

La relazione che segue è stata realizzata da uno studente che si è sempre distinto per l'impegno costante e tenace, il grande senso di responsabilità, gli interessi molteplici e l'autonomia organizzativa.

## Relazione su Amplificatori Operazionali

Un **amplificatore operazionale** è un amplificatore differenziale accoppiato in continua caratterizzato da un guadagno di tensione idealmente infinito ed una resistenza d'ingresso infinita.

Da tali ipotesi discendono due proprietà fondamentali:

- La differenza tra le tensioni applicate in ingresso è nulla.
- Le correnti di ingresso sono nulle.

Il nome è dovuto al fatto che con esso è possibile realizzare circuiti elettronici in grado di effettuare numerose operazioni matematiche: la somma, la sottrazione, la derivata, l'integrale, il calcolo di logaritmi e di antilogaritmi. Al giorno d'oggi l'amplificatore operazionale è, in genere, costituito da un circuito integrato.

### Descrizione

In generale il modello dell'amplificatore presenta due ingressi: uno definito *invertente*, indicato con il simbolo "-", l'altro definito *non invertente*, indicato con il simbolo "+", ed una uscita (figura A in alto a destra). L'impedenza di ingresso presenta un valore molto elevato, idealmente infinito, mentre l'impedenza di uscita ha valore basso, idealmente nullo. Il fatto che la resistenza d'ingresso sia infinita implica che l'amplificatore non assorbe corrente da nessuno dei due terminali d'ingresso. Inoltre, il fatto che la resistenza d'ingresso sia infinita e quella di uscita nulla, fa sì che un amplificatore operazionale ideale sia un perfetto amplificatore di tensione. Nella pratica questi valori, così come la banda passante e la frequenza massima di lavoro, sono determinati dalle caratteristiche costruttive dei singoli modelli di circuiti integrati. La maggior parte degli amplificatori operazionali è progettata per lavorare con una tensione di alimentazione duale, cioè con un valore positivo ed uno negativo, simmetrici rispetto ad una massa, che può essere reale oppure virtuale. Le due tensioni non necessariamente debbono avere lo stesso valore: ad esempio la *tensione positiva* potrebbe essere di 15 volt, quella *negativa* di 7 volt, la versatilità di questi dispositivi è tale, che vi possono essere applicazioni in cui la tensione negativa può essere posta a zero, ovvero, il componente è alimentato da una tensione singola rispetto alla massa. Nell'alimentazione duale, il livello del segnale in uscita, può spaziare tra i due valori di tensione d'alimentazione, a meno di un piccolo margine, che può variare a seconda del tipo di operazionale-adottato.

Quando gli ingressi sono posti allo stesso valore di tensione (cioè cortocircuitati), l'uscita dovrebbe idealmente assumere il potenziale della massa. In realtà il valore diverge verso un estremo e la differenza di potenziale che deve essere applicata tra gli ingressi per azzerare l'uscita, è detta tensione di offset. In alcuni *operazionali* questa può essere corretta, agendo su una coppia di pin supplementari. Esistono operazionali progettati per lavorare con una tensione singola rispetto alla massa, uno fra i più diffusi è l'LM358.

Dal punto di vista costruttivo, l'amplificatore operazionale può essere realizzato con transistor a giunzione bipolare (BJT) oppure mosfet, che lavorano a frequenze maggiori, con una impedenza di ingresso più elevata e un minore consumo energetico. Il package può essere plastico, ceramico o metallico e può contenere fino a 4 dispositivi identici.

