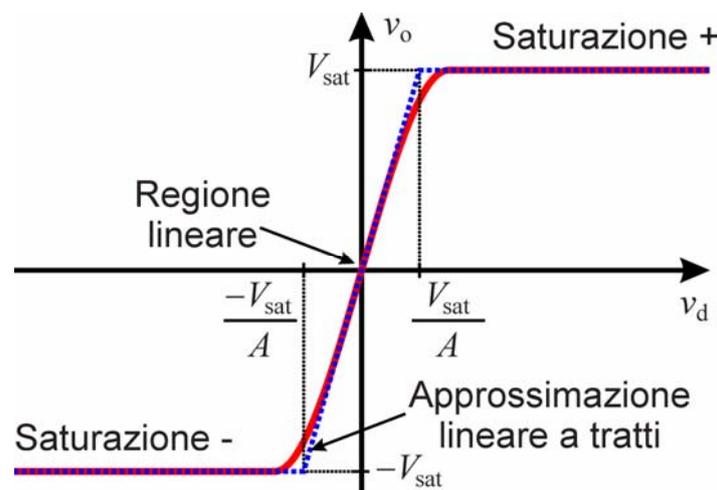
- Gli amplificatori operazionali hanno valori del CMRR molto elevati (tipicamente 80-100 dB)
 - ➔ spesso è possibile considerare il CMRR praticamente infinito
 - ➔ in queste condizioni si può ritenere

$$A_1 = A_2 = A \Rightarrow A_d = A \quad A_c = 0$$

9

Caratteristica ingresso-uscita

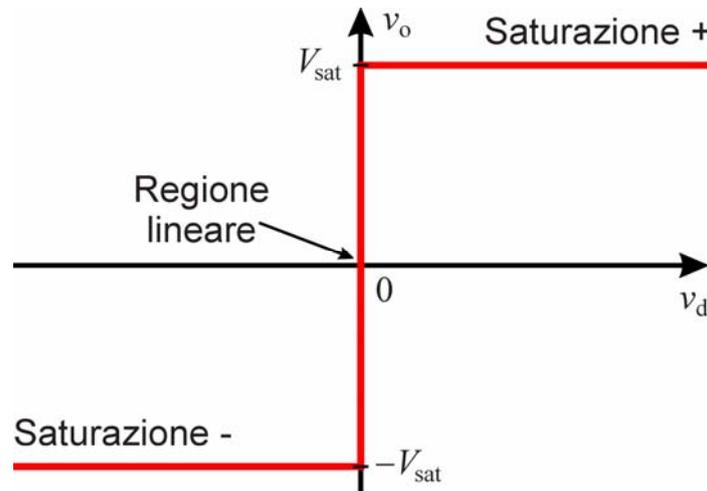
- La caratteristica di trasferimento di un amplificatore operazionale ha un andamento praticamente lineare nell'intorno dell'origine, con pendenza pari ad A
- Al crescere di v_d la tensione di uscita satura
- Il valore della tensione di saturazione V_{sat} è tipicamente inferiore di 1-2 V a quello della tensione di alimentazione



10

Caratteristica ingresso-uscita ideale

- Dato che A è molto grande, l'intervallo di valori di v_d corrispondente alla regione lineare è molto piccolo (poche decine o centinaia di μV)
- Nella regione lineare si può ritenere che v_d sia praticamente nulla, il che equivale a considerare il guadagno A praticamente infinito



11

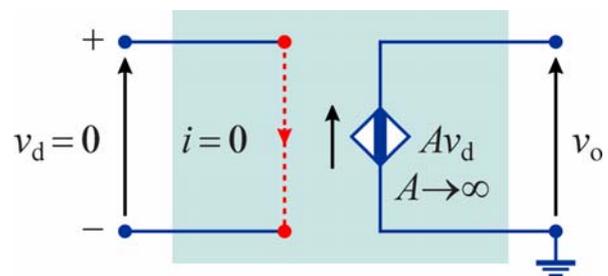
Amplificatore operazionale ideale

- Le considerazioni precedenti portano alla definizione dell'**amplificatore operazionale ideale**, che è caratterizzato dalle seguenti proprietà
 - ◆ Resistenza di ingresso R_{in} infinita
 - ◆ Resistenza di uscita R_{out} nulla
 - ◆ Guadagno ad anello aperto A infinito
 - ◆ Guadagno di modo comune A_c nullo
 - ➔ Rapporto di reiezione di modo comune infinito
 - ◆ Larghezza di banda infinita (guadagno indipendente dalla frequenza)

12

Cortocircuito virtuale

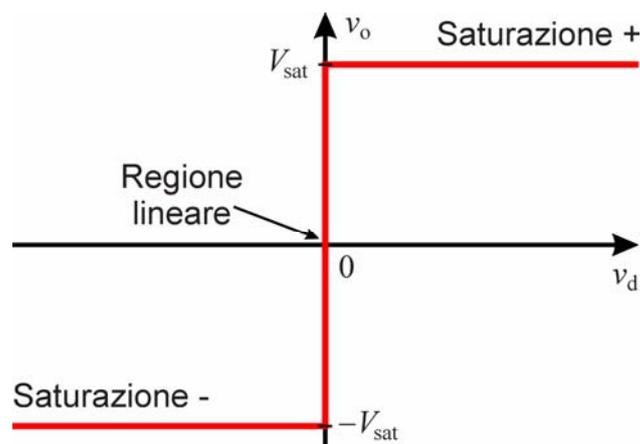
- Un amplificatore operazionale ideale può essere rappresentato come un doppio bipolo per il quale
 - ◆ la tensione e la corrente della porta di ingresso sono entrambe nulle
 - ◆ la tensione e la corrente della porta di uscita possono assumere entrambe valori arbitrari
- L'ingresso invertente e l'ingresso non invertente sono sempre allo stesso potenziale, come se fossero collegati tra loro da un cortocircuito
- Le correnti ai due terminali di ingresso sono sempre nulle, 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**



13

Regioni di funzionamento

- Il modello dell'amplificatore operazionale ideale fornisce risultati validi solo se la tensione di uscita dell'amplificatore operazionale non supera, in valore assoluto, la tensione di saturazione V_{sat}
- La caratteristica ingresso-uscita di un operazionale può essere rappresentata con un andamento lineare a tratti in cui si distinguono tre regioni
- Nelle regioni di saturazione la tensione di uscita rimane costante e gli ingressi non sono in cortocircuito virtuale ($v_d \neq 0$)



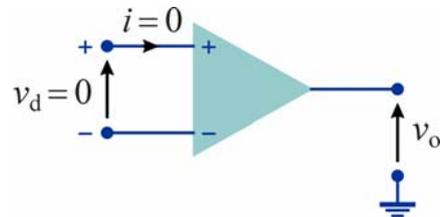
14

Regioni di funzionamento

- Nelle tre regioni l'operazionale può essere rappresentato mediante circuiti equivalenti diversi
- Ciascun circuito equivalente può essere utilizzato solo se è verificata una condizione di validità

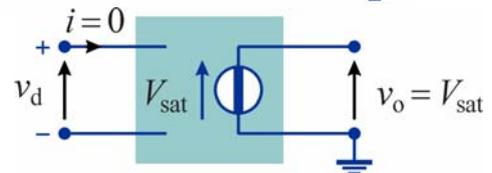
- **Regione lineare:**

- ◆ $v_d = 0$
- ◆ condizione: $|v_o| < V_{sat}$



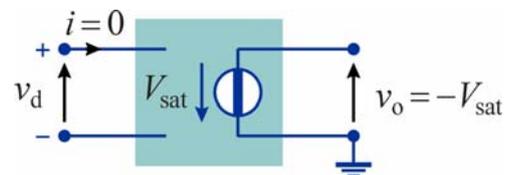
- **Regione di saturazione positiva:**

- ◆ $v_o = V_{sat}$
- ◆ condizione: $v_d > 0$



- **Regione di saturazione negativa:**

- ◆ $v_o = -V_{sat}$
- ◆ condizione: $v_d < 0$



15

Regioni di funzionamento

- In generale, per analizzare un circuito con amplificatori operazionali occorre
 - ◆ studiare i circuiti equivalenti relativi alle varie regioni di funzionamento
 - ◆ verificare se le condizioni di validità sono soddisfatte, cioè se le soluzioni sono accettabili
- E' opportuno notare che in alcuni casi il circuito può avere soluzioni multiple, cioè possono essere verificate simultaneamente le condizioni corrispondenti a più regioni di funzionamento
- Se il circuito contiene più operazionali si dovrebbero considerare tutte le possibili combinazioni di circuiti equivalenti
 - ◆ In pratica, spesso è possibile riconoscere a priori che alcune combinazioni non sono accettabili e quindi devono essere escluse

