

Amplificatore Operazionale



Figura 1

SIMBOLO

Il simbolo dell'Amplificatore Operazionale è rappresentato in fig.1. In esso possono essere indicati i pin di alimentazione (fig.1a) oppure possono essere omessi (fig.1b).

CARATTERISTICHE ESTERNE

Alimentazione

L'Amplificatore Operazionale (abbrev. AO oppure OA) ha un'alimentazione duale. Cioè ha due pin di alimentazione aventi tensione diversa tra loro ed in genere diversa anche da massa (solo in alcuni AO è possibile porre $-V_{EE} = 0V$).

La corrente richiesta all'alimentazione (la corrente cioè che entra dal pin V_{DD} ed esce dal pin $-V_{EE}$) è un altro parametro molto importante essa varia, a seconda dell'AO utilizzato, da $10\mu A$ a $10mA$ circa. Essa è in genere indicata nei datasheets come I_S o I_{Supply} , dove Supply è il termine inglese per Alimentazione.

Ingressi

L'AO ha due ingressi indicati con i simboli '+' e '-' e chiamati rispettivamente ingresso non invertente (+) e ingresso invertente (-).

Uscite

L'AO ha un'uscita chiamata Out.

CARATTERISTICHE INTERNE

Modello Equivalente

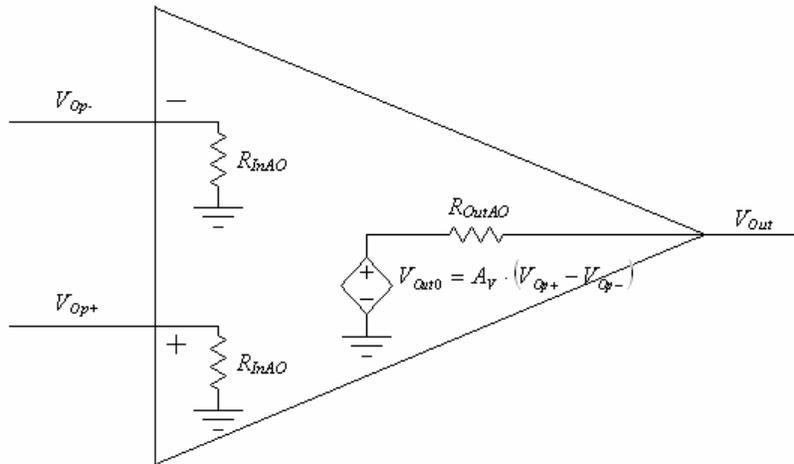


Figura 2

	R_{InAO}	R_{OutAO}	A_V
Ideale	$+\infty \Omega$	0Ω	$+\infty \Omega$
$\mu A741$	$> 300k\Omega$	75Ω	$> 15\ 000$

Tabella 1

Resistenza d'Ingresso

Si indica con R_{In} ed è la resistenza equivalente di Thevenin vista da uno degli ingressi e massa.

Resistenza d'Uscita

Si indica con R_{Out} ed è la resistenza equivalente di Thevenin vista tra l'uscita e massa.

Relazione I/O

La relazione I/O di questo dispositivo oltre a spiegarne il comportamento, ne chiarisce anche il nome, infatti la tensione d'uscita è pari alla differenza delle due tensioni d'ingresso (per questo si chiama 'Operazionale') moltiplicata per una costante, il guadagno di tensione (da qui 'Amplificatore'):

$$V_{Out0} = A_V \cdot (V_+ - V_-) \quad (1)$$

E' importante tener presente che la tensione d'uscita V_{Out0} è prodotta mediante le due tensioni d'alimentazione, perciò non può mai essere inferiore a $-V_{EE}$, ne superiore a V_{DD} .

La tabella seguente mostra un esempio del comportamento dell'AO nel caso di un $\mu A741$ ($V_{DD} = 6V$, $-V_{EE} = -6V$).

$V_{Op+} - V_{Op-}$	V_{Out} (Ideale)	V_{Out} (Reale)
-1V	-15 000 V	-6V
-1mV	-15 V	-6V
1mV	15 V	6V
1V	15 000 V	6V

Tabella 2

Stabilità e Circuiti Retroazionati

Stabilità

Un dispositivo si dice instabile se la sua uscita tende a portarsi a $\pm\infty$ (questo idealmente, in realtà si porterà a $+V_{DD}$ o $-V_{EE}$).

Analogamente un dispositivo si dice stabile se la sua uscita assume solo valori finiti (in corrispondenza di ingressi finiti).

Retroazione Positiva

Si ha una retroazione positiva quando il ramo di reazione torna indietro collegandosi al morsetto positivo dell'AO.

I circuiti retroazionati positivamente sono tipicamente instabili.

Retroazione Negativa

Si ha una retroazione negativa quando il ramo di reazione torna indietro collegandosi al morsetto negativo dell'AO.

I circuiti retroazionati negativamente sono tipicamente stabili.

