

Classe : **4A IPAI - 5A IPAI**

A.S. : 2020-2021

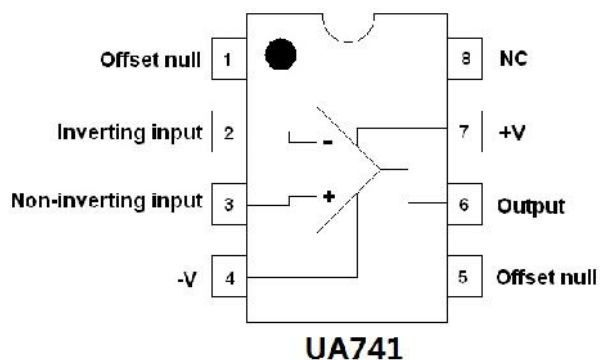
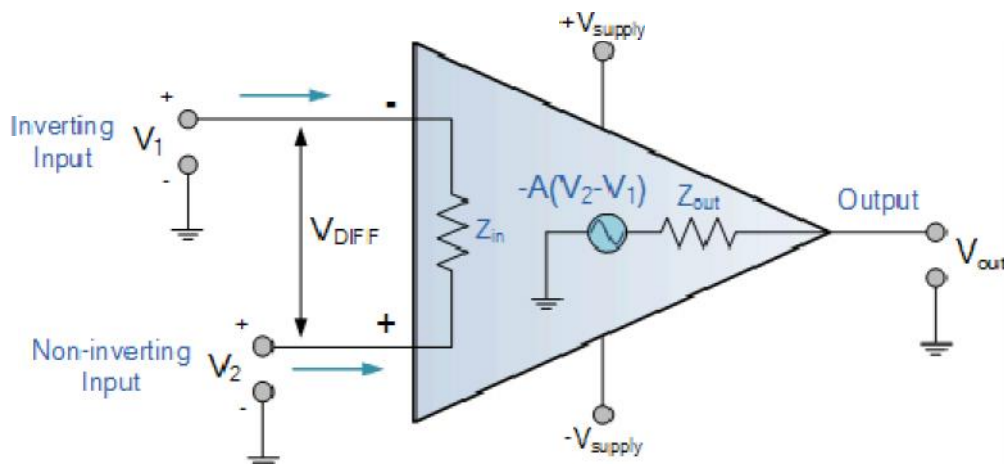
Docente : Prof. Franco Tufoni Codocente: Prof. Enrico Ruggieri

Disciplina: Tecnologie elettriche-elettroniche, dell'automazione e applicazioni

Amplificatori Operazionali

Circuiti Lineari Algebrici

Configurazioni - Schemi - Formule

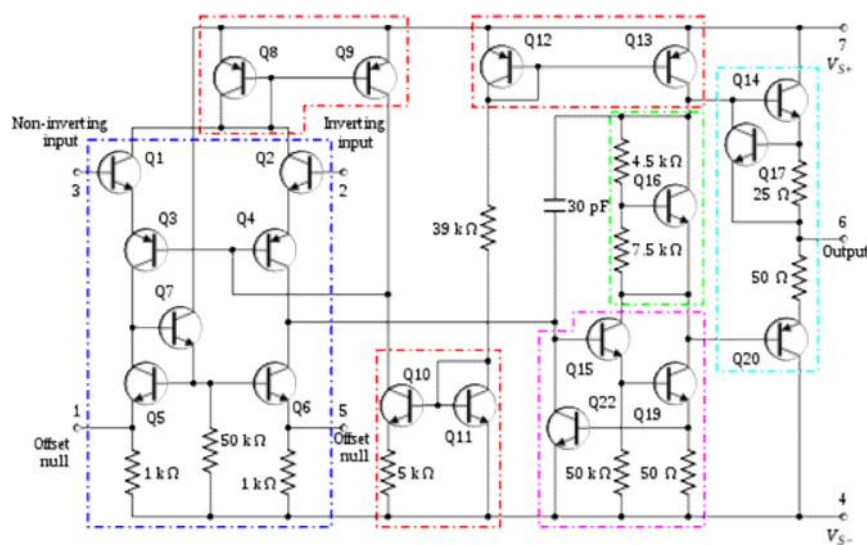


Vers 3.0

Amplificatore Operazionale - Circuiti lineari algebrici

Introduzione (Fonte Elemania)

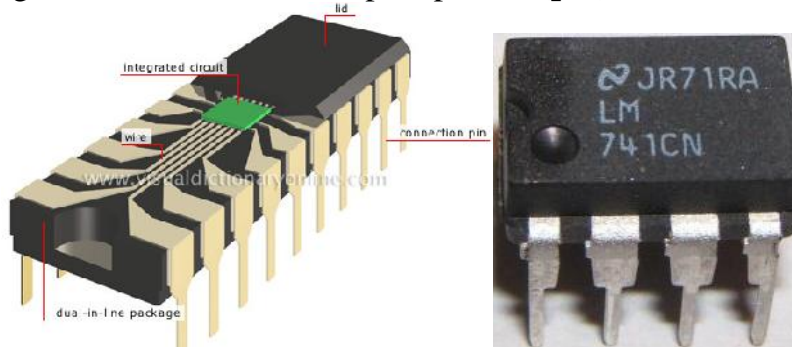
L'**amplificatore operazionale** (*operational amplifier*) è un tipo di **circuito integrato** analogico.



