

## AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

### DEFINIZIONI

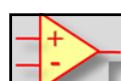
AMPLIFICATORE INVERTENTE

AMPLIFICATORE NON INVERTENTE

INTEGRATORE

DERIVATORE

SOMMATORE



## Amplificatori Operazionali

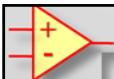
2

Buona parte dei circuiti elettronici è costituita da componenti *integrati*, composti ciascuno da numerosi elementi attivi e passivi miniaturizzati, e nei circuiti analogici questi integrati sono quasi tutti **amplificatori operazionali**.

L'Amplificatore Operazionale (**Op Amp - Operational Amplifiers**) è essenzialmente, un amplificatore di tensione, avente le seguenti caratteristiche:

- alto guadagno;
- ingresso differenziale;
- alta impedenza di ingresso e bassa impedenza di uscita.

Generalità



## Amplificatori Operazionali

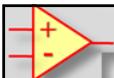
3

Il termine di amplificatore operazionale deriva dal fatto che, originariamente, tale dispositivo veniva usato nei calcolatori analogici per svolgere operazioni matematiche (come somme, sottrazioni, moltiplicazioni, integrali, derivate, ecc...) su segnali elettrici.

I primi **Op Amp** furono realizzati negli anni '40 con tubi a vuoto; tali dispositivi erano voluminosi e richiedevano una notevole potenza di alimentazione.

L'avvento del transistor bipolare consentì un notevole miglioramento con la realizzazione di **Op Amp** come moduli a componenti discreti.

**Storia**



## Amplificatori Operazionali

4

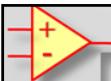
Successivamente la realizzazione di **Op Amp** come circuiti integrati monolitici costituì una vera e propria rivoluzione nel campo dell'elettronica analogica.

Il primo di tali dispositivi fu realizzato intorno agli anni 60' dalla **Fairchild**.

Sempre la stessa casa introdusse sul mercato, nel 1968 l' **Op Amp μA741**, che divenne ben presto uno standard industriale.

Da allora il numero di **Op Amp** e di case produttrici è cresciuto enormemente, tuttavia il 741 continua ad essere utilizzato.

**... continua: Storia**



## Amplificatori Operazionali

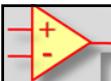
5

L'amplificatore operazionale (Op Amp) è un circuito integrato costituito da una rete di resistenze, capacità, diodi e transistori incapsulati in unico contenitore di plastica (di uso frequente è il *dual in-line package* o DIP) da otto pin.



L'Op Amp può essere definito funzionalmente come un **amplificatore differenziale**, cioè un dispositivo attivo a tre terminali che genera al terminale di uscita una tensione proporzionale alla differenza di tensione fornite ai due terminali di ingresso.

Considerazioni Generali



## Amplificatori Operazionali

6

Le tensioni vanno sempre riferite ad un potenziale comune, detto **potenziale di massa**.

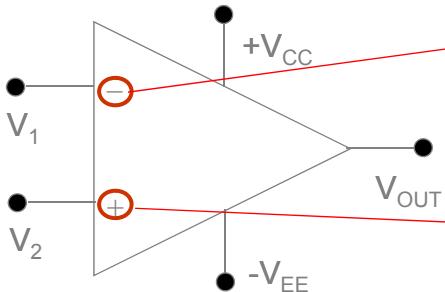
Quindi dato un punto di riferimento B (massa), se in un punto A si dice che c'è una tensione pari a  $V_a$  significa che tra A e B c'è una differenza di potenziale paria  $V_a$ .

Potenziale di massa

**Amplificatori Operazionali** 7



Il simbolo grafico, comunemente, utilizzato per rappresentare l'**OP Amp** è il seguente:

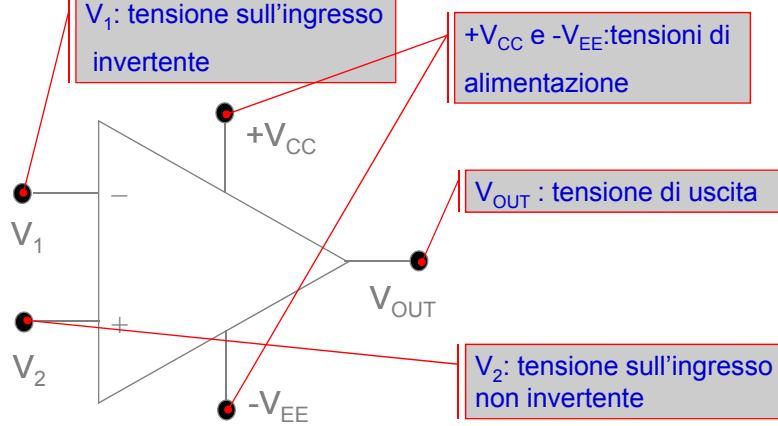


Con il simbolo “-” si indica il canale invertente

Con il simbolo “+” si indica il canale non invertente

**Simbologia**

**Amplificatori Operazionali** 8



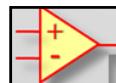
V<sub>1</sub>: tensione sull'ingresso invertente

