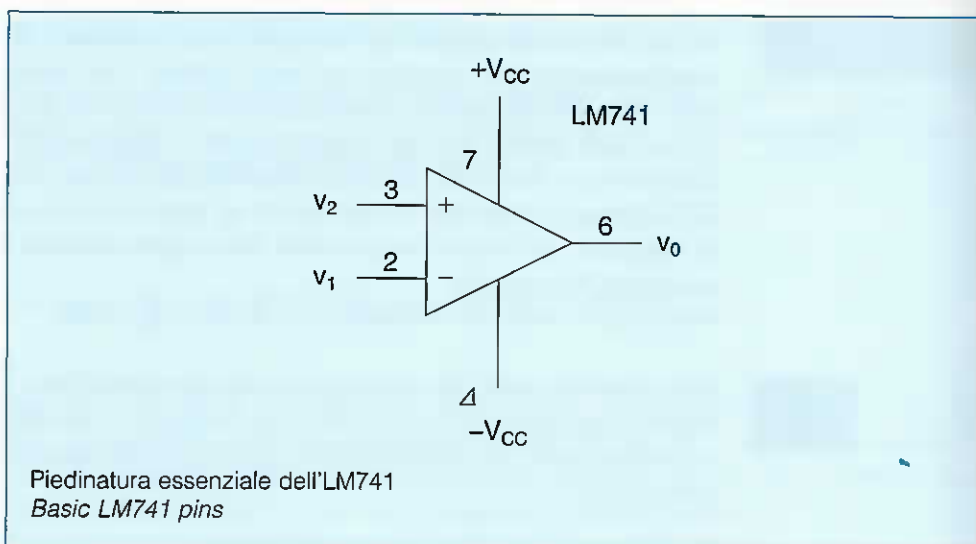


3. L'amplificatore operazionale

the operational amplifier

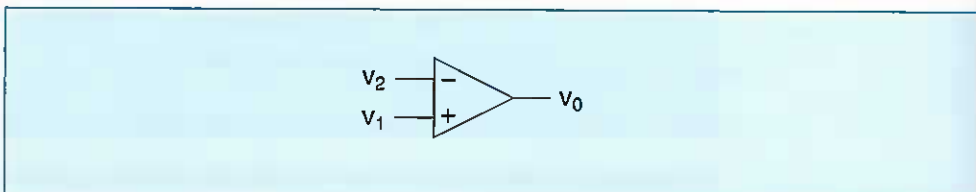
L'amplificatore operazionale (di qui in avanti denominato amp.op.) è essenzialmente un amplificatore di tensione ad elevato guadagno, a cui è aggiunta una reazione interna al chip per controllare la sua caratteristica di risposta complessiva. Esso è un componente integrato che al suo interno contiene decine di transistor collegati fra loro. Circuitualmente si rappresenta con il seguente simbolo:

FIGURA 15



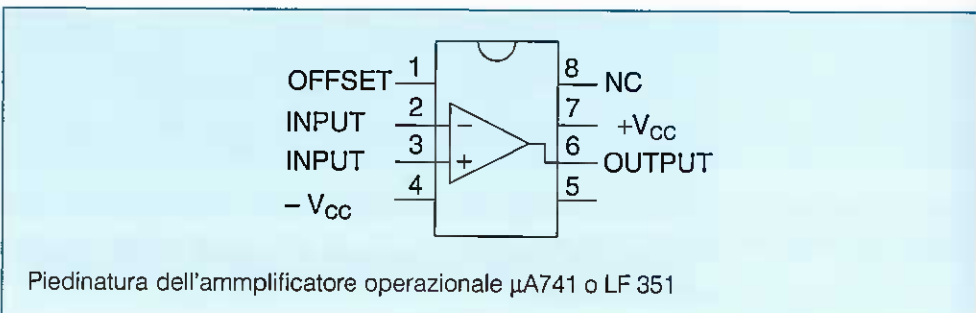
che, più semplicemente, viene indicato nei circuiti come:

FIGURA 16



Un tipico amplificatore operazionale per applicazioni generali è LM741.
A typical general purpose op. amp. is LM741 (μ A741).

FIGURA 17



Anche se originariamente era previsto per la realizzazione di calcolatori analogici per svolgere operazioni matematiche (da cui deriva il nome), è oggi utilizzato in tutti i campi dell'elettronica, di cui costituisce ormai il blocco base.

La realizzazione di amp. op. integrati ha costituito una vera e propria rivoluzione nel campo dell'elettronica analogica ed esso ormai non viene più considerato un dispositivo complesso ma semplicemente come un componente, alla pari di un resistore, di un condensatore, di un diodo o di un transistor.