Internamente esso è formato da una rete di resistori, capacità, diodi e transistor e tali componenti sono tutti realizzati su un unico *chip di silicio* incapsulato in un contenitore di plastica.

La figura seguente mostra la circuiteria interna di un **741**, un modello di operazionale a basso prezzo e di largo uso. Si osservi che si tratta di un amplificatore multistadio realizzato con molti transistor:

Nelle figure seguenti il chip montato all'interno di un tipico contenitore **DIP** (*dual in-line package*) a 8 piedini con i collegamenti elettrici fra il chip e i piedini (**pin**) esterni dell'integrato.



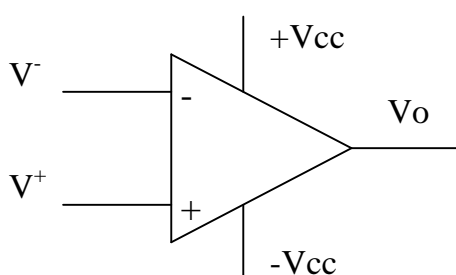
I primi amplificatori operazionali erano realizzati a valvole ed erano dei componenti abbastanza ingombranti. Quello mostrato in figura è il modello K2-W, commercializzato nel 1952:



Il primo amplificatore operazionale integrato venne realizzato nel 1963 (μ A702 della Fairchild) e nel 1968 faceva la sua comparsa il modello 741, di cui già abbiamo parlato e tuttora uno dei tipi più usati di amplificatore operazionale. Da allora sono stati realizzati numerosi modelli di operazionale, differenti per prezzo, prestazioni o utilizzo.

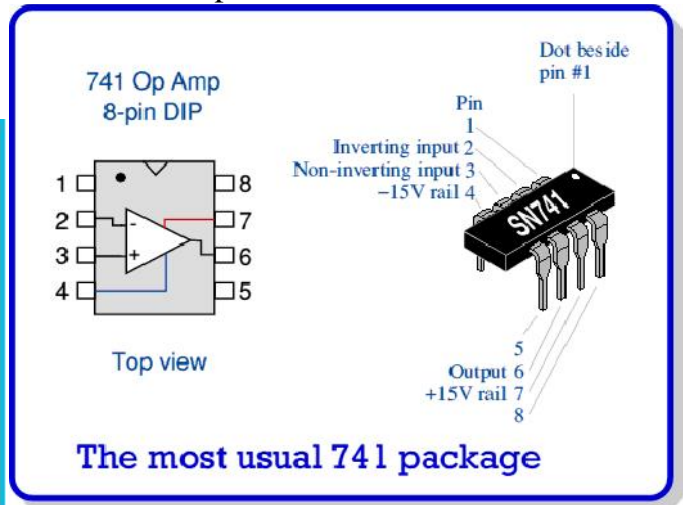
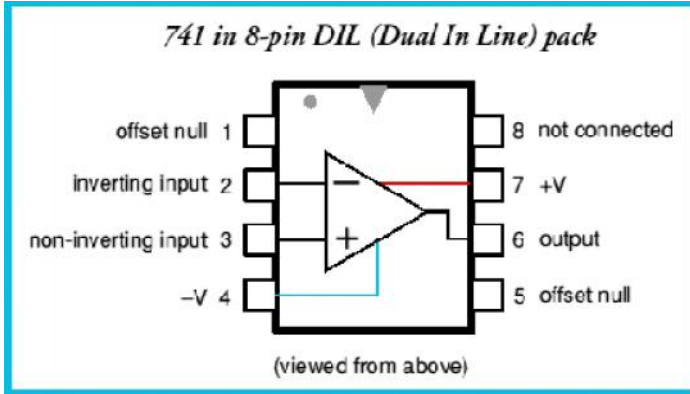
Simbolo elettrico e piedinatura

In figura è riportato il simbolo elettrico dell'operazionale.

