

# Amplificatori operazionali

## Parte 4

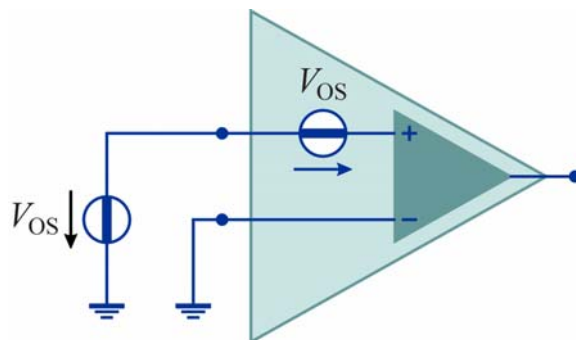
[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)  
(versione del 31-5-2017)

### Amplificatori operazionali non ideali

- Il comportamento degli amplificatori operazionali reali si discosta dal modello ideale per diversi motivi
  - ◆ Guadagno finito
  - ◆ Saturazione
  - ◆ CMRR finito
  - ◆ Resistenza di ingresso finita
  - ◆ Resistenza di uscita non nulla
  - ◆ Larghezza di banda limitata
  - ◆ Errori in continua
    - Tensione di offset
    - Correnti di polarizzazione
  - ◆ Slew rate limitato
  - ◆ Massima corrente in uscita limitata

## Tensione di offset

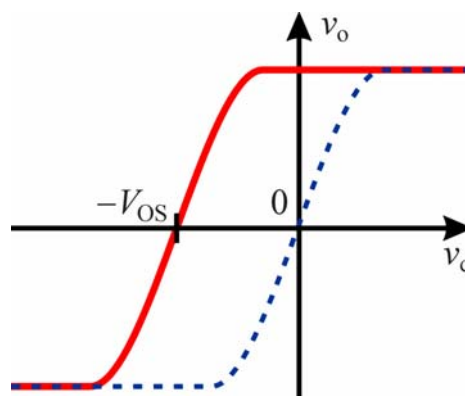
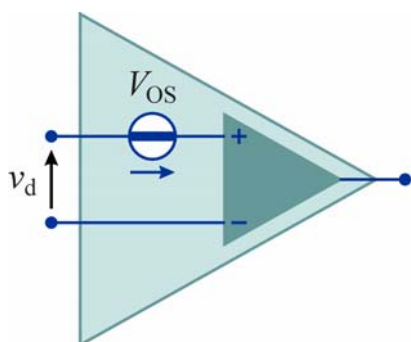
- Se le tensioni applicate agli ingressi di un amplificatore operazionale sono nulle, anche la tensione di uscita dovrebbe essere nulla
  - In pratica, a causa di asimmetrie dello stadio di ingresso, in queste condizioni si ottiene una tensione diversa da zero
  - La tensione di uscita può essere azzerata collegando un generatore di tensione di valore  $V_{OS}$  (**tensione di offset**) con opportuna polarità ad uno degli ingressi (la polarità di  $V_{OS}$  non è nota a priori)
  - I valori tipici di  $V_{OS}$  sono dell'ordine di qualche mV
- ➔ L'amplificatore operazionale si comporta come se internamente fosse presente un generatore di tensione  $V_{OS}$  con polarità opposta rispetto al generatore esterno



3

## Tensione di offset

- La tensione di offset determina una traslazione della caratteristica ingresso-uscita dell'amplificatore operazionale, che di conseguenza non è più simmetrica rispetto all'origine