L'amp.op. è impiegato con l'aggiunta di pochi altri componenti per la realizzazione di amplificatori, filtri attivi, comparatori, generatori di forme d'onda, convertitori, la cui progettazione risulta abbastanza semplice e le cui prestazioni più che soddisfacenti.

Elenchiamo le particolarità e le caratteristiche di un amp. op.:

1) ingresso differenziale

significa che in ingresso è sensibile alla differenza fra i segnali applicati ai due morsetti, quindi l'uscita v_o sarà proporzionale alla differenza fra i segnali applicati ai suoi due ingressi

$$v_o = A_{do} (v_1 - v_2)$$

A_{do} è l'amplificazione di tensione a catena aperta, i segnali sono riferiti a massa;

2) alimentazione duale

vuol dire che normalmente prevede una doppia alimentazione $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ normalmente ± 15 V (normalmente negli schemi elettrici l'alimentazione viene sottintesa e non disegnata);

3) accoppiamento diretto

significa che al suo interno i vari transistor sono collegati fra loro senza l'inserimento di condensatori di accoppiamento; è quindi un amplificatore capace di amplificare anche un segnale continuo; al suo interno, i problemi di instabilità sono risolti con l'uso della reazione negativa. Diremo così che un amp. op. è un amplificatore ad ingresso differenziale, con alimentazione duale, ad accoppiamento diretto.

Un amp. op. ideale è un amp. con le seguenti caratteristiche:

- 1) guadagno di tensione differenziale infinito
- 2) resistenza di ingresso infinita
- 3) resistenza di uscita nulla
- 4) larghezza di banda infinita
- 5) insensibilità totale ai disturbi

È molto importante notare che gli amp. op. reali hanno caratteristiche che si discostano così poco da quelle ideali che, nella maggior parte dei casi vengono considerati ideali. Solo per la banda passante sarà necessario fare delle considerazioni particolari.

Per gli operazionali reali, noi faremo normalmente riferimento al μA 741 ed al LF 351. Analizziamo in dettaglio le varie caratteristiche ideali.

1) $A_d \rightarrow \infty$

significa che appena si applica una piccolissima differenza di potenziale tra i due morsetti di ingresso, l'uscita va all'infinito. In pratica diremo che l'operazionale si satura, cioè dà la massima tensione in uscita (l'alimentazione meno 1,5 volt).

Viceversa se l'uscita è finita, cioè limitata di valore, è necessario che la d.d.p. fra i morsetti di ingresso sia nulla, quindi i due ingressi devono essere allo stesso potenziale.

Quindi, da $v_o = A_{do} (v_1 - v_2)$

se $v_1 \neq v_2$ $v_o \rightarrow \infty$ in pratica arriva a $V_{cc} - 1,5$;

se v_o è finito, ricavando $(v_1 - v_2)$ risulta $(v_1 - v_2) = \frac{v_o}{A_d} = \frac{v_o}{\infty} = 0$

quindi deve essere $v_1 = v_2$.

L'amp.op. ha quindi due possibilità di impiego:

- a) per funzionare come **componente lineare**, cioè con guadagno limitato, ha bisogno di una rete di reazione negativa che ne abbassi l'amplificazione e non faccia automaticamente saturare l'uscita; in questo caso i due morsetti di ingresso sono allo stesso potenziale;
- b) lasciato a catena aperta o addirittura con reazione positiva, produce la saturazione dell'uscita appena si applica una d.d.p fra i suoi ingressi, e funziona come **comparatore**.

2) $R_i \rightarrow \infty$

significa che, applicando un segnale di tensione all'ingresso dell'op., le correnti assorbite dal dispositivo sono nulle, di conseguenza la sorgente di segnale non viene caricata e nella sua resistenza interna non vi è perdita di tensione.

$$I_s = I_r = 0$$

3) $R_o = 0$

significa che l'amp. op. si può considerare in uscita come un generatore ideale di tensione e quindi l'ampiezza del segnale sul carico collegato non dipenderà dal valore del carico stesso.

4) $B \rightarrow \infty$

significa che l'amplificazione fornita è costante al variare della frequenza del segnale e non subisce alcun taglio.

Gli amp. op. sono impiegati in numerosissime applicazioni circuitali; tuttavia, le applicazioni lineari si possono ricondurre a due configurazioni circuitali fondamentali:

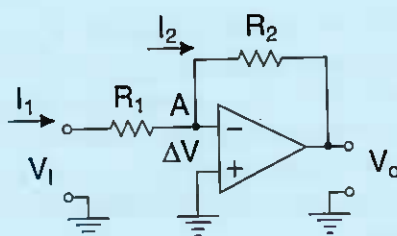
- 1) l'amplificatore invertente
- 2) l'amplificatore non invertente.

