

Supervisore Prof. **Giancarlo Fionda**
 Insegnante di Elettronica

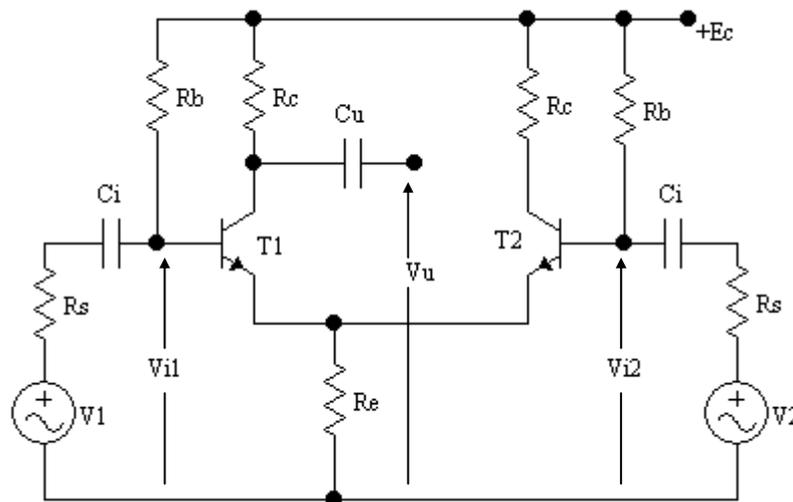
AMPLIFICATORI DIFFERENZIALI

Generalità

Gli amplificatori differenziali sono amplificatori composti da due stadi in collegamento simmetrico rispetto all'alimentazione, caratterizzati da due ingressi e da una uscita. Hanno il vantaggio di formare un circuito insensibile alla deriva termica e una amplificazione pressoché esente da disturbi.

Amplificatore differenziale a BJT

Il circuito tipico di un amplificatore differenziale è formato da due stadi simmetrici, accoppiati d'emettitore, con ingressi V_1 e V_2 sulle due basi e uscita V_u su uno dei due collettori.



Funzionamento statico

In sede di progetto, assegnato il punto di lavoro e fissato il valore di V_{RE} , si potrà calcolare :

- la resistenza di carico di collettore $R_C = \frac{(E_C - V_{CE} - V_{RE})}{I_C}$
- la resistenza di emettitore $R_E = \frac{V_{RE}}{2I_C}$
- la resistenza di polarizzazione $R_B = \frac{E_C - V_{BE} - V_{RE}}{I_B}$

Funzionamento dinamico

Supponendo $h_{re} = 0$, $h_{oe} = 0$ e R_B molto maggiore di R_S ed R_i , quindi trascurabile, e tenendo presente il principio di sovrapposizione degli effetti, per ottenere l'amplificazione complessiva si può procedere tenendo attivo un segnale di ingresso alla volta, dopo aver cortocircuitato l'altro.

a) ingresso in T_1 , $V_2 = 0$

Il circuito è del tipo a retroazione serie-serie attuata tramite la resistenza dinamica R_E tra emettitore e massa.

La resistenza d'ingresso vale $R_i = 2h_{ie} + R_S$.

La tensione d'uscita, riferita alla tensione del generatore V_1 vale:

$$V_{u1} = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2(h_{ie} + R_S)} V_1 \Rightarrow A_1 = \frac{V_{u1}}{V_1} = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2(h_{ie} + R_S)}$$

La tensione d'uscita in collettore di T_1 è di fase opposta al segnale in base di T_1 , per cui l'ingresso 1 si dice invertente.

b) Ingresso in T_2 , $V_1 = 0$

Il circuito in esame è del tutto simile al precedente.

la resistenza di ingresso $R_i = 2h_{ie} + R_S$.

la tensione in collettore di T_1 $V_{u2} = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2(h_{ie} + R_S)} V_2 \Rightarrow A_2 = \frac{V_{u2}}{V_2} = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2(h_{ie} + R_S)}$

La tensione d'uscita in collettore di T_1 è in fase rispetto al segnale in base di T_2 , per cui l'ingresso 2 si dice invertente.

Tenuto conto delle fasi delle due tensioni V_{u1} e V_{u2} , la tensione complessiva risulterà la differenza fra le due tensioni parziali.

$$V_u = V_{u1} - V_{u2}$$

Cioè $V_u = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2(h_{ie} + R_S)} (V_1 - V_2)$.