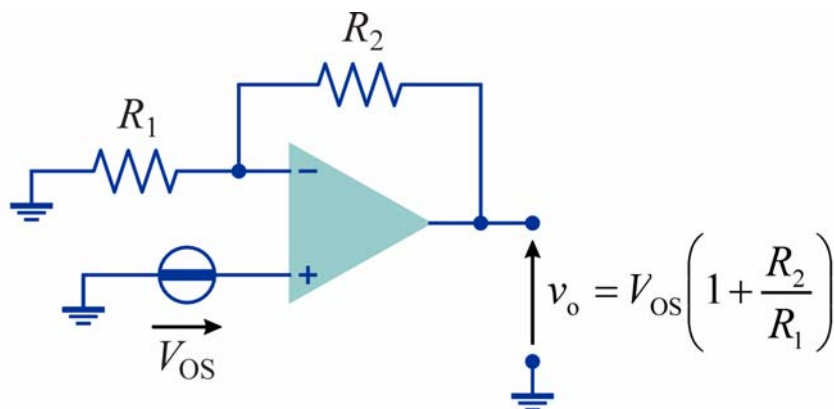


- ➔ Quando l'operazionale si trova nella regione lineare, la tensione  $v_d$  non è nulla ma è uguale a  $-V_{OS}$

4

## Tensione di offset

- Azzerando l'ingresso gli amplificatori invertente e non invertente assumono la stessa configurazione
- ➔ In entrambi i casi l'effetto della tensione di offset sull'uscita può essere determinato mediante questo circuito

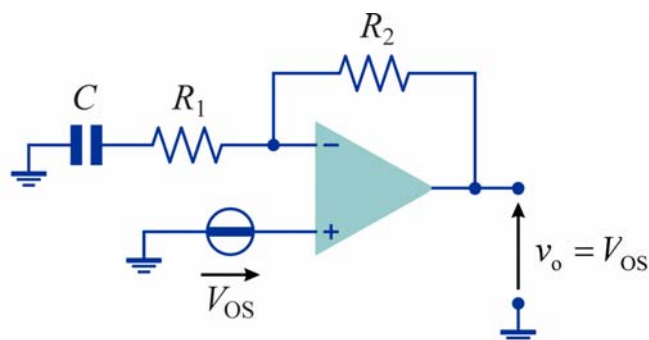


- ➔ La tensione in uscita è uguale alla tensione di offset moltiplicata per il guadagno corrispondente all'amplificatore non invertente

5

## Tensione di offset

- Se l'amplificatore non deve trattare segnali in continua o a frequenze molto basse, sia nel caso non invertente che in quello invertente, si può ridurre l'effetto della tensione di offset sulla tensione di uscita inserendo un condensatore  $C$  in serie a  $R_1$
- In continua  $C$  si comporta come un aperto, quindi, dal punto di vista di  $V_{OS}$ , l'amplificatore si riduce ad un inseguitore di tensione
- Il condensatore, sia nel caso non invertente che in quello invertente, determina una riduzione del guadagno a bassa frequenza
- La frequenza di taglio, per cui il guadagno risulta inferiore di 3 dB al guadagno ad alta frequenza è

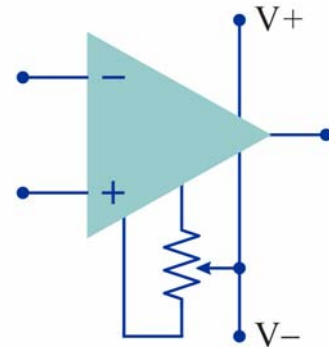


$$f_t = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

6

## Tensione di offset

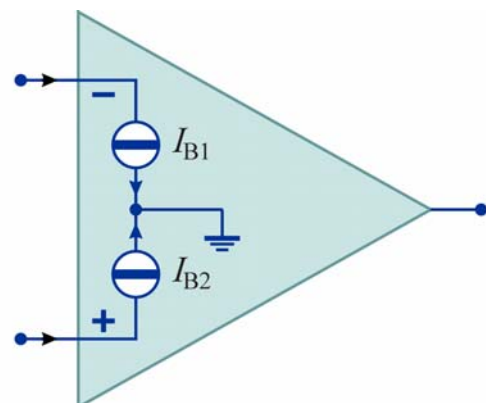
- Di solito gli amplificatori operazionali dispongono di una coppia di terminali aggiuntivi a cui può essere collegato un circuito esterno per la compensazione della tensione di offset (la cui struttura dipende dal tipo di operazionale considerato)
- Nel caso più comune questi terminali vengono collegati mediante un potenziometro all'alimentazione negativa
- Spostando il cursore del potenziometro dalla posizione centrale si introduce uno "sbilanciamento" nel circuito con cui si può compensare l'effetto dell'asimmetria dello stadio di ingresso dell'operazionale



