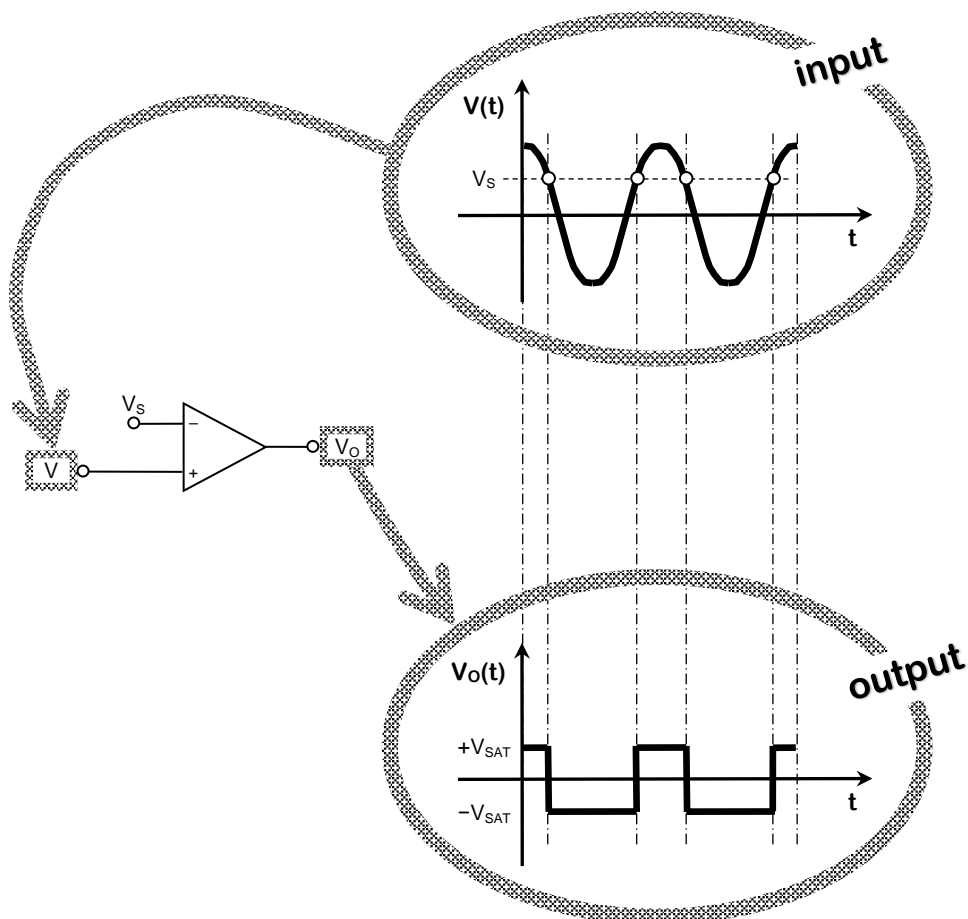


Elettronica analogica 5

Capitolo 2

I comparatori



Prof. Giuseppe Di Michele --- fascicolo di 26 pagine --- novembre 2021

I comparatori

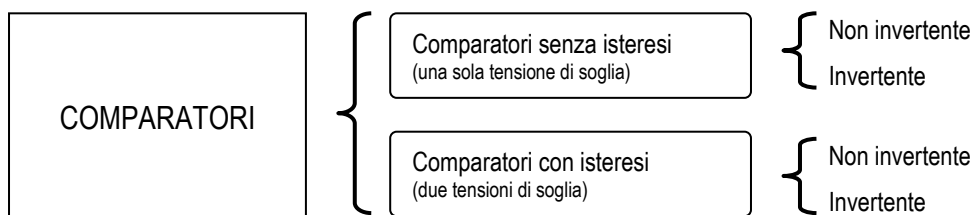
<u>Introduzione</u>	3
<u>2.1 -- Comparatori senza isteresi</u>	4
<ul style="list-style-type: none">> Comparatore senza isteresi non invertente> Comparatore senza isteresi invertente> Esercizi	
<u>2.2 -- Comparatori con isteresi</u>	8
<ul style="list-style-type: none">> Comparatore con isteresi non invertente> Comparatore con isteresi invertente> Esercizi	
<u>2.3 -- Controllo della tensione di uscita</u>	16
<ul style="list-style-type: none">> Circuito di controllo 1 - diodo Raddrizzatore> Circuito di controllo 2 - un diodo Zener> Circuito di controllo 3 - due diodi Zener> Circuito di controllo 4 - traslatore di tensione di tipo diretto> Esercizi	
<u>Quadri riassuntivi</u>	24

Introduzione

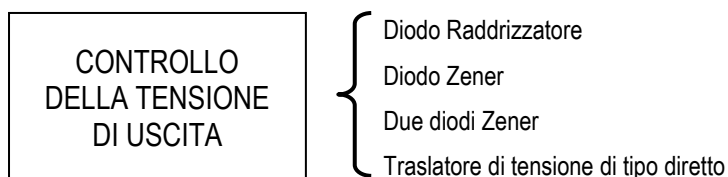
I comparatori sono circuiti che ricevono in ingresso una tensione variabile $V(t)$, la confrontano con una o due tensioni costanti chiamate *tensioni di soglia*, e forniscono in uscita una tensione $V_O(t)$ che può assumere un valore alto o basso a seconda del risultato di questo confronto. In questo capitolo analizzeremo i circuiti comparatori più utilizzati in elettronica.

Entrando più nel dettaglio, il testo che segue è organizzato nella maniera seguente.

- A) Innanzi tutto presenteremo i vari tipi di comparatori. Esistono, infatti, due tipi di comparatori: l'uno è detto *senza isteresi* (se il confronto è fatto con una sola tensione di soglia) e l'altro è detto *con isteresi* (se il confronto è fatto con due tensioni di soglia); inoltre ciascuno di essi può essere *non invertente* oppure *invertente*. La figura che segue schematizza questa classificazione.



- B) Nei circuiti comparatori la tensione di uscita $V_O(t)$ assume come valore alto la tensione $+V_{SAT}$ e come valore basso la tensione $-V_{SAT}$ dell'amplificatore operazionale utilizzato. Esiste tuttavia la possibilità di variare queste due tensioni aggiungendo in uscita al comparatore un opportuno circuito di controllo della tensione di uscita.

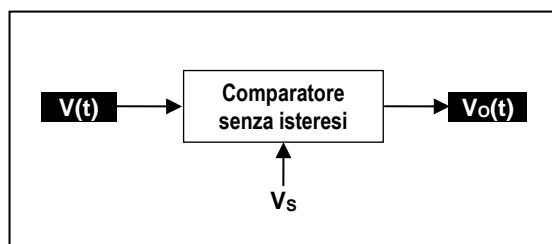


- C) Alla fine del capitolo si trova un quadro riassuntivo dei circuiti presentati con le relative formule notevoli.

2.1 -- Comparatori senza isteresi

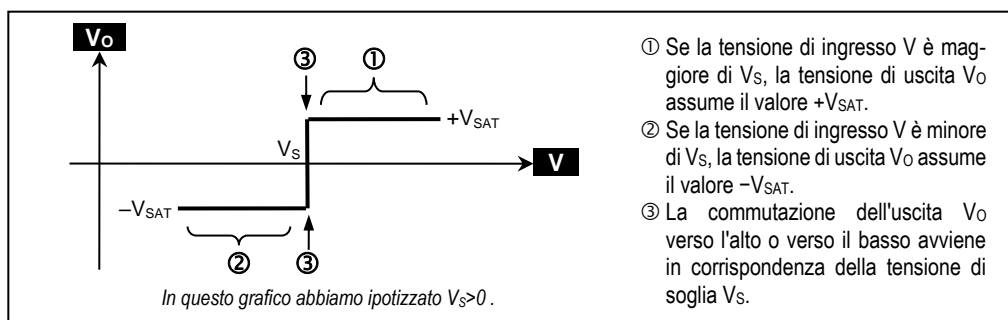
Il comparatore senza isteresi è un circuito che confronta la tensione di ingresso $V(t)$ con una tensione di soglia costante V_S . Il risultato di questo confronto determina la tensione di uscita $V_O(t)$ che può assumere i valori $+V_{SAT}$ o $-V_{SAT}$.