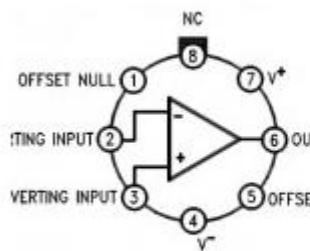
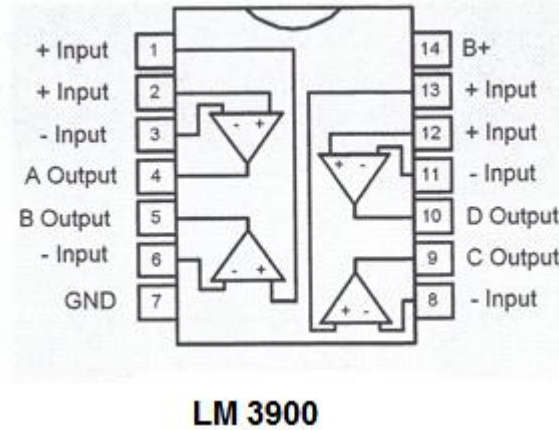
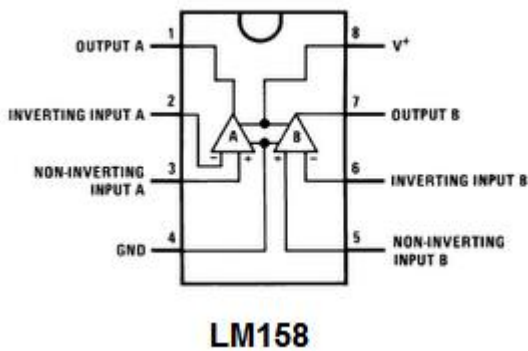


- **ingresso invertente** (*inverting input, V₋*)
- **ingresso non invertente** (*non-inverting input, V₊*)
- **uscita** (*V_{out}*)
- **alimentazione positiva** (*V_{cc} positive supply*)
- **alimentazione negativa** (*-V_{cc} negative supply*)

Le due figure seguenti mostrano invece la piedinatura interna di un 741 in contenitore DIP. Il terminale 8 (*not connected*) non è utilizzato (è presente per compatibilità con il contenitore standard, ma non è collegato). I terminali 1 e 5 (*offset null*) non sono rappresentati nel simbolo dell'operazionale e vengono utilizzati per regolare l'offset dell'amplificatore.



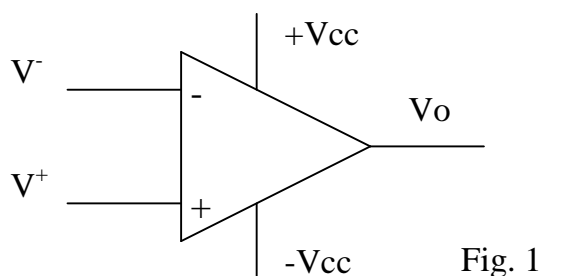
In commercio esistono vari Amplificatori operazionali montati in diversi contenitori.



Proprietà dell'amplificatore operazionale

L'amplificatore operazionale, il cui simbolo è indicato in Fig.1 costituisce attualmente l'elemento attivo più utilizzato nelle applicazioni analogiche.

La struttura, come si può notare, è quella di un amplificatore differenziale con i due ingressi V^+ e V^- rispettivamente non invertente ed invertente.



Le principali caratteristiche dell'amplificatore operazionale ideale sono:

-) resistenza d'ingresso infinita;
-) guadagno differenziale infinito;
-) resistenza d'uscita nulla.

Nel suo funzionamento reale:

-) la resistenza d'ingresso è molto elevata (dell'ordine delle decine di $M\Omega$);
-) il guadagno è molto elevato (dell'ordine delle centinaia di migliaia);
-) la resistenza d'uscita è bassa (dell'ordine delle decine di Ω).

L'evoluzione tecnologica ha permesso di migliorare progressivamente le caratteristiche dell'amplificatore operazionale reale, rendendo il comportamento sempre più prossimo all'ideale. Questa peculiarità si dimostra particolarmente utile nelle fasi di progetto perché il progettista può concentrare i propri sforzi sul problema in esame, prescindendo, quando è possibile, di limiti dell'elemento attivo utilizzato.

L'amplificatore operazionale *impiegato ad anello aperto* non è direttamente utilizzabile come amplificatore; infatti, anche per valori molto piccoli della tensione differenziale d'ingresso, *l'elevato guadagno comporta la saturazione del dispositivo*.

Volendo sfruttare un'ampia fascia dei valori d'ingresso, pur mantenendo un comportamento lineare, è necessario inserire il dispositivo in una struttura con *retroazione negativa*.

L'introduzione della retroazione negativa comporta la riduzione del guadagno complessivo, rendendo il funzionamento della rete indipendente dal *guadagno a catena aperta*.

Le caratteristiche dell'amplificatore operazionale conducono alle seguenti conclusioni:

- 1) essendo R_i molto elevata, si può ritenere che la corrente assorbita dai due morsetti d'ingresso sia trascurabile: nella risoluzione degli esercizi, tale corrente sarà ritenuta nulla;
- 2) nell'ipotesi di funzionamento lineare, il valore finito della tensione d'uscita ed il guadagno molto elevato del dispositivo comportano una trascurabile differenza di potenziale tra i morsetti d'ingresso, tale da poterla ritenere nulla. I due ingressi sono quindi allo stesso potenziale, costituendo pertanto un *cortocircuito virtuale* (**principio della massa virtuale**);
- 3) l'amplificatore operazionale retroazionato ha resistenza d'uscita trascurabile. È pertanto possibile affermare che il *guadagno complessivo è indipendente dal valore del carico* utilizzato (all'interno dei limiti di potenza erogabile dal dispositivo).