7

## Correnti di polarizzazione

- Per far funzionare l'amplificatore operazionale occorre che ai suoi terminali di ingresso vengano fornite delle correnti continue  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$  dette **correnti di polarizzazione di ingresso**
- Queste correnti possono essere rappresentate mediante due generatori di corrente collegati tra gli ingressi e la massa
- E' importante notare che la presenza di queste correnti non è in relazione col fatto che la resistenza di ingresso dell'amplificatore operazionale ha valore finito
- I valori di  $I_{B1}$  e  $I_{B2}$  di solito non sono uguali e la loro differenza



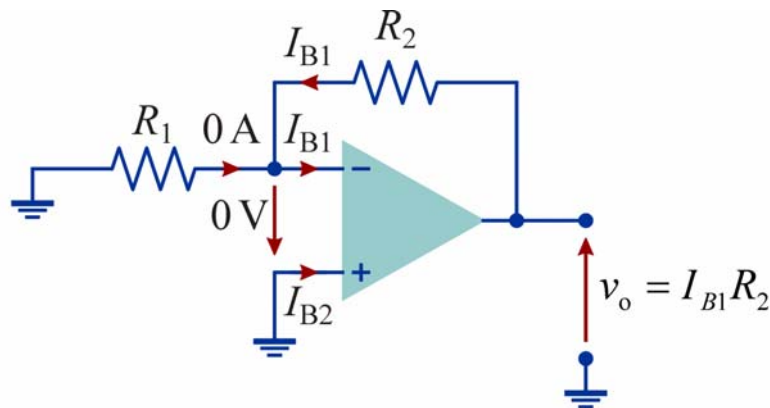
$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

è detta **corrente di offset ingresso**

8

## Correnti di polarizzazione

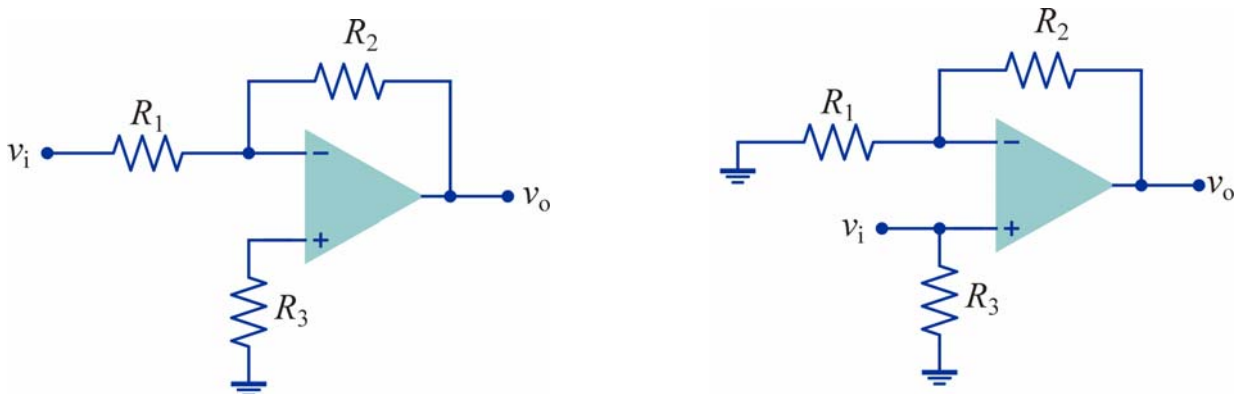
- Per gli amplificatori operazionali realizzati con transistori bipolari i valori tipici delle correnti di polarizzazione sono dell'ordine di 100 nA, mentre il valore della corrente di offset è dell'ordine di 10 nA
- Sia nel caso dell'amplificatore invertente, sia in quello dell'amplificatore non invertente, l'effetto delle correnti di polarizzazione sull'uscita può essere determinato mediante questo circuito



