

Amplificatori OPERAZIONALI

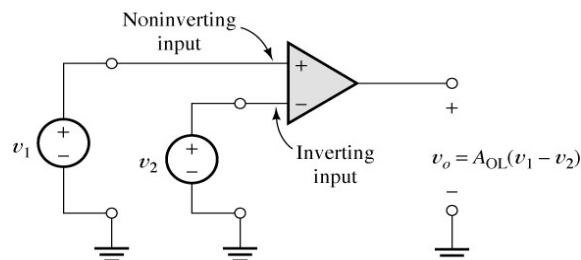
- L'**amplificatore operazionale (op amp)** è usato in un'ampia varietà di applicazioni: inizialmente era usato in sistemi analogici per integrare e sommare il segnale (da cui il nome *operazionale*)
- Gli op amp sono molto utili quando una parte del segnale di uscita ritorna all'ingresso attraverso **una rete di retroazione**: in queste condizioni (il segnale d'uscita scorre di nuovo verso l'ingresso) si dice che il circuito sta operando in condizioni di **anello chiuso (closed loop)**
- Se la retroazione non è presente, l'op amp opera ad **anello aperto (open loop)**
- **Op amp + reti di retroazione resistiva** formano diversi tipi di circuiti amplificatori, le cui caratteristiche **non dipendono** (significativamente) dai parametri dell'op amp

1

Amplificatori operazionali ideali

- L'**amplificatore operazionale ideale** è un amplificatore differenziale con le seguenti caratteristiche:
 - impedenza di ingresso infinita
 - guadagno ad anello aperto A_{OL} infinito per il segnale differenziale, $v_{id} = v_1 - v_2$
 - guadagno nullo per il segnale di modo comune, v_{icm}
 - impedenza di uscita nulla
 - larghezza di banda infinita

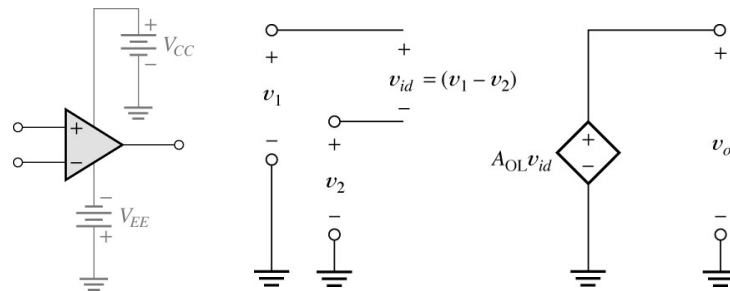
$$v_{icm} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$



2

Amplificatori operazionali ideali /2

- Il circuito equivalente per l'**amplificatore operazionale ideale** è un semplice generatore di tensione controllato in tensione, il cui guadagno ad anello aperto A_{OL} è molto elevato e può essere considerato infinito
- L'amplificatore operazionale deve essere alimentato (spesso, tuttavia, i generatori di tensione DC non sono mostrati)



3

Analisi circuiti con op amp

- Gli amplificatore operazionale sono usati quasi sempre con reti di **retroazione negativa**, in cui il segnale di uscita è riportato a un ingresso in **opposizione al segnale sull'altro ingresso**
- È possibile anche avere circuiti a **retroazione positiva**, in cui il segnale di uscita viene riportato a un ingresso **sommandolo** a quello sull'altro ingresso
- I circuiti che contengono amplificatori operazionale possono essere analizzati assumendo alcune ipotesi semplificative
- Se l'op amp ha guadagno A_{OL} infinito \Rightarrow un segnale di ingresso molto piccolo risulta in una segnale di uscita molto ampio \Rightarrow la retroazione negativa tende a riportare all'ingresso invertente l'ampio segnale in uscita, annullando il segnale differenziale in ingresso $\Rightarrow v_{id} = 0$

4

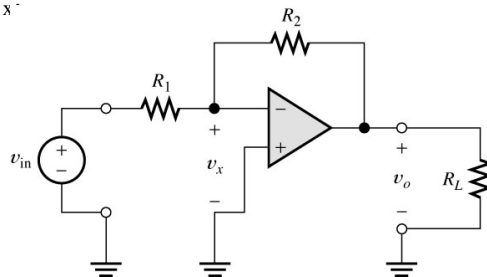
Analisi circuiti con op amp /2

- Dato che se $A_{OL} \rightarrow \infty$, $v_{id} = 0$ ciò implica che anche la corrente di ingresso è nulla
- Per analizzare correttamente i circuiti con op amp ideali, è utile ricordare i tre passi seguenti:
 1. verificare che la retroazione negativa sia presente (di solito, è una semplice rete resistiva che connette l'uscita all'ingresso noninvertente)
 2. assumere che la **tensione differenziale in ingresso (massa virtuale) e la corrente di ingresso del op amp siano nulle (vincoli del nodo sommatore)**
 3. Applicare le leggi standard di analisi dei circuiti (Kirchoff, Ohm) per risolvere il circuito e calcolare le quantità di interesse

5

Amplificatore invertente

- Calcoliamo il guadagno di anello chiuso $A_v = v_o / v_{in}$ del circuito in figura (**amp. invertente**) assumendo un op amp ideale e utilizzando i vincoli del nodo sommatore
- 1. La retroazione (tramite R_2) è negativa = il segnale $v_x > 0$ (< 0) all'ingresso determina il segnale $v_o < 0$ (> 0) in uscita, che ritorna in parte all'ingresso tramite R_2 , controbilanciando v_x :
in questo modo,
 v_o si fissa al valore necessario affinché all'ingresso dell'op amp ci sia tensione (v_x) nulla



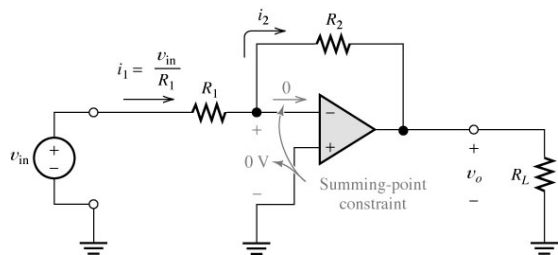
6

Amplificatore invertente /2

2. Assumiamo i vincoli di nodo sommatore (vedi figura) e
3. analizziamo il circuito (applicando le leggi Kirchhoff e Ohm)

$$i_1 = \frac{v_{in}}{R_1} \rightarrow i_2 = i_1 \rightarrow v_o = -R_2 i_2 \rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- Il guadagno ad anello chiuso (se l'op amp è considerato ideale) dipende solo dalle resistenze (cosa desiderabile dato le resistenze hanno valori stabili e precisi)
- $A_v < 0 \Rightarrow$ amp. invertente



