

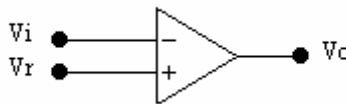
COMPARATORI

Un comparatore è un circuito che ha due possibili valori d'uscita, mediante i quali segnala il risultato del confronto delle tensioni sui due ingressi.

L'amplificatore operazionale ad anello aperto costituisce un comparatore semplice, che confronta un segnale d'ingresso con uno di riferimento e fornisce in uscita una tensione continua a livello alto o basso (positivo o negativo) a seconda che il segnale d'ingresso sia maggiore oppure minore di quello di riferimento. Si distinguono due tipi di comparatori semplici, comparatore invertente e comparatore non invertente.

Comparatore invertente

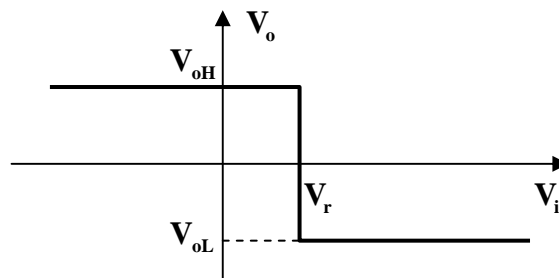
Il circuito di figura mostra un amplificatore operazionale ad anello aperto con una tensione V_r di riferimento all'ingresso non invertente e il segnale V_i a quello invertente



$$V_o = A_o (V_r - V_i) \begin{cases} \text{se } V_i < V_r \Rightarrow V_r - V_i > 0 \Rightarrow V_o = V_{oH} \\ \text{se } V_i > V_r \Rightarrow V_r - V_i < 0 \Rightarrow V_o = V_{oL} \end{cases}$$

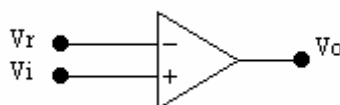
supponendo $A_o > 0$.

La caratteristica d'uscita è la seguente:



Comparatore non invertente

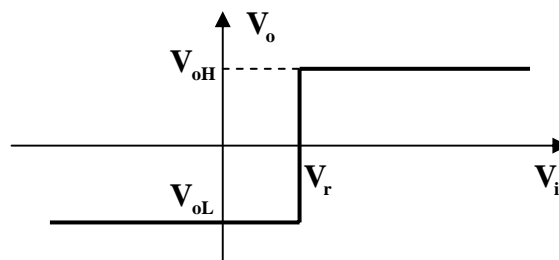
Per ottenere un comparatore non invertente è sufficiente mettere la tensione di riferimento V_r all'ingresso invertente e la tensione V_i a quello non invertente, come in figura



$$V_o = A_o (V_i - V_r) \begin{cases} \text{se } V_i < V_r \Rightarrow V_i - V_r < 0 \Rightarrow V_o = V_{oL} \\ \text{se } V_i > V_r \Rightarrow V_i - V_r > 0 \Rightarrow V_o = V_{oH} \end{cases}$$

supponendo $A_o > 0$.

La caratteristica d'uscita è la seguente:



Non necessariamente i due livelli di tensione V_{oH} e V_{oL} sono di segno opposto; in molte applicazioni sono dello stesso segno con, ovviamente, $V_{oH} > V_{oL}$. I comparatori sono molto usati in circuiti che richiedono il rilevamento di livelli di tensione, che si incontrano soprattutto nell'elettronica digitale.