In ogni caso sarà necessaria la presenza di una rete di retroazione in modo da ridurre il guadagno e rendere il circuito lineare, tale rete dovrà partire dall'uscita e collegarsi al morsetto di ingresso negativo. Dalle caratteristiche tipiche degli amp.op., che noi considereremo sempre ideali, si possono ricavare alcune considerazioni fondamentali che sono alla base del funzionamento dei circuiti e ne permettono uno studio molto semplice ed immediato:

- 1) poiché il guadagno ad anello aperto è infinito, qualsiasi valore della tensione di uscita in zona lineare presuppone che i due morsetti di ingresso siano allo stesso potenziale; si dice che i due ingressi sono virtualmente collegati insieme e così se uno è collegato fisicamente a massa, l'altro è a massa virtuale;
- 2) poiché la resistenza di ingresso è infinita, la corrente che entra nei morsetti di ingresso dell'operazionale è nulla.

Configurazioni fondamentali *basic circuits*

Nella figura è indicato l'amplificatore operazionale ideale con le resistenze di retroazione negativa R_1 ed R_2 ed il terminale + collegato a massa. Questa è la configurazione invertente fondamentale.



Poiché $R_1 \rightarrow \infty$ la corrente che scorre in R_1 percorre anche R_2 .

$$I_2 = I_1$$

Inoltre si può notare che:

$$\Delta v = \frac{v_o}{A_v} = 0 \quad \text{in quanto} \quad A_{vo} \rightarrow \infty$$

in tal modo i due morsetti di ingresso sono allo stesso potenziale:

$$V_+ = V_-$$

ed il terminale invertente è praticamente a massa, cioè:

$$V_A = 0$$

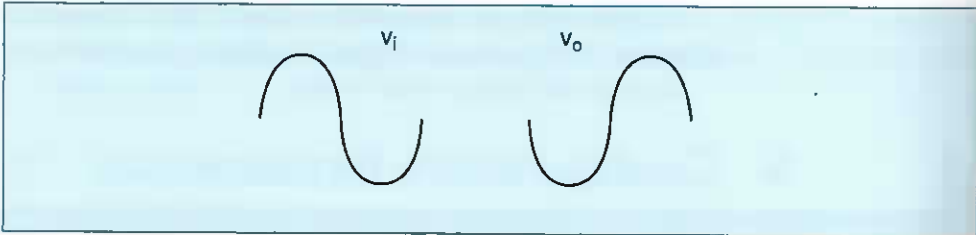
Possiamo dire che all'ingresso dell'amplificatore esiste una massa virtuale o un corto circuito. Il termine "virtuale" è usato per indicare che, sebbene la reazione dall'uscita all'ingresso attraverso R_2 serva per mantenere a zero la tensione Δv , in pratica in tale cortocircuito non c'è passaggio di corrente. Possiamo calcolare il guadagno di tensione A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-R_2 I_2 + V_A}{R_1 I_1 + V_A} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

[for.6]

Si vede come il guadagno dell'amplificatore completo non dipende dal guadagno a catena aperta dell'operazionale A_d , ma semplicemente dal rapporto dei valori delle resistenze R_2 ed R_1 . Il segno negativo indica che la polarità della tensione di uscita è invertita rispetto a quella della tensione di ingresso; per questo motivo tale amplificatore viene chiamato amplificatore **invertente**.



La resistenza di ingresso R_{in} dell'amplificatore completo risulta uguale ad R_1 , infatti:

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_1 i_i + v_A}{i_i} = R_1$$

[for.7]

essendo, per la massa virtuale, $v_A = 0$.

La resistenza di uscita R_{out} dell'amplificatore completo risulta uguale a quella di uscita dell'operazionale, quindi praticamente nulla.

È importante notare che l'inserimento di un carico in uscita R_L idealmente non provoca nessun cambiamento nel guadagno dell'amplificatore, nè nel segnale di uscita, dato che l'amplificatore si comporta come un generatore ideale di tensione.

In pratica questo però non è sempre vero. Infatti vediamo che l'operazionale deve fornire in uscita una corrente $i_o = i_2 + i_L$ che dipenderà dal valore delle resistenze inserite.