1.1 Configurazioni notevoli

Di norma gli esercizi riguardanti le reti lineari richiedono di determinare la *funzione di trasferimento* del circuito, da intendersi come il rapporto tra variabile d'uscita e la variabile d'ingresso oppure, nel caso siano presenti più ingressi, come relazione *ingressi-uscita*.

Un'altra possibile richiesta è quella di determinare *l'impedenza d'ingresso* della rete, ossia il rapporto tra la tensione e la corrente d'ingresso.

A tal fine è conveniente conoscere la funzione di trasferimento di alcune reti base, dette *configurazioni notevoli*, elencate di seguito:

-) *amplificatore invertente;*
-) *amplificatore non invertente;*
-) *inseguitore di tensione*
-) *sommatore invertente;*
-) *sommatore non invertente;*
-) *amplificatore differenziale*
-) *convertitore tensione/corrente*
-) *convertitore corrente/tensione*
-) *amplificatore per strumentazione*

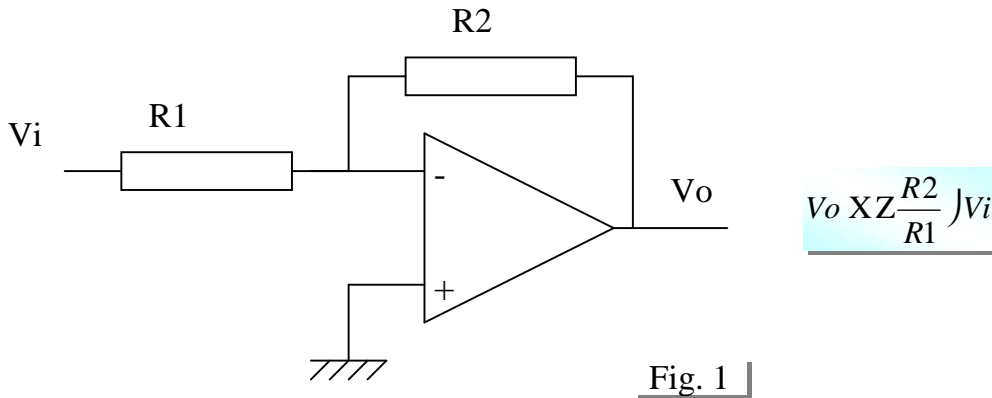
Il circuito per il quale è richiesto di determinare la relazione tra l'uscita e gli ingressi, in generale, contiene più un amplificatore operazionale e potrebbe non essere costituito da configurazioni notevoli poste in cascata. Se si verifica questa condizione, è possibile risolvere il problema con i due metodi seguenti:

- 1) si cerca di ricondurre il problema alle configurazioni notevoli per mezzo di semplificazioni, oppure applicando il principio della *sovrapposizione degli effetti*;
- 2) si applica il seguente algoritmo:
 - a. **passo 1:** si assegna un simbolo identificatore ad ogni nodo, che rappresenti il potenziale riferito alla massa del circuito;
 - b. **passo 2:** si assegna un verso arbitrario alle correnti nei rami del circuito (ricordando che gli amplificatori operazionali, considerati ideali, non assorbono corrente dai loro ingressi);
 - c. **passo 3:** si scrive un sistema di equazioni formato da tante equazioni ai nodi quante sono le variabili da eliminare aumentare di una unità, escludendo i nodi d'uscita degli amplificatori operazionali;
 - d. **passo 4:** si risolve il sistema riconducendo ad un'unica equazione contenente:
 -) tensioni d'ingresso e d'uscita per il calcolo della funzione di trasferimento o della relazione *ingressi-uscita*;
 -) tensione e corrente d'ingresso per il calcolo dell'impedenza *d'ingresso*.

Concetti, schemi e formule fondamentali

● Amplificatore invertente (Fig.1)

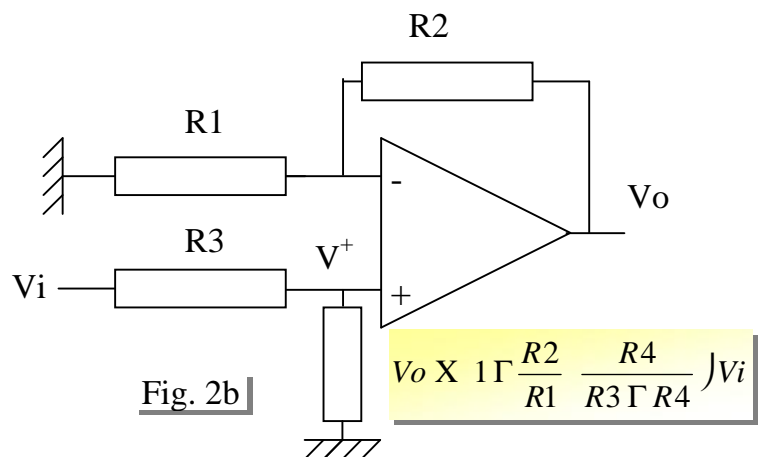
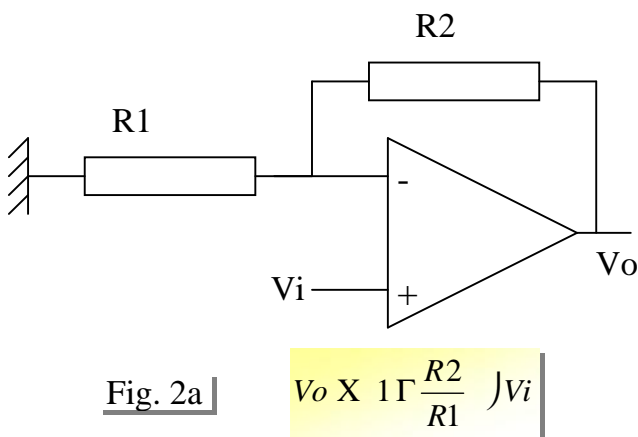
Il segnale in uscita è in opposizione di fase rispetto al segnale d'ingresso; il guadagno può assumere un qualunque valore positivo. Caso particolare è quello in cui le due resistenze sono uguali ed il circuito funziona da invertitore di fase