16

Regioni di funzionamento

- Se si vuole ricavare la relazione tra una tensione o corrente che rappresenta l'ingresso di un circuito contenente operazionali e una tensione o corrente che ne rappresenta l'uscita
 - ◆ Si analizzano i circuiti relativi a tutte le condizioni di funzionamento
 - ◆ Per ciascun circuito si individuano i gli intervalli di valori della variabile di ingresso in corrispondenza dei quali sono soddisfatte le ipotesi di validità
 - In alcuni casi è possibile che, per certe regioni, le ipotesi non siano mai verificate
 - ◆ La caratteristica ingresso-uscita viene ottenuta combinando le soluzioni parziali relative alle varie regioni

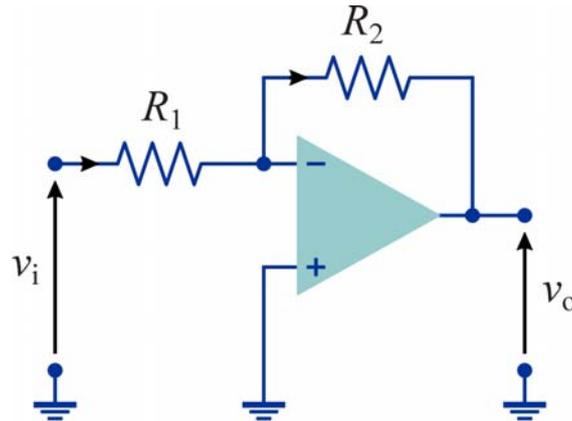
17

Retroazione

- Di solito l'amplificatore operazionale viene utilizzato in configurazione a **retroazione**:
 - ◆ il segnale in uscita all'amplificatore è riportato all'ingresso mediante una rete di retroazione (*feedback*) costituita da componenti passivi (ad esempio, da resistori).
- Se il segnale di uscita è riportato all'ingresso invertente si ha una **retroazione negativa**
 - ◆ questa rappresenta la situazione più comune
- Se il segnale di uscita è riportato all'ingresso non invertente si ha una **retroazione positiva**
 - ◆ questo collegamento viene utilizzato solo in casi particolari dato che di solito rende il circuito instabile

18

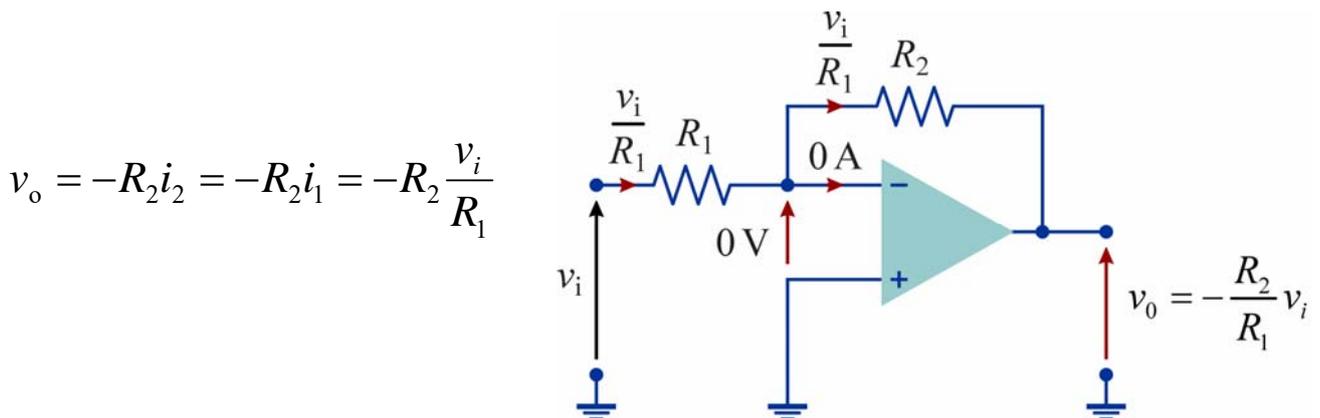
Amplificatore invertente



- L'ingresso invertente è virtualmente a massa
 - ➔ La tensione di R_1 coincide con v_i
 - ➔ La tensione di R_2 è uguale a $-v_o$
- La corrente entrante nell'ingresso invertente è nulla
 - ➔ le correnti di R_1 e R_2 sono uguali

19

Amplificatore invertente



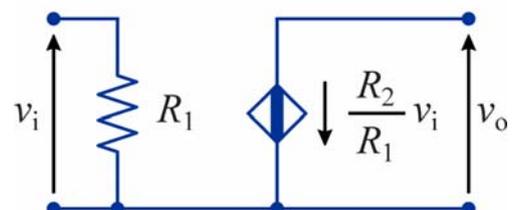
- Guadagno di tensione

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

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_1} = R_1$$

Circuito equivalente



20

Amplificatore invertente Condizioni per il funzionamento nella regione lineare

- Affinché l'amplificatore operazionale si trovi nella regione lineare deve essere verificata la condizione: $-V_{\text{sat}} < v_o < V_{\text{sat}}$

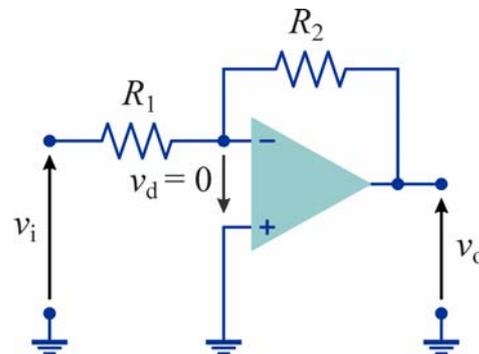
- Dato che

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

si ottiene

$$v_o < V_{\text{sat}} \Rightarrow v_i > -\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$$

$$v_o > -V_{\text{sat}} \Rightarrow v_i < \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}$$



21

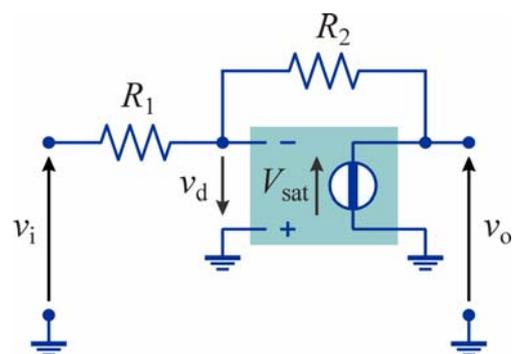
Amplificatore invertente Funzionamento in saturazione

- Regione di saturazione positiva ($v_d > 0$)

$$v_o = V_{\text{sat}}$$

$$v_d = -v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_d > 0 \Rightarrow v_i < -V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_2}$$