7

Amplificatore invertente /3

- Impedenza di ingresso = R_1
- La tensione di uscita è indipendente dal carico R_L : l'uscita agisce come un generatore ideale di tensione, che ha (ovviamente) resistenza di uscita R_o nulla

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_1} = R_1 \qquad v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{in}$$

- Le caratteristiche dell'amp. invertente sono influenzate (nella maggiorparte dei casi in modo non significativo) dalle **non-idealità dell'op amp**
- La condizioni degli ingressi del op amp viene detta **cortocircuito virtuale** (virtuale perchè non vi scorre corrente)

8

Analisi di un altro amp. invertente

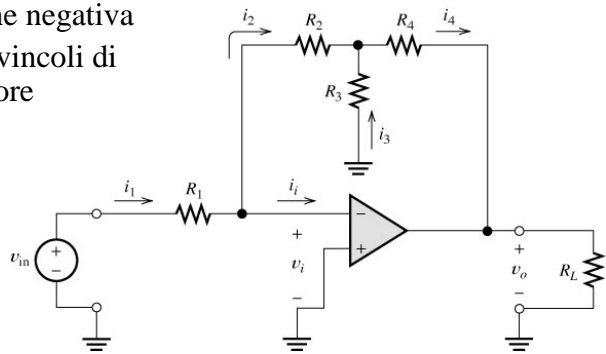
- L'amp. invertente in figura permette di ottenere un guadagno di ampiezza maggiore senza ricorrere agli ampi valori di resistenza necessari nelle configurazioni standard
- Calcoliamo il guadagno di anello chiuso, le impedenze di ingresso e d'uscita nell'ipotesi di op amp ideale
- C'è retroazione negativa
- Utilizziamo i vincoli di nodo sommatore

$$v_{in} = 0$$

$$i_{in} = 0$$

- Analisi circ. (Kirchoff)

$$i_1 = \frac{v_{in}}{R_1} = i_2$$



9

Analisi di un altro amp. invertente /2

- Tensione all'ingresso del nodo invertente è nulla
- Scriviamo l'equazione delle tensioni della maglia di uscita

$$R_2 i_2 - R_3 i_3 = 0 \quad i_2 + i_3 = i_4$$

$$v_o = -R_4 i_4 - R_3 i_3$$

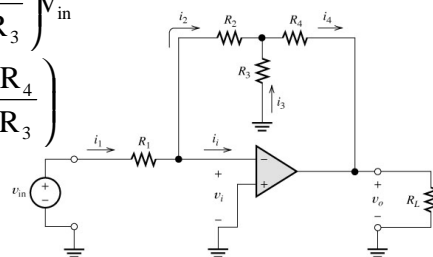
- Eliminando le correnti dalle equazioni precedenti $i_2 = \frac{v_{in}}{R_1}$

$$i_3 = \frac{R_2}{R_1 R_3} v_{in}; i_4 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} \right) v_{in}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = - \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right)$$

- Resistenza di ingresso:

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_1} = R_1$$



10

Analisi di un altro amp. invertente /3

- Tensione di uscita e guadagno ad anello chiuso **non dipendono** dalla resistenza di carico: l'uscita si comporta come un generatore ideale di tensione ($R_o=0$)
- Se $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega \Rightarrow A_v = -120$
- Utilizzando l'amplificatore invertente *standard* $A_v = -\frac{R_2}{R_1}$ e supponendo che $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, serve una resistenza $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$ per ottenere lo stesso guadagno
 - con amplificatore invertente standard $\sum R = 121 \text{ k}\Omega$
 - con questo nuovo amp. invertente $\sum R = 22 \text{ k}\Omega$
- Visto che il valore complessivo delle resistenze è proporzionale all'area di circuito consumata, e quest'ultima è proporzionale al suo costo, il nuovo amp. invertente (a parità di guadagno) è la soluzione migliore, in quanto il suo *costo* è 1/6 dell'altro

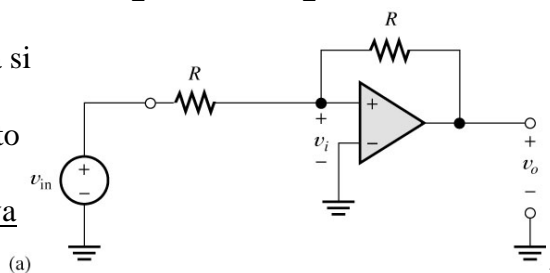
11

Retroazione positiva

- Se scambiamo i terminali di ingresso dell'amp. invertente classico, otteniamo un circuito che ha retroazione positiva ed è chiamato **trigger di Schmitt**
- Posto che la corrente entrante nell'op amp è nulla, sostituendo a $v_o = A_{OL}v_i$ e risolvendo l'eqz. per v_i

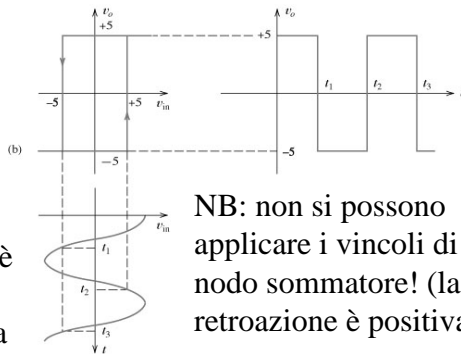
$$\frac{v_i - v_{in}}{R} = \frac{v_i - v_o}{R} \rightarrow v_i = \frac{1}{2}(v_{in} + v_o) = \frac{1}{2}(v_{in} + A_{OL}v_i)$$

- Il segnale di uscita si somma a quello di ingresso (contributo positivo) \Rightarrow retroazione positiva