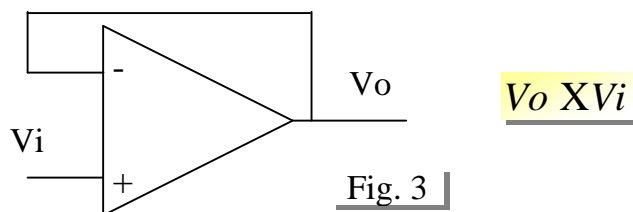
● Amplificatore non invertente (Fig.2a, fig.2b)

Il segnale in uscita è in fase con il segnale d'ingresso, il guadagno non può essere inferiore all'unità.

Caso limite è l'inseguitore di tensione, un circuito adattatore d'impedenza a guadagno unitario che presenta una resistenza d'ingresso infinita e una resistenza d'uscita nulla.



● Inseguitore di tensione (Fig. 3)

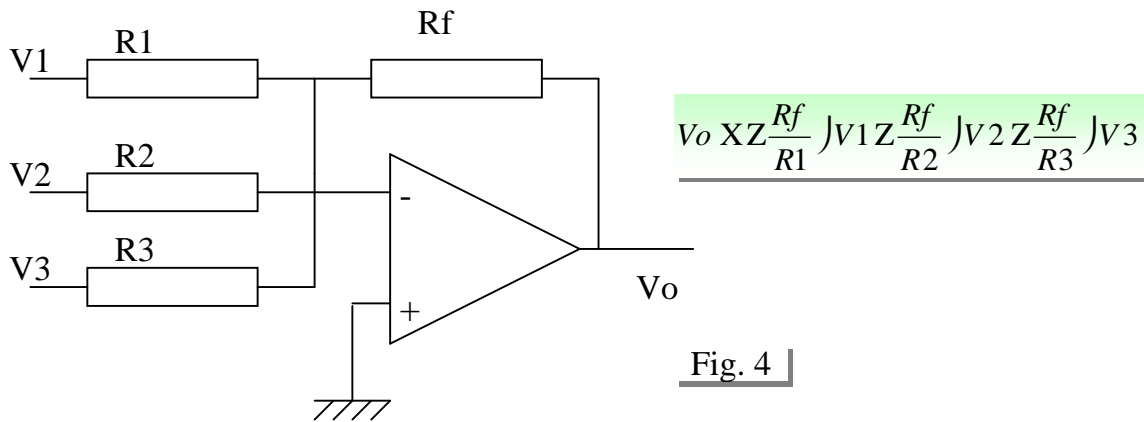


La configurazione inseguitore di tensione viene utilizzata come adattatore di impedenza. Infatti l'inseguitore ha:

- ⌋ la resistenza d'ingresso infinita che elimina le perdite di segnale da imputare alla resistenza interna della sorgente o alla resistenza d'uscita non nulla dello stadio precedente;
- ⌋ la resistenza d'uscita nulla che garantisce la costanza del guadagno al variare del carico e quindi il massimo trasferimento del segnale allo stadio successivo.

● **Sommatore invertente** (Fig.4)

Il segnale in uscita è la somma, cambiata di segno, dei segnali presenti ai terminali d'ingresso moltiplicati ciascuno per un coefficiente di proporzionalità dipende dai valori delle resistenze. Nel caso della figura, i terminali d'ingresso sono tre, ma il circuito può anche essere utilizzato per un numero differente di segnali d'ingresso.