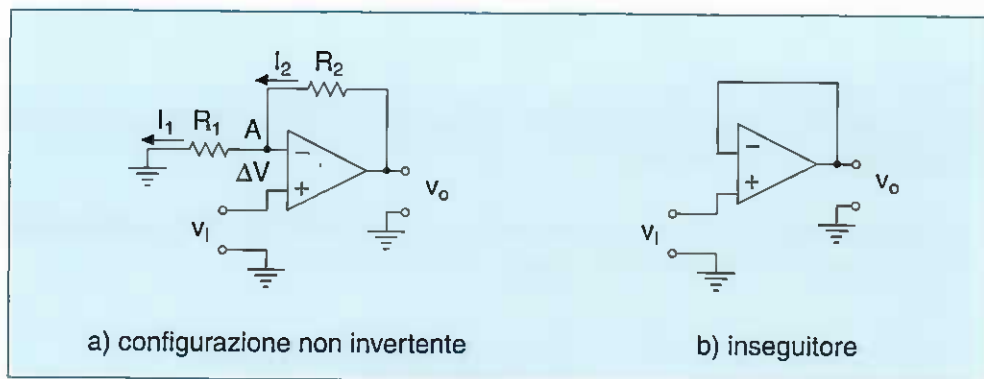
Se tali valori comportano l'erogazione da parte dell'operazionale di una corrente superiore al suo limite massimo (10 mA) la tensione comincia a diminuire a causa di una protezione interna. In particolare se si chiude in cortocircuito verso massa l'uscita, la corrente è limitata al valore $I_{osc} = 25$ mA.

Questo fatto limita anche la scelta dei valori delle resistenze di reazione R_1 ed R_2 in modo che la loro somma non risulti inferiore al $k\Omega$.

Ma il valore di R_1 , e di conseguenza R_2 , è limitato inferiormente anche dal fatto che essa è uguale anche alla resistenza di ingresso del circuito, che abbiamo visto è bene che sia la più grande possibile per ottimizzare l'accoppiamento dell'amplificatore di tensione alla sorgente di segnale.

Il valore delle resistenze di reazione è limitato anche superiormente da un altro fattore che ora consideriamo: abbiamo detto che nell'operazionale ideale la corrente in ingresso è nulla. In effetti nell'op. reale vi è una piccola corrente (corrente di polarizzazione). Questa, circolando nelle resistenze provoca una caduta di potenziale che va a influire sulle tensioni di segnale, modificando il funzionamento del circuito. È logico quindi che le resistenze debbano essere di valore non troppo elevato, in modo da ridurre le tensioni dovute alla corrente di polarizzazione. Normalmente è bene rimanere al di sotto delle centinaia di $k\Omega$. Avremo pertanto un range di valori da utilizzare per le resistenze: $100 \Omega \div 100 k\Omega$.

Molto spesso si rende necessario l'uso di un amplificatore in cui la tensione di uscita sia uguale, in modulo e in fase, alla tensione di ingresso, e che inoltre abbia $R_i \rightarrow \infty$ e $R_o = 0$, in modo tale che il generatore ed il carico siano in effetti isolati. Un inseguitore di emettitore presenta approssimativamente tale comportamento. Ci si avvicina ulteriormente a questa caratteristica ideale usando un amplificatore operazionale in cui al morsetto di ingresso non invertente venga applicato il segnale d'ingresso e al morsetto invertente venga applicata la reazione negativa di tensione, come indicato in figura:



Possiamo calcolare il guadagno di tensione:

We can calculate the voltage gain A_v :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_2 I_2 + R_1 I_1}{R_1 I_1}$$

$$A_v = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

[for.8]

Se nella configurazione non invertente si pone:

$R_1 = \infty$ (si toglie la resistenza)

$R_2 = 0$ (si sostituisce con un filo)

si ottiene il circuito di [FIG. 20b].

Sia analizzandolo come una configurazione non invertente, applicando cioè la formula:

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

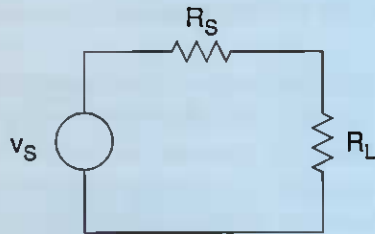
sia dall'analisi diretta della rete, i morsetti + e - devono essere allo stesso potenziale ed il morsetto - è collegato all'uscita, si ricava che $v_o = v_i$, quindi il guadagno è $A_v = 1$.

Per tali motivi il circuito prende il nome di **inseguitore di tensione** in quanto la tensione di uscita segue, cioè è uguale, a quella di ingresso.

3 Una sorgente di tensione di resistenza interna $R_s = 1 \text{ k}\Omega$, che produce una tensione $v_i = 2 \text{ V}$ deve essere applicata ad un carico $R_L = 1 \text{ k}\Omega$.