Si definisce amplificazione A_d di un amplificatore differenziale il rapporto $A_d = \frac{V_u}{V_1 - V_2}$ e risulta

$$A_d = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2(h_{ie} + R_S)}$$

Indicando con $A_1 = \frac{V_{u1}}{V_1}$ e $A_2 = \frac{V_{u2}}{V_2}$ le amplificazioni relative ai due ingressi, la tensione d'uscita risulta: $V_u = V_{u1} - V_{u2} = A_1 \cdot V_1 - A_2 \cdot V_2$.

$$\text{Se } A_1 = A_2 = A_d \Rightarrow V_u = A_d(V_1 - V_2) \Rightarrow A_d = \frac{V_u}{V_1 - V_2}$$

Rapporto di reiezione

L'amplificazione A_d coincide con quella relativa ai due ingressi separati. La coincidenza delle tre amplificazioni tuttavia è soltanto teorica. In pratica, per l'inevitabile diversità degli elementi componenti i due circuiti, si verificano differenze tra le tre amplificazioni.

Posta A_1 l'amplificazione derivante dall'ingresso 1, A_2 l'amplificazione derivante dall'ingresso 2, la tensione di uscita complessiva vale in realtà $V_u = A_1 \cdot V_1 - A_2 \cdot V_2$

Amnesso $A_1 \neq A_2$, facciamo riferimento ad un'amplificazione uguale per entrambi, di valore medio $\frac{A_1 + A_2}{2}$. Questa amplificazione, valendo per entrambi gli ingressi, coincide con A_d :

$$A_d = \frac{A_1 + A_2}{2} ; \quad \text{scostamento massimo } A_1 - A_2$$

Massimizzando l'amplificazione dell'ingresso 1

$$\frac{A_1 + A_2}{2} + \frac{A_1 - A_2}{2}$$

e minimizzando quella dell'ingresso 2

$$\frac{A_1 + A_2}{2} - \frac{A_1 - A_2}{2},$$

il segnale di uscita si potrà esprimere nel seguente modo

$$V_u = \left(\frac{A_1 + A_2}{2} + \frac{A_1 - A_2}{2} \right) V_1 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} - \frac{A_1 - A_2}{2} \right) V_2 = \frac{A_1 + A_2}{2} (V_1 - V_2) + \frac{A_1 - A_2}{2} (V_1 + V_2)$$

e ponendo $A_C = A_1 - A_2$, risulta:
$$V_u = A_d (V_1 - V_2) + A_C \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Ciò sta ad indicare che, in caso di divergenza fra le due amplificazioni, l'amplificatore fornirà in uscita non soltanto un segnale proporzionale alla differenza fra i due ingressi, ma anche una componente di errore proporzionale alla loro semisomma.

L'amplificazione A_C viene indicata come amplificazione in modo comune.

È uso definire la bontà di un amplificatore differenziale dal valore del rapporto fra l'amplificazione differenziale A_d e l'amplificazione di modo comune A_C , indicato come

Rapporto di Reiezione di Modo Comune CMNR, definito come:
$$\text{CMNR} = \frac{A_d}{A_C}$$

Un amplificatore differenziale è tanto migliore quanto minore è il valore di A_C , cioè quanto maggiore è il rapporto di reiezione.

Amplificatori differenziali integrati

Gli amplificatori differenziali per un corretto funzionamento, debbono essere realizzati mediante coppie di transistori identici; a questo scopo sono in commercio dei complessi costituiti da un unico supporto recanti i due transistori, in modo da garantire qualità tecniche costruttive ed uguale comportamento in funzione della temperatura. Tuttavia gli amplificatori differenziali di uso più comune si trovano realizzati completamente in circuito integrato monolitico.

I dati più importanti forniti dai manuali possono essere divisi in due gruppi. Nel primo vengono riportati i valori massimi assoluti da non superare, nel secondo le caratteristiche elettriche a temperatura ambiente di 25°C. si riportano i valori relativi all'integrato CA 3000.