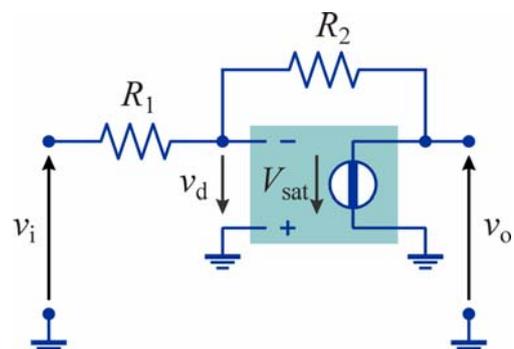


- Regione di saturazione negativa ($v_d < 0$)

$$v_o = -V_{\text{sat}}$$

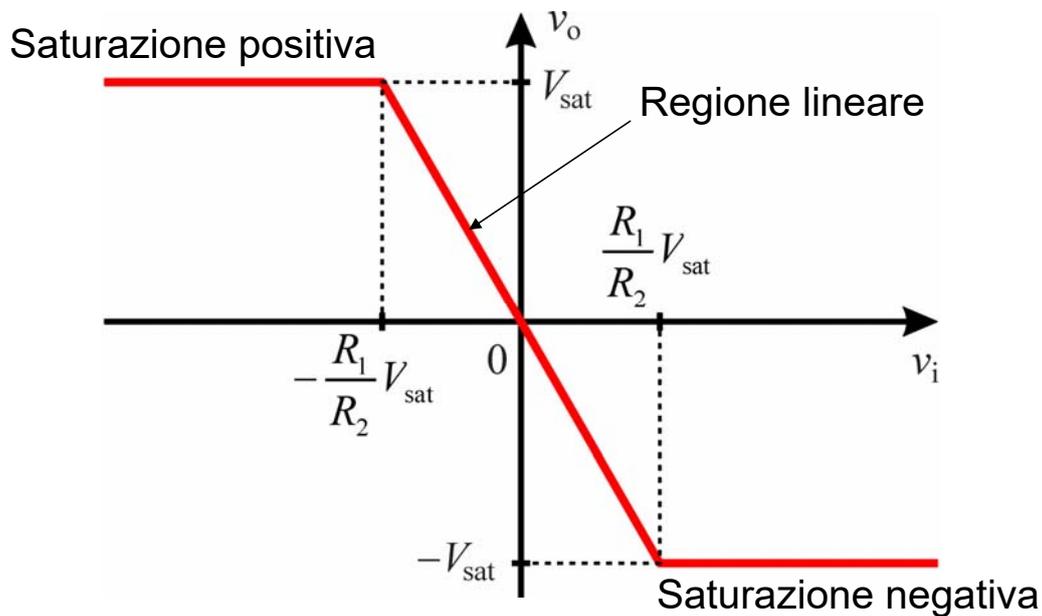
$$v_d = -v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_d < 0 \Rightarrow v_i > V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_2}$$



22

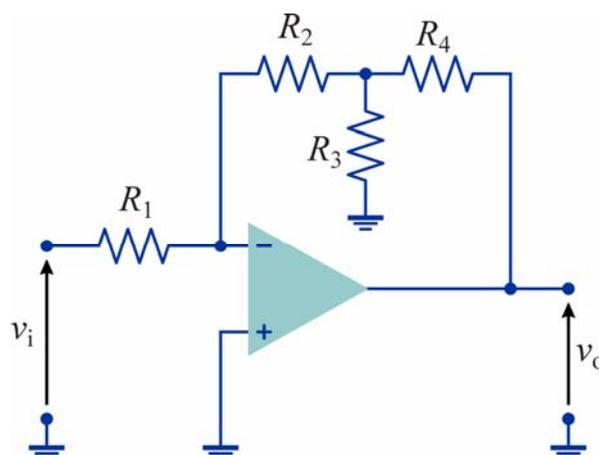
Amplificatore invertente Caratteristica ingresso-uscita



23

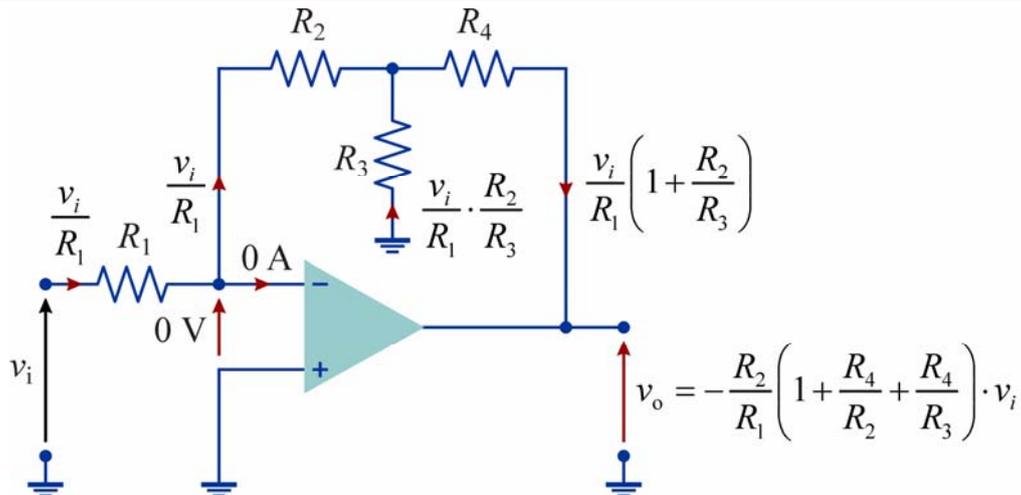
Amplificatore invertente con R_{in} elevata

- In un amplificatore invertente, per ottenere valori elevati del guadagno occorre che R_2 sia molto maggiore di R_1
- Se si vuole ottenere anche un'elevata resistenza di ingresso, e quindi R_1 è grande, il valore richiesto per R_2 potrebbe risultare troppo grande
- E' possibile risolvere il problema modificando il circuito in questo modo



24

Amplificatore invertente con R_{in} elevata



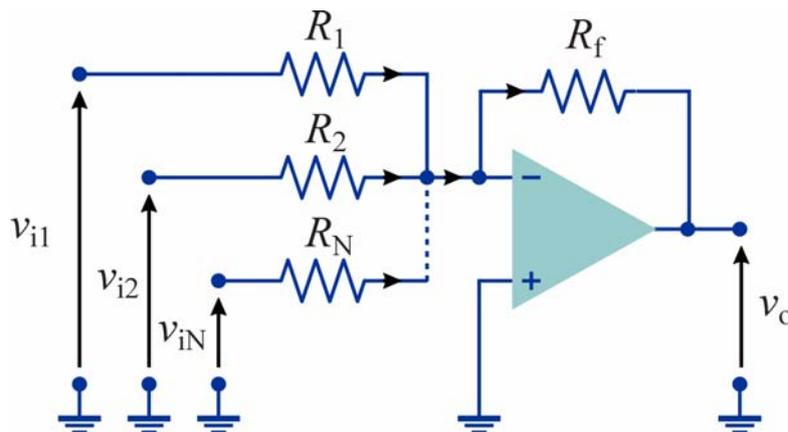
- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{v_2}{v_i} - \frac{v_4}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right)$$

- Per $R_3 \ll R_4$ è possibile ottenere un guadagno elevato senza utilizzare per R_2 e R_4 valori grandi rispetto a R_1

25

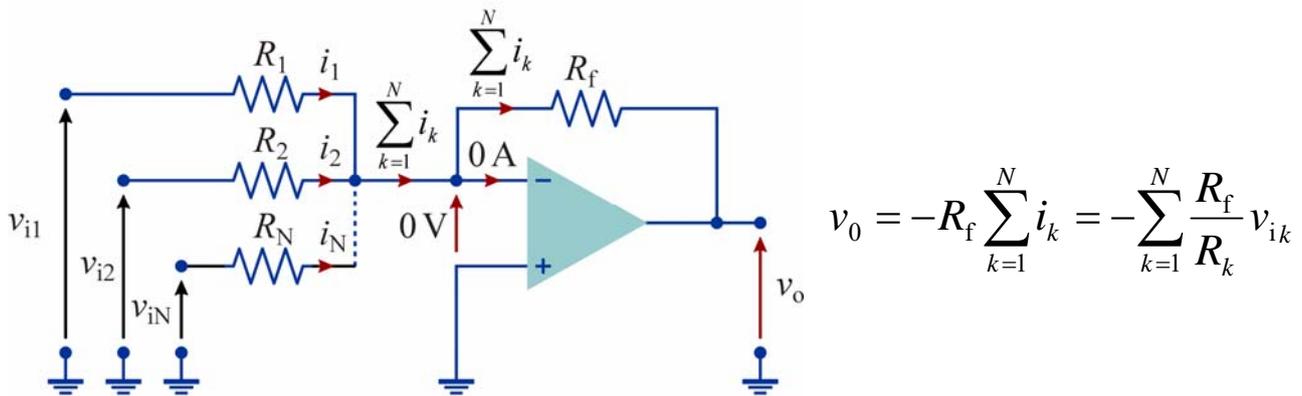
Sommatore invertente



- Il circuito può essere considerato un'estensione dell'amplificatore invertente
- In questo caso la corrente in R_f è uguale alla somma delle correnti degli N resistori collegati agli ingressi
- ➔ La tensione in uscita è una somma pesata delle tensioni degli ingressi