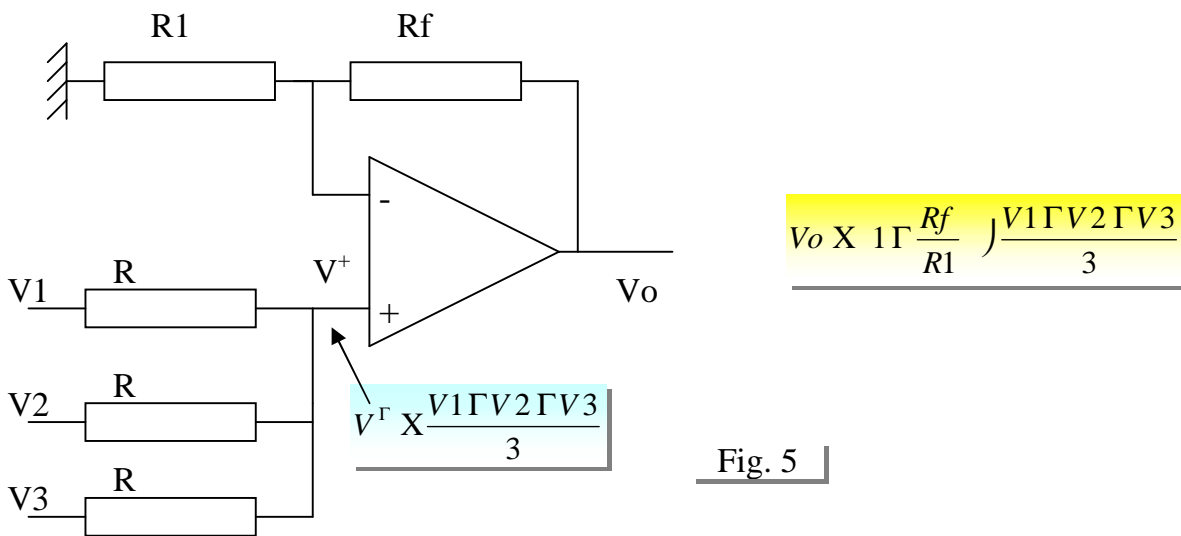


● **Sommatore non invertente** (Fig.5)

Il segnale in uscita è la media dei segnali presenti ai terminali d'ingresso moltiplicata per un coefficiente di proporzionalità, dipende dai valori delle resistenze.

Il circuito può essere esteso ad un numero differente di segnali d'ingresso.

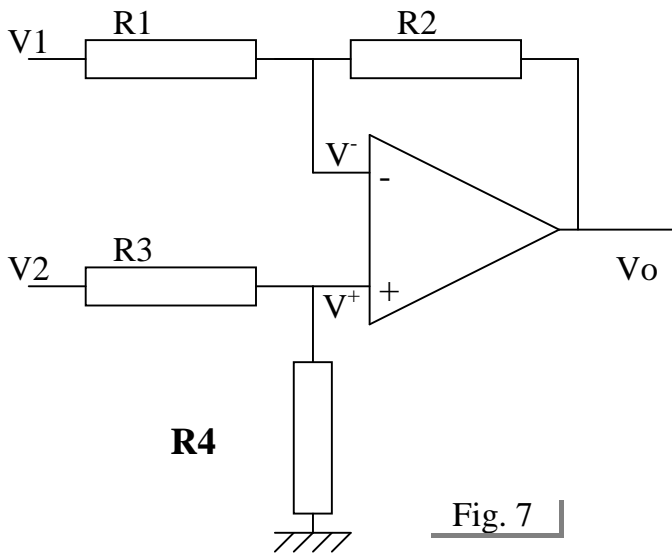
Si osserva che il dimensionamento del circuito è indipendente del valore assunto dalle resistenze R. Caso particolare è quello in cui il rapporto tra le resistenze Rf/R1 è uguale al numero dei segnali d'ingresso diminuito di uno; il coefficiente di proporzionalità diventa unitario.



● **Amplificatore differenziale (Fig.7)**

Il segnale in uscita è proporzionale alla differenza dei segnali applicati all'ingresso

Si possono presentare tre casi.



1

$$\frac{R2 \times R4}{R1 \times R3}$$

$$\downarrow$$

$$Vo \times \frac{R2}{R1} \left(\frac{V2}{V1} \right)$$

2

$$R1 \times R2 \times R3 \times R4$$

$$\downarrow$$

$$Vo \times \left(\frac{V2}{V1} \right)$$

3

$$\frac{R1 \mid R2 \mid R3 \mid R4}{R1 \mid R2 \mid R3 \mid R4}$$

$$\downarrow$$

$$Vo \times \left(\frac{R2}{R1} \frac{R4}{R3} \frac{V2}{V1} \right)$$

● **Convertitore Tensione/Corrente** (Fig.8)

L'intensità della corrente che circola nel carico, proporzionale alla tensione applicata al morsetto invertente, non dipende dalla natura del carico stesso.