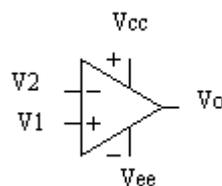
Valori massimi assoluti CA 3000

– Alimentazione positiva	$+V_{CC}$	+10V
– Alimentazione negativa	$-V_{EE}$	-10V
– Segnale in ingresso	V_{in}	$\pm 2V$
– Temperatura di lavoro	T	-55 ÷ 125°C
– Potenza dissipata	PD	450mW

Caratteristiche elettriche CA 3000

- Condizioni di misura: $V_{CC} = 6V$; $V_{EE} = -6V$; $T_A = 25^\circ C$
- **INPUT OFFSET VOLTAGE**: Tensione di bilanciamento d'ingresso V_{io} ; è la differenza di potenziale che si deve applicare ai terminali d'ingresso onde avere tensione d'uscita uguale a zero: 1,4mV.
- **INPUT OFFSET CURRENT**: corrente di bilanciamento d'ingresso, I_{io} , è la differenza tra le correnti che si hanno all'ingresso allorché l'uscita è zero: 1,2 μ A.
- **COMMON MODE REJECTION**: rapporto di reiezione di modo comune CMRR, rapporto tra il guadagno differenziale A_d e il guadagno comune A_C : 98dB.
- **INPUT BIAS CURRENT**: corrente di polarizzazione d'ingresso I_{in} , valore medio delle correnti ai due ingressi: 23 μ A.
- **INPUT COMMON MODE RANGE**: campo delle tensioni d'ingresso di modo comune, gamma delle possibili tensioni d'ingresso, al di fuori della quale l'amplificatore opera in modo anormale.
- **DIFFERENTIAL VOLTAGE GAIN**: guadagno di tensione differenziale, è il rapporto tra la variazione di tensione d'uscita (rilevata tra i morsetti d'uscita) e la variazione della tensione applicata a un terminale d'ingresso, cioè con l'altro a massa.
- **BANDWIDTH AT 3dB POINT**: larghezza di banda a 3dB, la frequenza in corrispondenza della quale il guadagno di tensione si riduce di 3dB rispetto a quello che si ha ad una frequenza di riferimento.
- **MAXIMUM OUTPUT SWING**: massima elongazione della tensione d'uscita, è la massima variazione picco-picco della tensione di uscita (rispetto a massa) che può essere ottenuta senza che si verifichi una deformazione (tosatura) del segnale di uscita.

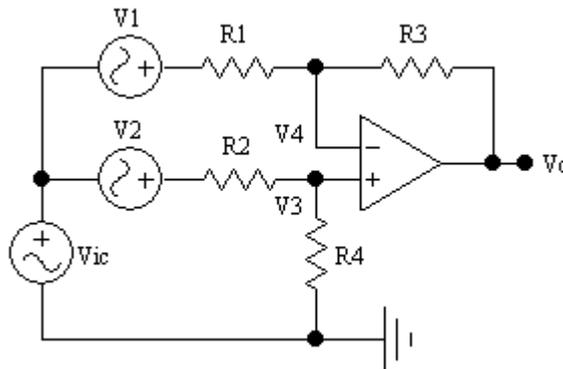
Simbolo circuitale



Amplificatore differenziale con amplificatori operazionali

L'amplificatore differenziale è un circuito usato in molte applicazioni, specie quando si deve convertire l'uscita a basso livello di un qualunque trasduttore in una uscita ad alto livello. Spesso il trasduttore ha una alta tensione di modo comune (cioè entrambi i terminali del trasduttore sono a tensione diversa da quella di massa).

Questa tensione di modo comune deve essere eliminata, e deve essere amplificato solo il segnale differenziale. Un circuito semplice è quello di figura.



V_{ic} rappresenta la tensione equivalente di modo comune.

Se l'amplificatore operazionale è ideale, valgono le seguenti relazioni:

$$V_3 = (V_{ic} + V_2) \frac{R_4}{R_2 + R_4} \quad ; \quad \frac{V_{ic} + V_1 - V_4}{R_1} = \frac{V_4 - V_o}{R_3}$$

Combinando queste due equazioni e ricordando che $V_3 = V_4$ (equipotenzialità degli ingressi, amplificatore operazionale ideale), si esplicita la tensione d'uscita v_o :

$$V_o = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_4)} V_{ic} - \frac{R_3}{R_1} V_1 + \frac{R_4}{R_2} \cdot \frac{1 + R_1 // R_3}{1 + R_2 // R_4} V_2$$

Se si pone $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$, si ha:
$$V_o = \frac{R_3}{R_1} (V_2 - V_1)$$

I rapporti $\frac{R_3}{R_1}$ e $\frac{R_4}{R_2}$ devono essere realizzati con la massima precisione per assicurare un basso guadagno di modo comune. Il valore di tali rapporti fissa il guadagno dell'amplificatore differenziale:

$$A_d = \frac{V_o}{V_2 - V_1} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$$

Il guadagno di modo comune dell'amplificatore differenziale è definito come

$$A_c = \frac{2V_o}{V_1 + V_2} = \frac{V_o}{\text{media delle tensioni d'ingresso}} = \frac{V_o}{V_{ic}}$$