Retroazione positiva /2

- Supponiamo che v_i sia piccolo e $>0 \Rightarrow v_o >0$ (ingresso è sul nodo noninvertente) \Rightarrow metà v_o ritorna ingresso e si somma a v_i : di conseguenza, v_o aumenta molto rapidamente
- Un op amp **reale** non può produrre una tensione di uscita infinita: v_o non può eccedere un valore fissato (es: ± 5 V)
- Se $v_o = 5$ V (op amp non funziona da amplificatore), finché $v_{in} > -5$, v_o resta a $v_o = 5$ V (dato che $v_i > 0$ V); quando $v_{in} < -5$, $v_i < 0$ V e v_o satura a -5 V
- Il trigger di Schmitt non è un amplificatore, e modifica la forma d'onda



NB: non si possono applicare i vincoli di nodo sommatore! (la retroazione è positiva)

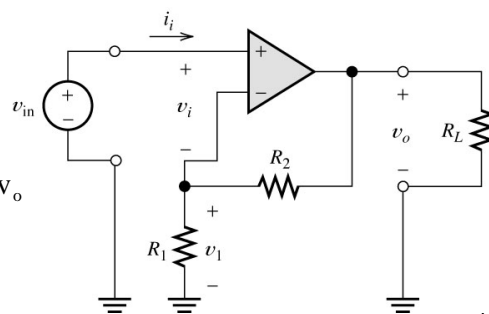
Amplificatore noninvertente

- Come fatto in precedenza, per analizzare il circuito assumiamo che l'op amp sia ideale
- Controlliamo che la retroazione sia negativa: se $v_i > 0$, il segnale in uscita sarà elevato e $v_o > 0$: parte di v_o (v_1) ritorna all'ingresso invertente ed, essendo $v_i = v_{in} - v_1$, v_i diminuisce
- L'op amp e la rete di retroazione tendono a portare $v_i = 0 \Rightarrow$ **retroazione negativa**
- Applichiamo i vincoli di nodo sommatore ($i_i = 0$ e $v_i = 0$)

$$v_1 = v_{in} \quad v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

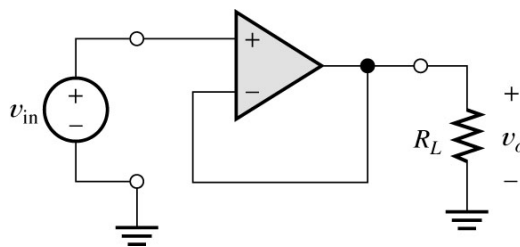
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



14

Amplificatore noninvertente /2

- L'amplificatore è noninvertente, dato $A_v > 0$
- Resistenza di ingresso $R_{in} = R_{in,amp} \rightarrow \infty$
- Resistenza di uscita $R_o = 0V$ (il guadagno è indipendente dal carico)
- Considerando ideale l'op amp, **l'amplificatore noninvertente è ideale**
- Il circuito in figura è detto **inseguitore di emettitore** (amp. inv. con $R_2=0$; $R_1=\infty$)
- $A_v = 1$



15

Progettazione di amplificatori

- Molti amplificatori possono essere progettati tramite con un op amp + rete resistiva di retroazione, anche se
 - **non-idealità** dell'amplificatore e
 - le **tolleranze dei resistori** possono portare a imprecisione del guadagno ad anello chiuso
- Il progetto di un amp. si riduce alla scelta della configurazione e dei valori delle resistenze di feedback
 - resistenze (con tolleranze 1%, 5%, 10%) sono disponibili in un range da $10\ \Omega$ - $10\ M\Omega$ sia in forma integrata che come componente discreto (occupano molta area, per cui vi si fa ricorso solo come ultima risorsa)

16

Resistenze integrate

- Una resistenza è costituita da uno strato di materiale conduttore, contattato alle estremità, di lunghezza L e larghezza W : un parametro importante è la **resistenza di un quadrato** R_{\square} del materiale in cui è costruita la resistenza
- Tipicamente, i resistori integrati occupano molta più area dei transistor: $R=10\text{ k}\Omega$ occupa $1000\text{ }\mu\text{m}^2$, mentre l'area di un MOSFET $= 2\text{ }\mu\text{m}^2$
- Per questo motivo, si cerca sempre di ridurre il numero ed il valore delle resistenze nei circuiti integrati

Un resistore che ha $L/W = 3$ ha resistenza $R = 3R_{\square}$.



$$\frac{L}{W} = 3$$

$$R = 3R_{\square}$$

17

Esempio: progetto amplificatore

- Progettare un amp. noninvertente $A_v=10$: il segnale di ingresso sta nel range $-1/1\text{ V}$, e la tolleranza resistenze 5%
- $$A_v = 10 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \longrightarrow R_2 = 9R_1$$
- Resistenze ottimali dell'ordine di 1-100 k Ω , tali da indurre correnti su R_1 e R_2 di qualche mA
 - Vantaggi/svantaggi resistenza piccole (Ω): corrente su R_1 e R_2 molto elevata, che l'amplificatore non riesce a fornire; consumo elevato nei sistemi a batteria; risparmio di area
 - Vantaggi/svantaggi resistenza grandi (M Ω): consumo eccessivo d'area; come componenti discreti sono instabili (umidità); evidenziano non-idealità op amp; effetto antenna (tendono a ricevere segnali indesiderati da circuiti vicini per accoppiamento capacitivo)

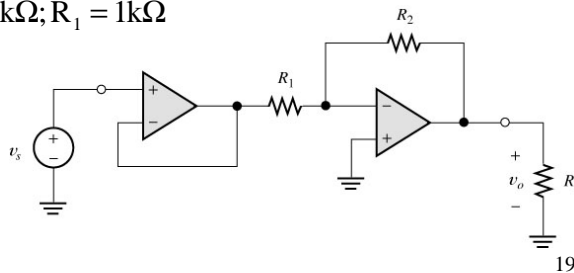
18

Esempio: progetto amp. invertente

- Vincoli: $A_V = -10$; $R_{in} \geq 500 \text{ k}\Omega$; $R_{feedback} < 10 \text{ k}\Omega$
- Stimare la tolleranza delle resistenze affinché A_V possa variare al massimo del 5% rispetto al valore nominale
- Considerando la configurazione invertente classica, $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$ e, perchè $A_V = -10$, $R_2 = 5 \text{ M}\Omega$ (**troppo grandi**)
- Un approccio migliore consiste nell'usare 2 op amp (1 in configurazione invertente + 1 come inseguitore di emettitore)

$$R_{in} \rightarrow \infty; R_2 = 10 \text{ k}\Omega; R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