Esistono due tipi di comparatore senza isteresi: il *non invertente* e l'*invertente*. Ora li analizziamo entrambi.

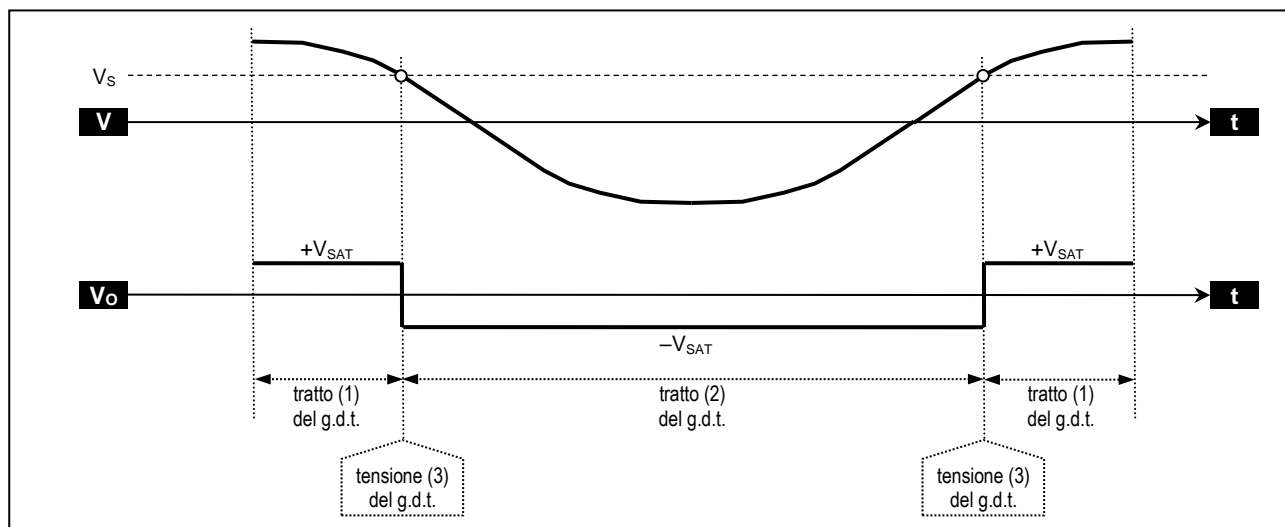


Comparatore senza isteresi non invertente

Il funzionamento del comparatore senza non invertente è indicato dal grafico di trasferimento (g.d.t.) riportato a lato.



La figura seguente mostra un esempio di funzionamento del comparatore senza isteresi non invertente, seguendo le specifiche del grafico di trasferimento riportato sopra.



Il circuito che realizza il comparatore senza isteresi non invertente è disegnato nella figura seguente.

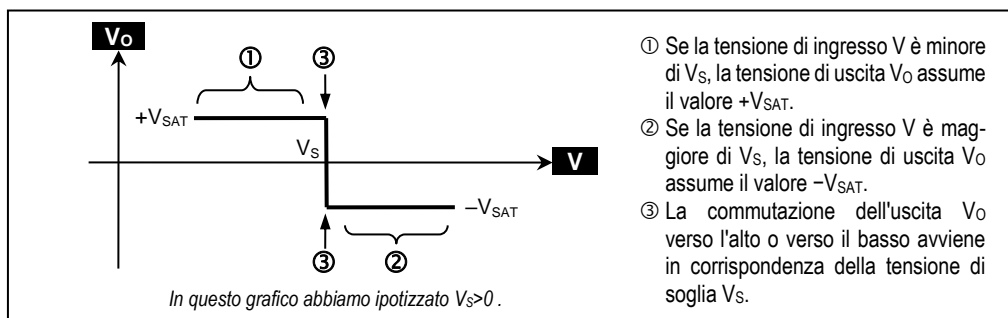


L'analisi del circuito è la seguente.

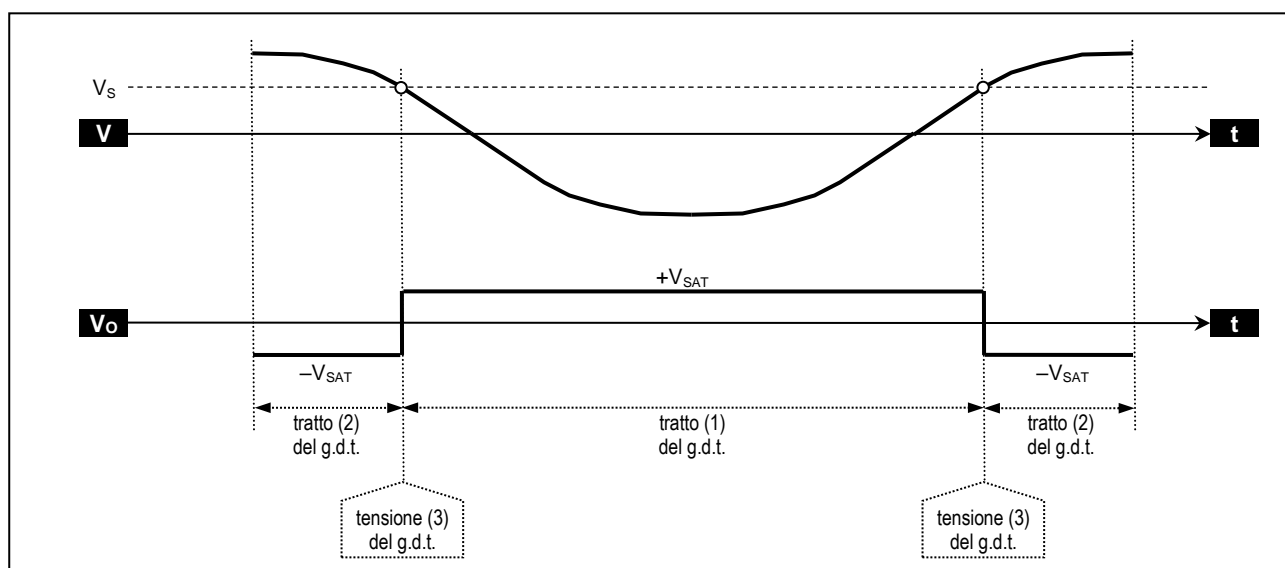
- Quando la tensione di ingresso V è maggiore della tensione di soglia V_S , l'AO è in saturazione positiva e quindi l'uscita V_O vale $+V_{SAT}$.
- Quando la tensione di ingresso V è minore della tensione di soglia V_S , l'AO è in saturazione negativa e quindi l'uscita V_O vale $-V_{SAT}$.

Comparatore senza isteresi invertente

Il funzionamento del comparatore senza isteresi invertente è indicato dal grafico di trasferimento riportato a lato.



La figura seguente mostra un esempio di funzionamento del comparatore senza isteresi invertente seguendo le specifiche del grafico di trasferimento riportato sopra.



Il circuito che realizza il comparatore senza isteresi invertente è disegnato nella figura seguente.

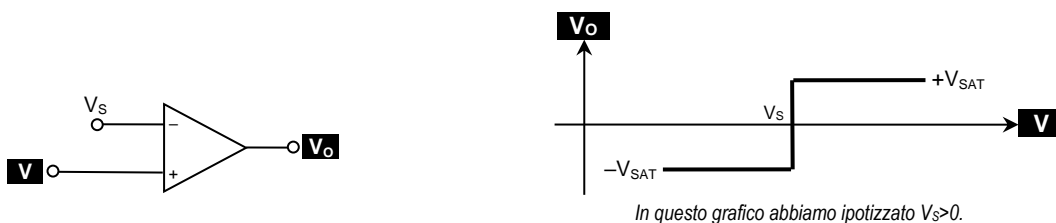


L'analisi del circuito è la seguente.