+V<sub>CC</sub> e -V<sub>EE</sub>: tensioni di alimentazione

V<sub>OUT</sub> : tensione di uscita

V<sub>2</sub>: tensione sull'ingresso non invertente

**Simbologia**



## Amplificatori Operazionali 9

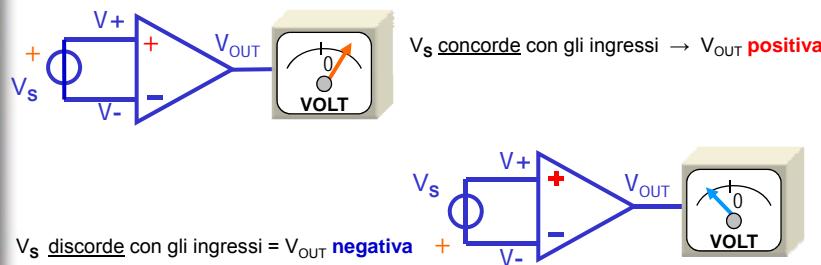
L'Amplificatore Operazionale (Op Amp) è un circuito integrato di tipo lineare a due ingressi, detti "invertente" (-) e "non invertente" (+).

Esso fornisce una tensione d'uscita  $V_{OUT}$  proporzionale alla differenza fra le due tensioni  $V(+)$  e  $V(-)$  applicate agli ingressi.

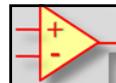
La relazione fra ingressi e uscita è quindi la seguente:

$$V_{OUT} = A_d \cdot [V(+) - V(-)]$$

dove il coefficiente di proporzionalità  $A_d$  è detto:  
guadagno differenziale di tensione



Amplificatore differenziale  
Generalità



## Amplificatori Operazionali 10

Il circuito base di un amplificatore operazionale è l'**amplificatore differenziale**.

L'amplificatore differenziale ha il compito di amplificare una differenza di tensione tra due punti di un circuito, indipendentemente dal loro singolo valore rispetto a massa. Come tutti gli amplificatori di tensione, anche l'amplificatore differenziale deve presentare tra i due ingressi, indicati con  $v^+$  e  $v^-$ , un'impedenza alta (idealmente infinita) mentre l'uscita deve avere un'impedenza bassa (idealmente nulla).

Il circuito è caratterizzato da un **guadagno differenziale**,  $A_d$ , che definisce la sua capacità di amplificare il **segnale differenziale**:  $V_{id} = v^+ - v^-$ .

Il potenziale medio dei due morsetti rispetto a massa, in genere non nullo, è invece detto **segnale di modo comune**:  $V_{cm} = (v^+ + v^-)/2$ .

Amplificatore differenziale - 1

**Amplificatore differenziale - 2**

11

**Amplificatori Operazionali**

**Simbolo circuitale di un amplificatore differenziale**

In un amplificatore differenziale ideale, il segnale di modo comune non ha alcun effetto sull'uscita ed il segnale  $v_{out}$  è proporzionale al segnale differenza:  $v_{out} = A_d \cdot v_{id}$ .

**Amplificatore differenziale - 2**

12

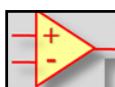
**Amplificatori Operazionali**

Gli amplificatori differenziali **reali**, purtroppo amplificano, in parte, anche il segnale di modo comune, e quindi il segnale all'uscita del circuito è dato da:  $v_{OUT} = A_d \cdot v_{id} + A_{cm} \cdot v_{cm}$ .

**$A_{cm}$  è detto guadagno di modo comune.**

Un buon amplificatore differenziale deve avere alto guadagno differenziale,  $A_d$ , e basso guadagno di modo comune,  $A_{cm}$ .