Tolleranza
 $R < 2.5\%$
 (soddisfatta
 facilmente in
 IC)



19

Non-idealità in regione lineare

- Gli amplificatori operazionali reali si discostano dalle caratteristiche degli op amp ideali. Queste **nonidealità** si possono raggruppare in tre gruppi:
 1. **Proprietà non-ideali** in regione lineare
 2. **Caratteristiche non-lineari**
 3. **DC offset**
- 1. **PROPRIETÀ NON-IDEALI**
 - Impedenza di ingresso (an. aperto) finita ($1 \text{ M}\Omega - 10^{12} \Omega$)
 - Impedenza di uscita (anello aperto) non nulla ($1 - 100 \Omega$)
 - Le impedenze di ingresso e di uscita ad anello chiuso possono essere diverse da quelle ad anello aperto: l'effetto della retroazione può essere sia quello di ridurle che di aumentarle

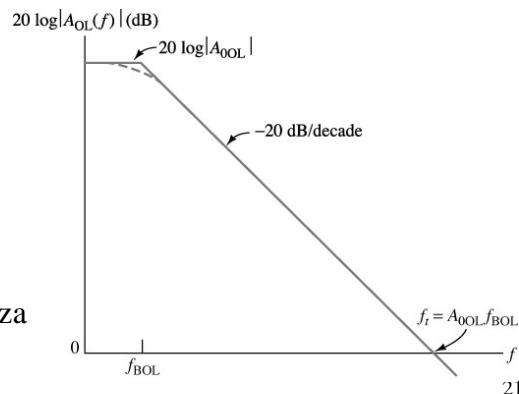
20

Non-idealità in regione lineare /2

- Gli amplificatori operazionali reali hanno guadagno **che cala ad alte frequenze ed in DC è elevato ma finito (10^4 - 10^6)**
- Nell'intervallo di frequenze utile, il guadagno dell'op amp ad anello aperto ha un solo polo significativo (**polo dominante**)

$$A_{OL}(f) = \frac{A_{0OL}}{1 + j(f/f_{BOL})}$$

- A_{0OL} = guadagno DC ad anello aperto
- f_{BOL} = frequenza di taglio
- $f_t = A_{0OL} \cdot f_{BOL}$ frequenza di guadagno unitario



21

Effetto nonidealità su amp. noninvertente

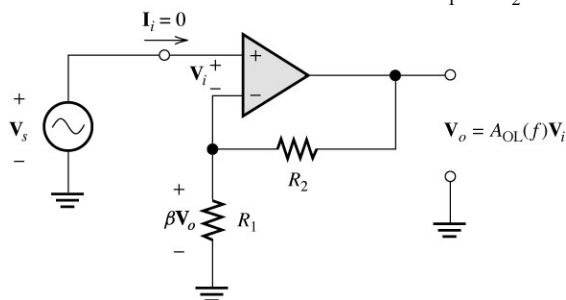
- L'op amp è ideale ($R_{in} \rightarrow \infty$, $I_i = 0$), eccetto per il fatto che il guadagno è finito e funzione della frequenza (tensioni e correnti sono indicate dai rispettivi fasori)
- Applico Kirchoff alla maglia di ingresso $V_s = V_i + \beta V_o$

- Guadagno di anello chiuso $V_o = A_{OL} V_i$ $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

$$A_{CL} = \frac{1}{\beta + 1/A_{OL}}$$

$$\lim_{A_{OL} \rightarrow \infty} A_{CL} = \frac{1}{\beta}$$

$$= 1 + \frac{R_1}{R_2}$$



22

Effetto nonidealità su amp. noninver. /2

- Sostituendo l'espressione del guadagno di anello aperto (in funzione della frequenza) in quella di anello chiuso

$$A_{CL}(f) = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}} = \frac{\frac{A_{0OL}}{1 + j(f/f_{BOL})}}{1 + \frac{\beta A_{0OL}}{1 + j(f/f_{BOL})}} = \frac{\frac{A_{0OL}}{1 + \beta A_{0OL}}}{1 + j \frac{f}{f_{BOL}(1 + \beta A_{0OL})}}$$

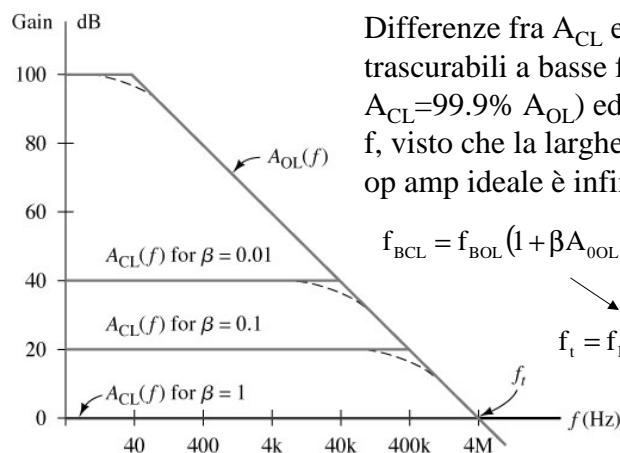
- Assumendo $f_{BCL} = f_{BOL}(1 + \beta A_{0OL})$ $A_{0CL} = \frac{A_{0OL}}{1 + \beta A_{0OL}}$
- Il guadagno ad anello chiuso prende la stessa forma di quella ad anello aperto, con diversi valori per frequenza di taglio e guadagno in DC

$$A_{0CL} = \frac{A_{0CL}}{1 + j(f/f_{BCL})}$$

23

Es: guadagno ad anello chiuso in frequenza

- Dati op amp: $A_{0OL} = 10^5$; $f_{BOL} = 40$ Hz
- Rete di retroazione: $\beta = 1, 0.1, 0.01$



Differenze fra A_{CL} e A_{OL} sono trascurabili a basse f (per $\beta=0.01$, $A_{CL}=99.9\% A_{OL}$) ed importanti ad alte f , visto che la larghezza di banda di un op amp ideale è infinita