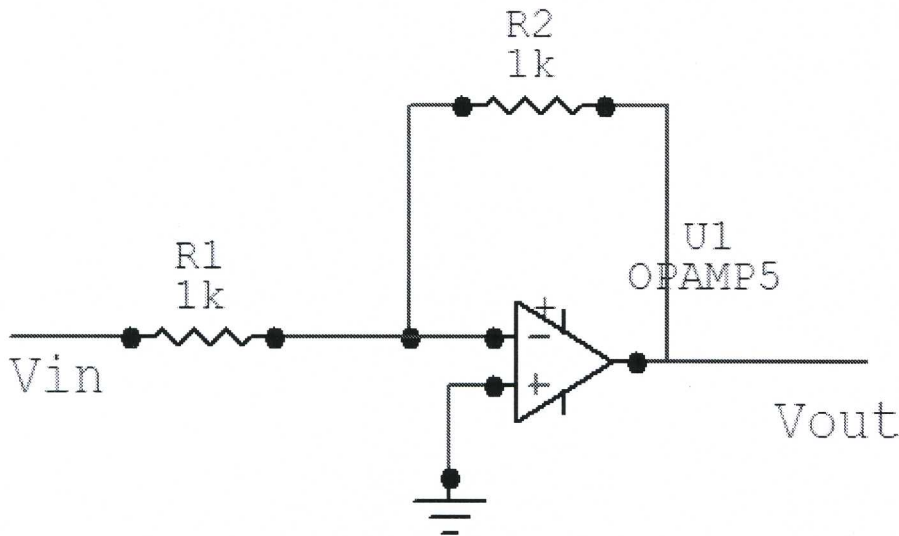
## *Amplificatore operazionale ideale*

Consideriamo l'amplificatore operazionale ideale, con le seguenti caratteristiche:

$$\begin{aligned}R_{in} &= +\infty \\R_{out} &= 0 \\A_V &= +\infty \\B &= +\infty \\V_1 &= V_2\end{aligned}$$

Il significato è ovvio, esso ha impedenza di ingresso infinita e di uscita nulla. L'amplificazione di tensione e la larghezza di banda infinita ed esiste bilanciamento perfetto tra i morsetti d'ingresso  $V_1 = V_2$  dove  $V_1$  è la tensione dell'ingresso invertente (con segno -) e  $V_2$  è la tensione dell'ingresso non invertente (con segno +). Tutte queste caratteristiche sono ideali, come si vedrà nel modello reale. Il fatto che esista un bilanciamento perfetto tra i morsetti invertente e non invertente significa che essi sono allo stesso potenziale e che in pratica l'amplificatore non assorbe corrente, cioè  $I_1 = I_2 = 0$ . A causa di queste proprietà, un amplificatore operazionale è spesso rappresentato tramite un nullore. In alcune applicazioni questa proprietà di cortocircuito virtuale viene a mancare, poiché il circuito è progettato per sfruttare le caratteristiche non lineari della transcaratteristica. Ad esempio questo avviene nei circuiti comparatori:

## Amplificatore invertente



Un amplificatore invertente con operazionale si ottiene applicando la tensione di ingresso  $V_s$  sul morsetto contraddistinto dal segno "-", mentre l'altro morsetto è a massa. Nell'amplificatore invertente il segnale periodico uscente viene sfasato di  $180^\circ$  rispetto all'ingresso (per questo il circuito è chiamato amplificatore "invertente"), ovvero il guadagno è negativo. Calcoliamo le correnti ai nodi del circuito, tenendo presente che l'impedenza di ingresso dell'operazionale è infinita e quindi la corrente da esso assorbita in ingresso è nulla:

$$I + I' = 0$$

dove  $I, I'$  sono le correnti che attraversano le due impedenze.

Le tensioni  $V_+$  e  $V_-$  applicate sui due ingressi dell'operazionale sono uguali in quanto

$$V_- = -\frac{V_{out}}{A}$$

ma tendendo  $A$  all'infinito,  $V_-$  tende a zero per qualsiasi valore di  $V_{out}$ . Si può descrivere questo comportamento dicendo che all'ingresso dell'amplificatore esiste una massa virtuale o corto circuito virtuale, nel senso che la corrente entrante nel morsetto invertente è nulla.