Supponiamo che  $v_{id} = 50 \mu V$  mentre  $v_{cm} = 500 mV$ , per evitare che all'uscita dell'amplificatore il trasferimento del segnale di modo comune oscuri completamente il segnale differenziale amplificato, il rapporto  $A_d / A_{cm}$  deve essere maggiore di  $500 mV / 50 \mu V = 10^4$ .



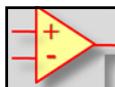
## Amplificatori Operazionali

13

Il rapporto  $A_d / A_{cm}$  è un importante fattore di merito per un amplificatore differenziale ed è detto rapporto di reiezione di modo comune (*Common Mode Rejection Ratio*).

Gli amplificatori operazionali sono amplificatori differenziali integrati caratterizzati da amplificazioni differenziali elevate (solitamente compreso tra  $10^4$  e  $10^6$ ), CMRR fino a 110 dB, resistenze d'ingresso molto alte (anche superiori a  $10^{12} \Omega$ ) e resistenze d'uscita, al massimo, di qualche ohm.

Amplificatore differenziale - 3



## Amplificatori Operazionali

14

**National Semiconductor**

December 1995

### LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

#### General Description

The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (0.01 V) and unity gain feedback. The device features a low supply current and yet maintains a high gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFETs are used to provide high output currents and low bias currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This allows the user to easily make an upgrade to the overall performance of existing LM741 designs.

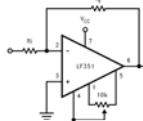
The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, summing junctions, bandpass filters, oscillators, and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and low total harmonic distortion. For applications where low voltage drift, but for applications where these requirements are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply current is important, however, the LF351 is the better choice.

#### Features

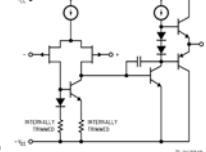
- Internally Trimmed offset voltage
- Low input bias current
- High slew rate
- Low input noise current
- Wide gain bandwidth
- High input impedance
- Low total harmonic distortion  $A_v = 10$ ,
- $P_L = 1.5 \text{ mW}, V_O = 20 \text{ Vpp}, \text{BW} = 20 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$
- Low 1/f noise corner frequency
- Fast settling time to 0.01%

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

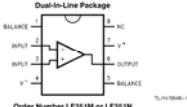
#### Typical Connection



#### Simplified Schematic



#### Connection Diagrams

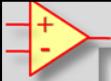


Order Number LF351M or LF351N  
See NS Package Number M08A or N08E

Amplificatore operazionale commerciale

## Amplificatore operazionale commerciale

**Amplificatori Operazionali 15**



<b>Absolute Maximum Ratings</b>					
<small>If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specification.</small>					
Supply Voltage Range	-0.3 V to +16 V	N Package	120°C/W		
Power Dissipation (Notes 1 and 6)	670 mW	M Package	TBD		
Operating Temperature Range	0°C to +70°C	Soldering Information			
T <sub>(MAX)</sub>	115°C	Dual-In-Line Package	260°C		
Differential Input Voltage	±30V	Soldering (10 sec.)	215°C		
Input Voltage Range (Note 2)	±15V	Storage Temperature Range	220°C		
Output Short Circuit Duration	Continuous	Vapor Phase (60 sec.)	215°C		
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	Infrared (15 sec.)	220°C		
Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	-65°C to +150°C	See "National Semiconductor Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.			
Metal Can	300°C	ESD rating to be determined.			
DIP	260°C				

<b>DC Electrical Characteristics (Note 3)</b>					
Symbol	Parameter	Conditions	LF351		
			Min	Typ	Max
$V_{OS}$	Input Offset Voltage	$R_S = 10 \text{ k}\Omega, T_A = 25^\circ\text{C}$ Over Temperature	5	10	mV
		$R_S = 10 \text{ k}\Omega$		13	mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}, (Notes 3, 4)$	10		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$I_{OS}$	Input Offset Current	$T_J = 25^\circ\text{C}, (Notes 3, 4)$	25	100	pA
		$T_J = \pm 70^\circ\text{C}$		4	nA
$I_B$	Input Bias Current	$T_J = 25^\circ\text{C}, (Notes 3, 4)$	50	200	pA
		$T_J = \pm 70^\circ\text{C}$		8	nA
$R_I$	Input Resistance	$T_J = 25^\circ\text{C}$	10 <sup>12</sup>		$\Omega$
$A_{VOL}$	Large Signal Voltage Gain	$V_{IN} = \pm 15\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = \pm 10\text{V}, R_L = 2\text{k}\Omega$ Over Temperature	25	100	$\text{V}/\text{mV}$
$V_D$	Output Voltage Swing	$V_{IN} = \pm 15\text{V}, R_L = 10\text{k}\Omega$	±12	±13.5	V
$V_{CM}$	Input Common-Mode Voltage Range	$V_{IN} = \pm 15\text{V}$	±11	+15	V
				-12	V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	$R_S = 10 \text{ k}\Omega$	70	100	dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio (Note 5)		70	100	dB
$I_S$	Supply Current		1.8	3.4	mA
SR	Slew Rate	$V_{IN} = \pm 15\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	13		$\text{V}/\mu\text{s}$
GBW	Gain Bandwidth Product	$V_{IN} = \pm 15\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	4		MHz
$\epsilon_n$	Equivalent Input Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_S = 100\Omega,$ $f = 1000 \text{ Hz}$	25		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$i_n$	Equivalent Input Noise Current	$T_J = 25^\circ\text{C}, f = 1000 \text{ Hz}$	0.01		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