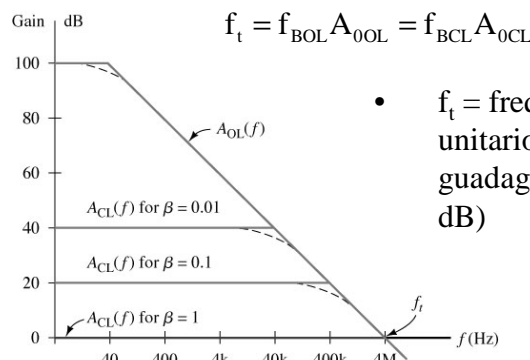
$$f_{BCL} = f_{BOL}(1 + \beta A_{0OL}) \quad A_{0CL} = \frac{A_{0OL}}{1 + \beta A_{0OL}}$$

$$f_t = f_{BOL} A_{0OL} = f_{BCL} A_{0CL}$$

24

Prodotto guadagno·banda = costante

- Il prodotto del guadagno DC e della larghezza di banda di un amplificatore invertente è costante e indipendente da β
- La retroazione negativa riduce il guadagno DC ed estende la larghezza di banda



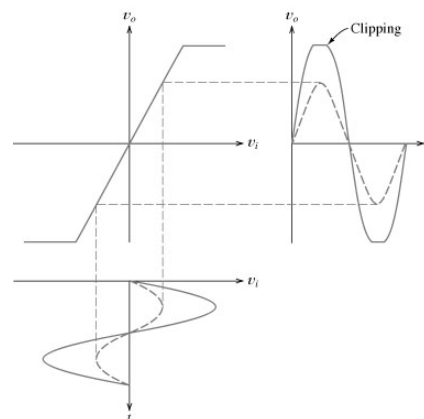
- f_t = frequenza di guadagno unitario (frequenza a cui il guadagno taglia l'asse a 0 dB)

$$f_{BCL} = \frac{f_t}{A_{0CL}}$$

25

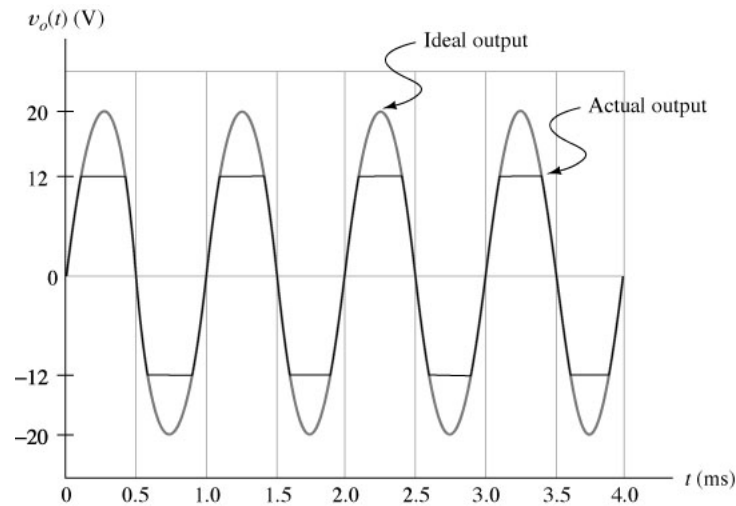
2. Limiti segnale d'uscita

- Ci sono molti **modi non-lineari** in cui un op amp reale può operare: il segnale di uscita v_o e la corrente che l'op amp può fornire la carico hanno un limite massimo e minimo
- Se il segnale di ingresso è così ampio che il segnale d'uscita amplificato eccede uno di questi limiti, v_o satura al suo valore massimo (**clipping**)
- Tale valore dipende da: resistenza di carico, alimentazione, tipo op amp (es: -12/12V se alimentazione -15/15V)



26

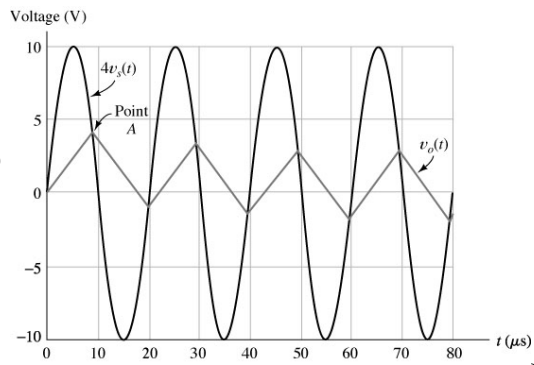
Es: *clipping* segnale d'uscita a $-12/12\text{V}$



27

2. Effetti non-lineari op amp reali

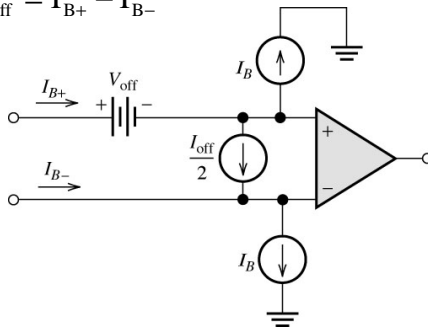
- Negli op amp reali la velocità con cui cambia il segnale di uscita è limitata: v_o non può aumentare o diminuire ad una velocità che eccede tale limite (**slew rate**, $\text{SR} \sim 10^5 \text{ V/s}$)
- Lo slew rate modifica la forma d'onda di v_o (es: da sinusoidale a triangolare)
- **Full-power bandwidth** = intervallo di frequenze per cui l'op amp produce in uscita un segnale non-distorto (si ricava da SR e $V_{o,\text{max}}$)



28

3. Offset DC

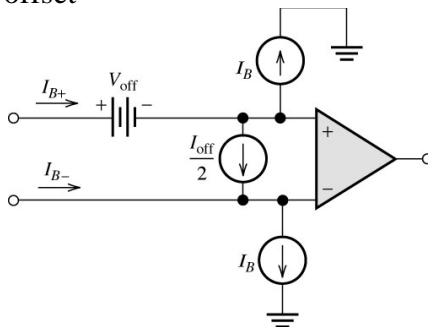
- Gli op amp sono accoppiati in diretta (correnti DC scorrono dentro e fuori elementi connessi ai terminali di ingresso)
 - Negli op amp **reali**, le **correnti DC I_{B+} e I_{B-}** scorrono dentro gli ingressi **noninvertente** ed **invertente**
1. **I_B** = corrente di polarizzazione (bias current) $I_B = \frac{I_{B+} + I_{B-}}{2}$
 2. **I_{off}** = corrente di offset $I_{off} = I_{B+} - I_{B-}$
 3. La tensione di uscita non è nulla per un ingresso nullo: l'op amp reale si comporta come un op amp ideale con in serie a uno dei 2 ingressi un **generatore di tensione di offset, V_{off}**