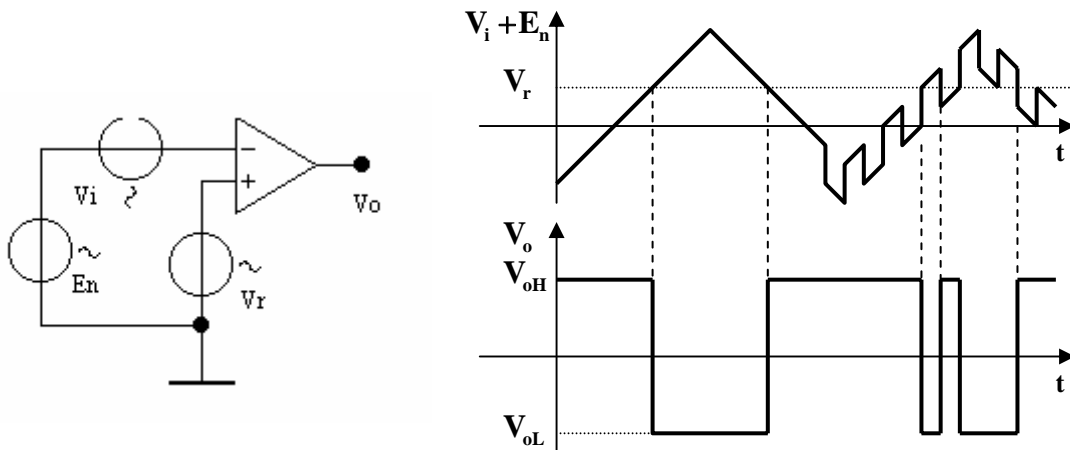
Limiti dei comparatori semplici

Occorre evidenziare i limiti di un comparatore con una struttura circuitale così scarna e con operazionali adatti ad usi generici.

- L'operazionale per usi generici è piuttosto lento nella commutazione. Occorre, in certi casi, valutare le prestazioni dell'operazionale per quanto riguarda il tempo di propagazione. In particolare, se il segnale d'ingresso è lentamente variabile nel tempo, in prossimità della soglia di commutazione, essendo l'amplificazione ad anello aperto di valore finito, l'uscita potrebbe assumere per un certo tempo valori di tensione diversi dalle tensioni di saturazione.
- Le uscite degli operazionali generalmente commutano fra $+V_{SAT}$ e $-V_{SAT}$; in questo modo non è possibile pilotare dispositivi che richiedono livelli di tensione particolari ad esempio 0 e 5 V, come gli integrati TTL, o 0 e 5 ÷ 15 V, come i CMOS.
- Infine, un comparatore realizzato con una struttura ad anello aperto si rivela assai sensibile alle tensioni di rumore presenti ad uno o all'altro degli ingressi, tensione di rumore che può originare commutazioni indesiderate.

Il rumore nei comparatori (comparatori con isteresi)

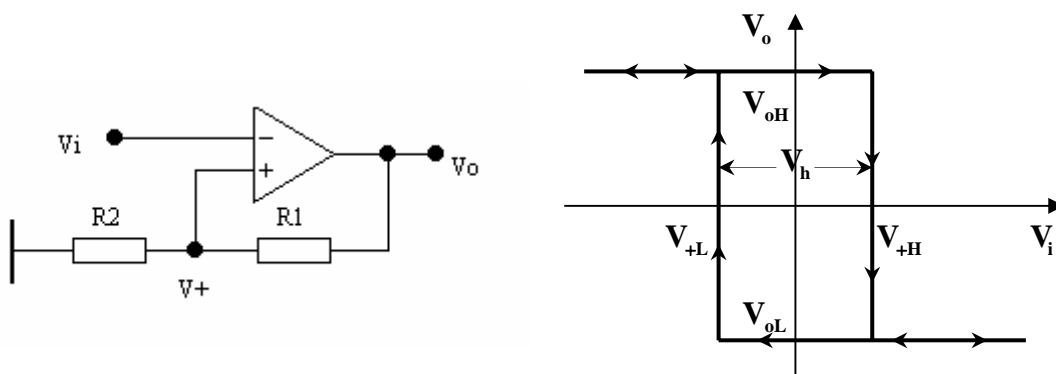
In figura (a) è illustrato un tipico comparatore che confronta il segnale V_i con il livello di riferimento di V_r . Il generatore E_n rappresenta la tensione di rumore considerata come un treno di impulsi. In figura (b) sono illustrati i diagrammi del segnale risultante $V = V_i + E_n$ e la tensione d'uscita. Come si vede, durante il primo periodo, in cui si è ipotizzata l'assenza di disturbi (E_n cortocircuitato), l'uscita commuta regolarmente; in presenza di disturbi, invece, quando V_i si avvicina a V_r , V_o presenta commutazioni indesiderate o oscillazioni incontrollate e la funzionalità del circuito risulta compromessa.