9

## Correnti di polarizzazione

- L'effetto delle correnti di polarizzazione sull'uscita può essere ridotto inserendo una resistenza tra l'ingresso non invertente e la massa

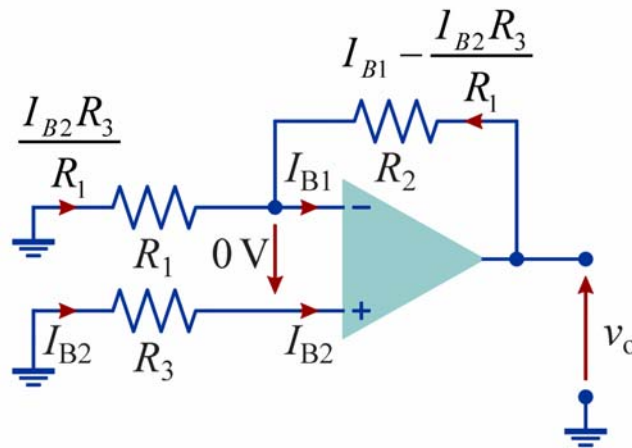


- La presenza di  $R_3$  non modifica il guadagno degli amplificatori
- Nel caso non invertente la resistenza di ingresso diviene uguale a  $R_3$

10

## Correnti di polarizzazione

- In questo modo, per entrambe le configurazioni si ottiene



$$v_0 = -I_{B2}R_3 + R_2 \left( I_{B1} - I_{B2} \frac{R_3}{R_1} \right) = \frac{R_1 R_2 I_{B1} - (R_1 + R_2) R_3 I_{B2}}{R_1}$$

11

## Correnti di polarizzazione

- Se le correnti di polarizzazione fossero uguali si potrebbe azzerare la tensione di uscita ponendo  $R_3 = R_1 // R_2$

$$v_0 = 0 \Rightarrow R_1 R_2 - (R_1 + R_2) R_3 = 0 \Rightarrow R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- In pratica, con questo valore di  $R_3$  si ottiene

$$|v_0| = R_2 |I_{B1} - I_{B2}| = R_2 I_{OS}$$

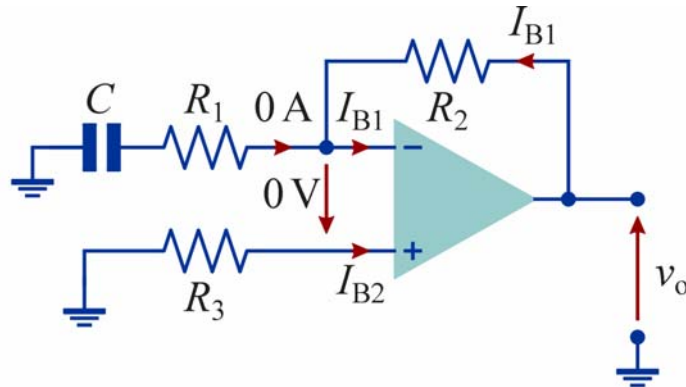
che, normalmente, corrisponde ad una riduzione della tensione di uscita di circa un ordine di grandezza

12

## Correnti di polarizzazione

- Se è presente un condensatore in serie a  $R_1$  la corrente  $I_{B1}$  non può circolare attraverso  $R_1$ , quindi la tensione in uscita è

$$v_0 = R_2 I_{B1} - I_{B2} R_3$$

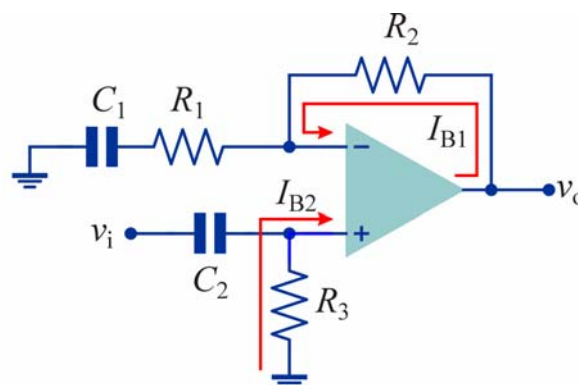


- In questo caso per ridurre l'effetto delle correnti di polarizzazione si deve avere  $R_3 = R_2$