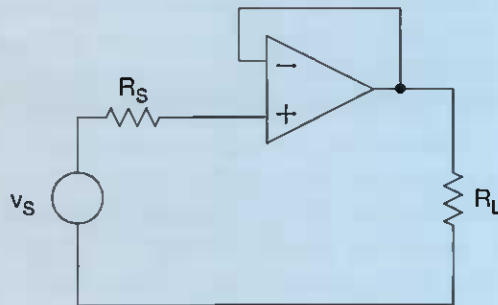
Collegando direttamente la sorgente al carico, si ottiene una forte attenuazione, in quanto solo il 50% del segnale arriva effettivamente al carico stesso:

$$v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot v_i = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ V}$$



[for.21]

Se viceversa interponiamo, fra la sorgente ed il carico, il circuito inseguitore di tensione, si ha:



[for.22]

La resistenza R_s non è percorsa da corrente dato che l'operazionale non ha corrente in ingresso. quindi $v_i = v_s$ ed essendo $v_o = v_i$, si ha $v_o = v_s = 2 \text{ V}$ senza alcuna attenuazione.

Globalmente tale amplificatore presenta le seguenti caratteristiche:

- 1) guadagno unitario;
- 2) resistenza di ingresso infinita;
- 3) resistenza di uscita nulla.

Per questo è un tipico **adattatore di impedenza**, in quanto adatta, cioè rende ottimale, il trasferimento di tensione da una sorgente ad un carico. Inoltre si può interpretare come un circuito **buffer analogico**, che cioè trasferisce invariato un segnale dall'ingresso all'uscita, con la possibilità di aumentare la corrente fornita al carico.

5. Impieghi fondamentali lineari dell'amp. op.

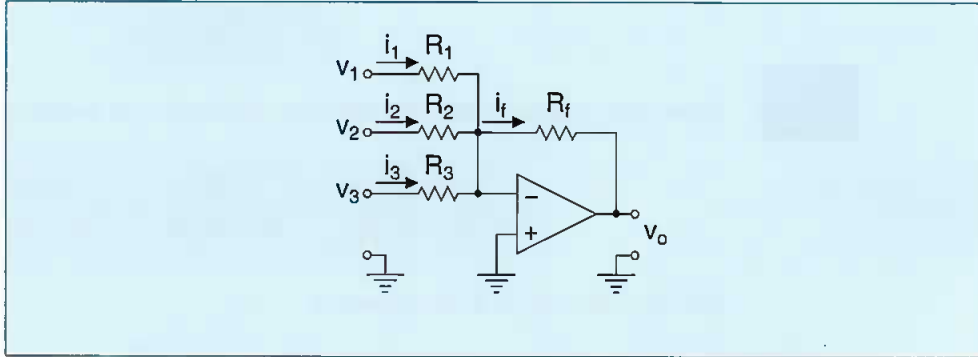
basic linear uses of an operational amplifier

Un amp. op. può essere impiegato per realizzare alcune operazioni matematiche. Questo spiega la denominazione data a questo tipo di amplificatore. Alcune delle configurazioni fondamentali sono le seguenti.

La configurazione indicata in figura può essere usata per ottenere un'uscita che sia una combinazione lineare di un certo numero di segnali d'ingresso.

AMPLIFICATORE
SOMMATTORE INVERTENTE
INVERTING ADDER OR
SUMMING AMPLIFIER

FIGURA 23



Dato che all'ingresso dell'amp. op. esiste una massa virtuale, allora:

$$v_o = -R_f i_r = -R_f (i_1 + i_2 + i_3)$$

$$v_o = -R_f \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} \right)$$

[for.9]

Se $R_1 = R_2 = R_3 = R$ allora

$$v_o = -\frac{R_f}{R} (v_1 + v_2 + v_3)$$

[for.10]

e l'uscita è proporzionale alla somma delle tensioni di ingresso.

In uscita si può anche ottenere **la media** dei segnali di ingresso, ponendo:

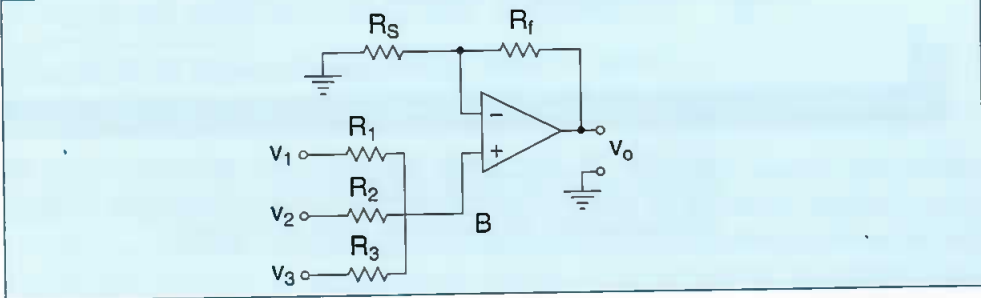
$$R_1 = R_2 = R_3 = 3R, \text{ così si ha } v_o = -\frac{v_1 + v_2 + v_3}{3}$$

Tale circuito può essere esteso ad un numero qualunque di ingressi, con la sola aggiunta di resistenze.