Massa Virtuale (o CortoCircuito Virtuale)

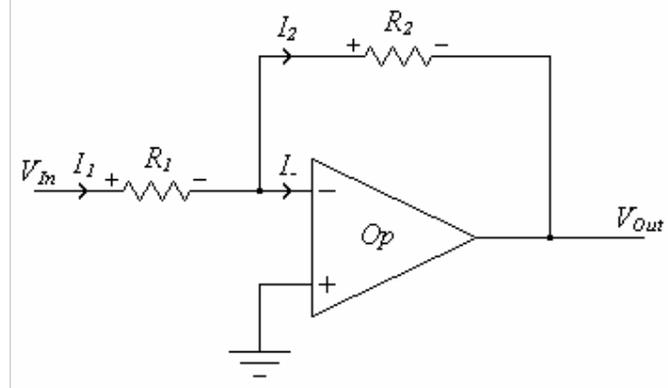


Figura 1

Si consideri ad esempio il circuito di fig.1. Esso è retroazionati negativamente e perciò stabile. Di conseguenza V_{Out} assumerà solo valori finiti (in corrispondenza di ingressi finiti). Ciò che si vuole sapere è quanto vale $(V_{Op+} - V_{Op-})$.

Si prenda in considerazione l'eq. Caratteristica dell'AO:

$$\begin{aligned}
 V_{Out} &= A_V \cdot (V_{Op+} - V_{Op-}) \Rightarrow A_V \cdot (V_{Op+} - V_{Op-}) = V_{Out} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow (V_{Op+} - V_{Op-}) = \frac{V_{Out}}{A_V} \stackrel{\text{(Idealmente)}}{=} \frac{\text{Valore Finito}}{+\infty} \stackrel{\text{(Divisione)}}{=} 0V \Rightarrow V_{Op+} = V_{Op-}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Riassumendo se l'AO ha un guadagno molto elevato ed è retroazionati negativamente, allora la differenza tra le due tensioni d'ingresso tende a 0V. Più precisamente sarà V_{Op-} che si sposterà fino ad eguagliare V_{Op+} .

Nel caso di fig.1 la massa virtuale porterà il morsetto $Op-$ a massa. In generale però si ha solo che:

$$V_{Op-} \stackrel{\text{(Massa Virtuale)}}{=} V_{Op+}
 \tag{2}$$

Circuiti con AO

Buffer di Tensione

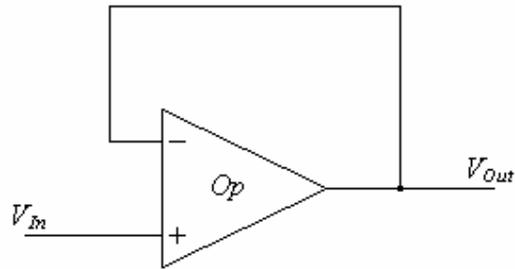


Figura 1

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-}^{(MV)} = V_{Op+}^{(Fig1)} = V_{In} \quad (1)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$V_{Out}^{(Out=Op-)} = V_{Op-}^{(1)} = V_{In} \quad (2)$$

Per la definizione di Guadagno di Tensione

$$A_V^{(GT)} = \frac{V_{Out}^{(2)}}{V_{In}} = \frac{V_{In}^{(D)}}{V_{In}} = 1 \quad (3)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

$$R_{In} = R_{InAO} \quad (4)$$

Calcolo della Resistenza d'Uscita

$$R_{Out} = \frac{R_{OutAO}^{(3)}}{|A_V|} = \frac{R_{OutAO}^{(D)}}{|1|} = R_{OutAO} \quad (5)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(D) = Divisione

Amplificatore Invertente

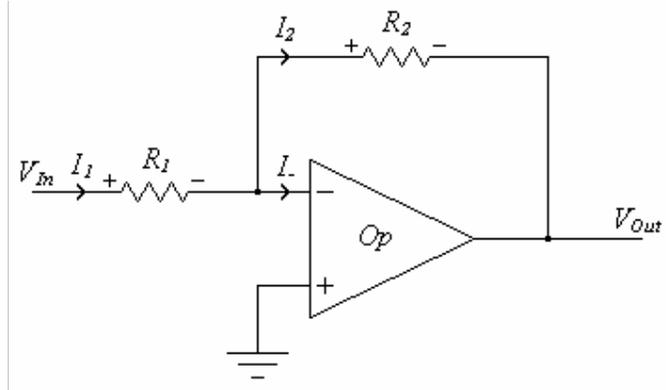


Figura 2

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-} \stackrel{(MV)}{=} V_{Op+} \stackrel{(Op+=Gnd)}{=} V_{Gnd} \stackrel{(D3)}{=} V_{GndGnd} \stackrel{(D1)}{=} V_{Gnd} - V_{Gnd} \stackrel{(S)}{=} 0V \quad (1)$$

Calcolo della Corrente I_1

$$V_{R1} \stackrel{(F1)}{=} R_1 \cdot I_1 \Rightarrow \frac{V_{R1}}{R_1} = I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V_{R1}}{R_1} \stackrel{(D4a)}{=} \frac{V_{InOp-}}{R_1} \stackrel{(D1)}{=} \frac{V_{In} - V_{Op-}}{R_1} \stackrel{(1)}{=} \frac{V_{In}}{R_1} \quad (2)$$