13

## Correnti di polarizzazione

- E' importante notare che, affinché l'amplificatore operazionale possa funzionare correttamente, occorre che i suoi ingressi non risultino isolati in continua, ma che nel circuito siano presenti percorsi attraverso i quali possano circolare le correnti di polarizzazione
- Ad esempio nel circuito seguente la resistenza  $R_3$  è necessaria per consentire la circolazione di  $I_{B2}$ 
  - Se si elimina  $R_3$  l'ingresso non invertente rimane isolato in continua e l'amplificatore non funziona



14

## Slew-rate

- In un amplificatore operazionale reale la velocità di variazione della tensione di uscita non può superare un valore limite detto **slew-rate** (velocità di risposta)

$$SR = \max\left(\frac{dv_o}{dt}\right)$$

- I valori tipici sono dell'ordine dei V/ $\mu$ s
- Questa limitazione è dovuta a fenomeni non lineari (saturazione dello stadio di ingresso dell'amplificatore operazionale) e non è in relazione con la larghezza di banda finita dell'amplificatore operazionale

15

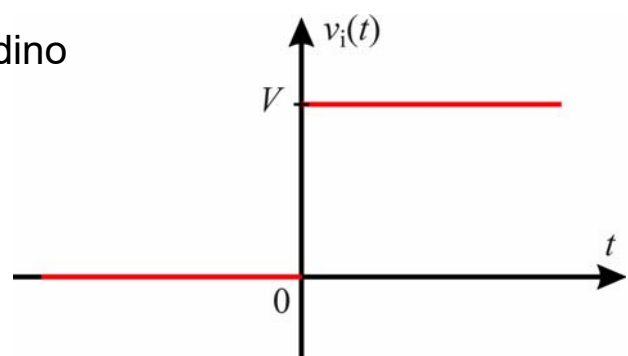
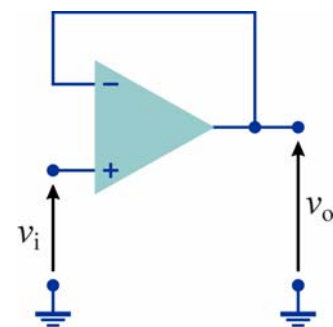
## Esempio

- Si considera un inseguitore di tensione ( $\beta = 1$ )
- La funzione di trasferimento è

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{UG}}}$$

- Si assume che l'ingresso sia un gradino di ampiezza  $V$

$$v_i(t) = V u(t)$$



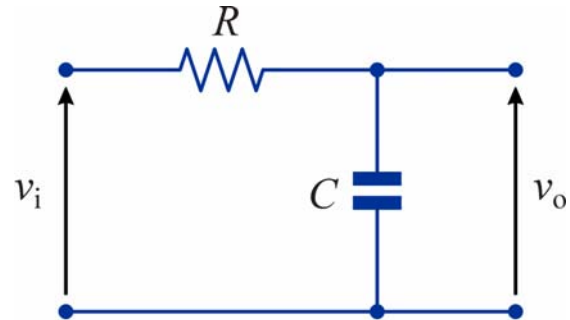
16



## Esempio

- La funzione di trasferimento dell'inseguitore coincide con quella di un circuito RC con costante di tempo  $\tau = RC = 1/\omega_{UG}$

$$\mathbf{V}_o = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \mathbf{V}_i = \frac{1}{1 + j\omega RC} \mathbf{V}_i$$