- Quando la tensione di ingresso V è maggiore della tensione di soglia V_S , l'AO è in saturazione negativa e quindi l'uscita V_O vale $-V_{SAT}$.
- Quando la tensione di ingresso V è minore della tensione di soglia V_S , l'AO è in saturazione positiva e quindi l'uscita V_O vale $+V_{SAT}$.

Esercizio -- Comparatore senza isteresi non invertente

RICHIAMI TEORICI



Problema di analisi

Determinare il grafico di trasferimento del seguente comparatore senza isteresi non invertente.

Dati dell'AO

$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

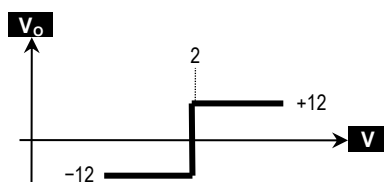
Dati del circuito

$V_S = 2$

Quesiti

Grafico di trasferimento

Non ci sono calcoli da fare. Disegniamo direttamente il grafico di trasferimento.



Problema di sintesi

Progettare un comparatore senza isteresi non invertente considerando le specifiche di progetto riportate a lato.

Dati dell'AO

$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

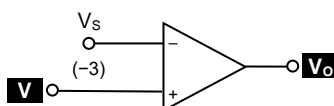
Specifiche di progetto

$V_S = -3$

Quesiti

Dimensionamento del circuito

Il circuito è il seguente.

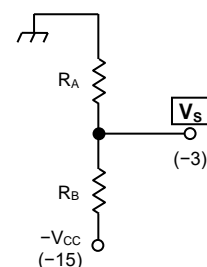


Il comparatore senza isteresi, in sé, non deve essere progettato. Occorre invece progettare il circuito che fornisce la tensione di soglia V_S .

La tensione di soglia V_S si ottiene con un partitore di tensione alimentato con $V_{CC} = -15$ e riferito a massa, come è rappresentato nella figura a lato.

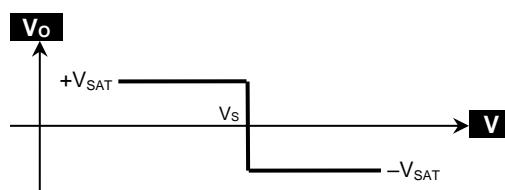
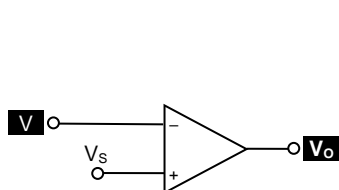
$$V_S = V_{CC} \cdot \frac{R_A}{R_A + R_B} \quad \left[\begin{array}{l} V_{CC} = 15 \text{ dato} \\ R_A = 3 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ V_S = -3 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow R_B = 12 \cdot 10^3$$

La tensione V_S così ottenuta può essere direttamente applicata al relativo morsetto del comparatore in quanto il comparatore non assorbe corrente da tale morsetto.



Esercizio -- Comparatore senza isteresi invertente

RICHIAMI TEORICI



In questo grafico abbiamo ipotizzato $V_S > 0$.

Problema di analisi

Determinare il grafico di trasferimento del seguente comparatore senza isteresi invertente.

Dati dell'AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$$

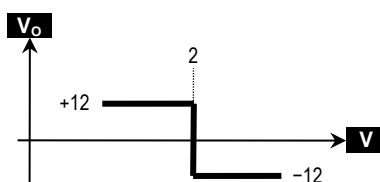
Dati del circuito

$$V_S = 2$$

Quesiti

Grafico di trasferimento

Non ci sono calcoli da fare. Disegniamo direttamente il grafico di trasferimento.



Problema di sintesi

Progettare un comparatore senza isteresi invertente considerando le specifiche di progetto riportate a lato.

Dati dell'AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$$

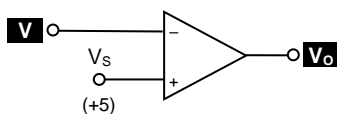
Specifiche di progetto

$$V_S = 5$$

Quesiti

Dimensionamento del circuito

Il circuito è il seguente.

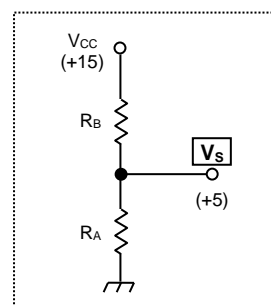


Il comparatore senza isteresi, in sé, non deve essere progettato. Occorre invece progettare il circuito che fornisce la tensione di soglia V_S .

La tensione di soglia V_S si ottiene con un partitore di tensione alimentato con $V_{CC} = +15$ e riferito a massa, come è rappresentato nella figura a lato.

$$V_S = V_{CC} \cdot \frac{R_A}{R_A + R_B} \quad \left[\begin{array}{l} V_{CC} = 15 \text{ dato} \\ R_A = 5 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ V_S = 5 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow R_B = 10 \cdot 10^3$$

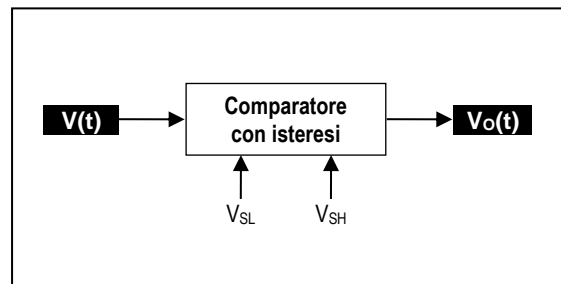
La tensione V_S così ottenuta può essere direttamente applicata al relativo morsetto del comparatore in quanto il comparatore non assorbe corrente da tale morsetto.



2.2 -- Comparatori con isteresi

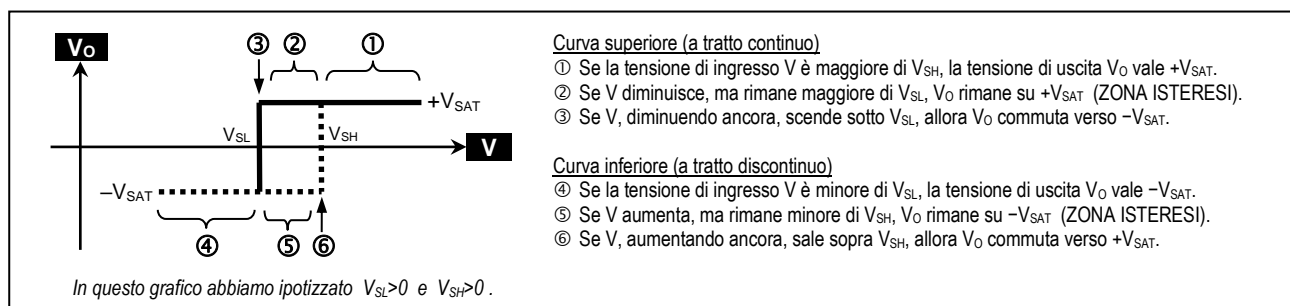
Il comparatore con isteresi è un circuito elettronico che confronta la tensione di ingresso $V(t)$ con due tensioni di soglia costanti: V_{SL} (soglia bassa) e V_{SH} (soglia alta), con $V_{SL} < V_{SH}$. Il risultato di questo confronto determina la tensione di uscita $V_O(t)$ che può assumere i valori $+V_{SAT}$ o $-V_{SAT}$.

Esistono due tipi di comparatore con isteresi: il *non invertente* e l'*invertente*. Li analizziamo entrambi.