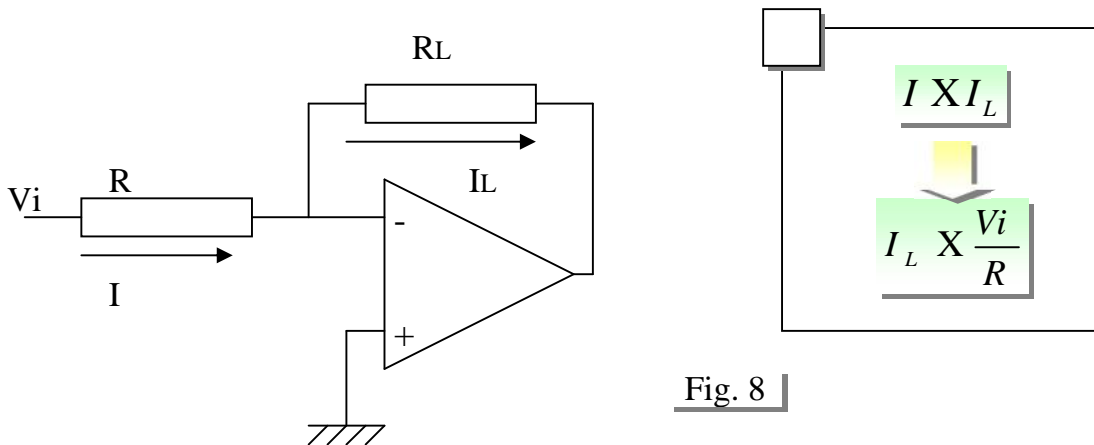


Fig. 8

● **Convertitore Corrente/Tensione** (Fig. 9)

La tensione in uscita è proporzionale all'intensità della corrente inviata al morsetto invertente.

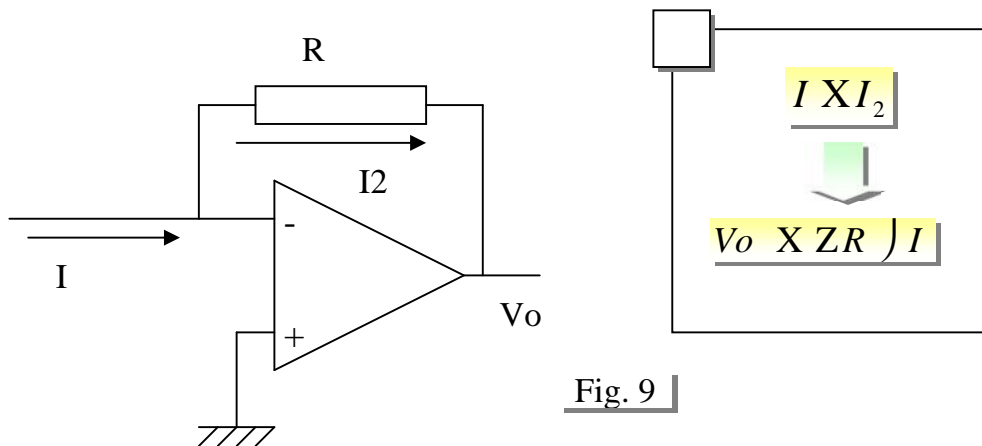


Fig. 9

● Amplificatore per strumentazione

Un amplificatore da strumentazione (in inglese: *Instrumentation Amplifier*) è un amplificatore operazionale particolarmente adatto per amplificare i segnali provenienti dai trasduttori nel campo delle misure elettroniche e nelle strumentazioni professionali (naturalmente le sue prestazioni sono legate all'uso di componenti di elevata qualità: i singoli operazionali che lo compongono devono avere ottime caratteristiche e i resistori devono essere molto precisi).

La sua struttura può pensarsi derivata dall'amplificatore differenziale: rispetto a questo presenta due operazionali in più che migliorano (aumentandola) l'impedenza di ingresso e permettono di variare l'amplificazione del segnale differenziale d'ingresso $V_{in}=V_2-V_1$ variando un solo componente R_G (R_{Gain}).

Normalmente viene fornito come un unico chip con due pin a cui va connesso il resistore R_G . In Fig. 1 è riportata la struttura interna.