Note 1: Input bias current is the sum of input offset current and junction leakage current.  $I_B = I_{OS} + I_{JL}$ .  $I_{JL}$  is measured at  $T_{JA} = 25^\circ\text{C}$ .

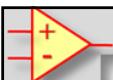
Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: These specifications apply for  $V_{IN} = \pm 15\text{V}$  and  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$ .  $V_{OS}$ ,  $I_B$  and  $I_{OS}$  are measured at  $V_{IN} = 0$ .

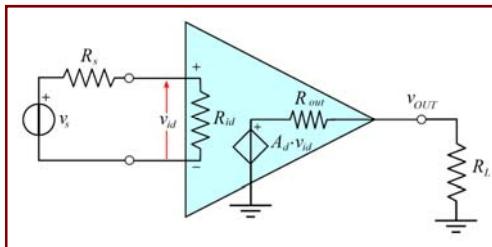
Note 4: The input offset current is junction leakage currents which approximately double for every  $10^\circ\text{C}$  increase in the junction temperature,  $T_J$ . Due to the limited propagation time, the input offset current increases exponentially with temperature.  $P_J = T_J - T_A + R_{JA} P_0$  where  $P_{JA}$  is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended to limit the junction temperature to  $70^\circ\text{C}$  or less.

Note 5: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practices. From 1.15V to 1.65V.

Note 6: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

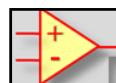


## Amplificatori Operazionali 16



**Circuito equivalente di un amplificatore operazionale**

La tensione in uscita da un amplificatore operazionale è direttamente proporzionale alla tensione differenziale in ingresso. Pertanto, un amplificatore operazionale può essere schematizzato come un generatore di tensione controllato in tensione.



### L'amplificatore operazionale "ideale"

## Amplificatori Operazionali 17

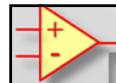
Per poter comprendere le affermazioni che seguiranno, nonché accettare come valide le formule utilizzate, occorre partire da un preciso presupposto, ovvero che l'amplificatore operazionale deve essere considerato come "ideale", cioè deve possedere le seguenti caratteristiche:

Parametro	simbolo	valore	ovvero, in altri termini, l'operazionale deve
Guadagno di tensione	$A_d$	infinito	- amplificare senza limiti i segnali applicati
Resistenza d'ingresso	$R_{in}$	infinita	- non assorbire corrente all'ingresso
Resistenza d'uscita	$R_{out}$	nulla	- avere una $V_{out}$ indipendente dal carico
Reiezione di modo comune	CMRR	infinita	- amplificare solo la differenza $[V(+)-V(-)]$
Banda passante a catena aperta	BW	infinita	- saper gestire segnali ad alta frequenza

E' utile notare che dai parametri sopra descritti deriva una proprietà molto importante, ovvero che, grazie all'elevato guadagno, i due ingressi si possono ritenere pressoché equipotenziali.

Nell'operazionale ideale, inoltre, si escludono variazioni dei parametri con la temperatura o con la tensione di alimentazione, si immagina che la tensione d'uscita sia nulla se non vi sono segnali in ingresso, che l'uscita possa variare istantaneamente e che non generi alcun rumore elettrico.

Proprio basandoci sull'operazionali ideale, vediamo ora le configurazioni di base, ovvero quelle che permettono di realizzare in pratica tutti i circuiti applicativi oggi utilizzati.