Calcolo della Corrente I_-

Poiché la resistenza d'ingresso dell'AO sul morsetto invertente ha entrambi i morsetti a massa, grazie alla massa virtuale, la corrente I_- è pari a 0A:

$$I_- = 0A \quad (3)$$

Calcolo della Corrente I_2

$$I_1 \stackrel{(F3)}{=} I_2 + I_- \stackrel{(3)}{\Rightarrow} I_1 = I_2 \quad (4)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$R_2 \cdot I_2 \stackrel{(F1)}{=} V_{R2} \stackrel{(D4a)}{=} V_{Op-Out} \stackrel{(D1)}{=} V_{Op-} - V_{Out} \stackrel{(1)}{=} -V_{Out} \Rightarrow \quad (5)$$

$$\Rightarrow V_{Out} = -R_2 \cdot I_2 \stackrel{(4)}{=} -R_2 \cdot I_1 \stackrel{(2)}{=} -R_2 \cdot \frac{V_{In}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In}$$

Per la definizione di Guadagno di Tensione

$$A_V \stackrel{(GT)}{=} \frac{V_{Out}}{V_{In}} \stackrel{(S)}{=} -\frac{R_2}{R_1} V_{In} \stackrel{(D)}{=} -\frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

$$R_{In} = R_1 \quad (7)$$

Calcolo della Resistenza d'Uscita

$$R_{Out} = \frac{R_{OutAO}}{|A_V|} \quad (8)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

Amplificatore Non Invertente (1° Tipo)

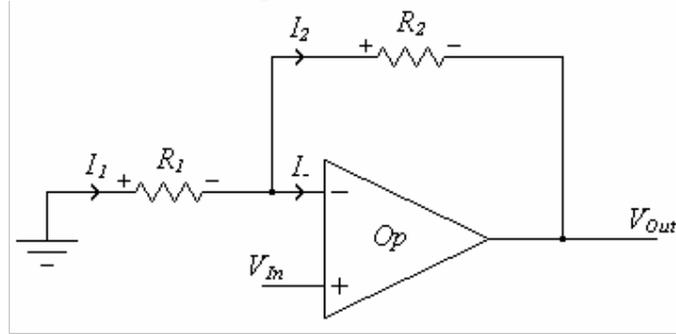


Figura 3

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-}^{(MV)} = V_{Op+}^{(Op+=In)} = V_{In} \quad (1)$$

Calcolo della Corrente I_1

$$V_{R1}^{(F1)} = R_1 \cdot I_1 \Rightarrow \frac{V_{R1}}{R_1} = I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V_{R1}}{R_1} \stackrel{(D4b)}{=} \frac{-V_{Op-Gnd}^{(D3)}}{R_1} \stackrel{(1)}{=} -\frac{V_{Op-}}{R_1} = -\frac{V_{In}}{R_1} \quad (2)$$

Calcolo della Corrente I_-

Poiché la resistenza d'ingresso dell'AO è idealmente infinita la corrente I_- è pari a 0A:

$$I_- = 0A \quad (3)$$

Calcolo della Corrente I_2

$$I_1^{(F3)} = I_2 + I_-^{(3)} \Rightarrow I_1 = I_2 \quad (4)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$\begin{aligned} R_2 \cdot I_2^{(F1)} &= V_{R2}^{(D4a)} = V_{Op-Out}^{(D1)} - V_{Out}^{(1)} = V_{In} - V_{Out} \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{Out} &= V_{In} + R_2 \cdot I_2 \stackrel{(4)}{=} V_{In} + R_2 \cdot I_1 \stackrel{(2)}{=} V_{In} - R_2 \cdot \frac{V_{In}}{R_1} \stackrel{(Ev)}{\Rightarrow} V_{Out} = V_{In} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

Per la definizione di Guadagno di Tensione

$$A_V^{(GT)} = \frac{V_{Out}^{(5)}}{V_{In}} = \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{In}^{(D)}}{V_{In}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

$$R_{In} = R_{InAO} \quad (7)$$

Calcolo della Resistenza d'Uscita

$$R_{Out} = \frac{R_{OutAO}}{|A_V|} \quad (8)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