**AMPLIFICATORE SOMMATORE
NON INVERTENTE**



Un sommatore in cui l'uscita è una combinazione lineare degli ingressi senza cambiamento di segno è ottenuto usando la configurazione non invertente. Un simile sommatore lo vediamo in figura.



La configurazione non invertente impone che

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) v_B$$



where the voltage at the non inverting terminal v_B is found by using superposition

$$v_B = \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} v_1 + \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} v_2 + \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} v_3$$

[for.11]

Per $R_1 = R_2 = R_3 = R$ il rapporto è

$$\frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} = \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} = \frac{\frac{R}{2}}{R + \frac{R}{2}} = \frac{1}{3}$$

$$v_B = \frac{1}{3}(v_1 + v_2 + v_3)$$

$$v_o = \frac{1 + \frac{R_f}{R_s}}{3}(v_1 + v_2 + v_3)$$

[for.12]

In generale, per n resistenze uguali R_1, R_2, R_3, R_4, R_n ognuna di valore R , il denominatore è n e l'uscita è:

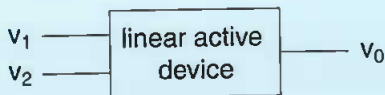
$$v_o = \frac{1 + \frac{R_f}{R_s}}{n}(v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

[for.13]

Un amplificatore differenziale è in grado di amplificare la differenza fra due segnali. La figura rappresenta un dispositivo lineare attivo con due tensioni di ingresso ed un segnale di uscita, ciascuna misurata rispetto a massa. In un amp. diff. ideale la tensione di uscita dovrebbe avere la seguente espressione:

$$v_o = A_d (v_1 - v_2)$$

dove A_d è il guadagno dell'amplificatore differenziale.

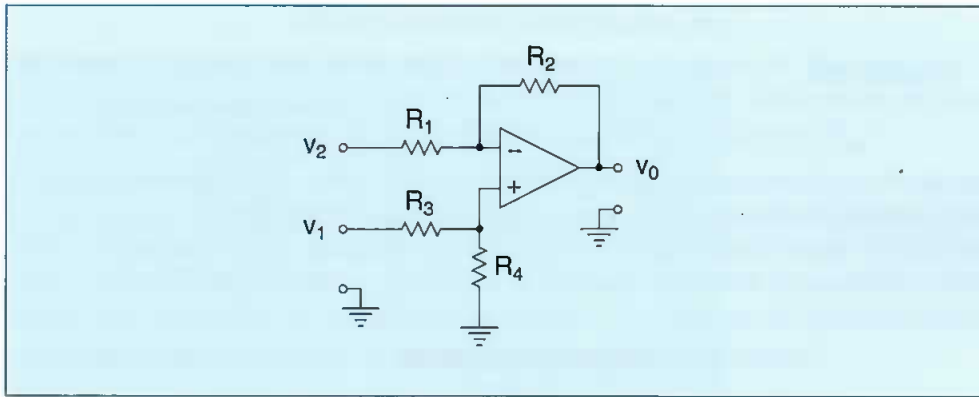


Così si può notare che tutti i segnali che sono in comune ai due ingressi non avranno effetto sulla tensione di uscita.

L'amplificatore con stadio di ingresso differenziale e uscita verso massa è spesso usato per amplificare segnali da trasduttori che convertono un parametro fisico e le loro variazioni in un segnale elettrico. Esempi di tali trasduttori sono i ponti per estensimetri, per termocoppie, ecc.

L'amplificatore operazionale è già di per se un amplificatore differenziale ma, causa il suo guadagno troppo elevato, non può essere utilizzato a catena aperta come amplificatore lineare della differenza dei segnali applicati. Si può realizzare con il circuito di [FIG.25].

25



Per trovare v_0 usiamo la sovrapposizione degli effetti.