### L'amplificatore operazionale "ideale"

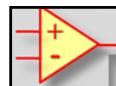
## Amplificatori Operazionali 18

In un amplificatore operazionale ideale la tensione d'uscita può essere espressa come:  $v_{OUT} = A_d \cdot (v^+ - v^-)$ . In generale, si possono verificare tre possibili condizioni per la tensione d'uscita.

- Se  $v^- = 0$ ,  $v_{out}$  sarà in fase con la tensione d'ingresso ( $v_{OUT} = A_d \cdot v^+$ ).
- Se  $v^+ = 0$ ,  $v_{out}$  avrà fase opposta a  $v^-$  ( $v_{OUT} = -A_d \cdot v^-$ ).
- Se sono presenti sia  $v^+$  sia  $v^-$  allora si avrà:  
 $v_{OUT} = A_d \cdot (v^+ - v^-)$ .

Pertanto, a seconda delle condizioni sulle tensioni in ingresso, i circuiti con amplificatori operazionali possono essere classificati in tre configurazioni fondamentali:

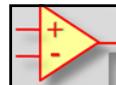
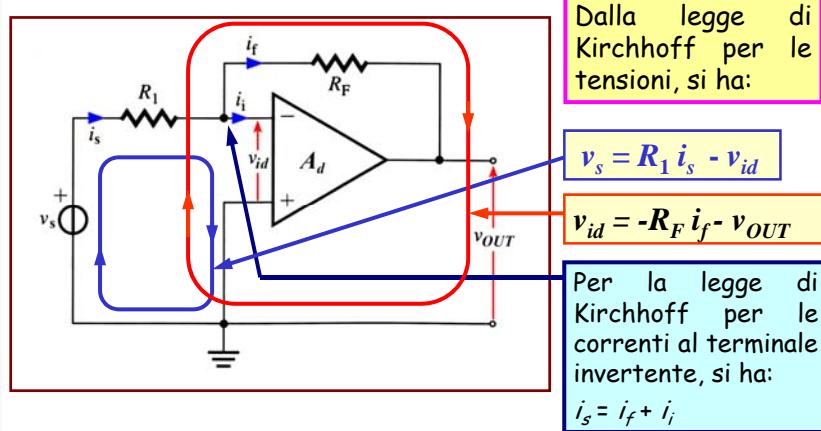
- ✚ amplificatori non invertenti;
- ✚ amplificatori invertenti;
- ✚ amplificatori differenziali.



## Amplificatori Operazionali 19

L'amplificatore invertente

Un amplificatore invertente può essere realizzato ponendo a massa l'ingresso non invertente, collegando il terminale di uscita al terminale di ingresso invertente attraverso la resistenza  $R_F$ , e collegando il terminale invertente al generatore di segnale attraverso la resistenza  $R_1$ .



## Amplificatori Operazionali 20

L'amplificatore invertente

Nell'ipotesi di amplificatore operazionale ideale,  $A_d = \infty$  e  $i_i = 0$ , possiamo scrivere:

$$v_s = R_1 i_s - v_{id}; v_{id} = -R_F i_f - v_{OUT}$$

$$\begin{aligned} v_s - v_{OUT} &= (R_1 + R_F) i_s \\ (i_i = 0 \Rightarrow i_s &= i_f) \end{aligned}$$

$$i_s = \frac{v_s + v_{id}}{R_1} = \frac{v_s}{R_1} + \frac{v_{OUT}}{R_1 \cdot A_d} \quad \text{se } A_d \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad i_s \approx \frac{v_s}{R_1}$$

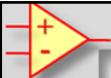


$$v_s - v_{OUT} = (R_1 + R_F) \frac{v_s}{R_1}$$



$$-v_{OUT} = \frac{R_F}{R_1} v_s \quad \Rightarrow \quad A_f = \frac{v_{OUT}}{v_s} = -\frac{R_F}{R_1}$$

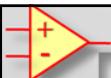
## Amplificatori Operazionali 21



Poiché nel circuito amplificatore invertente la tensione al terminale invertente è pari a zero, si considera questo terminale come **massa virtuale**. L'amplificatore operazionale controlla la tensione di uscita in modo tale che la tensione  $v^-$  sia pari a zero. Benché il terminale invertente rappresenti una massa virtuale, questo terminale non è collegato direttamente a massa, ovvero non esiste un percorso per la corrente continua tra il terminale invertente e massa.

Un errore molto comune nell'analisi di circuiti con operazionali è quello di porre in cortocircuito questo terminale con la massa.