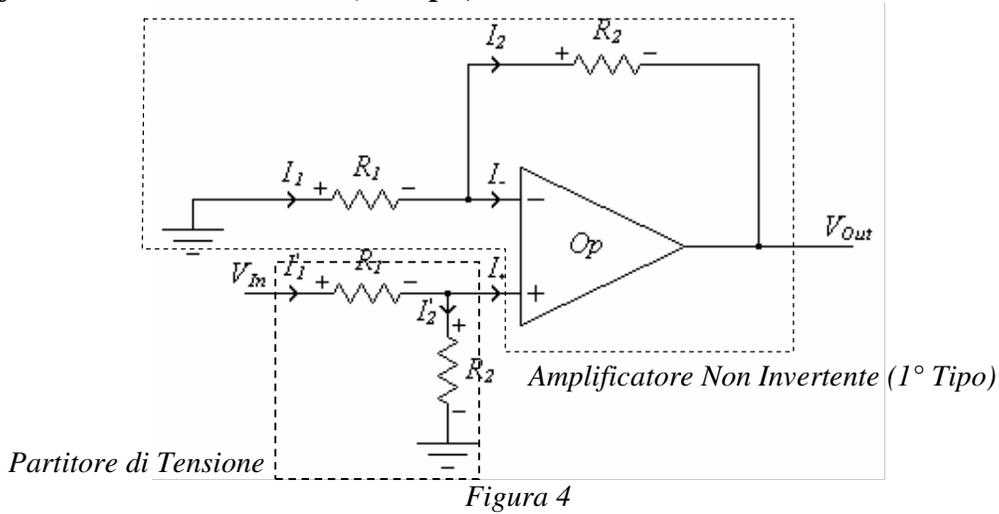
(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

Amplificatore Non Invertente (2° Tipo)



Calcolo del Guadagno

Poiché la resistenza d'ingresso ideale di un AO è infinita:

$$I_+ = 0A \quad (1)$$

qualunque sia la tensione ai capi di tale resistenza.

Si può quindi pensare il circuito in fig.4 come costituito da:

- Un partitore resistivo di tensione, avente una caratteristica I/O (il calcolo è lasciato al lettore):

$$V_{Op+} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{In} \quad (2)$$

- Ed un Amplificatore Non Invertente del 1° Tipo, avente una caratteristica I/O (già calcolata nel paragrafo precedente):

$$V_{Out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{Op+} \quad (3)$$

La caratteristica I/O del circuito è perciò pari a:

$$V_{Out} \stackrel{(3)}{=} \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{Op+} \stackrel{(2)}{=} \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{In} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In} \quad (4)$$

E perciò il guadagno è pari a:

$$A_V = \frac{V_{Out}}{V_{In}} \stackrel{(4)}{=} \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{In}}{V_{In}} \stackrel{(2)}{=} \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Come si può vedere, a differenza dell'amplificatore non invertente del 1° tipo, in questo caso è assente l'uno a sommare, questo rende più semplici i calcoli, ed anche permette di realizzare circuiti attenuatori.

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

Caso reale

$$R_{in} = R_1 + (R_2 // R_{inAO}) \quad (6)$$

Caso ideale

$$R_{in} = R_1 + R_2 \quad (7)$$

Calcolo della Resistenza d'Uscita

$$R_{out} = \frac{R_{outAO}}{|A_v|} \quad (8)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

(Def) = Definizione

Amplificatore Differenziale

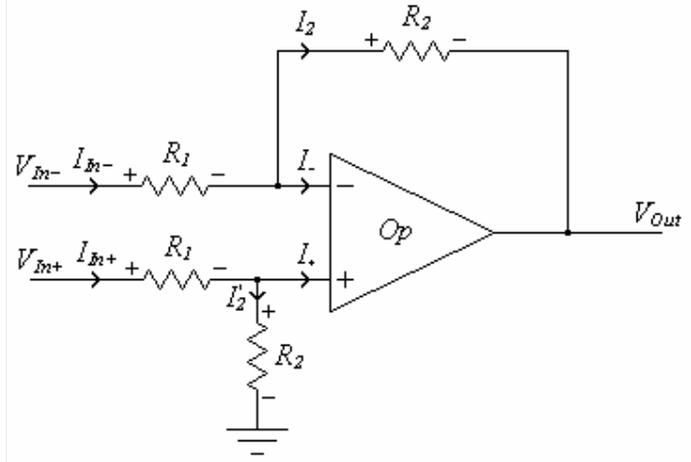


Figura 5

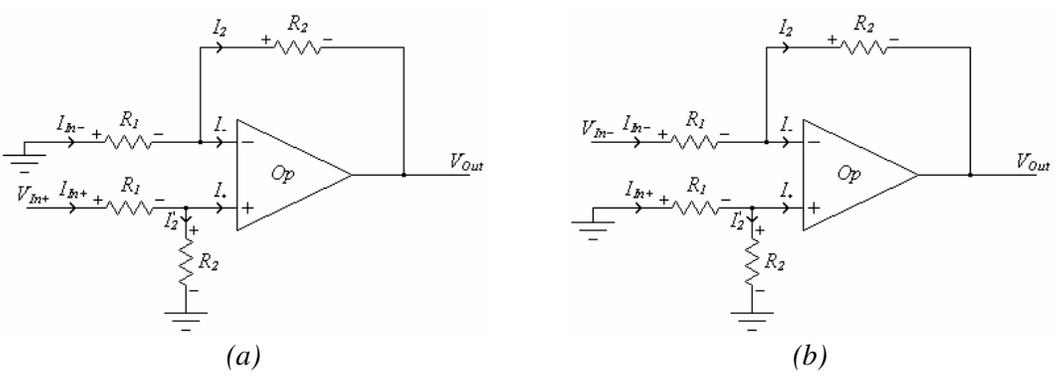


Figura 6

Calcolo del Guadagno

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti ora al generatore V_{In-} e poi al generatore V_{In+} , si otterranno i circuiti mostrati in fig.6. Calcoliamo la tensione V_{Out} nei due casi e poi le sommiamo assieme.