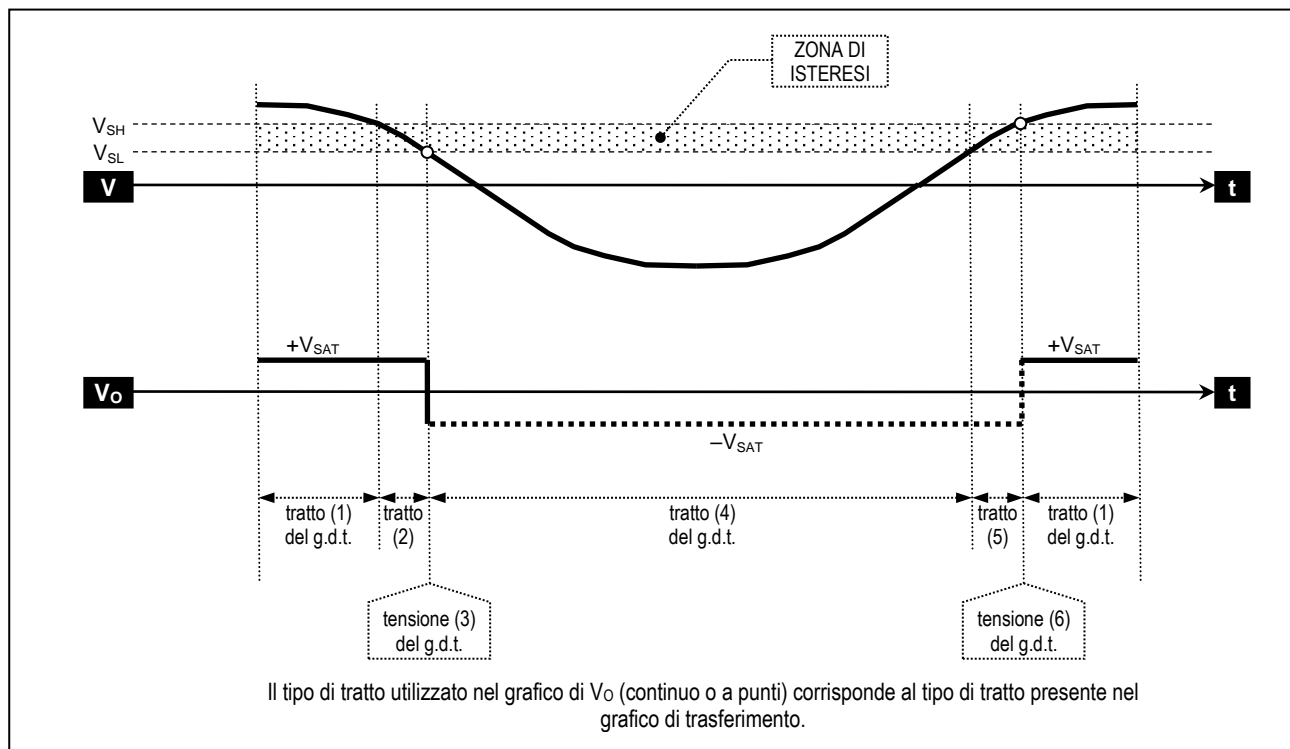


Comparatore con isteresi non invertente

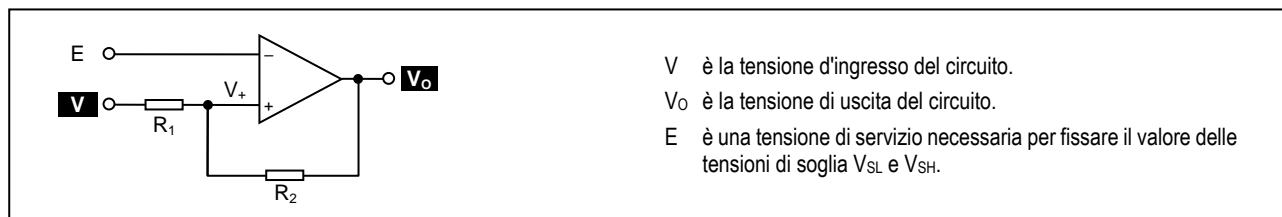
Il comparatore con isteresi non invertente ha la logica di funzionamento rappresentata dal seguente grafico di trasferimento (g.d.t.).



La figura seguente mostra un esempio di funzionamento del comparatore con isteresi non invertente seguendo le specifiche del grafico di trasferimento riportato sopra.



Il circuito che realizza il comparatore con isteresi non invertente è disegnato nella figura seguente.



L'analisi del circuito è la seguente.

Supponiamo $V_O = +V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se si verifica la relazione seguente

$$V_+ > V_-$$

sapendo che

$$V_+ = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{sovrapposizione effetti})$$

$$V_- = E$$

sostituendo nella formula di sopra e ricavando V si ottiene

$$V > E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} = V_{SL}$$

Questo valore limite della tensione d'ingresso prende il nome di *soglia bassa* ed è indicato con V_{SL} .

Riassumendo. Consideriamo la situazione $V_O = +V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se $V_+ > V_-$, il che si verifica quando $V > V_{SL}$. Se V scende al di sotto di V_{SL} , accade che V_- diventa maggiore di V_+ e quindi l'uscita V_O commuta su $-V_{SAT}$.

Supponiamo $V_O = -V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se si verifica la relazione seguente

$$V_- > V_+$$

sapendo che

$$V_+ = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{sovrapposizione effetti})$$

$$V_- = E$$

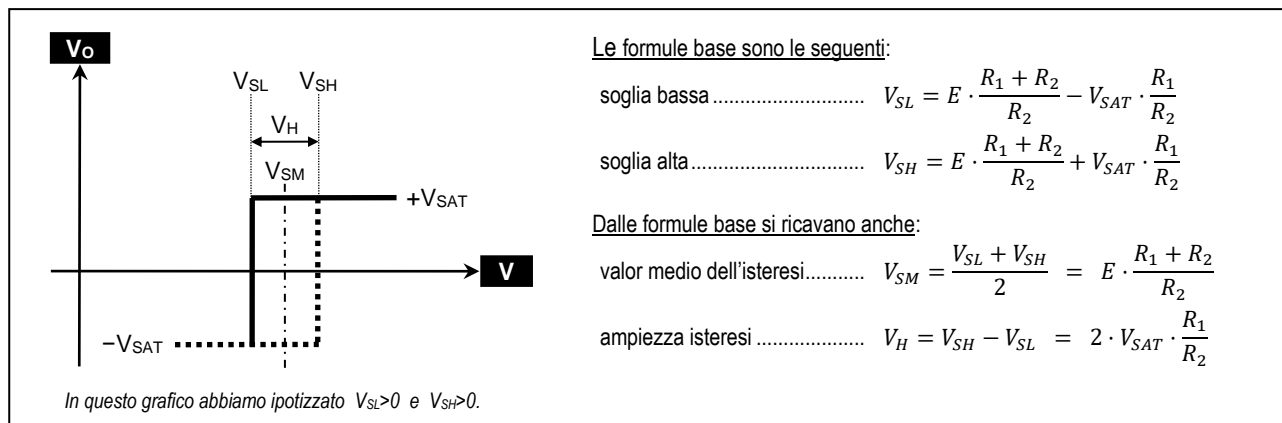
sostituendo nella formula di sopra e ricavando V si ottiene

$$V < E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} = V_{SH}$$

Questo valore limite della tensione d'ingresso prende il nome di *soglia alta* ed è indicato con V_{SH} .

Riassumendo. Consideriamo la situazione $V_O = -V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se $V_- > V_+$, il che si verifica quando $V < V_{SH}$. Se V sale al di sopra di V_{SH} , accade che V_+ diventa maggiore di V_- e quindi l'uscita V_O commuta su $+V_{SAT}$.

