

Amplificatori operazionali

Parte 4

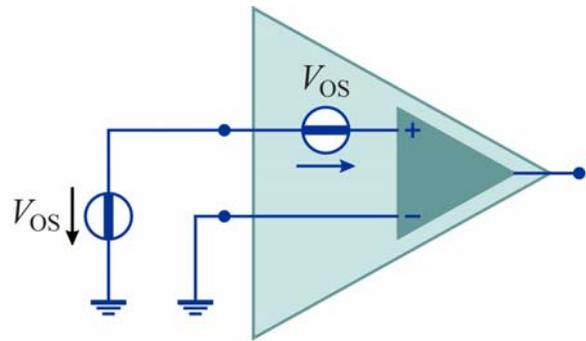
www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 31-5-2017)

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

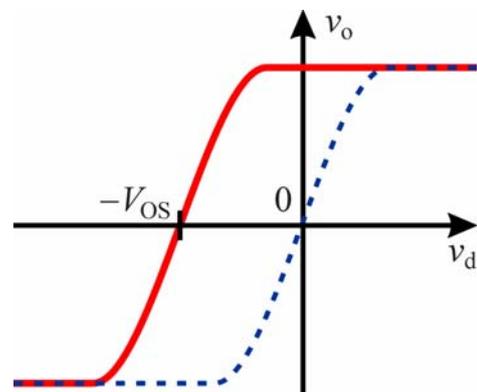
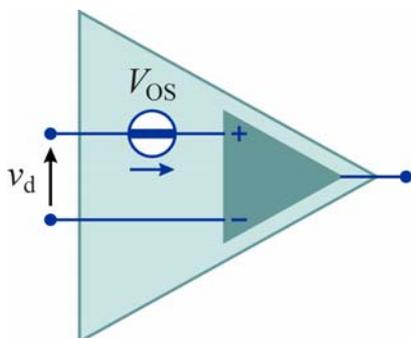
- Se le tensioni applicate agli ingressi di un amplificatore operazionale sono nulle, anche la tensione di uscita dovrebbe essere nulla
 - In pratica, a causa di asimmetrie dello stadio di ingresso, in queste condizioni si ottiene una tensione diversa da zero
 - La tensione di uscita può essere azzerata 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

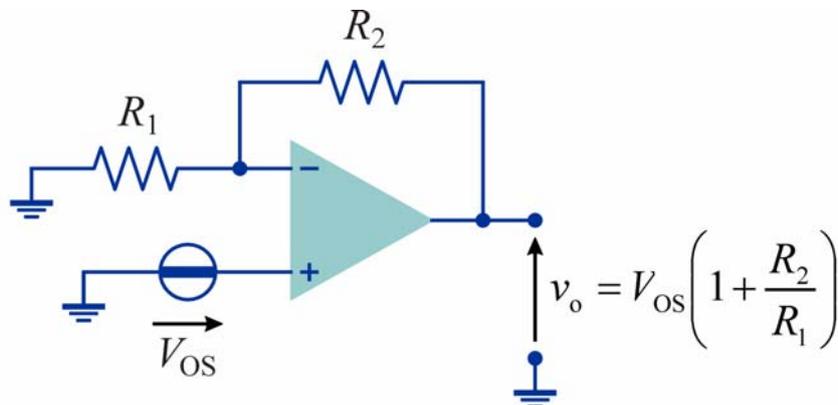


- ➔ Quando l'operazionale si trova nella regione lineare, la tensione v_d non è nulla ma è uguale a $-V_{OS}$

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

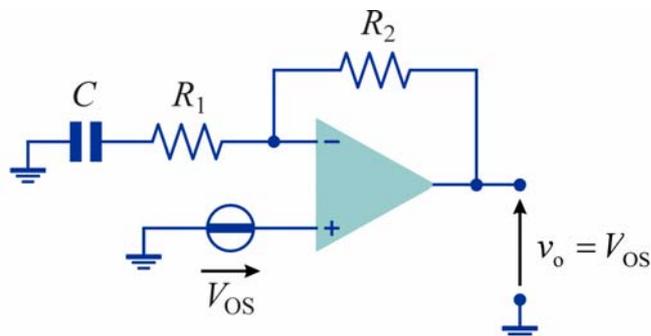


- ➔ La tensione in uscita è uguale alla tensione di offset moltiplicata per il guadagno corrispondente all'amplificatore non invertente