1° Caso

Azzerando il generatore V_{In-} si ottiene il circuito di fig.6a. Si tratta di un Amplificatore Non Invertente del 2° Tipo ed ha perciò guadagno pari a:

$$A_{V1} = \frac{R_2}{R_1} \tag{1}$$

E la tensione d'uscita V_{Out1} è pertanto pari a:

$$A_{V1} = \frac{V_{Out1}}{V_{In+}} \Rightarrow A_{V1} \cdot V_{In+} = V_{Out1} \Rightarrow V_{Out1} = A_{V1} \cdot V_{In+} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In+} \tag{2}$$

2° Caso

Azzerando il generatore V_{In+} si ottiene il circuito di fig.6b. Le due resistenze in basso, connesse al morsetto positivo dell'AO, non sono connesse a nessun generatore, pertanto non sono attraversate da nessuna corrente (legge di Ohm) e perciò (essendo nulla la d.d.p. ai loro capi) il morsetto positivo dell'AO si trova al potenziale di massa.

In questo modo l'AO di fig.6b è configurato come Amplificatore Invertente e pertanto ha il seguente guadagno:

$$A_{V2} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

E la tensione d'uscita V_{Out2} è pertanto pari a:

$$A_{V2} = \frac{V_{Out2}}{V_{In-}} \Rightarrow A_{V2} \cdot V_{In-} = V_{Out2} \Rightarrow V_{Out2} = A_{V2} \cdot V_{In-} \stackrel{(3)}{=} -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In-} \quad (4)$$

Sommando le tensioni d'uscita ottenute si può ottenere la tensione d'uscita risultante (Principio di Sovrapposizione degli Effetti) e tramite questa si può poi calcolare il guadagno.

$$V_{Out} \stackrel{(PSE)}{=} V_{Out1} + V_{Out2} \stackrel{(2)}{=} \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In+} - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{In-} \stackrel{(Ev)}{=} \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{In+} - V_{In-}) \quad (5)$$

$$A_V \stackrel{(Def)}{=} \frac{V_{Out}}{V_{In+} - V_{In-}} \stackrel{(5)}{=} \frac{\frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{In+} - V_{In-})}{V_{In+} - V_{In-}} \stackrel{(D)}{=} \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

Per V_{In-} essa è pari a quella dell'Amplificatore Invertente, mentre per V_{In+} essa è pari a quella dell'Amplificatore Non Invertente del 2° Tipo.

Calcolo della Resistenza d'Uscita

$$R_{Out} = \frac{R_{OutAO}}{|A_V|} \quad (7)$$

Legenda

- (MV) = Massa Virtuale
- (GT) = Definizione di Guadagno di Tensione
- (Abs) = Valore Assoluto
- (S) = Somma
- (D) = Divisione
- (M) = Moltiplicazione
- (Ev) = Mettere in Evidenza
- (Def) = Definizione
- (PSE) = Principio di Sovrapposizione degli Effetti