## Amplificatori Operazionali 22

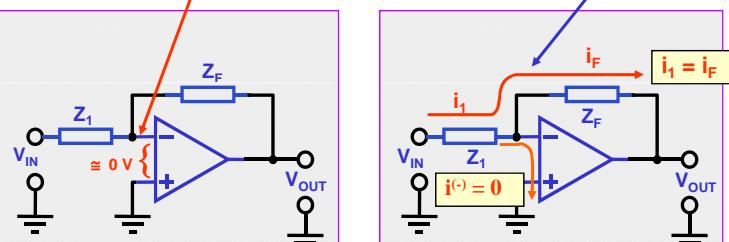


### Ricapitoliamo

L'analisi dell'amplificatore operazionale in configurazione invertente può essere facilitata ricordando che l'**impedenza d'ingresso di un operazionale ideale è infinita**.

L'impedenza d'ingresso infinita implica infatti una corrente d'ingresso nulla. Grazie inoltre al guadagno infinito tra i due ingressi non vi è alcuna caduta di tensione e pertanto, essendo l'ingresso non invertente a massa, anche la tensione all'ingresso invertente sarà zero. Per tale motivo si dice che l'ingresso invertente rappresenta una "**massa virtuale**", ovvero a tensione nulla, come l'altro ingresso.

Inoltre, poiché l'impedenza d'ingresso è infinita, la corrente attraverso  $Z_1$  sarà uguale a quella in  $Z_F$ .



Si noti che le impedanze  $Z$  possono essere delle semplici resistenze oppure delle reti reattive anche complesse: in entrambi i casi varranno le formule d'ora in poi indicate

### Amplificatore invertente

### Amplificatore invertente

**Amplificatore invertente**

**in sintesi:**

$$i_1 = \frac{V_{IN}}{Z_1} \quad i_F = \frac{-V_{OUT}}{Z_F}$$

ma...  $i_F = i_1$

e quindi

$$\frac{-V_{OUT}}{Z_F} = \frac{V_{IN}}{Z_1} \text{ da cui}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{Z_F}{Z_1}$$

e quindi

$$A_f = -\frac{Z_F}{Z_1}$$

**guadagno di tensione ad anello chiuso**

ingresso 50mV/div      uscita 2V/div

inversione del segnale

### Amplificatore non-invertente

**Amplificatore non-invertente**

Lo schema di un **amplificatore non invertente** prevede che la tensione in ingresso  $v_s$  sia applicata al terminale d'ingresso non invertente.

La tensione  $v_x$  proporzionale a quella d'uscita, è riportata al terminale invertente mediante il partitore di resistenze  $R_1$  e  $R_F$ .

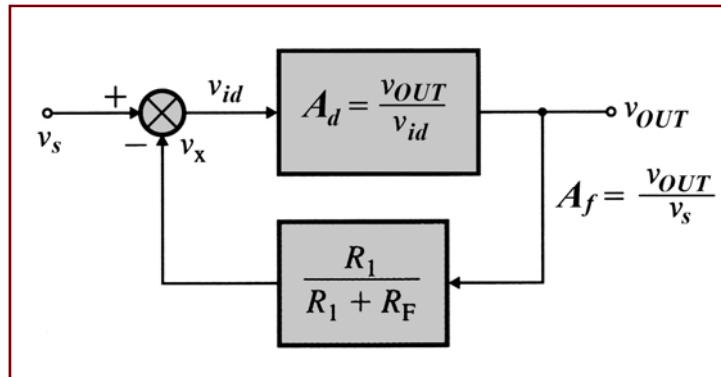
Applicando, alla maglia d'ingresso, la legge di Kirchhoff per le tensioni, si ottiene:  $v_s = v_x + v_{id}$

## Amplificatori Operazionali

25

### Amplificatore non-invertente

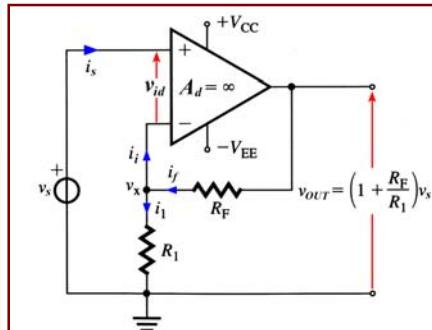
La tensione differenza,  $v_{id} = v_s - v_x$ , è amplificata dall'operazionale, la cui uscita è riportata indietro al terminale d'ingresso invertente. Questo è dunque un circuito retroazionato.