26

Sommatore invertente

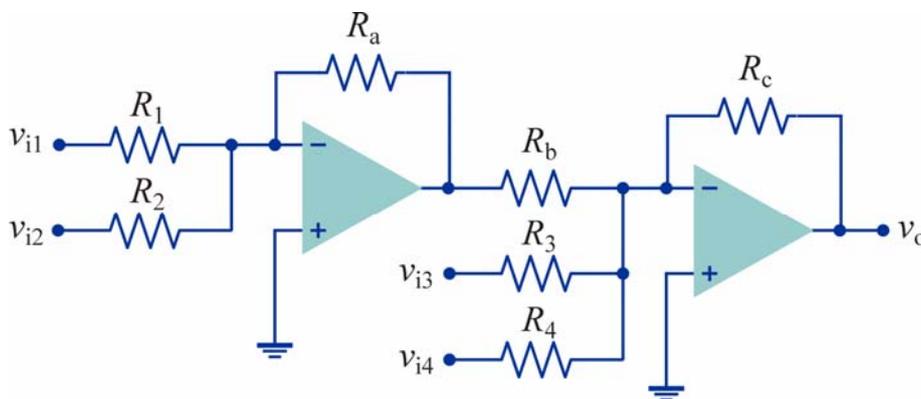


- Il peso di ciascuna delle tensioni di ingresso v_k nella somma può essere modificato in modo indipendente, modificando la resistenza R_k
- Per il k -esimo ingresso, la resistenza di ingresso è uguale a R_k

27

Sommatore invertente

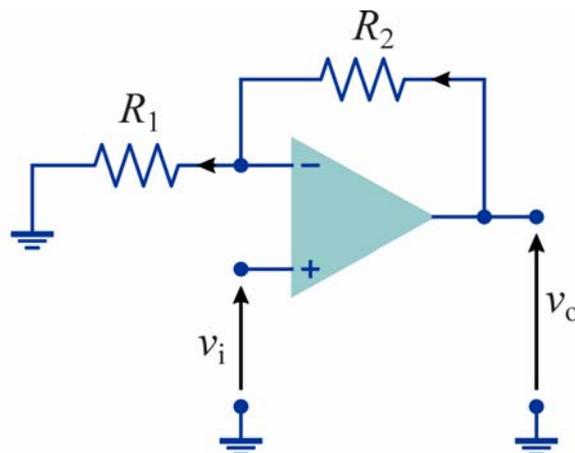
- Combinando due sommatore invertenti si può realizzare un circuito che esegue una somma pesata degli ingressi con coefficienti positivi e negativi



$$v_o = \frac{R_a}{R_1} \frac{R_c}{R_b} v_1 + \frac{R_a}{R_2} \frac{R_c}{R_b} v_2 - \frac{R_c}{R_3} v_3 - \frac{R_c}{R_4} v_4$$

28

Amplificatore non invertente



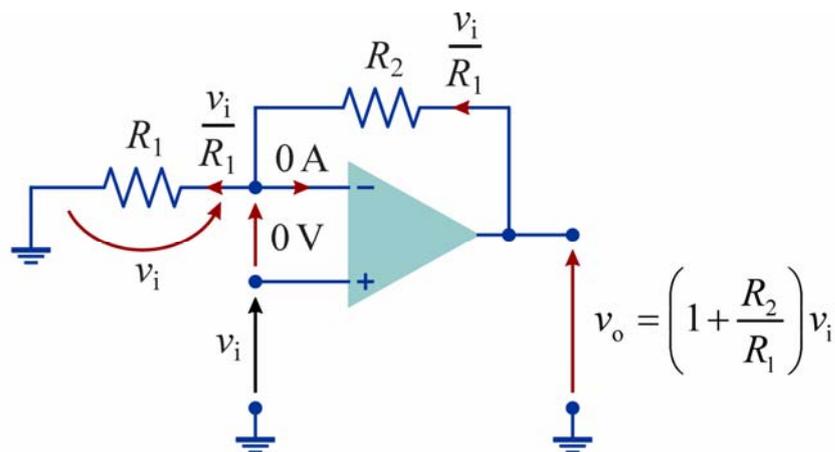
- A causa del cortocircuito virtuale le tensioni dei due ingressi sono uguali
 - ➔ La tensione di R_1 coincide con v_i
- La corrente entrante nell'ingresso invertente è nulla
 - ➔ le correnti di R_1 e R_2 sono uguali

29

Amplificatore non invertente

$$v_o = v_1 + v_2 = v_i + R_2 i_2 =$$

$$= v_i + R_2 i_1 = v_i + \frac{R_2}{R_1} v_i$$



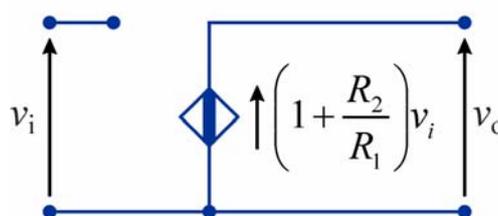
- Guadagno di tensione

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \infty$$

Circuito equivalente



30

Amplificatore non invertente Condizioni per il funzionamento nella regione lineare

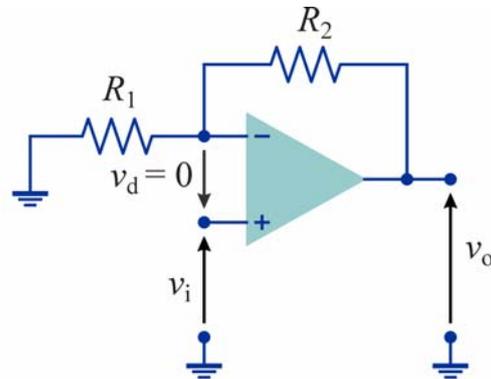
- Affinché l'amplificatore operazionale si trovi nella regione lineare deve essere verificata la condizione: $-V_{\text{sat}} < v_o < V_{\text{sat}}$
- Dato che

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_i$$

si ottiene

$$v_o < V_{\text{sat}} \Rightarrow v_i < \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$

$$v_o > -V_{\text{sat}} \Rightarrow v_i > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$



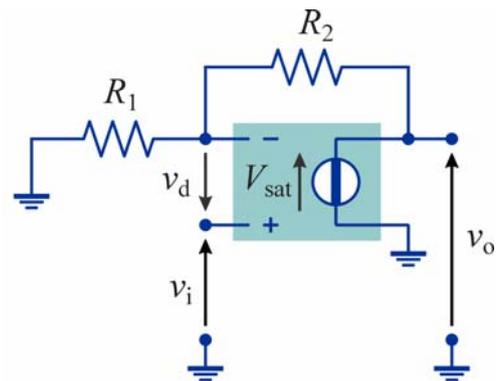
31

Amplificatore non invertente Funzionamento in saturazione

- Regione di saturazione positiva ($v_d > 0$)

$$v_d = v_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$

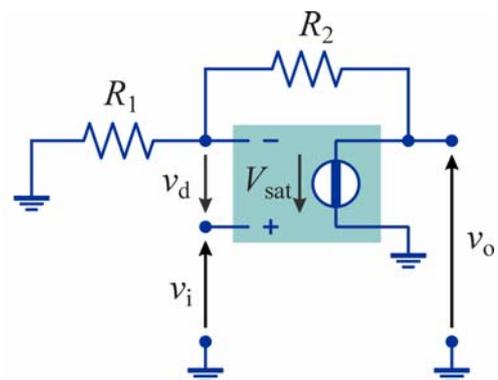
$$v_d > 0 \Rightarrow v_i > \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$



- Regione di saturazione negativa ($v_d < 0$)