29

3. Offset DC /2

- Le tre imperfezioni (offset) in DC degli op amp reali si modellano mettendo all'ingresso di un op amp ideale i generatori di corrente (I_B e I_{off}) e di tensione V_{off}
- I_B (può essere <0) e $I_{off}/2$ (non prevedibile, $\sim 20-50\% I_B$) modellano le correnti di polarizzazione e di offset
- V_{off} modella la tensione di offset
- L'effetto complessivo di I_B , I_{off} e V_{off} è quello (sia per configurazioni invertente che noninvertenti) di aggiungere una **componente indesiderata DC di tensione al segnale di uscita voluto**

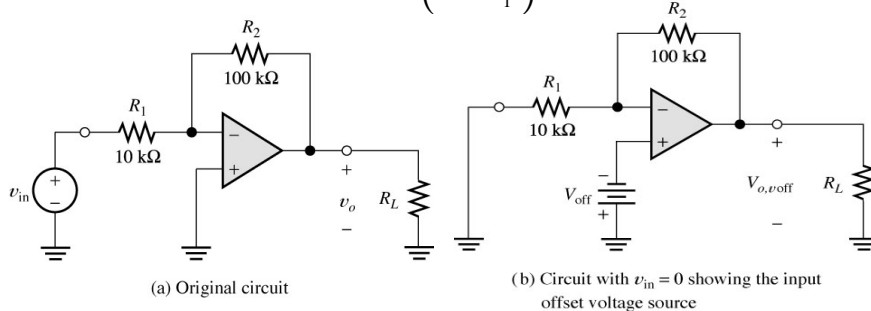


30

Esempio: offset DC massimo

- Calcoliamo il segnale di uscita v_o peggiore quando $v_{in}=0$
 - Dati op amp: $I_B=40\text{nA}$; $I_{off,max}=100\text{nA}$; $V_{off,max}=2\text{mV}$
 - Usiamo la sovrapposizione degli effetti
1. Effetto di V_{off} : il circuito equivalente è uguale ad un amp. noninvertente

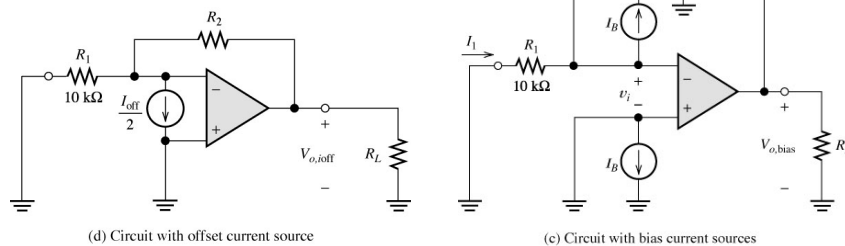
$$V_{o,off} = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{off} \quad V_{o,off,MAX} = -22 \div 22\text{mV}$$



31

Esempio: di offset DC massimo /2

2. Effetto di I_B (c): il gen. di corrente all'ingresso noninvertente è cortocircuitato e non ha effetto; utilizzando i vincoli di nodo sommatore ($v_i=0$; $i_i=0$) $\Rightarrow I_2 = -I_B$; $I_1=0 \Rightarrow V_{o,bias} = -R_2 I_2 - R_1 I_1 = R_2 I_B \Rightarrow V_{o,bias} = \sim 0-10\text{ mV}$
3. Effetto di I_{off} (d): seguendo lo stesso procedimento $V_{o,bias} = R_2 I_{off}/2 \Rightarrow V_{o,bias} = -2/2\text{ mV}$

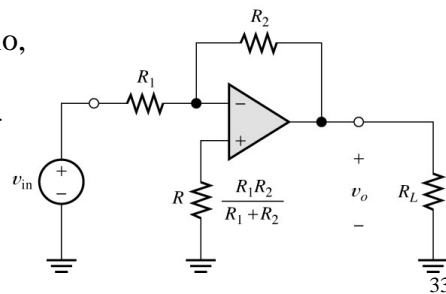


32

Esempio: di offset DC massimo /3

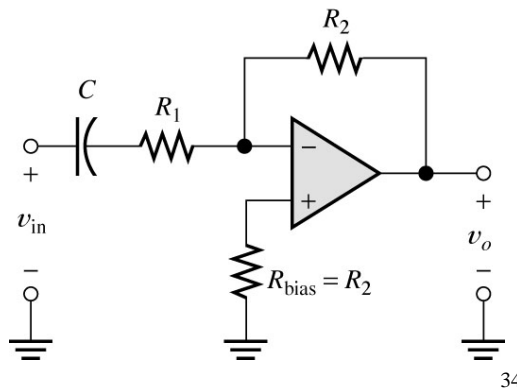
- Applicando la sovrapposizione degli effetti

$$V_o = V_{o,voff} + V_{o,bias} + V_{o,ioff}$$
 - Intervallo di valori:
 - $V_{o,max} = 22 + 10 + 2 = 34 \text{ mV}$
 - $V_{o,min} = -22 + 0 - 22 = -34 \text{ mV}$
- È possibile progettare i circuiti in modo da cancellare gli effetti delle correnti di polarizzazione: ad esempio, basta aggiungere la resistenza R all'ingresso non-invertente, per eliminare l'effetto di I_B senza modificare il guadagno dell'amp. inv.