Amplificatore Sommatore Invertente

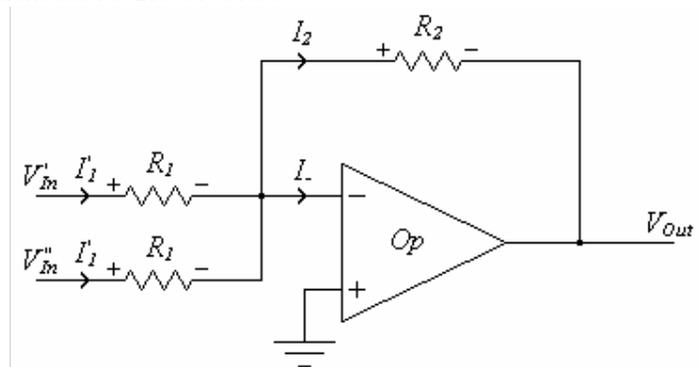


Figura 7

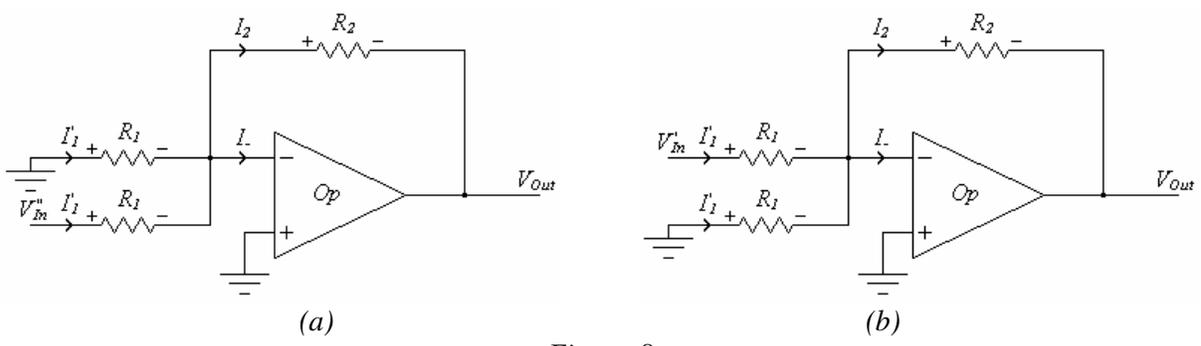


Figura 8

Calcolo del Guadagno

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti ora al generatore V'_m e poi al generatore V''_m , si otterranno i circuiti mostrati in fig.8. Calcoliamo la tensione V_{Out} nei due casi e poi le sommiamo assieme.

Ogni volta che si azzerava un generatore, la resistenza ad esso associata, per la massa virtuale, ha entrambi i morsetti a massa e perciò è attraversata da una corrente nulla. In pratica può essere omessa.

1° Caso

Azzerando il generatore V'_m si ottiene il circuito di fig.8a. Si tratta di un Amplificatore Invertente ed ha perciò guadagno pari a:

$$A'_v = -\frac{R_2}{R_1} \tag{1}$$

E la tensione d'uscita V'_{Out} è pertanto pari a:

$$A'_v = \frac{V'_{Out}}{V'_{In}} \Rightarrow A'_v \cdot V'_{In} = V'_{Out} \Rightarrow V'_{Out} = A'_v \cdot V'_{In} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V'_{In} \tag{2}$$

2° Caso

Azzerando il generatore V'_{in} si ottiene il circuito di fig.8b. Si tratta di un Amplificatore Invertente ed ha perciò guadagno pari a:

$$A''_V = \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

E la tensione d'uscita V_{Out2} è pertanto pari a:

$$A''_V = \frac{V''_{Out}}{V''_{In}} \Rightarrow A''_V \cdot V''_{In} = V''_{Out} \Rightarrow V''_{Out} = A''_V \cdot V''_{In} = \frac{(1) R_2}{R_1} \cdot V''_{In} \quad (4)$$

Sommando le tensioni d'uscita ottenute si può ottenere la tensione d'uscita risultante (Principio di Sovrapposizione degli Effetti) e tramite questa si può poi calcolare il guadagno.

$$V_{Out} \stackrel{(PSE)}{=} V'_{Out} + V''_{Out} \stackrel{(2)}{=} \frac{R_2}{(4) R_1} \cdot V'_{In} + \frac{R_2}{R_1} \cdot V''_{In} \stackrel{(Ev)}{=} \frac{R_2}{R_1} \cdot (V'_{In} + V''_{In}) \quad (5)$$

$$A_V \stackrel{(Def)}{=} \frac{V_{Out}}{V'_{In} - V''_{In}} \stackrel{(5)}{=} \frac{\frac{R_2}{R_1} \cdot (V'_{In} + V''_{In})}{V'_{In} + V''_{In}} \stackrel{(D)}{=} \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso e d'Uscita

Sono le stesse dell'Amplificatore Invertente.

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

(Def) = Definizione

(PSE) = Principio di Sovrapposizione degli Effetti

Amplificatore Derivatore

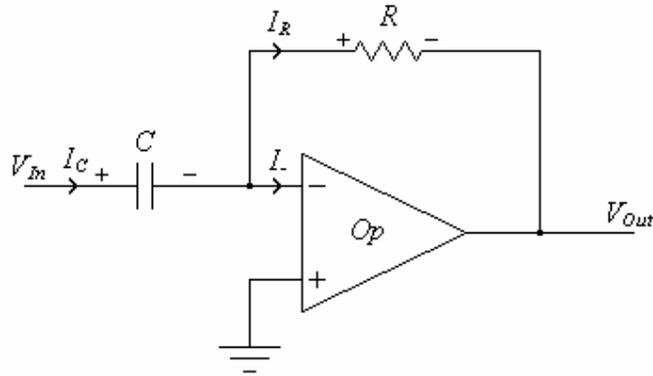


Figura 9

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-} \stackrel{(MV)}{=} V_{Op+} \stackrel{(Op+=Gnd)}{=} V_{Gnd} \stackrel{(D3)}{=} V_{GndGnd} \stackrel{(D1)}{=} V_{Gnd} - V_{Gnd} \stackrel{(S)}{=} 0V \quad (1)$$

Calcolo della Corrente I_C

$$I_C \stackrel{(EqC)}{=} C \cdot \frac{dV_C}{dt} \stackrel{(D4a)}{=} C \cdot \frac{dV_{InOp-}}{dt} \stackrel{(D1)}{=} C \cdot \frac{d(V_{In} - V_{Op-})}{dt} \stackrel{(1)}{=} C \cdot \frac{dV_{In}}{dt} \quad (2)$$