Questi risultati si riassumono nel seguente grafico di trasferimento:



Su questo grafico si fanno le seguenti osservazioni:

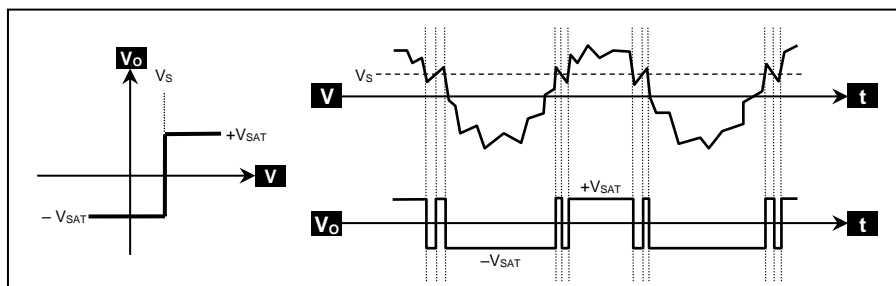
- > il valor medio delle soglie V_{SM} ha lo stesso segno di E , quindi per ottenere una V_{SM} positiva occorre una tensione E positiva, e per ottenere una V_{SM} negativa occorre una tensione E negativa;
- > il valore di V_{SM} è, in valore assoluto, sempre maggiore di E .

NOTA. L'utilità del comparatore con isteresi. Il comparatore con isteresi è utilizzato in molte applicazioni. Una di queste riguarda la trasformazione di un'onda sinusoidale di ingresso con disturbo in un'onda quadra di uscita. Vediamo cosa accade se per tale scopo si utilizza un comparatore senza isteresi oppure un comparatore con isteresi.

- Consideriamo il caso di un segnale sinusoidale con disturbo processato da un comparatore senza isteresi non invertente.

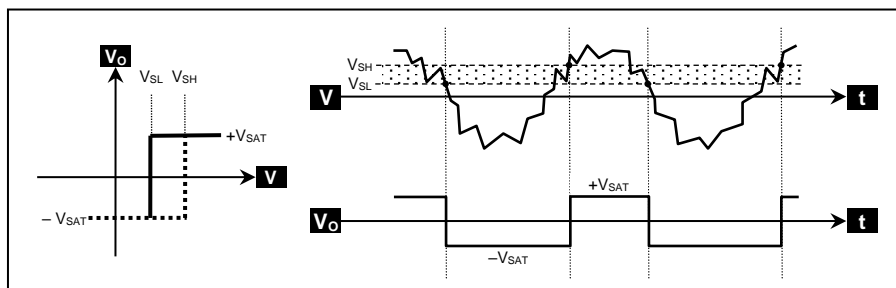
Quando il segnale d'ingresso si approssima alla tensione di soglia V_S l'uscita presenta delle oscillazioni tra i valori $+V_{SAT}$ e $-V_{SAT}$ come è mostrato nella figura seguente.

Quasi sempre questo fenomeno è indesiderato.



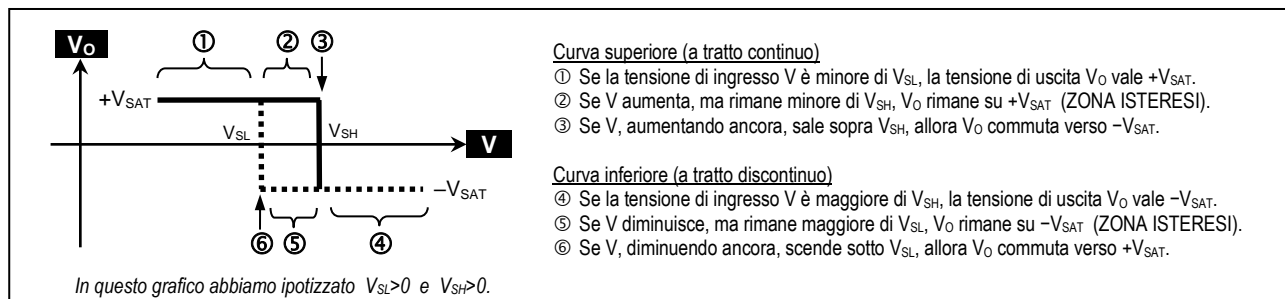
- Consideriamo ora lo stesso segnale sinusoidale con disturbo processato da un comparatore con isteresi non invertente.

In questo caso la tensione di uscita non presenta più le oscillazioni indesiderate che si verificavano nel caso precedente. Grazie alla presenza della doppia soglia (V_{SL} e V_{SH}), il problema delle oscillazioni indesiderate è stato risolto, infatti la commutazione verso $-V_{SAT}$ avviene quando V scende sotto V_{SL} , e la commutazione verso $+V_{SAT}$ avviene quando V sale sopra V_{SH} .

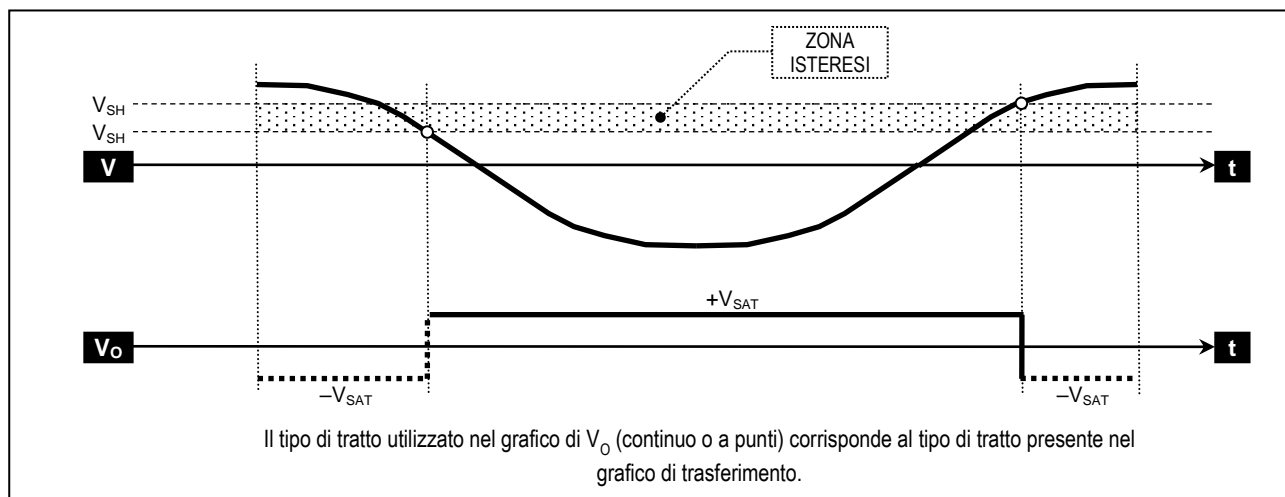


Comparatore con isteresi invertente

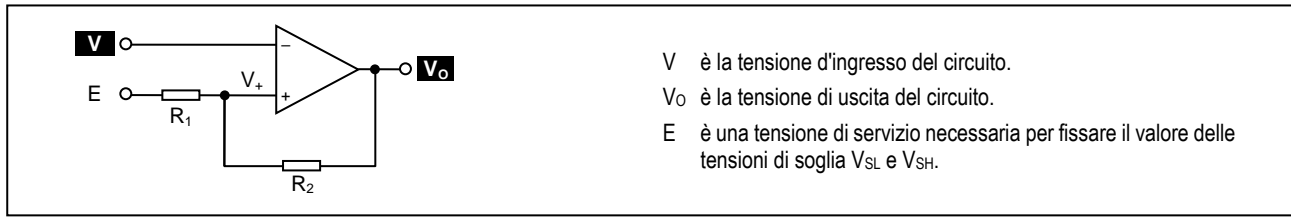
Per il comparatore con isteresi invertente valgono le stesse considerazioni fatte per quello non invertente, salvo che ora l'uscita ha segno opposto. Il tutto è riassunto nel seguente grafico di trasferimento:



La figura seguente mostra un esempio di funzionamento del comparatore con isteresi invertente seguendo le specifiche del grafico di trasferimento riportato sopra.



Il circuito che realizza il comparatore con isteresi invertente è disegnato nella figura seguente.



L'analisi del circuito è la seguente.