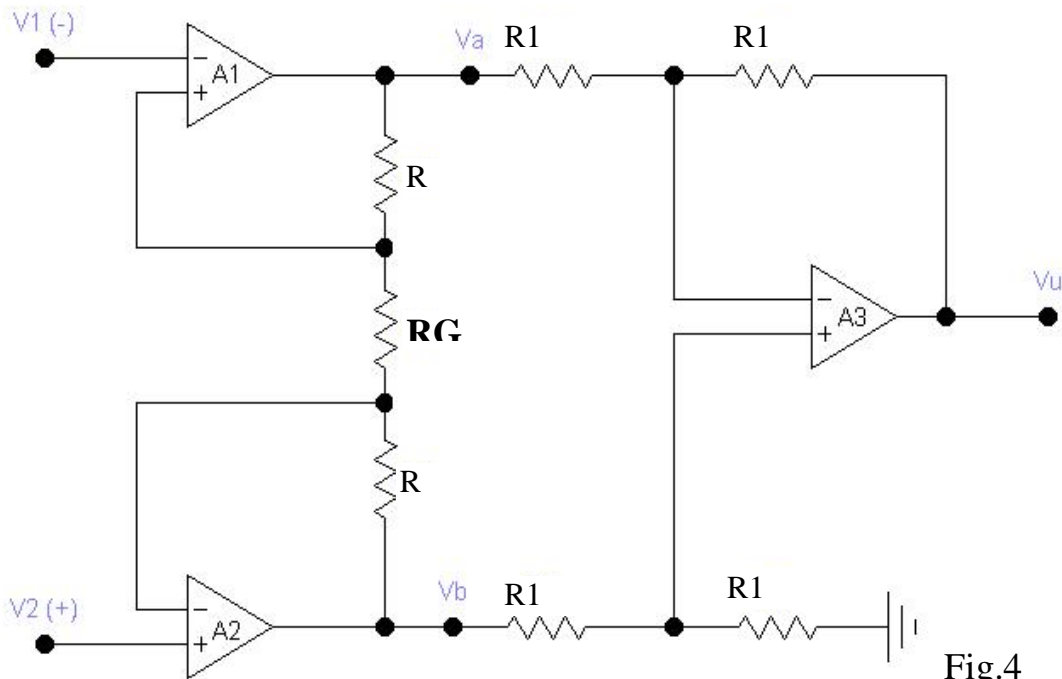
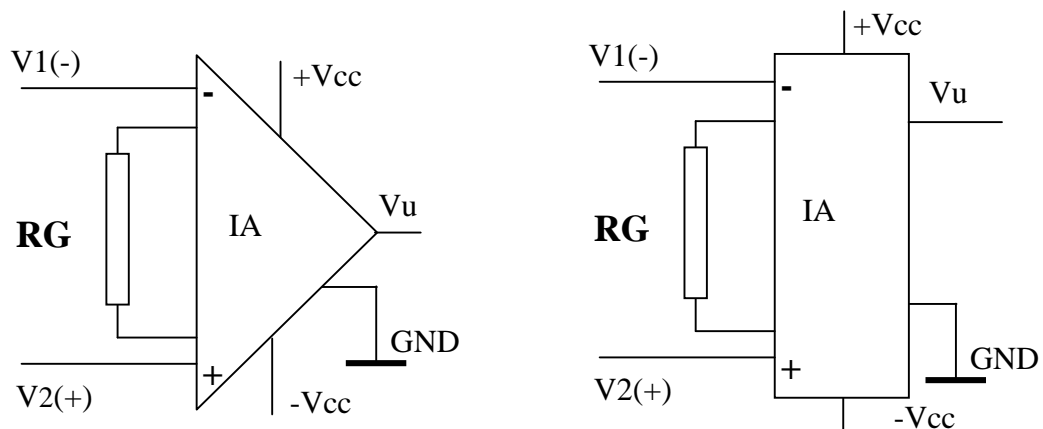


Fig.4

Su strumentazione di classe elevata, quando le specifiche dei componenti in commercio sono insufficienti per le prestazioni che il costruttore vuole ottenere dallo strumento, il costruttore stesso progetta il circuito, e ne affida la realizzazione a case specializzate, questo tipo di chip prende il nome di custom e pertanto non sarà in commercio. La relazione tra tensione di uscita e tensione differenziale di ingresso è data da:

$$V_u = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \frac{V_2 - V_1}{Z}$$

SIMBOLO



Si dimostra che:

$$V_u = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \frac{V_2 - V_1}{Z}$$

Un amplificatore per strumentazione in genere, è caratterizzato dai seguenti dati:

$$R = 25K\Omega; R1 = 10K\Omega$$

Dalla formula di V_u si ricava l'espressione di $A_v \times \frac{V_u}{\sqrt{2} Z_{I1}} \times \Gamma \frac{2R}{R_G}$, relazione che permette di determinare l'amplificazione se è nota R_G ; oppure di scegliere R_G , per avere una determinata amplificazione

$$R_G \times \frac{2R}{A_v Z_{I1}}$$

Gli amplificatori per strumentazione detti anche instrumentation amplifier o IA, sono amplificatori con ingresso differenziale caratterizzati da un amplificatore lineare, con elevata reiezione del rumore di modo comune (alto CMRR).

Sono particolarmente utili quando, si devono amplificare piccoli segnali in ambiente relativamente rumoroso.

Gli amplificatori per strumentazione vengono utilizzati in abbinamento con le strutture a ponte.

Gli amplificatori più diffusi sono:

- 1) INA 111/114/120;
- 2) PGA 202/203;
- 3) AD 524.

) L'integrato PGA 202/203 è un amplificatore per strumentazione a guadagno programmabile (1, 10, 100, 1000). La programmazione avviene tramite un MULTIPLEXER ANALOGICO interno all'integrato.

) L'integrato INA120 è un amplificatore a guadagno programmabile (1, 10, 100, 1000), in questo caso il MULTIPLEXER è esterno.

Esempio di applicazione

Dato l'INA111 ($R = 25K\Omega$) progettare un amplificatore in grado di avere un guadagno $A_v = 101$.

DATI: $A_v = 101$; $R = 25K\Omega$

$$A_v \times \Gamma \frac{2R}{R_G} = R_G \times \frac{2R}{A_v Z_{I1}} \longrightarrow R_G \times \frac{2 * 25 * 10^3}{101 Z_{I1}} \times 500\Omega$$