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

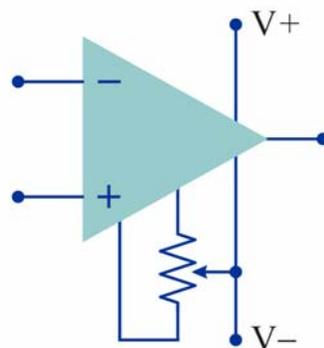


$$f_t = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

6

Tensione di offset

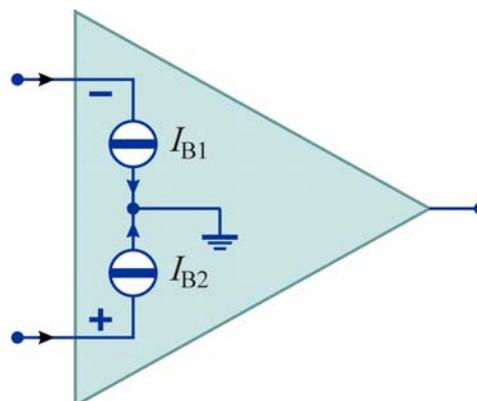
- Di solito gli amplificatori operazionali dispongono di una coppia di terminali aggiuntivi a cui può essere collegato un circuito esterno per la compensazione della tensione di offset (la cui struttura dipende dal tipo di operazionale considerato)
- Nel caso più comune questi terminali vengono collegati 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



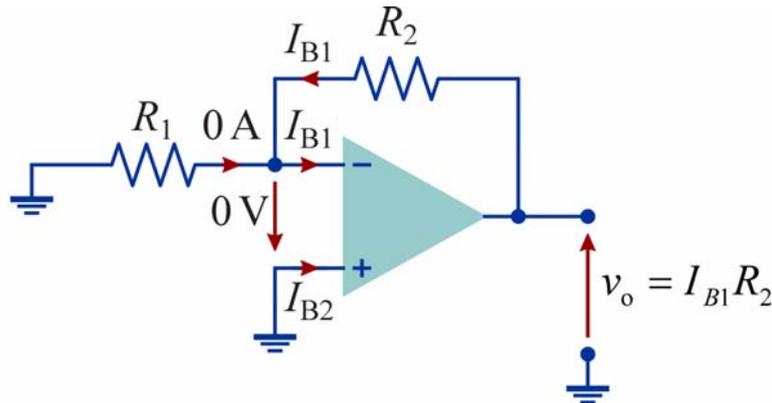
$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

è detta **corrente di offset ingresso**

8

Correnti di polarizzazione

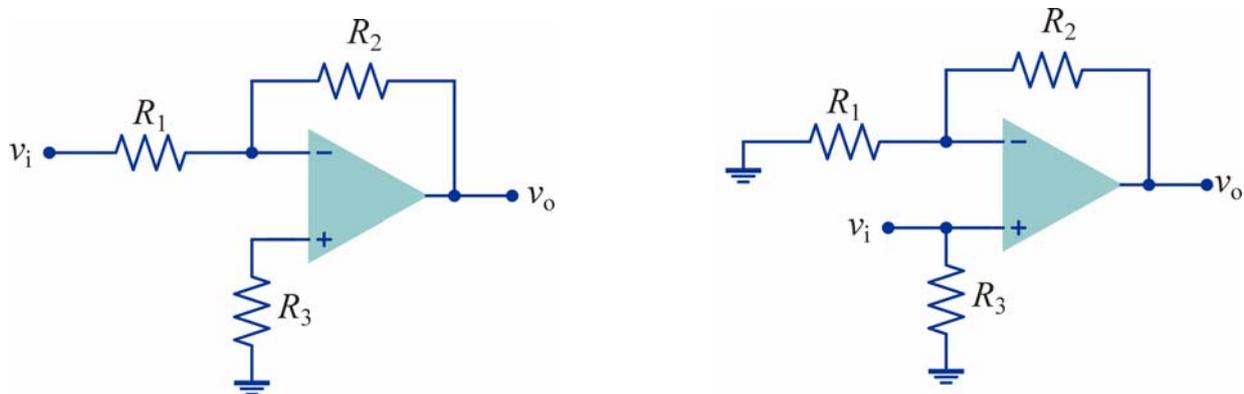
- Per gli amplificatori operazionali realizzati con transistori bipolari i valori tipici delle correnti di polarizzazione sono dell'ordine di 100 nA, mentre il valore della corrente di offset è dell'ordine di 10 nA
- Sia nel caso dell'amplificatore invertente, sia in quello dell'amplificatore non invertente,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