Supponiamo $V_0 = +V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se si verifica la relazione seguente:

$$V_+ > V_-$$

sapendo che

$$V_+ = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{sovrapposizione effetti})$$

$$V_- = V$$

sostituendo nella formula di sopra e ricavando V si ottiene

$$V < E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{SH}$$

Questo valore limite della tensione d'ingresso prende il nome di *soglia alta* ed è indicato con V_{SH} .

Riassumendo. Consideriamo la situazione $V_0 = +V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se $V_+ > V_-$, il che si verifica quando $V < V_{SH}$. Se V sale al di sopra di V_{SH} , accade che V_- diventa maggiore di V_+ e quindi l'uscita V_0 commuta su $-V_{SAT}$.

Supponiamo $V_0 = -V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se si verifica la relazione seguente:

$$V_- > V_+$$

sapendo che

$$V_+ = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{sovrapposizione effetti})$$

$$V_- = V$$

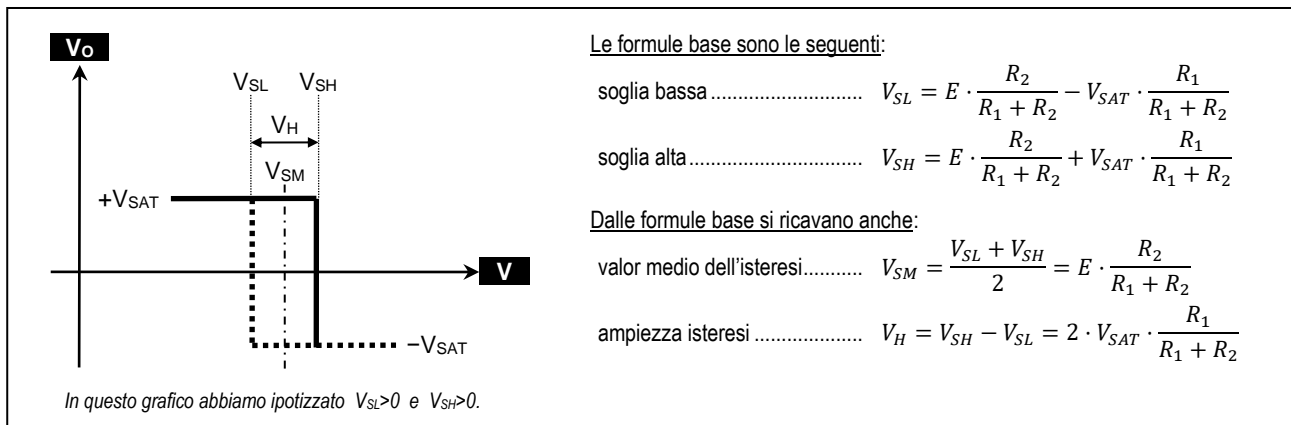
sostituendo nella formula di sopra e ricavando V si ottiene

$$V > E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{SL}$$

Questo valore limite della tensione d'ingresso prende il nome di *soglia bassa* ed è indicato con V_{SL} .

Riassumendo. Consideriamo la situazione $V_0 = -V_{SAT}$. Questo valore si mantiene stabile se $V_- > V_+$, il che si verifica quando $V > V_{SL}$. Se V scende al di sotto di V_{SL} , accade che V_+ diventa maggiore di V_- e quindi l'uscita V_0 commuta su $+V_{SAT}$.

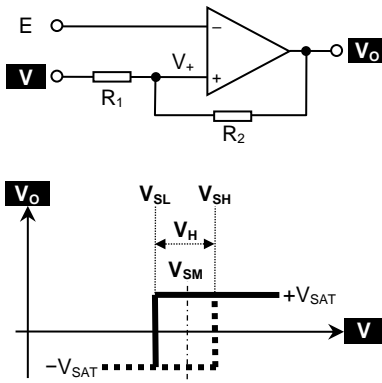
Questi risultati si riassumono nel seguente grafico di trasferimento:



Su questo grafico si fanno le seguenti osservazioni:

- > il valor medio delle soglie V_{SM} ha lo stesso segno di E , quindi per ottenere una V_{SM} positiva occorre una tensione E positiva, e per ottenere una V_{SM} negativa occorre una tensione E negativa;
- > il valore di V_{SM} è, in valore assoluto, sempre minore di E .

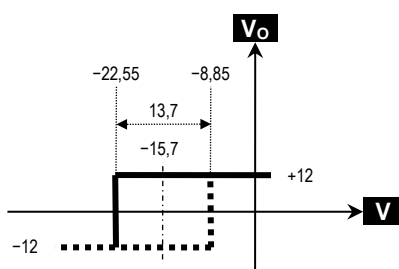
Esercizio -- Comparatore con isteresi non invertente

RICHIAMI TEORICI	
 <p style="font-size: small; margin-top: 10px;">In questo grafico abbiamo ipotizzato $V_{SL} > 0$ e $V_{SH} > 0$.</p>	<p>Le formule fondamentali sono:</p> $V_{SL} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $V_{SH} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ <p>Da cui si ricavano:</p> $V_{SM} = \frac{V_{SL} + V_{SH}}{2} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ $V_H = V_{SH} - V_{SL} = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$

Problema di analisi

Analizzare il seguente comparatore con isteresi non invertente.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: small;"> <tr> <th style="text-align: left;">Dati dell'AO</th> <th style="text-align: left;">Dati del circuito</th> <th style="text-align: left;">Quesiti</th> </tr> <tr> <td>$V_{CC} = \pm 15$</td> <td>$E = -10$</td> <td rowspan="3">Grafico di trasferimento</td> </tr> <tr> <td>$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$</td> <td>$R_1 = 8 \cdot 10^3$</td> </tr> <tr> <td></td> <td>$R_2 = 14 \cdot 10^3$</td> </tr> </table>	Dati dell'AO	Dati del circuito	Quesiti	$V_{CC} = \pm 15$	$E = -10$	Grafico di trasferimento	$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$R_1 = 8 \cdot 10^3$		$R_2 = 14 \cdot 10^3$	
Dati dell'AO	Dati del circuito	Quesiti										
$V_{CC} = \pm 15$	$E = -10$	Grafico di trasferimento										
$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$R_1 = 8 \cdot 10^3$											
	$R_2 = 14 \cdot 10^3$											

- | | |
|---|--|
| 1) $V_{SM} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ | $\left[\begin{array}{l} R_1 = 8 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 14 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ E = -10 \text{ dato} \end{array} \right. \Rightarrow V_{SM} = -15,7$ |
| 2) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ | $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \Rightarrow V_{SAT} = 12$ |
| 3) $V_H = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ | $\left[\begin{array}{l} R_1 = 8 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 14 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 2} \end{array} \right. \Rightarrow V_H = 13,7$ |
| 4) $\begin{cases} V_{SH} = V_{SM} + \frac{V_H}{2} \\ V_{SL} = V_{SM} - \frac{V_H}{2} \end{cases}$ | $\left[\begin{array}{l} V_{SM} = -15,7 \text{ calcolo 1} \\ V_H = 13,7 \text{ calcolo 3} \end{array} \right. \Rightarrow \begin{cases} V_{SH} = -8,85 \text{ V} \\ V_{SL} = -22,55 \text{ V} \end{cases}$ |



Problema di sintesi

Progettare un comparatore con isteresi non invertente che abbia il seguente grafico di trasferimento.

Dati dell'AO

$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

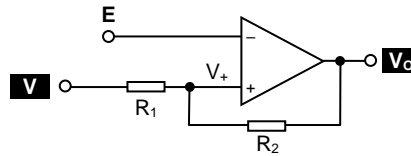
Specifiche di progetto

$V_{SH} = +3$
 $V_{SL} = +1$

Quesiti

Dimensionamento del circuito

Il circuito è il seguente.