Se noi poniamo $v_1 = 0$, allora, trascurando la corrente di polarizzazione ($I_1 = 0$), la tensione al terminale non invertente è zero e ne risulta la configurazione invertente tipica.

$$v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_2$$

Se invece poniamo $v_2 = 0$

$$v_0 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_1$$

Applicando la sovrapposizione, si ha:

$$v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_2 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_1$$

[for.14]

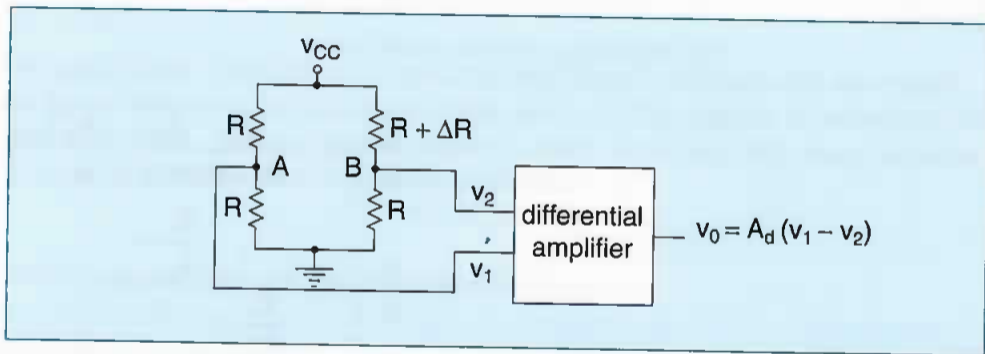
che possiamo scrivere anche come

$$v_0 = \frac{R_2}{R_1} \left[-v_2 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1}{R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_1 \right]$$

$$v_0 = \frac{R_2}{R_1} \left(-v_2 + \frac{1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \frac{\frac{R_1}{R_2} + 1}{1} v_1 \right)$$

Se $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ allora:

Un amp. diff. è spesso usato per amplificare l'uscita di un trasduttore a ponte, come indicato in figura.



Nominalmente, le quattro resistenze del ponte sono uguali ad R e, di conseguenza, i punti A e B sono allo stesso potenziale, ma, se un lato contiene una resistenza il cui valore dipende da una grandezza fisica, fra i punti A e B si viene a crea-

FIGURA 27

re una ddp che possiamo calcolare e che dipende essenzialmente dallo squilibrio esistente fra le resistenze del ponte:

$$V_1 = \frac{V_{CC}}{2} \quad V_2 = \frac{R}{R + \Delta R} V_{CC}$$

$$V_0 = A_d V_{CC} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R}} \right) = A_d V_{CC} \frac{1 + \frac{\Delta R}{R} - 2}{2 \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right)} = \frac{A_d V_{CC}}{2} \frac{\frac{\Delta R}{R} - 1}{\frac{\Delta R}{R} + 1}$$

È spesso necessario convertire un segnale di tensione in una corrente di uscita ad esso proporzionale. Questa operazione è necessaria, per esempio, quando si pilotano i gioghi di deflessione di un cinescopio per televisione. Sono chiamati anche VCCS (voltage-controlled current source, generatori di corrente controllati in tensione) e sono dispositivi che, pilotati da una tensione di ingresso v_i , producono in uscita una corrente i_o proporzionale alla corrente di ingresso, che non dipende dal carico:

$$i_o = k v_i$$

Le impedenze di ingresso e di uscita di tale dispositivo devono essere molto elevate.

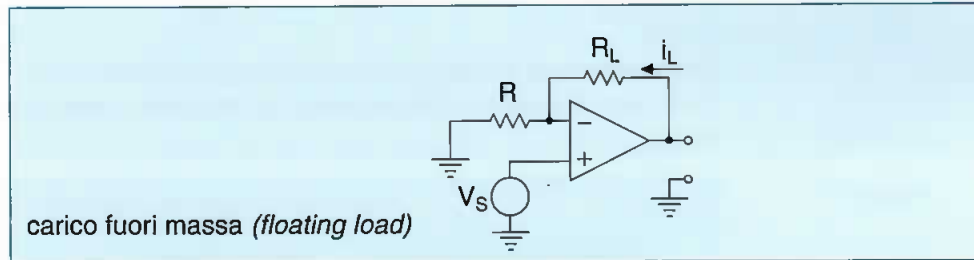
fuori massa

Se la resistenza di carico non ha capi a massa (cioè è fluttuante), possiamo usare il semplice circuito di figura. Nel caso di un solo ingresso v_s , la corrente in R_L è

$$i_L = \frac{v_s}{R_3}$$

[for.16]