- Quindi anche la risposta ad un ingresso a gradino deve coincidere quella di un circuito RC elementare

$$v_0(t) = -V e^{-t/\tau} + V = V(1 - e^{-\omega_{UG}t})$$

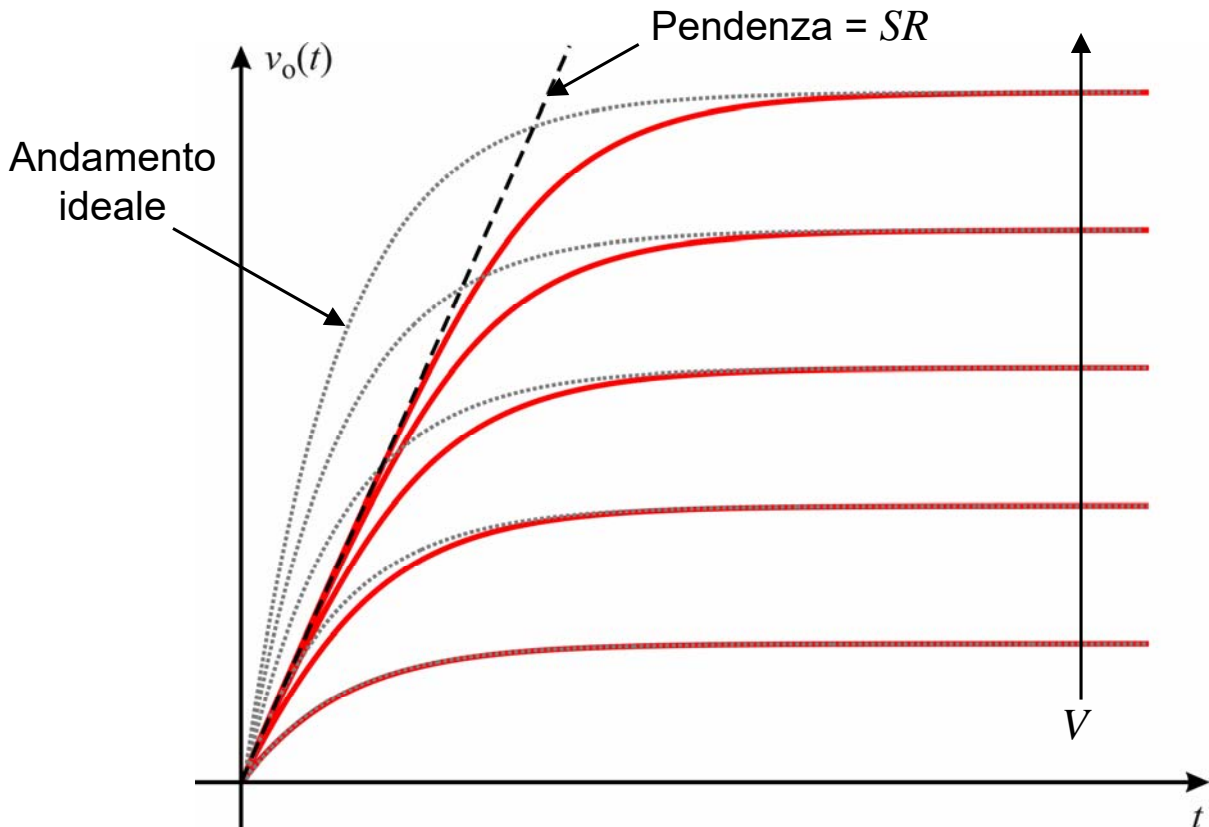
17

## Esempio

- Il valore massimo della derivata della tensione di uscita si ha per  $t = 0$  ed è  $\omega_{UG}V$
- Per valori di  $V$  tali che  $\omega_{UG}V \leq SR$  la tensione di uscita tende con legge esponenziale a  $V$
- Valori più elevati di  $V$  comporterebbero valori della derivata di  $v_o$  maggiori di  $SR$
- ➔ Nel tratto iniziale la tensione di uscita aumenta con la massima velocità possibile, quindi cresce linearmente con pendenza  $SR$

18

## Esempio



19

## Larghezza di banda a piena potenza

- Per una tensione sinusoidale  $v(t) = V_M \cos(\omega t)$  il valore massimo della derivata è

$$\max\left(\frac{dv}{dt}\right) = \omega V_M$$

- Si considera una tensione di uscita sinusoidale con ampiezza pari al valore della tensione di saturazione  $V_{\text{sat}}$
- Il valore massimo della frequenza per cui l'uscita non è distorta,  $f_M$ , deve soddisfare la condizione