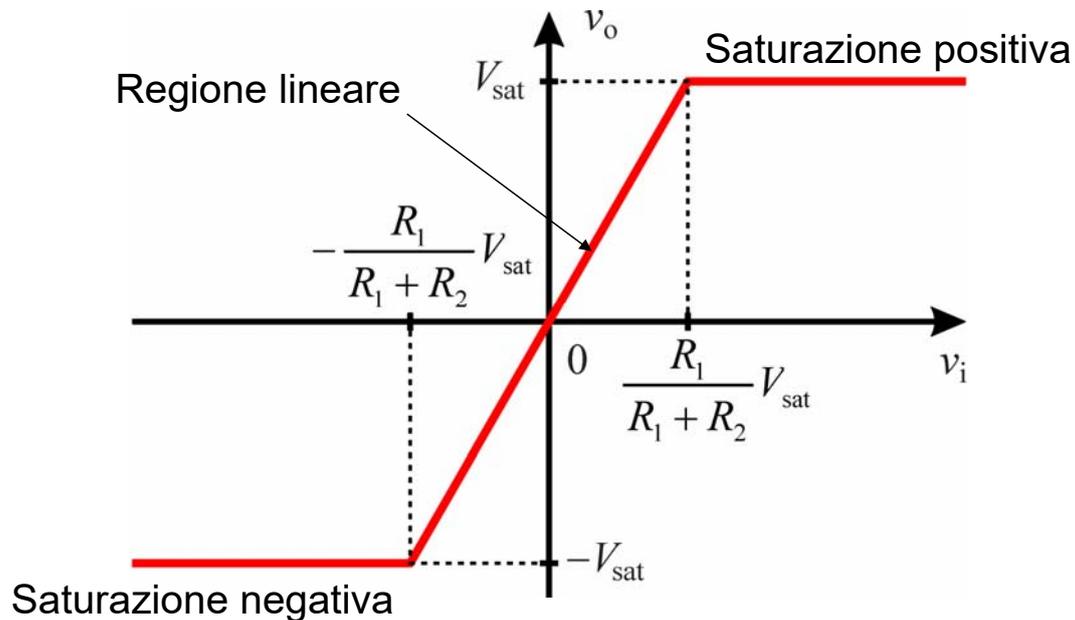
$$v_d = v_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$

$$v_d < 0 \Rightarrow v_i < -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$$



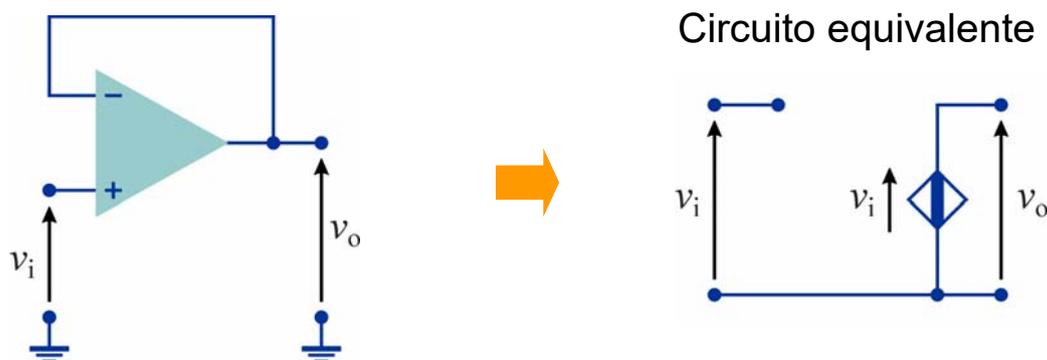
32

Amplificatore non invertente Caratteristica ingresso-uscita



33

Inseguitore di tensione

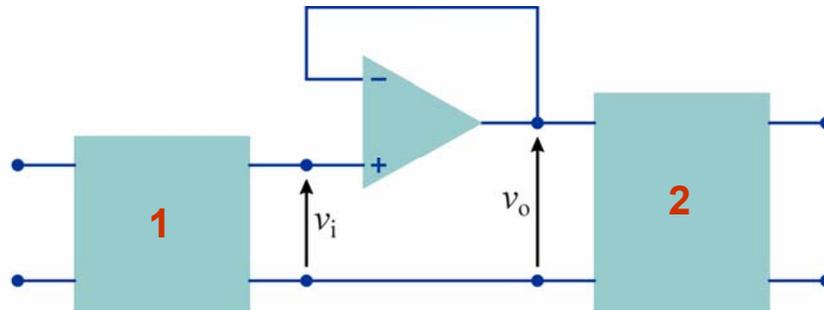


- La tensione di uscita coincide con la tensione dell'ingresso invertente che, a sua volta, coincide con la tensione v_i a causa del cortocircuito virtuale
 - Guadagno di tensione: $A_v = 1$
 - Resistenza di ingresso: $R_{in} = \infty$
 - Resistenza di uscita: $R_{out} = 0$

34

Inseguitore di tensione

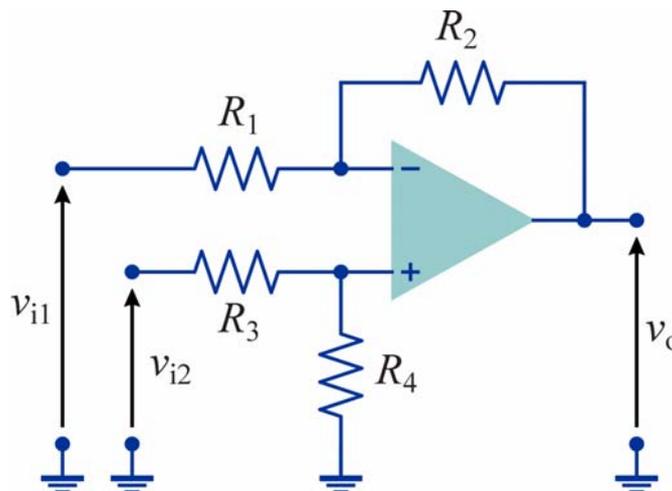
- Spesso questo circuito viene impiegato come separatore (**buffer**)



- Il blocco 1 vede una resistenza di carico praticamente infinita
- Il blocco 2 vede una sorgente con resistenza praticamente nulla
- La tensione $v_i = v_o$ coincide con la tensione a vuoto del blocco 1, indipendentemente dai valori della resistenza di uscita del blocco 1 e della resistenza di ingresso del blocco 2

35

Amplificatore differenziale

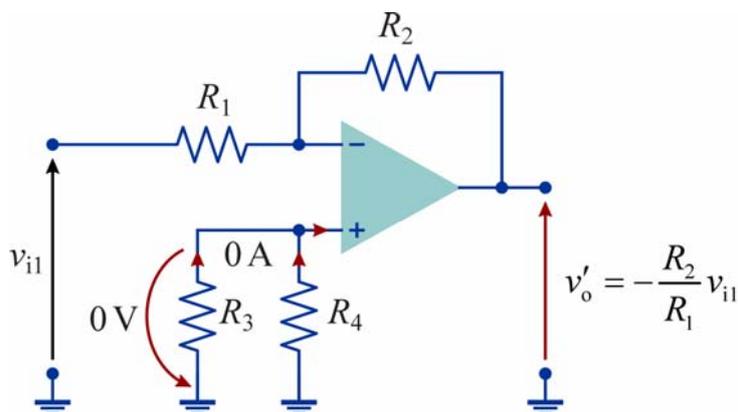


- Il circuito può essere visto come una combinazione delle configurazioni invertente e non invertente
- La tensione in uscita può essere valutata mediante il principio di sovrapposizione degli effetti