- 1) $V_H = V_{SH} - V_{SL}$ $\begin{cases} V_{SH} = 3 \text{ dato} \\ V_{SL} = 1 \text{ dato} \end{cases} \Rightarrow V_H = 2$
- 2) $V_{SM} = \frac{V_{SH} + V_{SL}}{2}$ $\begin{cases} V_{SH} = 3 \text{ dato} \\ V_{SL} = 1 \text{ dato} \end{cases} \Rightarrow V_{SM} = 2$
- 3) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ $\begin{cases} V_{CC} = 15 \text{ dato} \end{cases} \Rightarrow V_{SAT} = 12$
- 4) $V_H = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ V_H = 2 \text{ calcolo 1} \\ V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 3} \end{cases} \Rightarrow R_2 = 12 \cdot 10^3$
- 5) $V_{SM} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 4} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ calcolo 4} \\ V_{SM} = 2 \text{ calcolo 2} \end{cases} \Rightarrow E = 1,8$

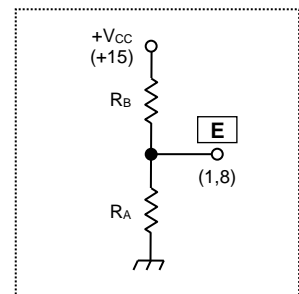
- 6) Circuito per ottenere la tensione di servizio $E=1,8$.

La tensione $E=1,8$ si ottiene tramite un partitore di tensione collegato indicato in figura. Il punto centrale del partitore, dove è presente la tensione $E=1,8$, può essere collegato direttamente al circuito comparatore in quanto il relativo morsetto fa capo direttamente all'ingresso invertente dell'operazionale, e quindi da esso non viene assorbita nessuna corrente.

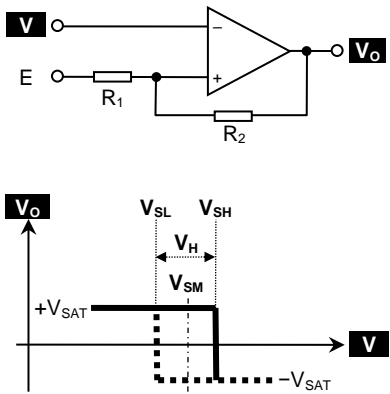
Il dimensionamento delle resistenze è il seguente:

$$\Delta V_{RA} = 1,8 \quad \Rightarrow \quad R_A = 1,8 \cdot 10^3$$

$$\Delta V_{RB} = 13,2 \quad \Rightarrow \quad R_B = 13,2 \cdot 10^3$$



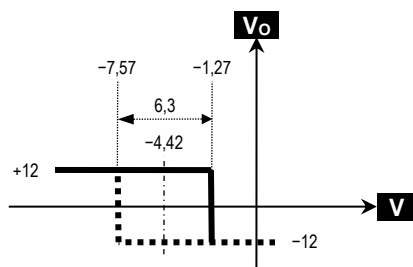
Esercizio -- Comparatore con isteresi invertente

RICHIAMI TEORICI	
 <p style="font-size: small; margin-top: 10px;">In questo grafico abbiamo ipotizzato $V_{SL} > 0$ e $V_{SH} > 0$.</p>	<p>Le formule fondamentali sono:</p> $V_{SL} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ $V_{SH} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ <p>Da cui si ricavano:</p> $V_{SM} = \frac{V_{SL} + V_{SH}}{2} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $V_H = V_{SH} - V_{SL} = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Problema di analisi

Analizzare il seguente comparatore con isteresi invertente.	Dati dell'AO $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	Dati del circuito $E = -6$ $R_1 = 5 \cdot 10^3$ $R_2 = 12 \cdot 10^3$	Quesiti Grafico di trasferimento

- | | |
|---|--|
| 1) $V_{SM} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ | $\left[\begin{array}{l} R_1 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ E = -6 \text{ dato} \end{array} \right. \Rightarrow V_{SM} = -4,42$ |
| 2) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ | $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \Rightarrow V_{SAT} = 12$ |
| 3) $V_H = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ | $\left[\begin{array}{l} R_1 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 2} \end{array} \right. \Rightarrow V_H = 6,3$ |
| 4) $\begin{cases} V_{SH} = V_{SM} + \frac{V_H}{2} \\ V_{SL} = V_{SM} - \frac{V_H}{2} \end{cases}$ | $\left[\begin{array}{l} V_{SM} = -4,42 \text{ calcolo 1} \\ V_H = 6,3 \text{ calcolo 3} \end{array} \right. \Rightarrow \begin{cases} V_{SH} = -1,27 \text{ V} \\ V_{SL} = -7,57 \text{ V} \end{cases}$ |



Problema di sintesi

Progettare un comparatore con isteresi invertente che abbia il seguente grafico di trasferimento.

Dati dell'AO

$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

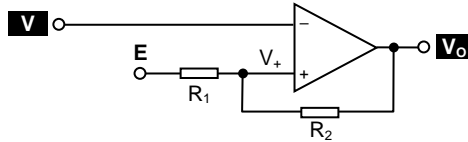
Specifiche di progetto

$V_{SH} = +5,4$
 $V_{SL} = -1,8$

Quesiti

Dimensionamento del circuito

Il circuito è il seguente.



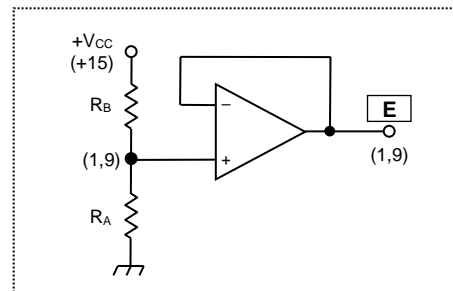
- 1) $V_H = V_{SH} - V_{SL}$ $\begin{cases} V_{SH} = 5,4 \text{ dato} \\ V_{SL} = -1,8 \text{ dato} \end{cases} \Rightarrow V_H = 7,2$
- 2) $V_{SM} = \frac{V_{SH} + V_{SL}}{2}$ $\begin{cases} V_{SH} = 5,4 \text{ dato} \\ V_{SL} = -1,8 \text{ dato} \end{cases} \Rightarrow V_{SM} = 1,8$
- 3) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \Rightarrow V_{SAT} = 12$
- 4) $V_H = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ V_H = 7,2 \text{ calcolo 1} \\ V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 3} \end{cases} \Rightarrow R_2 = 16,8 \cdot 10^3$
- 5) $V_{SM} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 4} \\ R_2 = 16,8 \cdot 10^3 \text{ calcolo 4} \\ V_{SM} = 1,8 \text{ calcolo 2} \end{cases} \Rightarrow E = 1,9$

- 6) Circuito per ottenere la tensione di servizio $E=1,9$.

La tensione $E=1,9$ si ottiene tramite un partitore di tensione seguito da un inseguitore di tensione. L'inseguitore di tensione è necessario in quanto impedisce che ci sia prelievo di corrente dal partitore. Il dimensionamento delle resistenze è il seguente:

$$\Delta V_{RA} = 1,9 \quad \Rightarrow \quad R_A = 1,9 \cdot 10^3$$

$$\Delta V_{RB} = 13,1 \quad \Rightarrow \quad R_B = 13,1 \cdot 10^3$$

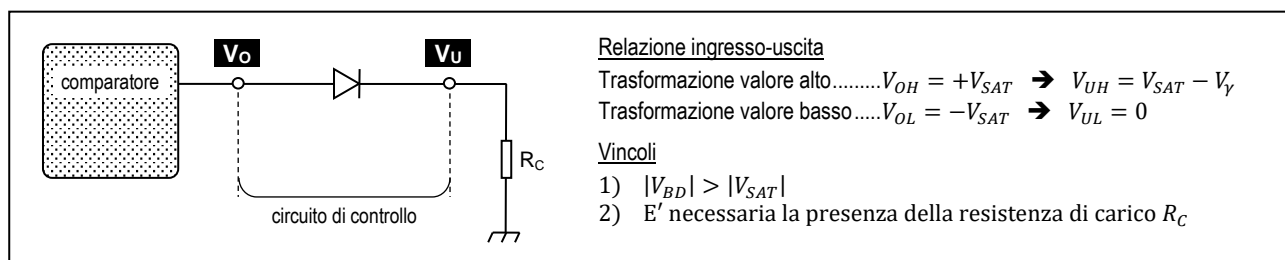


2.3 -- Controllo della tensione di uscita

La tensione di uscita V_O dei circuiti comparatori appena presentati (sia senza isteresi che con isteresi) può assumere i valori $+V_{SAT}$ o $-V_{SAT}$. Se vogliamo controllare il valore di queste due tensioni di uscita, in modo che assumano genericamente i valori V_{UH} (valore alto) e V_{UL} (valore basso), non necessariamente simmetrici rispetto allo zero, occorre aggiungere all'uscita del comparatore un circuito di condizionamento del segnale. Esistono diversi circuiti utili allo scopo, ora ne presentiamo alcuni.