A questa situazione si può rimediare inserendo nel circuito del comparatore semplice una retroazione positiva.

La retroazione positiva viene realizzata applicando all'ingresso non invertente una parte della tensione di uscita, tramite un partitore resistivo, come in figura.

Questo tipo di comparatore viene indicato con il nome di trigger di Schmitt o comparatore con isteresi.



L'uscita commuta ogni qualvolta la tensione $V_- = V_i$ sull'ingresso invertente uguaglia la tensione V_+ sull'ingresso non invertente.

La tensione V_+ dipende dalla tensione d'uscita che può assumere due valori, V_{oH} e V_{oL} , pertanto, si avranno due tensioni di soglia, V_{+H} e V_{+L} .

– Se $V_o = V_{oH} \Rightarrow V_+ = V_{+H} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oH}$ **tensione di soglia superiore**

– Se $V_o = V_{oL} \Rightarrow V_+ = V_{+L} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oL}$ **tensione di soglia inferiore**

Quando V_i , crescendo, uguaglia e tende a superare V_{+H} , prevale l'ingresso invertente su quello non invertente provocando la commutazione dell'uscita da V_{oH} a V_{oL} , e la tensione sull'ingresso non invertente passa da V_{+H} a V_{+L} , ossia la tensione di soglia subisce una drastica variazione.

Una nuova commutazione dell'uscita si avrà quando la tensione d'ingresso V_i , decrescendo, uguaglia e tende a scendere al di sotto di V_{+L} , prevale l'ingresso non invertente su quello invertente provocando la commutazione dell'uscita da V_{oL} a V_{oH} , e la tensione sull'ingresso non invertente passa da V_{+L} a V_{+H} , ossia la tensione di soglia subisce un'altra drastica variazione.

Il circuito, come evidenziato dalla caratteristica d'uscita, presenta una isteresi di ampiezza V_h , ossia le commutazioni dell'uscita avvengono per valori della tensione di soglia diversi tra loro ed esiste un intervallo delle tensioni d'ingresso per le quali l'uscita rimane allo stato precedente. Riassumendo:

– Se $V_i \leq V_{+L} \Rightarrow V_o = V_{oH}$

– Se $V_{+L} < V_i < V_{+H} \Rightarrow V_o = \text{stato precedente}$

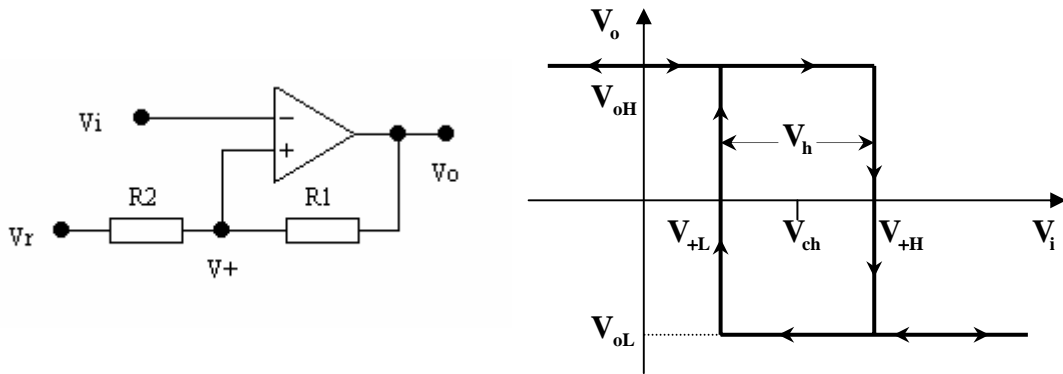
– Se $V_i \geq V_{+H} \Rightarrow V_o = V_{oL}$

Si può concludere che l'impiego della retroazione positiva spinge V_o a commutare più velocemente; inoltre, se le due soglie di commutazione sono sufficientemente distanziate e maggiori dei picchi della tensione di rumore, vengono eliminate le false commutazioni.