36

Amplificatore differenziale

Contributo di v_{i1}

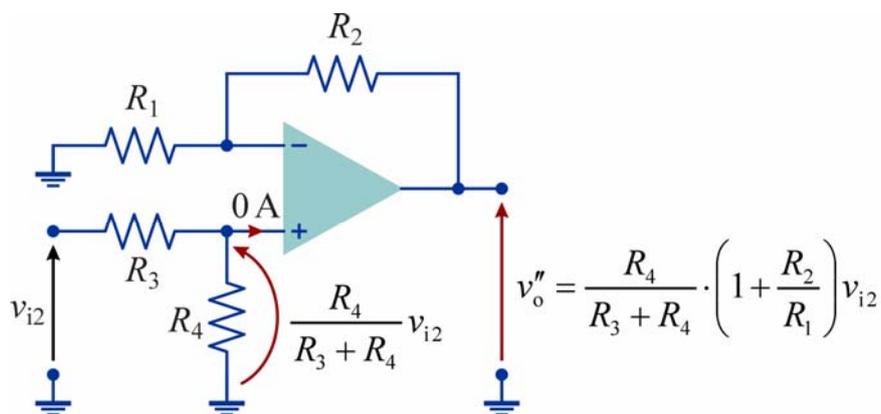


- Dato che la corrente entrante nell'ingresso invertente è nulla, anche le correnti (e quindi la tensione) di R_3 e R_4 sono nulle
 - ➔ Le tensioni degli ingressi dell'amplificatore operazionale sono nulle
 - ➔ Dal punto di vista di v_{i1} il circuito si comporta come un amplificatore invertente

37

Amplificatore differenziale

Contributo di v_{i2}



- Dato che la corrente entrante nell'ingresso non invertente è nulla, R_3 e R_4 formano un partitore a cui è applicata la tensione v_{i2}
- La tensione all'uscita del partitore costituisce l'ingresso di un amplificatore non invertente

38

Amplificatore differenziale

- Combinando i due contributi si ha

$$v_o = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_4}{R_3}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_{i2} - \frac{R_2}{R_1} v_{i1}$$

- Per ottenere un amplificatore differenziale occorre fare in modo che i coefficienti di v_{i1} e v_{i2} siano uguali e opposti
- Questo si verifica se

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{spesso si pone } R_1 = R_3, R_2 = R_4)$$

- In queste condizioni si ha

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{i2} - v_{i1}) \quad \rightarrow \quad A_d = \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} = \frac{R_2}{R_1}$$

39

CMRR

- Se i rapporti tra i resistori non sono uguali, la tensione di uscita è

$$v_o = \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} v_{i2} - \frac{R_2}{R_1} v_{i1} = A_2 v_{i2} - A_1 v_{i1}$$

- In queste condizioni, il guadagno di modo comune è diverso da zero

$$A_c = A_2 - A_1 = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1(R_3 + R_4)}$$

- Nel caso generale il guadagno differenziale è

$$A_d = \frac{A_2 + A_1}{2} = \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{2R_1(R_3 + R_4)}$$

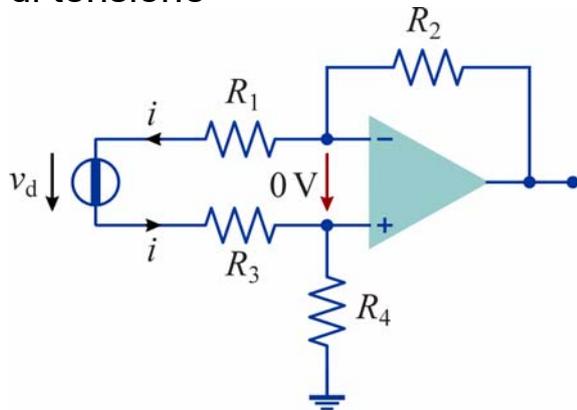
- Quindi il rapporto di reiezione di modo comune vale

$$CMRR = \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{2|R_1 R_4 - R_2 R_3|}$$

40

Resistenza di ingresso differenziale

- La resistenza tra i due terminali di ingresso, **resistenza di ingresso differenziale** può essere valutata collegando all'ingresso un generatore di tensione



$$v_d = R_1 i + R_3 i$$



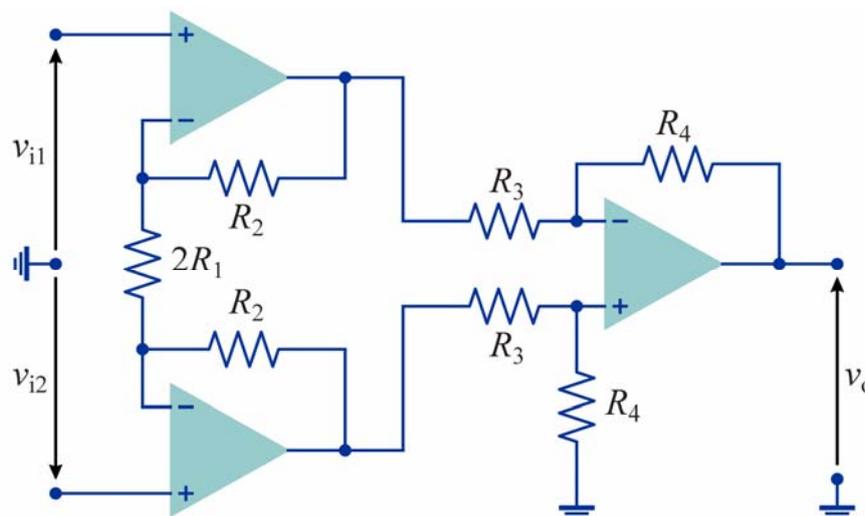
$$R_{id} = \frac{v_d}{i} = R_1 + R_3$$

- Questo circuito non consente di ottenere nello stesso tempo valori elevati della resistenza di ingresso e del guadagno
 - Se i valori di R_1 e R_3 sono grandi, i valori richiesti a R_2 e R_4 per ottenere un guadagno elevato possono risultare troppo grandi (e quindi non essere facilmente realizzabili)

41

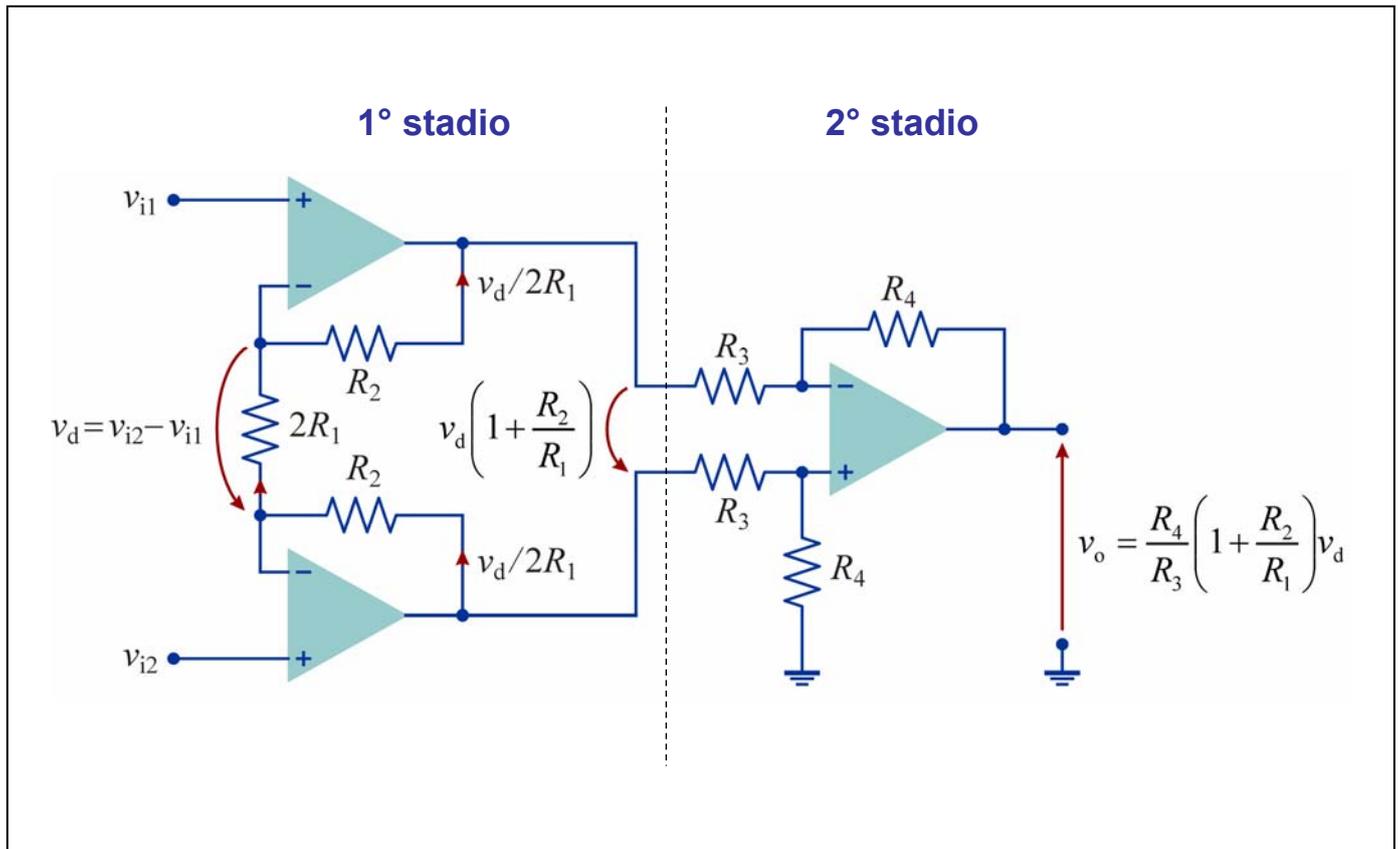
Amplificatore differenziale con 3 operazionali