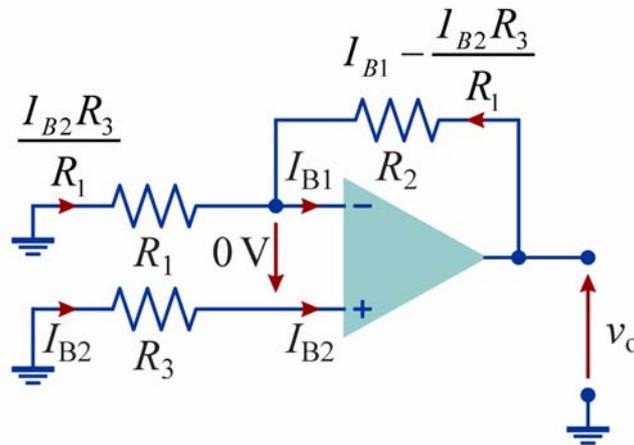


- La presenza di R_3 non modifica il guadagno degli amplificatori
- Nel caso non invertente la resistenza di ingresso diviene uguale a R_3

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

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

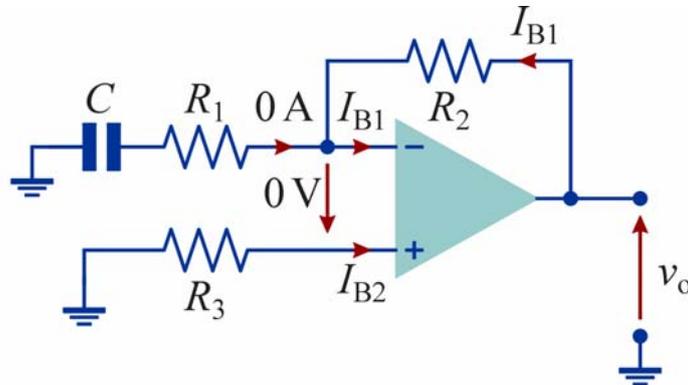
che, normalmente, corrisponde ad una riduzione della tensione di uscita di circa un ordine di grandezza

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

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

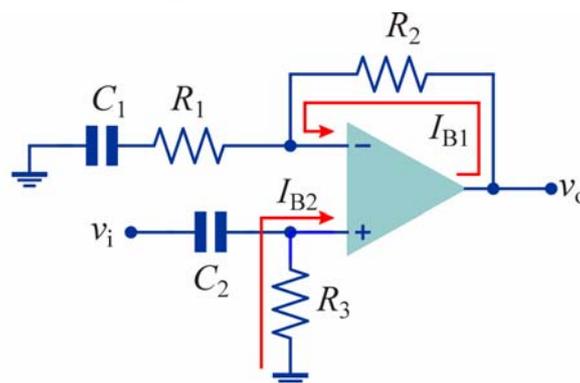


- In questo caso per ridurre l'effetto delle correnti di polarizzazione si deve avere $R_3 = R_2$

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/ μ 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