### Amplificatore non-invertente

## Amplificatori Operazionali

26



Nell'ipotesi di amplificatore operazionale ideale,  $i_i = 0$ , la tensione  $v_x$  può essere espressa in funzione della tensione di uscita utilizzando l'equazione del partitore di tensione formato dalle resistenze  $R_1$  e  $R_F$ .

$$i_i = 0 \Rightarrow v_x = \frac{R_1}{R_1 + R_F} v_{OUT} \Rightarrow v_s - v_{id} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} v_{OUT}$$

**Amplificatore non-invertente**

**Amplificatori Operazionali 27**

$$v_s - v_{id} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} v_{OUT} \Rightarrow v_s = \frac{R_1}{R_1 + R_F} v_{OUT} + \frac{v_{OUT}}{A_d}$$

Con l'ipotesi di amplificatore operazionale ideale,  $A_d \rightarrow \infty$ , il termine  $v_{OUT}/A_d \rightarrow 0$ .

$$v_s \approx \frac{R_1}{R_1 + R_F} v_{OUT}$$

$$A_f = \frac{v_{OUT}}{v_s} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

**Amplificatore non-invertente**

**Amplificatori Operazionali 28**

**Ricapitoliamo**

Applicando il segnale da amplificare all'ingresso non invertente e collegando le impedenze di retroazione fra uscita, ingresso invertente e massa, si ottiene lo schema riportato in figura, chiamato **amplificatore non-invertente** poiché il segnale d'uscita risulta in fase con quello d'ingresso.

Per analizzarne il funzionamento occorre partire dai medesimi presupposti già visti per l'invertente ovvero che, grazie alla resistenza d'ingresso infinita, risulta  $i_+ = 0$ . Ne consegue che  $Z_1$  e  $Z_F$  sono percorse dalla medesima corrente.

Ricordando poi che i due ingressi sono al medesimo potenziale ( $A_d = \infty$ ) si ha che la tensione ai capi di  $Z_1$  è uguale al segnale d'ingresso  $V_{IN}$  ( $Z_1 \cdot i_1 = V_{IN}$ ).

La tensione d'uscita sarà quindi la somma delle tensioni ai capi di  $Z_1$  e  $Z_F$ , ovvero:

$$V_{OUT} = Z_1 \cdot i_1 + Z_F \cdot i_1 = V_{IN} + Z_F \cdot (V_{IN}/Z_1) = V_{IN} \cdot (1 + Z_F/Z_1)$$

Si può quindi dedurre che il guadagno  $A_f = V_{OUT}/V_{IN}$  è dato da:

$$A_f = 1 + Z_F/Z_1$$

## Amplificatori Operazionali 29

**Amplificatore non-invertente**

$$A_f = 1 + Z_F / Z_1$$

Si noti che - in base alla formula ottenuta - il guadagno non potrà mai essere inferiore all'unità, e se si desidera ottenere un guadagno unitario occorre porre  $Z_F = 0$  oppure  $Z_1$  infinita (ovviamente si possono soddisfare, contemporaneamente entrambe le condizioni).

Questo circuito presenta un'impedenza d'ingresso infinita ed una resistenza d'uscita pressoché nulla. Per questo motivo l'amplificatore non-invertente viene spesso usato come "buffer" per isolare la sorgente di segnale dal carico, in modo da evitare "effetti di carico" indesiderati.

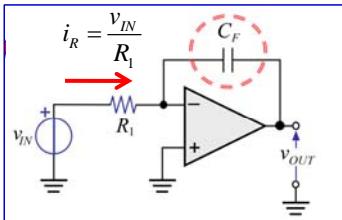
ingresso 50mV/div      segnale amplificato  
uscita 2V/div

### Amplificatore Operazionale: Circuito integratore

Un integratore è un circuito la cui uscita è proporzionale all'integrale del segnale di ingresso.  
Un circuito che esegue la funzione di integrazione può essere realizzato tramite un amplificatore operazionale in configurazione invertente dove la resistenza  $R_F$  nell'amplificatore è sostituita con un condensatore  $C_F$ .