- Un amplificatore differenziale con prestazioni migliori può essere ottenuto mediante questa configurazione
- Questo circuito è noto anche come **amplificatore per strumentazione** (*instrumentation amplifier*)



42

Amplificatore differenziale con 3 operazionali



43

Amplificatore differenziale con 3 operazionali

- A causa dei cortocircuiti virtuali, la tensione sulla resistenza $2R_1$ coincide con la tensione differenziale in ingresso
- Dato che le correnti degli ingressi invertenti sono nulle, la corrente in $2R_1$ circola anche nelle due resistenze R_2
- All'uscita del primo stadio si ha la tensione

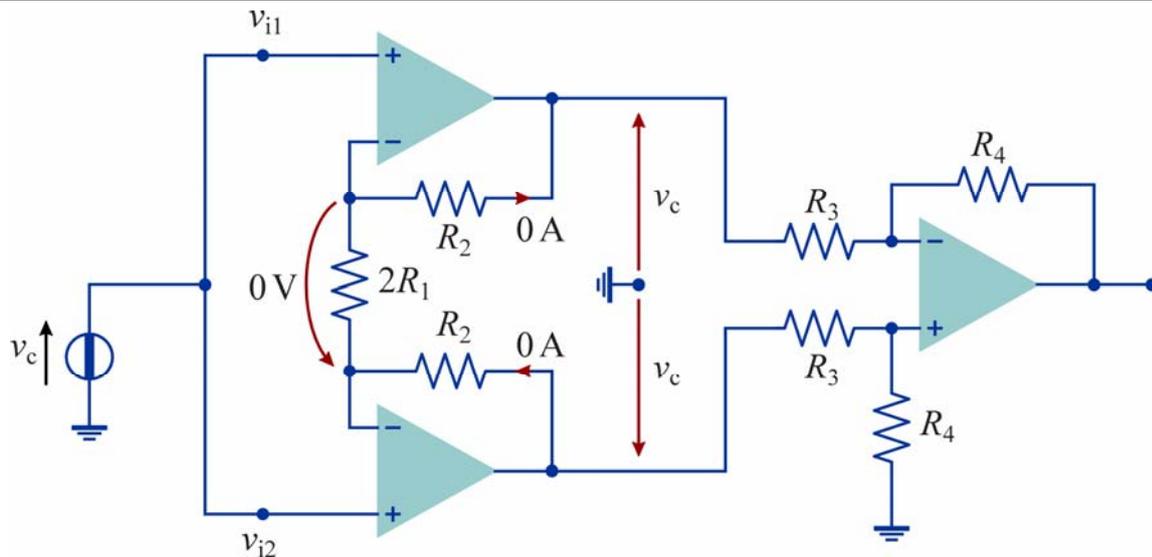
$$v_{d2} = v_d + 2R_2 i_2 = v_d + 2R_2 \frac{v_d}{2R_1} = v_d \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

- Questa tensione costituisce l'ingresso del secondo stadio, che è un amplificatore differenziale realizzato con un singolo operazionale e ha un guadagno pari a R_4/R_3 , quindi

$$v_o = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_d$$

44

Amplificatore differenziale con 3 operazionali



- Se si applica in ingresso un segnale di modo comune v_C , la tensione degli ingressi degli operazionali del primo stadio è uguale a v_C
- La tensione di $2R_1$ è nulla, quindi non circola corrente né in $2R_1$ né nelle resistenze R_2
- ➔ All'ingresso del secondo stadio si ha la tensione di modo comune v_C

45

Amplificatore differenziale con 3 operazionali

- Una tensione di modo comune in ingresso viene trasferita direttamente all'ingresso del secondo stadio
- Una tensione differenziale in ingresso viene trasferita al secondo stadio moltiplicata per il fattore
$$1 + \frac{R_2}{R_1}$$
- Complessivamente si ottiene un amplificatore differenziale che ha lo stesso guadagno di modo comune del secondo stadio, ma ha un guadagno differenziale maggiore
- ➔ Si ottiene un CMRR maggiore di quello del solo secondo stadio
- Inoltre, rispetto a un amplificatore differenziale con un solo operazionale
 - ◆ si ha una resistenza di ingresso maggiore (idealmente infinita)
 - ◆ si ha la possibilità di modificare il guadagno modificando il valore di una sola resistenza ($2R_1$)

46

Segnali bilanciati e sbilanciati

- Un segnale in tensione può essere rappresentato
 - ◆ dalla tensione di un nodo rispetto al nodo di massa
 - ➔ **segnale sbilanciato**
 - ◆ dalla tensione tra due nodi nessuno dei quali coincide con il nodo di massa
 - ➔ **segnale bilanciato** o **differenziale**
- I segnali sbilanciati in genere richiedono circuiti più semplici
- I segnali bilanciati
 - ◆ sono più robusti nei confronti di disturbi
 - ◆ consentono prestazioni migliori in termini di linearità in sistemi realizzati mediante dispositivi non lineari
 - ◆ in molti casi di interesse pratico rappresentano il tipo di segnale disponibile all'uscita dei trasduttori

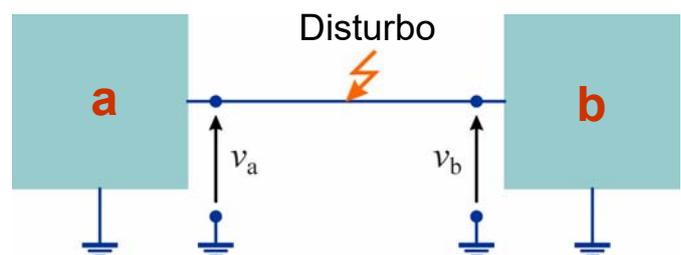
47

Segnali bilanciati e sbilanciati in presenza di disturbi

Segnale sbilanciato

- In presenza del disturbo, la tensione all'ingresso del blocco b è

$$v_b = v_a + \varepsilon$$

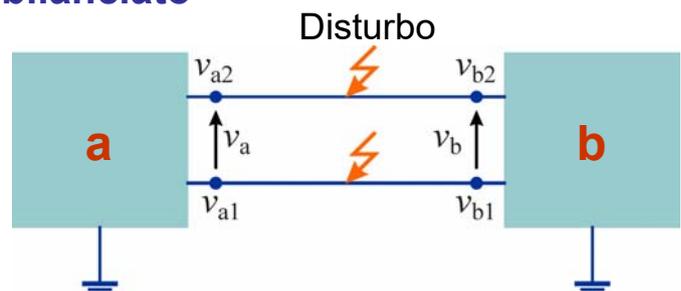


Segnale bilanciato

- In presenza del disturbo, la tensione all'ingresso del blocco b è

$$v_b = v_{a2} + \varepsilon_2 - v_{a1} - \varepsilon_1 = v_a + \varepsilon$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$