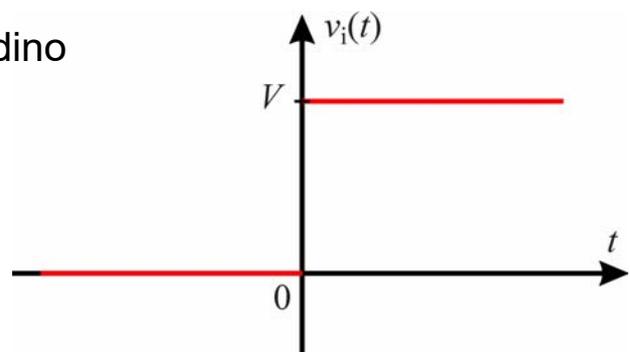
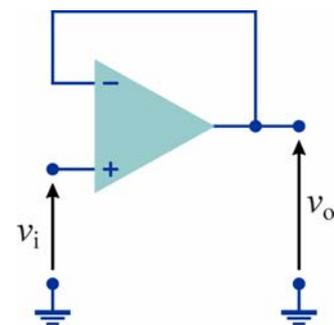
Esempio

- 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

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

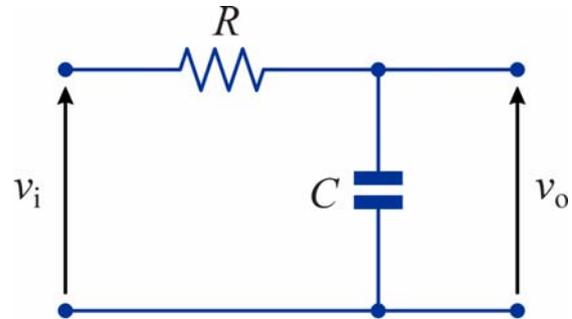


16

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

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

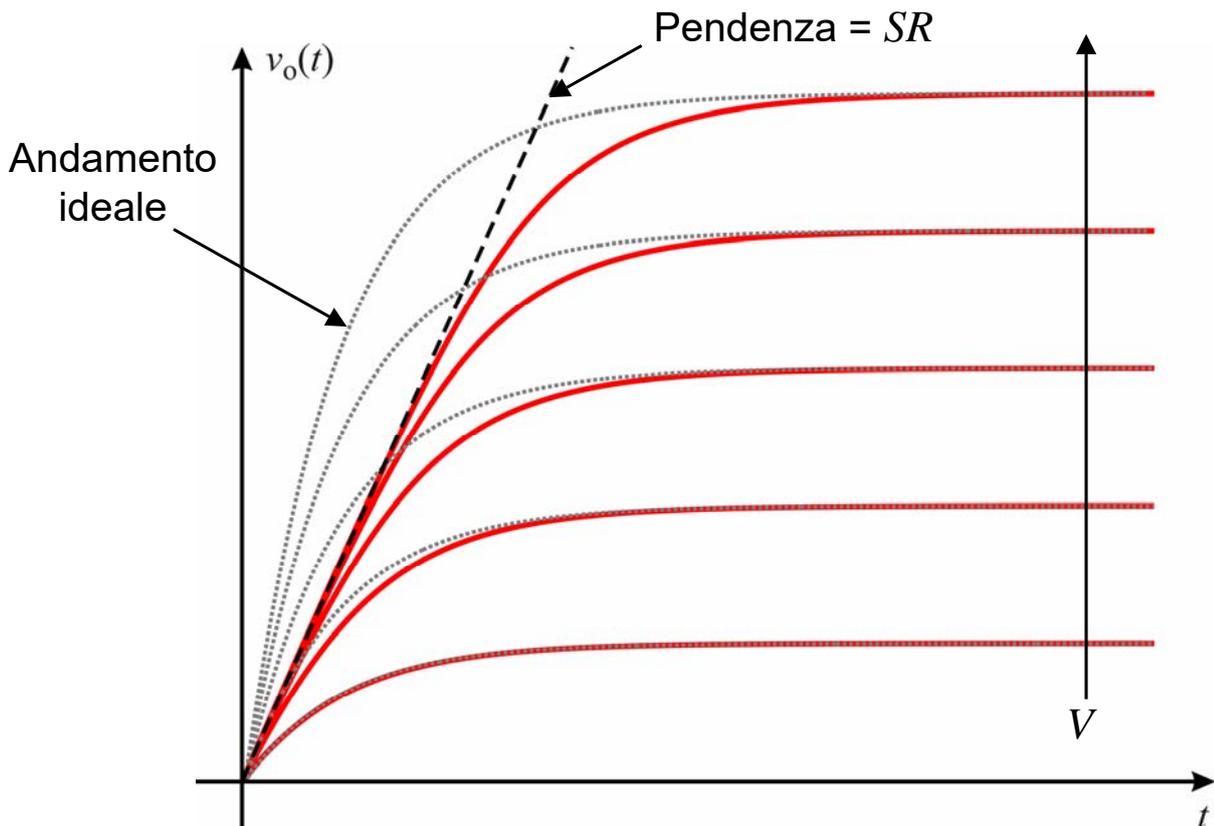
17

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_{sat}