Se l'amplificatore è perfettamente bilanciato, cioè $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$, e l'amplificatore operazionale non ha guadagno di modo comune, il circuito avrà $A_C = 0$. se queste due condizioni non sono rispettate, la tensione d'uscita sarà uguale a:

$$V_o = A_d(V_2 - V_1) + A_C \frac{V_1 + V_2}{2}.$$

In genere, nelle specifiche di un amplificatore operazionale non viene indicato il guadagno di modo comune; viene invece fornito il rapporto di reiezione di modo comune (CMRR), così definito:

$$CMRR = \frac{\text{guadagno differenziale}}{\text{guadagno di modo comune}} = \frac{A_d}{A_C}$$

Se il circuito è perfettamente bilanciato, ma $CMRR \neq \infty$, si ha che il guadagno di modo comune dell'amplificatore differenziale risulta uguale a

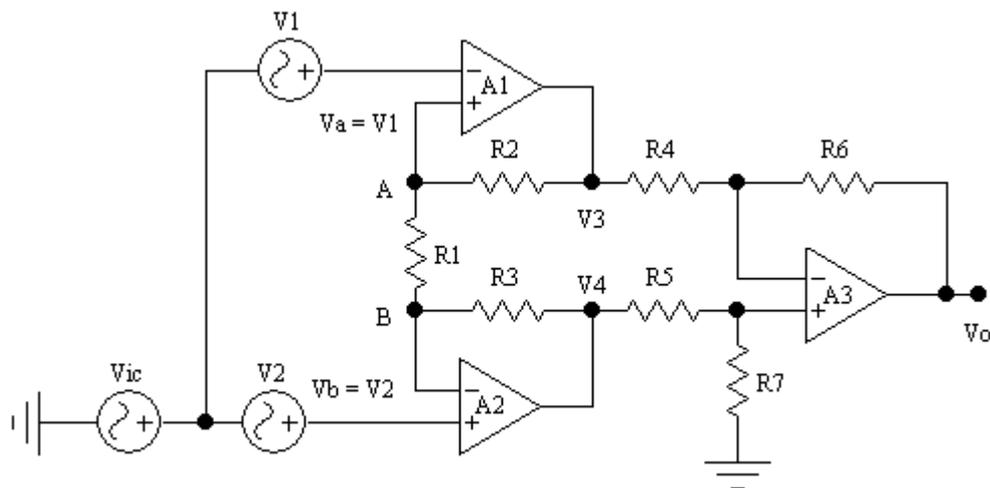
$$A_{Co} = \frac{R_3^2}{R_1(R_1 + R_3) \cdot CMRR};$$

mentre se $CMRR = \infty$, ma il circuito non è perfettamente bilanciato, cioè $\frac{R_3}{R_1} \neq \frac{R_4}{R_2}$, si ha

$$A_{Cc} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1(R_2 + R_4)}$$

Nel circuito i due guadagni di modo comune si sommano: $A_C = A_{Co} + A_{Cc}$.

Questa configurazione circuitale presenta diverse limitazioni. La sua resistenza d'ingresso risulta spesso troppo bassa per molte applicazioni. Se è richiesto un alto guadagno differenziale occorre impiegare una resistenza di retroazione di valore molto elevato che, a causa della corrente d'ingresso di offset, può provocare degli inconvenienti. I problemi sono ancora maggiori se sono richiesti contemporaneamente una alta impedenza d'ingresso ed un elevato guadagno differenziale. L'amplificatore differenziale riportato nella successiva figura, realizzato con l'impiego di 3 amplificatori operazionali, consente di superare queste limitazioni.



Essenzialmente tale circuito deriva dal precedente, con due amplificatori non invertenti inseriti ai due ingressi.

Considerando tutti gli amplificatori operazionali ideali, per l'equipotenzialità degli ingressi si ha:

$$V_A = V_{-1} = V_{+1} = V_1 \quad ; \quad V_B = V_{-2} = V_{+2} = V_2$$

Le tensioni d'uscita dei due stadi d'ingresso sono:

$$V_3 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_1 - \frac{R_2}{R_1}V_2 + V_{ic} \quad ; \quad V_4 = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right)V_2 - \frac{R_3}{R_1}V_1 + V_{ic}$$

dove, V_{ic} è la tensione d'ingresso di modo comune $V_{ic} = \frac{V_1 + V_2}{2}$.