Calcolo della Corrente I_-

Poiché la resistenza d'ingresso dell'AO sul morsetto invertente ha entrambi i morsetti a massa, grazie alla massa virtuale, la corrente I_- è pari a 0A:

$$I_- = 0A \quad (3)$$

Calcolo della Corrente I_R

$$I_C \stackrel{(F3)}{=} I_R + I_- \stackrel{(3)}{\Rightarrow} I_C = I_R \quad (4)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$R \cdot I_R \stackrel{(F1)}{=} V_R \stackrel{(D4a)}{=} V_{Op-Out} \stackrel{(D1)}{=} V_{Op-} - V_{Out} \stackrel{(1)}{=} -V_{Out} \Rightarrow \quad (5)$$

$$\Rightarrow V_{Out} = -R \cdot I_R \stackrel{(4)}{=} -R \cdot I_C \stackrel{(2)}{=} -R \cdot C \cdot \frac{dV_{In}}{dt}$$

Calcolo della Impedenza d'Ingresso

$$Z_{in} = Z_C \quad (6)$$

Calcolo della Impedenza d'Uscita

$$Z_{out} = \frac{Z_{OutAO}}{|A_v|} \quad (7)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

(EqC) = Equazione Caratteristica del Condensatore

Amplificatore Integratore

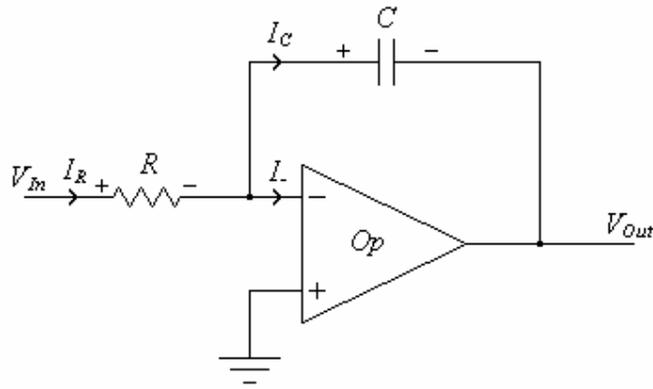


Figura 10

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-} \stackrel{(MV)}{=} V_{Op+} \stackrel{(Op+=Gnd)}{=} V_{Gnd} \stackrel{(D3)}{=} V_{GndGnd} \stackrel{(D1)}{=} V_{Gnd} - V_{Gnd} \stackrel{(S)}{=} 0V \quad (1)$$

Calcolo della Corrente I_R

$$V_R \stackrel{(F1)}{=} R \cdot I_R \Rightarrow \frac{V_R}{R} = I_R \Rightarrow I_R = \frac{V_R}{R} \stackrel{(D4a)}{=} \frac{V_{InOp-}}{R} \stackrel{(D1)}{=} \frac{V_{In} - V_{Op-}}{R} \stackrel{(1)}{=} \frac{V_{In}}{R} \quad (2)$$

Calcolo della Corrente I_-

Poiché la resistenza d'ingresso dell'AO sul morsetto invertente ha entrambi i morsetti a massa, grazie alla massa virtuale, la corrente I_- è pari a 0A:

$$I_- = 0A \quad (3)$$

Calcolo della Corrente I_C

$$I_R \stackrel{(F3)}{=} I_C + I_- \stackrel{(3)}{\Rightarrow} I_R = I_C \quad (4)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$\frac{1}{C} \int I_C dt \stackrel{(EqC)}{=} V_C \stackrel{(D4a)}{=} V_{Op-Out} \stackrel{(D1)}{=} V_{Op-} - V_{Out} \stackrel{(1)}{=} -V_{Out} \Rightarrow \quad (5)$$

$$\Rightarrow V_{Out} = -\frac{1}{C} \int I_C dt \stackrel{(4)}{=} -\frac{1}{C} \int I_R dt \stackrel{(2)}{=} -\frac{1}{C} \int \frac{V_{In}}{R} dt = -\frac{1}{R \cdot C} \int V_{In} dt$$

Calcolo della Impedenza d'Ingresso

$$R_{in} = R \quad (6)$$

Calcolo della Impedenza d'Uscita

$$Z_{out} = \frac{Z_{OutAO}}{|A_v|} \quad (7)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

(EqC) = Equazione Caratteristica del Condensatore

Amplificatore Esponenziale

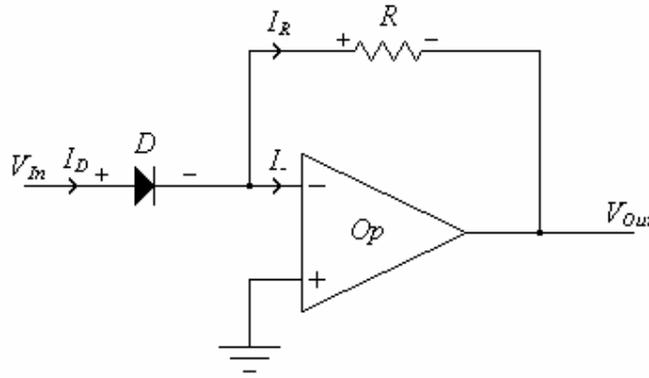


Figura 11

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-} \stackrel{(MV)}{=} V_{Op+} \stackrel{(Op+=Gnd)}{=} V_{Gnd} \stackrel{(D3)}{=} V_{GndGnd} \stackrel{(D1)}{=} V_{Gnd} - V_{Gnd} \stackrel{(S)}{=} 0V \quad (1)$$