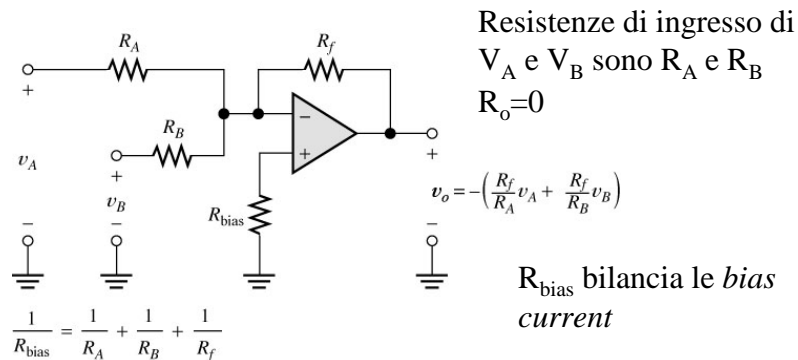
Circuiti amplificatori: invertente AC

- La versione dell'amp. invertente accoppiato in AC si può ottenere da quella classica aggiungendo in serie al resistore R_1 il **condensatore C**
- Il resistore R_{bias} per compensare le correnti di polarizzazione è uguale a R_2
- Questo tipo di amp. è utile quando il segnale di ingresso **contiene una componente DC indesiderata**



Circuiti amplificatori: sommatore

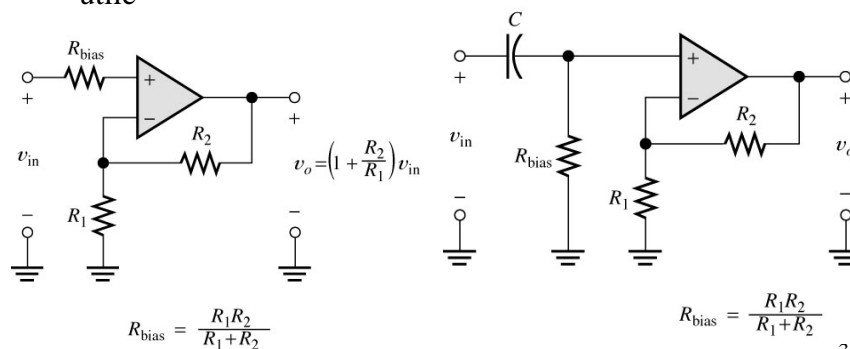
- L'amplificatore sommatore invertente in figura si analizza assumendo che l'op amp sia ideale (ipotesi classica nell'analisi di circuiti contenenti op amp)
- La tensione di uscita è proporzionale alla somma "pesata" delle tensioni di ingresso



35

Circuiti amplificatori: noninvertente

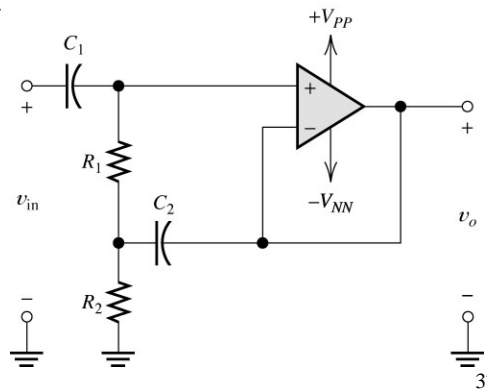
- Amp. noninvertente: $R_{in}=\infty$; $R_o=0 \Rightarrow$ amplificatore ideale
- Per accoppiare AC l'amp., va aggiunto il condensatore C
- R_{bias} ($=R_{in}$) è necessaria per scaricare a massa la corrente di polarizzazione (DC), altrimenti I_B caricherebbe C l'op amp fino a portarlo fuori dal suo range di funzionamento utile



36

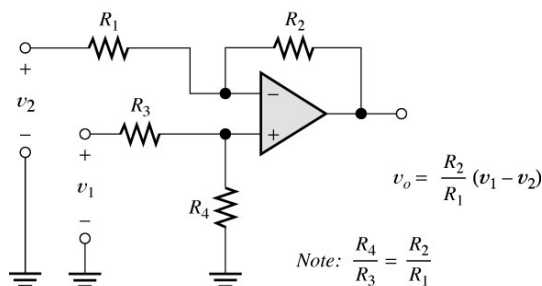
Circuiti amp.: inseguitore di emettitore

- Svantaggi di amp. noninvertente AC: $R_{in}=R_{bias}$ ($R_{in}=\infty$)
- L'inseguitore di emettitore in figura ha $R_{in}=\infty$ (considerando ideale l'op amp)
- A frequenza elevate per cui i condensatori possono essere approssimati con cortocircuiti: R_1 è connessa fra in e out
- $A_v=1 \Rightarrow v_o=v_{in}$
- su R_1 non cade tensione \Rightarrow la resistenza di ingresso è molto elevata $R_{in}=\infty$

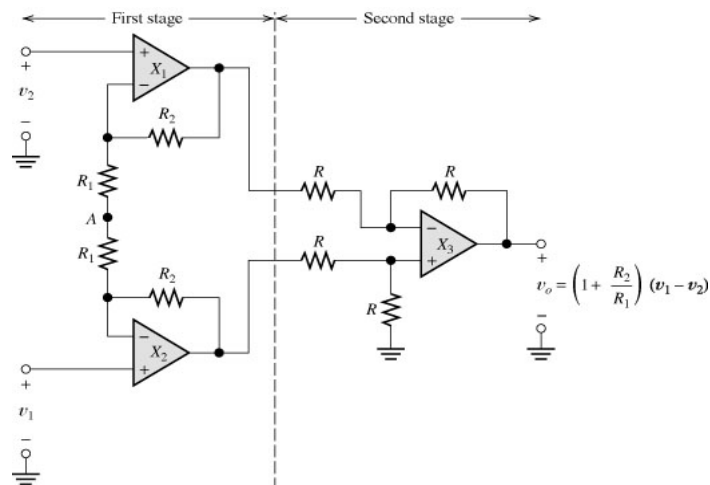


Circuiti amplificatori: differenziale

- Assumendo che l'op amp ideale e che $R_4/R_3 = R_2/R_1$, il segnale di uscita è **proporzionale alla differenza dei segnali di ingresso v_1-v_2**
- $A_{cm}=0$ (CMRR=0) se $R_4/R_3 = R_2/R_1$ (perfettamente)
- $R_4=R_2$ e $R_3=R_1$ minimizza l'effetto di I_B
- $R_{in,1}=R_4+R_3$; $R_{in,2}$ dipende da v_1 (la corrente indotta da v_1 in uscita ritorna all'ingresso 2 tramite la rete di retroazione)
- R_1 e R_3 possono essere progettate per contenere le resistenze dei generatori di tensione v_1 e v_2
- $R_o=0$