La differenza $V_h = V_{+H} - V_{+L}$ fra le due soglie di commutazione prende il nome di ampiezza dell'isteresi. Per evitare false commutazioni occorre dunque che V_h sia maggiore dell'ampiezza picco-picco dei disturbi; così l'ampiezza dell'isteresi indicherà l'ampiezza del segnale di rumore che può essere tollerata o il margine di rumore. Il centro dell'isteresi, $V_{ch} = \frac{V_{+H} + V_{+L}}{2}$, in questo caso è zero.

Comparatore con isteresi invertente

Se si vuole un centro dell'isteresi diverso da zero, si collega la resistenza R_2 , non a massa, ma ad una opportuna tensione di riferimento come in figura.



Alla tensione V_+ contribuiscono due cause, V_o e V_r , e le soglie di commutazione si ottengono applicando il principio di sovrapposizione degli effetti:

$$V_{+H} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oH} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_r \quad \text{e} \quad V_{+L} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oL} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_r$$

Il centro dell'isteresi, supponendo $V_{oH} = -V_{oL}$, è:

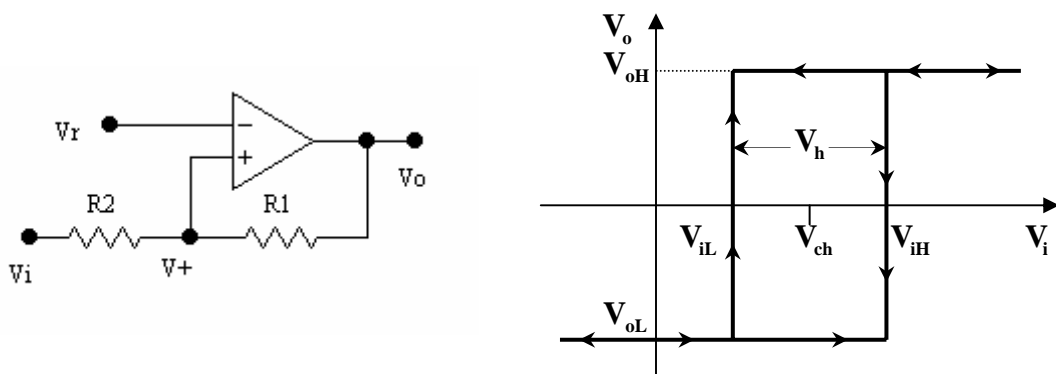
$$V_{ch} = \frac{V_{+H} + V_{+L}}{2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_r$$

L'ampiezza dell'isteresi è:

$$V_h = V_{+H} - V_{+L} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 2V_{oH}$$

Comparatore con isteresi non invertente

Il comparatore con isteresi non invertente si ottiene invertendo tra loro le tensioni d'ingresso e di riferimento, come in figura.



La commutazione dell'uscita si ha ogni qualvolta la tensione V_+ uguaglia la tensione $V_- = V_r$.

Alla tensione V_+ contribuiscono due cause, V_o e V_i ; applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha:

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_o$$

Supponendo la tensione d'uscita a livello alto, $V_o = V_{oH}$, la tensione V_+ deve essere necessariamente maggiore della tensione $V_- = V_r$.