FIGURA 28

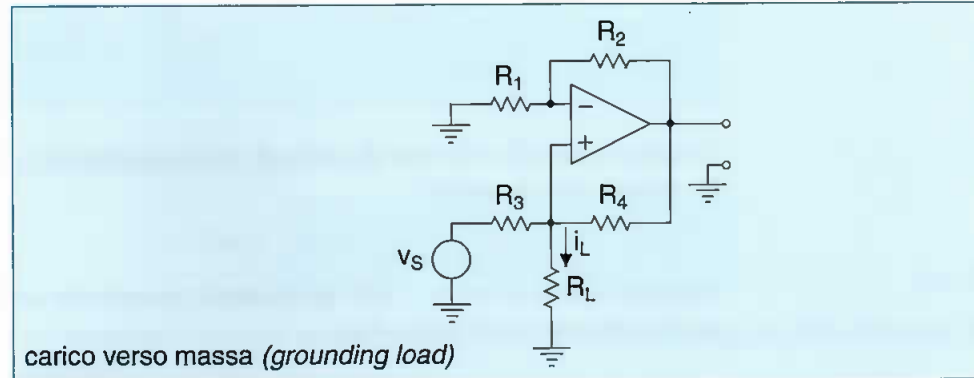


Si noti che i_L è indipendente dal valore del carico R_L a causa della massa virtuale presente all'ingresso dell'amp. op.

verso massa

Se il carico ha un capo a massa, si può utilizzare il circuito indicato in figura.

FIGURA 29



Cerchiamo la relazione fra la corrente sul carico e la tensione di ingresso.

$$i_L = \frac{v_s - v_+}{R_3} + \frac{v_o - v_+}{R_4}$$

$$v_+ = v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

$$i_L = \frac{v_s}{R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{v_o}{R_3} + \frac{v_o}{R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{v_o}{R_4} = \frac{v_s}{R_3} - \frac{v_o}{R_4} \left[1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_4}{R_3} + 1 \right) \right]$$

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

Se $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ allora

$$i_L = \frac{v_s}{R_3}$$

[for.17]

indipendente dal carico R_L .



If the load resistance has neither side grounded (floating), we can use the simple circuit of fig.28. If the load R_L is grounded, the circuit of fig.29 can be used.

Note that i_L is independent of the load R_L , because of the virtual ground of the operational amplifier input.

CONVERTITTORE
CORRENTE-TENSIONE

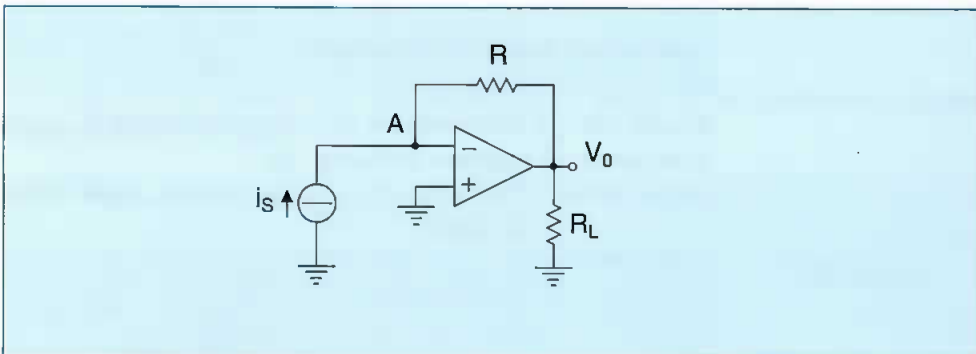
Sono chiamati anche CCVS (current-controlled voltage source, generatori di tensione controllati in corrente). Tali dispositivi sono pilotati da una corrente di ingresso i_i e forniscono in uscita una tensione v_o proporzionale alla corrente di ingresso indipendente dal carico collegato:

$$v_o = k i_i$$

Le resistenze di ingresso e di uscita devono essere nulle.

Il circuito di figura mostra un amp. op. utilizzato come convertitore corrente-tensione.

FIGURA 30



L'espressione della tensione di uscita si ricava facilmente: sappiamo che il punto A è a massa virtuale, quindi:

$$v_A = 0$$

Sappiamo che il morsetto - dell'operazionale non assorbe corrente, quindi la corrente che percorre la resistenza R è:

$$i_R = i_s$$

Calcoliamo così la tensione di uscita, seguendo il percorso che porta a massa:

$$v_o = -R i_R + v_A = -R i_S$$

quindi

$$v_o = -R i_S$$

[for.18]

che non dipende dal carico (sempre che questo sia di resistenza molto più grande della resistenza di uscita dell'operazionale).

La resistenza di ingresso è nulla (A è a massa virtuale), quindi se il generatore di corrente ha una resistenza interna $< \infty$ (si pone in parallelo al generatore), questa non provoca alcuna perdita di segnale (si trova tra massa e massa).

La resistenza di uscita è nulla (R_o dell'op. è molto bassa).

Le fotocellule ed alcuni trasduttori di temperatura forniscono in uscita una corrente indipendente dal carico. Il convertitore C CVS permette di trasformare tali sorgenti in sorgenti di tensione.