- Il valore massimo della frequenza per cui l'uscita non è distorta, f_M , deve soddisfare la condizione

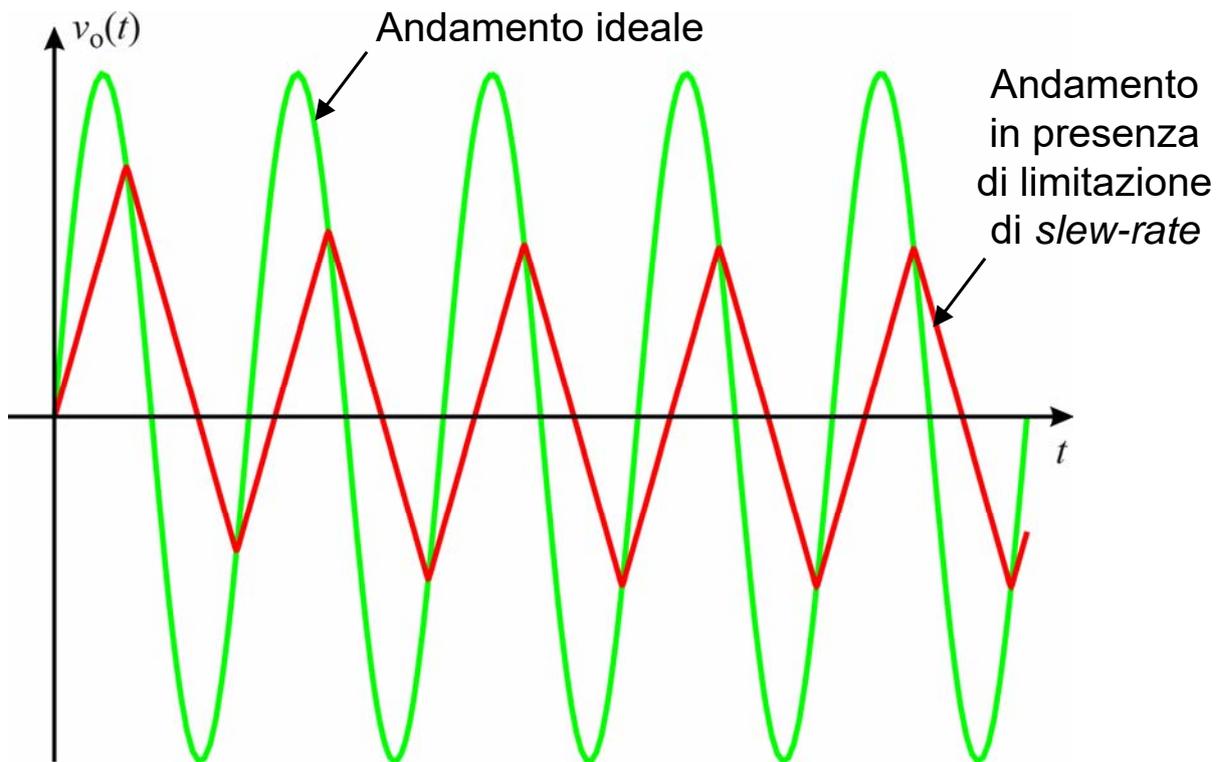
$$2\pi f_M V_{\text{sat}} = SR \Rightarrow f_M = \frac{SR}{2\pi V_{\text{sat}}}$$

- La frequenza f_M definisce la **larghezza di banda a piena potenza**
- Per valori maggiori di frequenza, l'ampiezza massima V_{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