Circuiti amplificatori: differenziale per strumentazione



39

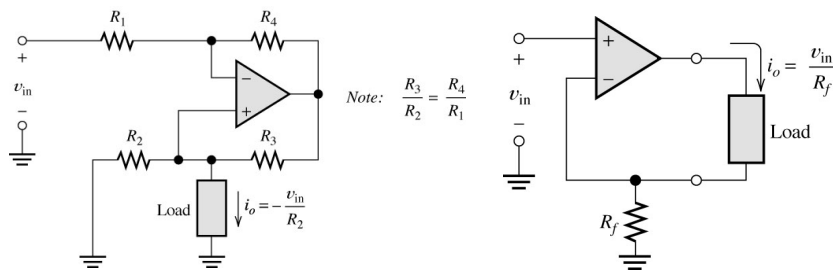
Amp. differenziale per strumentazione

- A differenza dell'amp. differenziale visto prima, il rapporto di reiezione di modo comune (**CMRR**) **non dipende più dalle resistenze interne**
- Il 2° stadio è un differenziale a guadagno unitario; il 1° stadio fornisce un alto guadagno al segnale differenziale:
 - se $v_1 = -v_2$ (s. **differenziale**), $v_A = 0 \Rightarrow$ gli op amp di ingresso (X_1 e X_2) sono configurati come amp. noninvertenti: $A_{v,diff} = 1 + R_2/R_1$ (=guadagno dell'intero amp visto che il 2o stadio ha guadagno unitario)
 - se $v_1 = v_2 = v_{cm}$ (s. di modo comune) \Rightarrow su $R_1 + R_1$ non c'è differenza di tensione \Rightarrow non scorre corrente su $R_1 + R_1$ e quindi, nemmeno su $R_2 \Rightarrow A_{v,cm} = 1$
- $A_{v,diff} = 1 + R_2/R_1$, $A_{v,cm} = 1 \Rightarrow$ riduzione s. di modo comune
- Ulteriori vantaggi: $R_{in(2)} = \infty$; $R_o = 0$; i resistori non devono essere perfettamente uguali

40

Convertitori tensione/corrente

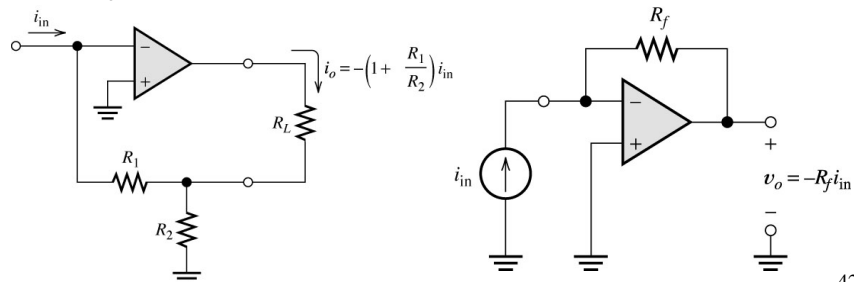
- Un convertitore tensione/corrente (figura a destra) è un circuito che forza una corrente su un carico (il carico è flottante se nessuna delle due estremità è connessa a massa)
- $R_{in}=\infty$; $R_o=\infty \Rightarrow$ è un amplificatore di transconduttanza
- Se il carico deve essere connesso a massa, si adotta la connessione a sinistra che ha $R_o=\infty$ e R_{in} che dipende R_L



41

Convertitori corrente/tensione

- Un convertitore corrente/tensione è un circuito che produce una tensione di uscita proporzionale alla corrente in ingresso
- $R_{in}=0$ (la tensione sul generatore di input è nulla) e $R_o=0$ (v_o è indipendente dal carico) \Rightarrow è un amplificatore di transresistenza
- Il circuito a destra è un amp ideale di corrente dato che $R_{in}=0$ e $R_o=\infty$ (il carico è floating)



42

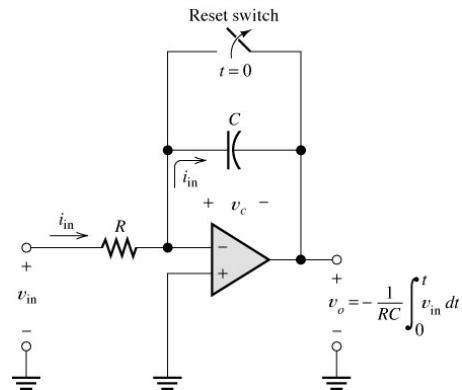
Circuiti amplificatori: integratore

- Un integratore è un circuito che produce in uscita una tensione proporzionale all'integrale di quella in ingresso
- È usato in sistemi di strumentazione: il segnale proveniente da un accelerometro è integrato per dare un segnale proporzionale alla velocità
- C'è retroazione negativa attraverso C e assumendo ideale l'op amp:

$$i_{in} = \frac{v_{in}(t)}{R}$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{in}(\tau) \cdot d\tau$$

$$v_o(t) = -v_c(t)$$



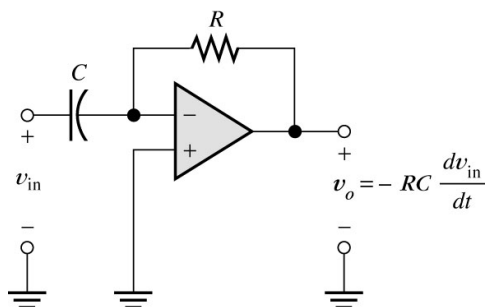
43

Circuiti amplificatori: derivatore

- La tensione di uscita è data dal prodotto di $-1/RC$ per l'integrale di $v_{in}(t)$: per avere un guadagno positivo, basta aggiungere un amp. invertente in cascata
- Il circuito in figura è un derivatore, che produce un segnale in uscita proporzionale (a meno di $-RC$) alla derivata di quello v_{in}
- Applicando l'analisi fatta per l'integratore:

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in}(\tau) \cdot d\tau$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_{in}}{dt}$$



44

Risposta in frequenza integratore e derivatore

- È difficile realizzare un buon derivatore perchè ha guadagno elevato ad alte frequenze, mentre gli op amp reali hanno un comportamento tipo passa-basso (il guadagno decresce con f)