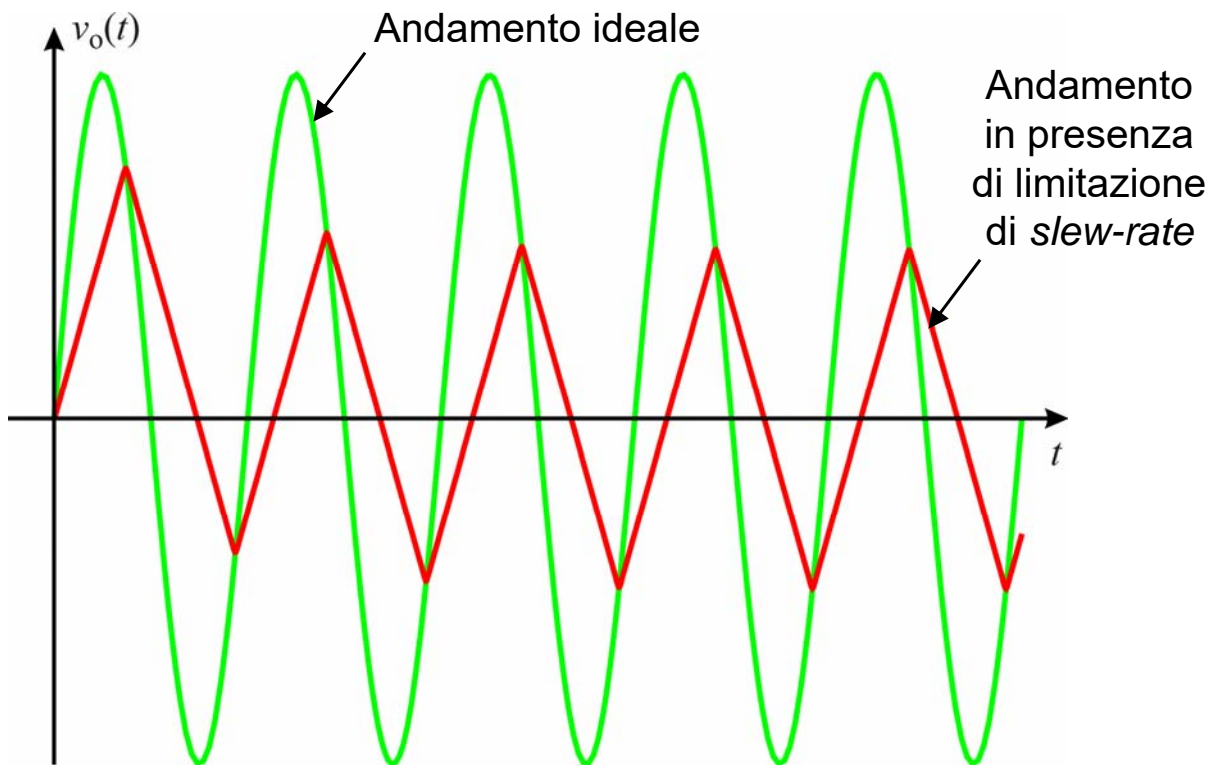
$$2\pi f_M V_{\text{sat}} = SR \Rightarrow f_M = \frac{SR}{2\pi V_{\text{sat}}}$$

- La frequenza  $f_M$  definisce la **larghezza di banda a piena potenza**
- Per valori maggiori di frequenza, l'ampiezza massima  $V_{\text{oM}}$  per cui l'uscita risulta indistorta è minore

$$2\pi f V_{\text{oM}} = 2\pi f_M V_{\text{sat}} = SR \Rightarrow V_{\text{oM}} = V_{\text{sat}} \frac{f_M}{f}$$

20

## Esempio



21

## Massima corrente in uscita

- La corrente di uscita di un amplificatore operazionale non può superare, in modulo, un valore limite tipicamente dell'ordine di qualche decina di mA
- Se il circuito richiede all'amplificatore operazionale una corrente maggiore, l'amplificatore eroga la corrente massima mentre la tensione di uscita si riduce

22