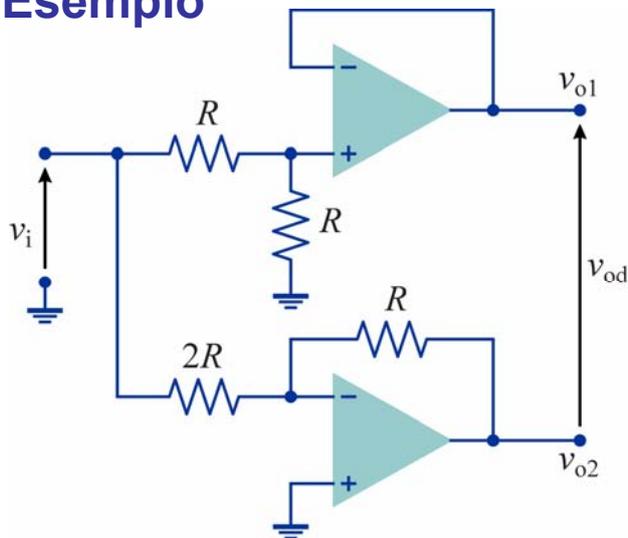
- Se il disturbo agisce in modo simile sui due conduttori, vicini tra loro, si ha $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$, quindi ε è molto piccolo rispetto a ε_1 e ε_2

48

Conversione tra segnali bilanciati e sbilanciati

- Un amplificatore differenziale può essere considerato un dispositivo che converte un segnale bilanciato in uno sbilanciato
- Anche la conversione in senso opposto può essere eseguita in vari modi mediante amplificatori operazionali

Esempio



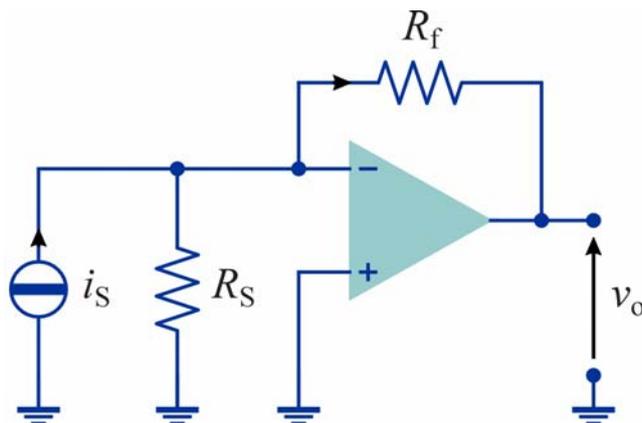
$$v_{o1} = \frac{v_i}{2}$$

$$v_{o2} = -\frac{v_i}{2}$$

$$v_{od} = v_{o1} - v_{o2} = v_i$$

49

Convertitore corrente-tensione

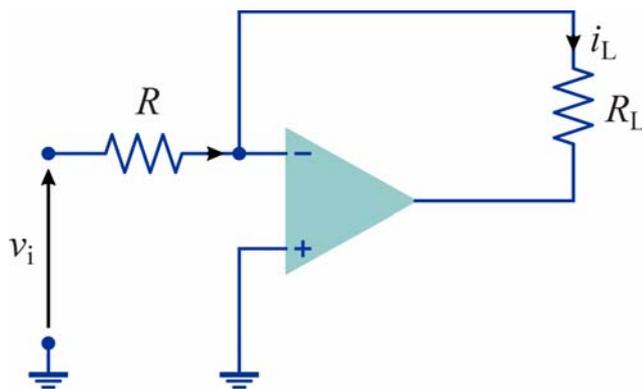


$$i_f = i_s \quad \Rightarrow \quad v_o = -R_f i_s$$

- A causa del cortocircuito virtuale la tensione e quindi la corrente di R_S sono nulle
- La tensione in uscita è indipendente da R_S (il circuito si comporta come se all'ingresso fosse collegato solo il generatore ideale i_s)

50

Convertitore tensione-corrente



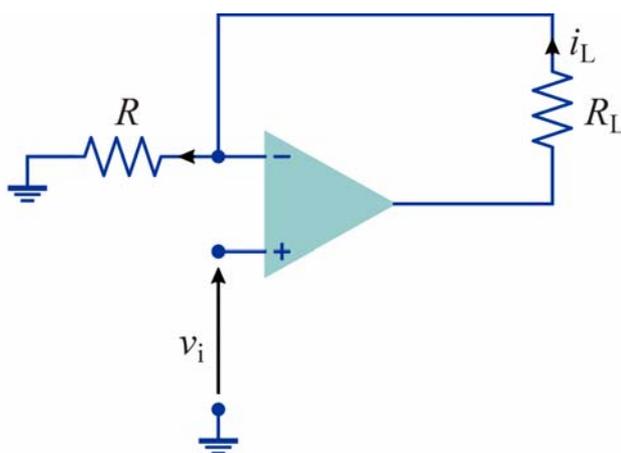
$$i_L = i_i = \frac{v_i}{R}$$

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = R$$

- Il carico deve essere *flottante*, cioè non può avere terminali collegati fisicamente a massa (anche se un terminale è collegato a una massa virtuale)
 - ◆ se si collegasse a massa l'ingresso invertente la corrente i_L si annullerebbe

51

Convertitore tensione-corrente



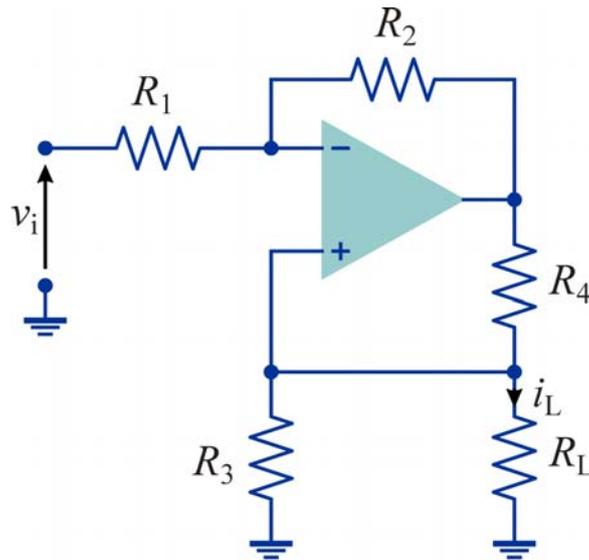
$$i_L = \frac{v_i}{R}$$

$$R_{in} = \infty$$

- E' possibile utilizzare anche la configurazione non invertente
- In questo modo si ottiene una corrente con verso opposto rispetto al caso precedente

52

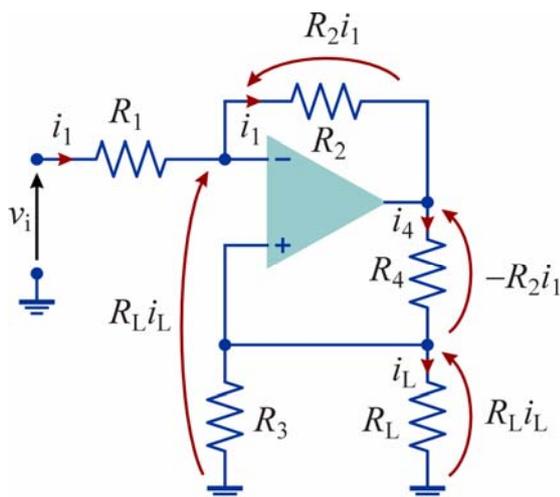
Convertitore tensione-corrente con carico riferito a massa



- Se la resistenza di carico ha un terminale a massa si può utilizzare questo circuito
- Con una scelta opportuna dei valori delle resistenze si può fare in modo che la corrente nel carico sia indipendente dal valore di R_L

53

Convertitore tensione-corrente con carico riferito a massa



$$i_L = \frac{R_3}{R_3 + R_L} i_4 = -\frac{R_3}{R_3 + R_L} \frac{R_2 i_1}{R_4} =$$

$$= -\frac{R_3}{R_3 + R_L} \frac{R_2}{R_4} \frac{v_i - R_L i_L}{R_1}$$



$$i_L = \frac{-R_2 R_3 v_i}{R_1 R_3 R_4 + (R_1 R_4 - R_2 R_3) R_L}$$

- Si può eliminare la dipendenza di i_L da R_L ponendo $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$
- ➔ In queste condizioni si ottiene $i_L = -\frac{v_i}{R_3}$

54