Calcolo della Corrente I_D

$$I_D \stackrel{(EqD)}{=} I_S \cdot e^{\frac{V_D}{V_T}} \stackrel{(D4a)}{=} I_S \cdot e^{\frac{V_{inOp-}}{V_T}} \stackrel{(D1)}{=} I_S \cdot e^{\frac{(V_{in}-V_{Op-})}{V_T}} \stackrel{(1)}{=} I_S \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}} \quad (2)$$

Calcolo della Corrente I_-

Poiché la resistenza d'ingresso dell'AO sul morsetto invertente ha entrambi i morsetti a massa, grazie alla massa virtuale, la corrente I_- è pari a 0A:

$$I_- = 0A \quad (3)$$

Calcolo della Corrente I_R

$$I_D \stackrel{(F3)}{=} I_R + I_- \stackrel{(3)}{\Rightarrow} I_D = I_R \quad (4)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$R \cdot I_R \stackrel{(F1)}{=} V_R \stackrel{(D4a)}{=} V_{Op-Out} \stackrel{(D1)}{=} V_{Op-} - V_{Out} \stackrel{(1)}{=} -V_{Out} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{Out} = -R \cdot I_R \stackrel{(4)}{=} -R \cdot I_D \stackrel{(2)}{=} -R \cdot I_S \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}} \quad (5)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

$$R_{in} = R_D \quad (6)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

(EqD) = Equazione Caratteristica del Diodo

Amplificatore Logaritmico

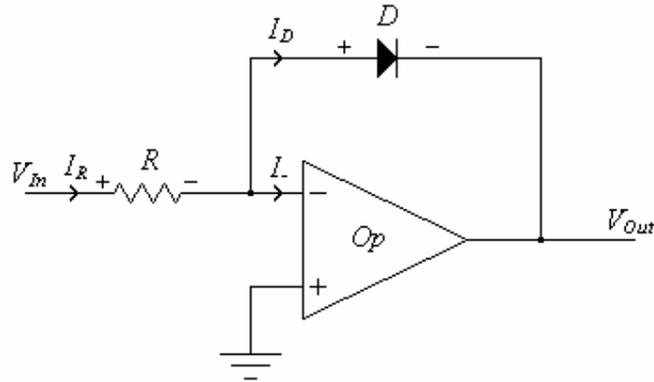


Figura 12

Calcolo del Guadagno

Per il concetto di massa virtuale

$$V_{Op-} \stackrel{(MV)}{=} V_{Op+} \stackrel{(Op+=Gnd)}{=} V_{Gnd} \stackrel{(D3)}{=} V_{GndGnd} \stackrel{(D1)}{=} V_{Gnd} - V_{Gnd} \stackrel{(S)}{=} 0V \quad (1)$$

Calcolo della Corrente I_R

$$V_R \stackrel{(F1)}{=} R \cdot I_R \Rightarrow \frac{V_R}{R} = I_R \Rightarrow I_R = \frac{V_R}{R} \stackrel{(D4a)}{=} \frac{V_{InOp-}}{R} \stackrel{(D1)}{=} \frac{V_{In} - V_{Op-}}{R} \stackrel{(1)}{=} \frac{V_{In}}{R} \quad (2)$$

Calcolo della Corrente I_-

Poiché la resistenza d'ingresso dell'AO sul morsetto invertente ha entrambi i morsetti a massa, grazie alla massa virtuale, la corrente I_- è pari a 0A:

$$I_- = 0A \quad (3)$$

Calcolo della Corrente I_D

$$I_R \stackrel{(F3)}{=} I_D + I_- \stackrel{(3)}{\Rightarrow} I_R = I_D \quad (4)$$

Calcolo della Tensione d'Uscita

$$V_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) \stackrel{(EqD)}{=} V_D \stackrel{(D4a)}{=} V_{Op-Out} \stackrel{(D1)}{=} V_{Op-} - V_{Out} \stackrel{(1)}{=} -V_{Out} \Rightarrow \quad (5)$$

$$\Rightarrow V_{Out} = -V_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) \stackrel{(4)}{=} -V_T \ln\left(\frac{I_R}{I_S}\right) \stackrel{(2)}{=} -V_T \ln\left(\frac{V_{In}}{R \cdot I_S}\right)$$

Calcolo della Resistenza d'Ingresso

$$R_{in} = R_D \quad (6)$$

Legenda

(MV) = Massa Virtuale

(GT) = Definizione di Guadagno di Tensione

(Abs) = Valore Assoluto

(S) = Somma

(D) = Divisione

(M) = Moltiplicazione

(Ev) = Mettere in Evidenza

(EqD) = Equazione Caratteristica del Diodo