A questo punto possiamo semplicemente calcolare:

$$I = \frac{V_s}{Z} = -I' = -\frac{V_{out}}{Z'}$$

e quindi:

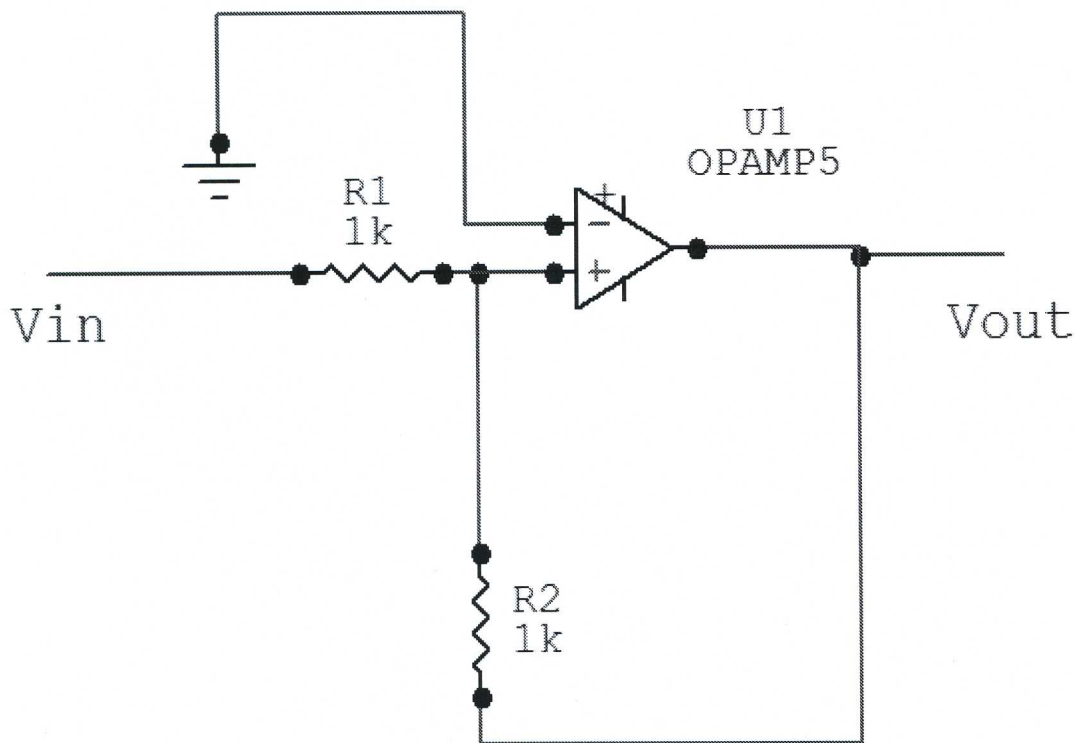
$$V_{out} = -V_s \frac{Z'}{Z}$$

da cui si conclude che il guadagno in tensione è legato al rapporto tra le due impedenze:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_s} = -\frac{Z'}{Z}$$

Da notare che l'uso dei simboli maiuscoli implica che vale anche nel caso di grandezze alternate oltre che continue

### Amplificatore non invertente



Un amplificatore non invertente con operazionali si ottiene applicando la tensione d'ingresso  $V_s$  sul morsetto contraddistinto dal segno + (*non* invertente) e l'altro morsetto a massa. Nell'amplificatore di tensione non invertente la fase del segnale uscente corrisponde a quella del segnale entrante. Il guadagno, o amplificazione, dell'amplificatore è il rapporto tra la tensione di uscita e la tensione di ingresso. Se applichiamo la legge di Kirchhoff delle correnti al nodo del circuito equivalente e usando la legge di ohm:

$$\frac{V_1}{Z} + \frac{V_1 - V_{out}}{Z'} = 0$$

ma in questa configurazione si vede bene che  $V_1 = V_2 = V_s$  e quindi:

$$\frac{V_s}{Z} + \frac{V_s - V_{out}}{Z'} = 0$$

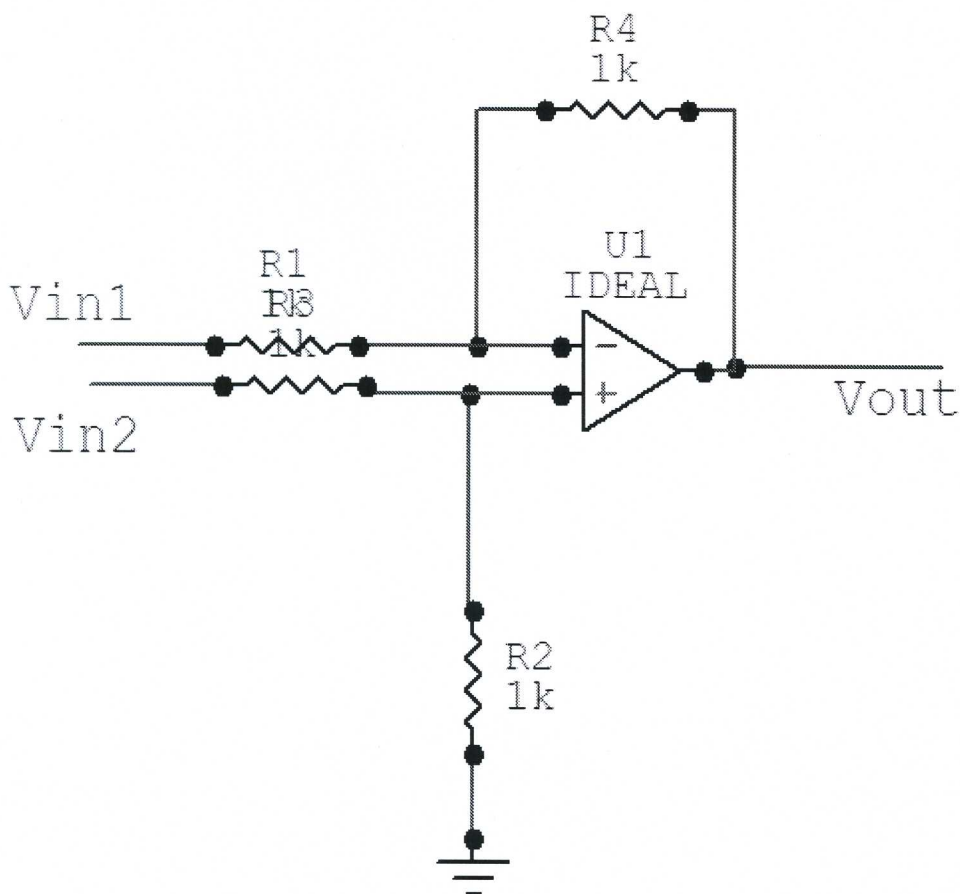
dalla quale:

$$V_{out} = \frac{Z + Z'}{Z} V_s$$

quindi:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_s} = 1 + \frac{Z'}{Z}$$

### Amplificatore differenziale ideale



L'amplificatore differenziale è rappresentato in figura e si chiama così perché in questo caso i due morsetti di ingresso sono entrambi collegati ad un generatore e quindi tra essi si stabilisce una tensione differenziale  $V_d = (V_1 - V_2)$ . Esso è la combinazione di un amplificatore non invertente e uno invertente, infatti se  $V_1 = 0$  il circuito si comporta come un amplificatore invertente, se  $V_2 = 0$  allora si comporta come un amplificatore non invertente.

Ponendo

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

allora l'amplificazione differenziale ha una tensione di uscita:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

Solitamente si pone  $R_4 = R_2$  e  $R_3 = R_1$ . Nell'amplificatore differenziale si definisce il CMRR cioè il *rapporto di reiezione del modo comune*  $\rho$ :

$$\rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

dove  $A_c = A_1 + A_2$  è la somma delle amplificazioni dei due morsetti infatti deriva dal segnale  $V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$ ,  $A_d = \frac{1}{2}(A_1 - A_2)$  è l'amplificazione di tensione per il segnale differenza  $v_d$ .

Quando l'amplificazione dello stadio è notevole è opportuno scegliere resistori di precisione al fine di minimizzare il CMRR, allo scopo può essere inserito un trimmer in serie a  $R_4$  (modificandone opportunamente il valore), quindi applicare in ingresso un segnale modo comune, ossia a entrambi gli ingressi, e regolare il trimmer per il minimo della tensione in uscita. Applicazioni dell'amplificatore differenziale sono: stadio d'ingresso per linee bilanciate, blocco di confronto in sistemi retroazionati o comunque tutte quelle applicazioni in cui sia necessario rilevare la differenza tra due grandezze.