Se
$$V_o = V_{oH} \Rightarrow V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oH} > V_r$$

La commutazione dell'uscita da V_{oH} a V_{oL} si avrà quando, diminuendo la tensione d'ingresso V_i la tensione V_+ uguaglia e tende a scendere al di sotto della tensione V_r , per un valore della tensione d'ingresso V_{iL} , che è anche il valore della tensione di **soglia inferiore**. Si impone, quindi, che:

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{iL} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oH} = V_r \Rightarrow V_{iL} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{oH} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_r$$

Supponendo la tensione d'uscita a livello basso, $V_o = V_{oL}$, la tensione V_+ deve essere necessariamente minore della tensione $V_- = V_r$.

Se
$$V_o = V_{oL} \Rightarrow V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oL} < V_r$$

La commutazione dell'uscita da V_{oL} a V_{oH} si avrà quando, aumentando la tensione d'ingresso V_i la tensione V_+ uguaglia e tende a superare la tensione V_r , per un valore della tensione d'ingresso V_{iH} , che è anche il valore della tensione di **soglia superiore**. Si impone, quindi, che:

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{iH} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{oL} = V_r \Rightarrow V_{iH} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{oL} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_r$$

Il centro dell'isteresi, supponendo $V_{oH} = -V_{oL}$, è:

$$V_{ch} = \frac{V_{iH} + V_{iL}}{2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_r$$

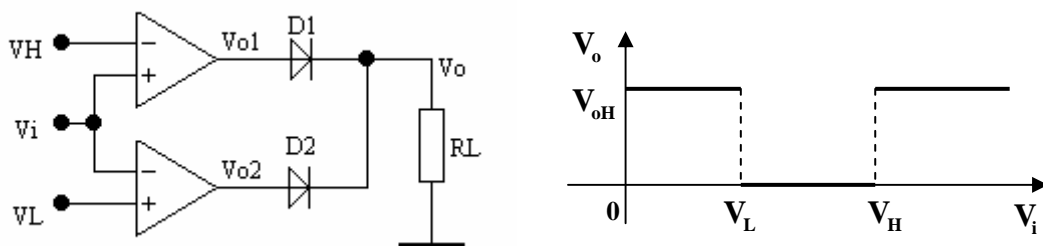
L'ampiezza dell'isteresi è:

$$V_h = V_{iH} - V_{iL} = \frac{R_2}{R_1} \cdot 2V_{oH}$$

Comparatore a finestra

Il comparatore a finestra segnala con uno dei due livelli di uscita quando il segnale d'ingresso V_i è compreso tra due valori di tensione V_L e V_H , e con l'altro livello quando è esterno a tale intervallo.

Il circuito si realizza combinando un comparatore invertente con uno non invertente aventi tensioni di riferimento diverse.



$$\text{Se } V_i < V_L \Rightarrow \begin{cases} V_{o1} = V_{o1L} \\ V_{o2} = V_{o2H} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_1 \text{ interdetti} \\ D_2 \text{ in conduzione} \end{cases} \Rightarrow V_o = V_{oH} = V_{o2H} - V_\gamma$$

$$\text{Se } V_L \leq V_i \leq V_H \Rightarrow \begin{cases} V_{o1} = V_{o1L} \\ V_{o2} = V_{o2L} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_1 \text{ interdetti} \\ D_2 \text{ interdetti} \end{cases} \Rightarrow V_o = 0$$

$$\text{Se } V_i > V_H \Rightarrow \begin{cases} V_{o1} = V_{o1H} \\ V_{o2} = V_{o2L} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_1 \text{ in conduzione} \\ D_2 \text{ interdetti} \end{cases} \Rightarrow V_o = V_{oH} = V_{o1H} - V_\gamma$$

Quando uno dei due diodi è in conduzione circola corrente attraverso la resistenza R con conseguente caduta di tensione ai suoi capi, ossia si ha una tensione d'uscita V_{oH} ; se entrambi i diodi sono interdetti, non può circolare corrente attraverso la resistenza R e quindi ai suoi capi non vi è alcuna caduta di tensione, la tensione d'uscita è nulla, $V_{oL} = 0$.