(a) - Amplificatore invertente      (b) - Circuito Integratore

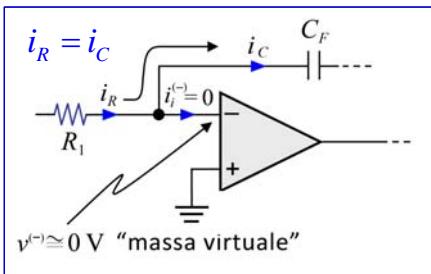
### ... continua: Integratore



$$Q = C \cdot v \Rightarrow dQ = C \cdot dv \Rightarrow \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$\downarrow$$

$$i_C = -C \frac{dv_{OUT}}{dt}$$



$$\frac{v_{IN}}{R_1} = -C_F \frac{dv_{OUT}}{dt} \Rightarrow dv_{OUT} = -\frac{v_{IN}}{R_1 C_F} dt$$

$$\int dv_{OUT} = \int -\frac{1}{R_1 C_F} v_{IN} dt$$

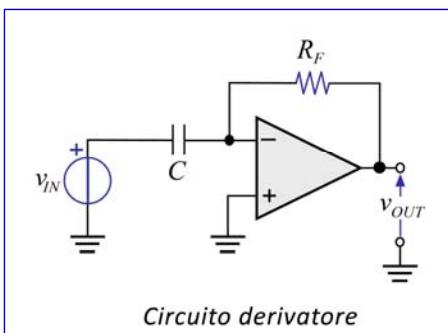
$$\downarrow$$

$$v_{OUT}(t) = -\frac{1}{R_1 C_F} \int_0^t v_{IN}(\tau) d\tau + v_{OUT}(0)$$

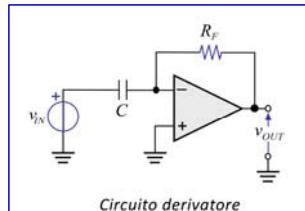
### Amplificatore Operazionale: Circuito derivatore

Un derivatore è un circuito la cui uscita è proporzionale alla derivata rispetto al tempo del segnale di ingresso.

Il circuito derivatore può essere ottenuto semplicemente scambiando il condensatore con la resistenza nel circuito integratore.

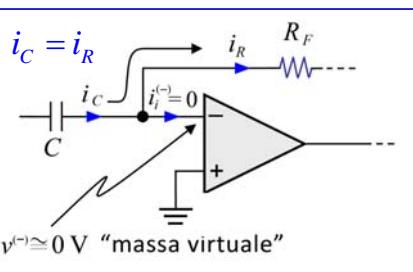


### ... continua: Derivatore



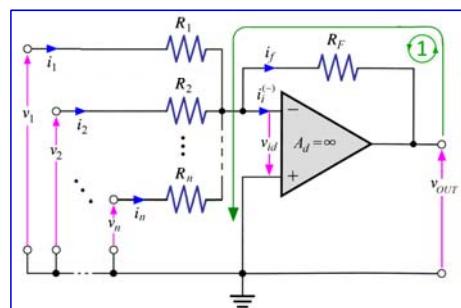
$$i_R = -\frac{v_{OUT}}{R_F}; \quad i_C = C \frac{dv_{IN}}{dt}$$

$$v_{OUT} = -R_F C \frac{dv_{IN}}{dt}$$



### Amplificatore Operazionale: Circuito sommatore

Nel circuito sommatore c'è una resistenza di feedback  $R_F$  e numerosi segnali di ingresso  $v_1, v_2, \dots, v_n$  ognuno applicato ad un corrispondente resistore  $R_1, R_2, \dots, R_n$  i quali sono connessi al terminale invertente dell'amplificatore operazionale. La legge di Ohm dice che le correnti  $i_1, i_2, \dots, i_n$  sono date da:



$$i_1 = \frac{v_1}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_2}{R_2}, \quad \dots, \quad i_n = \frac{v_n}{R_n}$$

$$i_{\text{totale}} = i_1 + i_2 + \dots + i_n = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n} = i_f$$

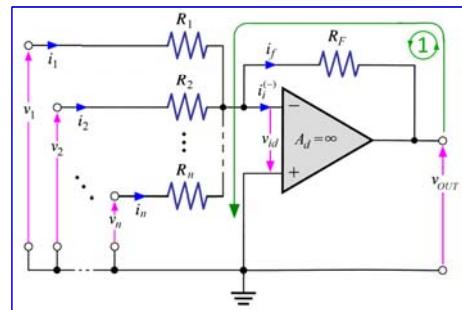
### ... continua: Sommatore

$$i_f = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n}$$

$$v_{OUT} = -R_F \cdot i_f - v_{id}$$

$\Downarrow v_{id} \approx 0$  (ipotesi di Op Amp ideale)

$$v_{OUT} = -R_F \cdot i_f$$



$$v_{OUT} = -\left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$