Se lo stadio d'uscita è perfettamente bilanciato, cioè se $\frac{R_6}{R_4} = \frac{R_7}{R_5}$, si ha:

$$V_o = \frac{R_6}{R_5}(V_4 - V_3) = \frac{R_6(R_1 + R_2 + R_3)}{R_1 R_4}(V_2 - V_1).$$

Ponendo $R_2 = R_3$ e $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$, si ha: $A_o = \frac{V_o}{V_2 - V_1} = 1 + \frac{2R_2}{R_1}$

Il guadagno di modo comune dell'amplificatore dipende dal CMRR di A_3 e dalla condizione $\frac{R_6}{R_4} = \frac{R_7}{R_5}$. Deviazioni nei valori di R_1, R_2, R_3 provocano piccole variazioni in A_d , ma non in A_C .

L'impedenza d'ingresso risulta in genere maggiore di $10^{10}\Omega$.

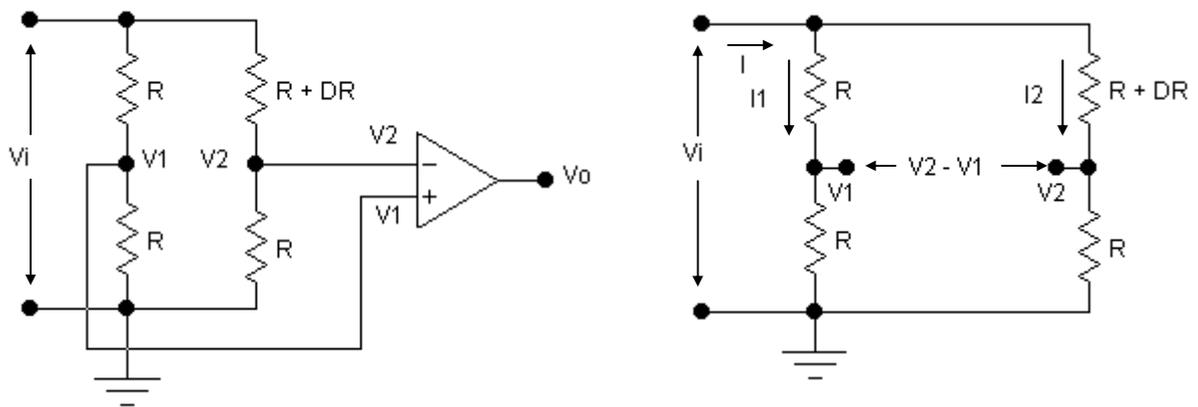
Anche se la realizzazione a 3 amplificatori operazionali può risultare poco costosa data la presenza in commercio di circuiti integrati che contengono 2 e 4 amplificatori operazionali, l'inevitabile differenza nelle resistenze esterne comporta degli errori. Si trovano in commercio amplificatori per strumentazione a guadagno variabile tramite un'unica resistenza esterna: Analog device AD521; Datal Intersil AM7605 che presenta inoltre la compensazione automatica degli errori di tensione dovuti alla temperatura, alle variazioni della tensione d'alimentazione e alla deriva temporale.

Applicazione dell'amplificatore differenziale

Una applicazione dell'amplificatore differenziale con amplificatore operazionale è rappresentata in figura, dove l'amplificatore operazionale amplifica l'uscita di un ponte resistivo che può essere sbilanciato da una variazione ΔR di resistenza in uno qualsiasi dei rami.

Dal circuito equivalente (seconda figura) risulta:

$$V_1 = \frac{V_i}{2} \quad ; \quad I = I_1 + I_2 = \frac{V_i}{2R} + \frac{V_i}{2R + \Delta R} \quad ; \quad V_2 = \frac{V_i \cdot R}{2R + \Delta R}$$



Perciò si ottiene :

$$\begin{aligned}
 V_o &= A_o (V_2 - V_1) = A_o \left(\frac{V_i \cdot R}{2R + \Delta R} - \frac{V_i}{2} \right) = A_o \left(\frac{V_i \cdot 2R - V_i \cdot 2R - V_i \cdot \Delta R}{2(2R + \Delta R)} \right) = \\
 &= A_o \frac{-V_i \cdot \Delta R}{4 \left(R + \frac{\Delta R}{2} \right)} = -\frac{A_o V_i}{4} \cdot \frac{\frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}}
 \end{aligned}$$

Dove $\frac{\Delta R}{R}$ è la variazione relativa della resistenza R . Questo circuito è particolarmente utile in misure e regolazioni con trasduttori per il rilievo di variazioni anche molto piccole di grandezze fisiche.