Circuito di controllo 1 -- diodo Raddrizzatore

Un primo circuito di controllo è rappresentato nella figura che segue. A fianco è riportata la sua relazione ingresso-uscita e i vincoli da rispettare.



Dimostrazione

➤ Caso 1: $V_O = +V_{SAT}$

Calcolo V_{UH} . In questo caso il circuito di controllo assume l'aspetto riportato nella figura (a). Notiamo che il diodo si trova in conduzione diretta, pertanto V_{UH} vale:

$$V_{UH} = V_{SAT} - V_Y.$$

➤ Caso 2: $V_O = -V_{SAT}$

Calcolo V_{UL} . In questo caso il circuito di controllo assume l'aspetto riportato nella figura (b). Notiamo che il diodo è polarizzato inversamente in interdizione, pertanto la corrente circolante nel circuito è zero. Vale quindi:

$$V_{UL} = 0.$$

Vincoli. Affinchè il diodo Raddrizzatore, polarizzato inversamente, non entri in breakdown occorre che sia:

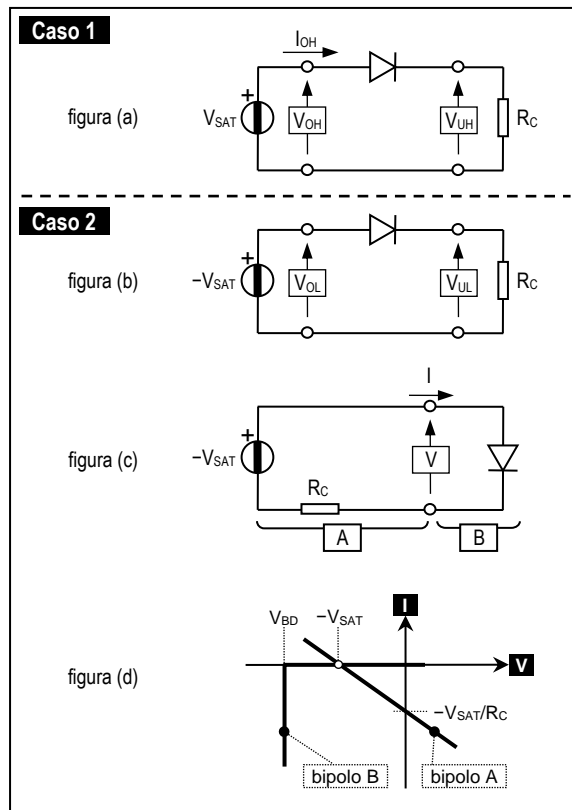
$$|V_{BD}| > |V_{SAT}|.$$

Per dimostrare questa affermazione osserviamo la figura (c) dove il circuito precedente è ridisegnato in modo da porre il diodo nella parte destra del circuito. Il circuito si può così dividere in due bipoli (A e B) le cui caratteristiche statiche sono rappresentate nella figura (d). In questa figura si osserva che affinchè il diodo rimanga fuori dal breakdown si deve avere:

$$|V_{BD}| > |V_{SAT}|.$$

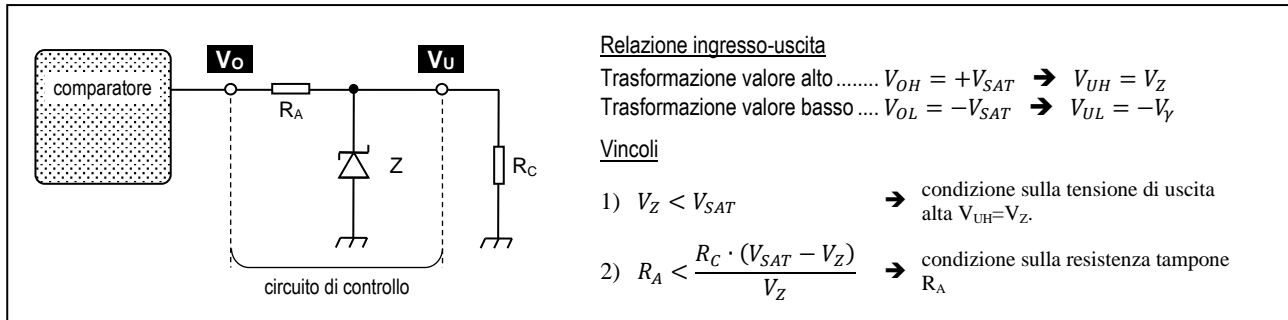
Fine dimostrazione

Notiamo che il circuito di controllo funziona correttamente solo se è presente la resistenza di carico R_C , qualunque valore essa abbia.



Circuito di controllo 2 -- un diodo Zener

Un secondo circuito di controllo è rappresentato nella figura che segue. A fianco è riportata la sua relazione ingresso-uscita e i vincoli da rispettare.



Dimostrazione

➤ Caso 1: $V_O = +V_{SAT}$.

Calcolo V_{UH} . In questo caso il circuito di controllo assume l'aspetto riportato nella figura (a). Notiamo che la tensione di uscita V_{UH} coincide con la tensione presente ai capi del diodo Zener che si trova in conduzione di breakdown:

$$V_{UH} = V_Z.$$

Vincoli. Applicando Thevenin al bipolo A si giunge al circuito rappresentato nella figura (b). In questo circuito si ha:

$$V_{Th} = V_{SAT} \cdot \frac{R_C}{R_A + R_C}.$$

La tensione V_{UH} presente ai capi del diodo Zener si ricava dall'intersezione delle caratteristiche statiche dei bipoli A e B come indicato nella figura (c). Affinchè l'ascissa di questo punto, ossia V_{UH} , si mantenga uguale a V_Z occorre che sia $V_{Th} > V_Z$. Sostituendo a V_{Th} l'espressione trovata sopra, si ottiene:

$$V_{SAT} \cdot \frac{R_C}{R_A + R_C} > V_Z$$

da cui si ricava

$$R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_Z} \quad \text{vincolo 1.}$$

Inoltre, la disequazione di sopra ha senso solo se:

$$V_Z < V_{SAT} \quad \text{vincolo 2.}$$

➤ Caso 2: $V_O = -V_{SAT}$.

Calcolo V_{UL} . In questo caso il circuito di controllo assume l'aspetto riportato nella figura (d). Notiamo che la tensione di uscita V_{UL} coincide con la tensione presente ai capi del diodo Zener che si trova in conduzione diretta:

$$V_{UL} = -V_Y.$$

Vincoli. Procedendo in modo analogo al caso 1 si ottengono le formule:

$$R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Y)}{V_Y} \quad \text{vincolo 1}$$

$$V_{SAT} > V_Y \quad \text{vincolo 2.}$$

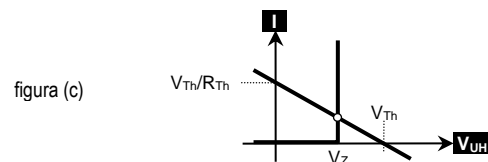
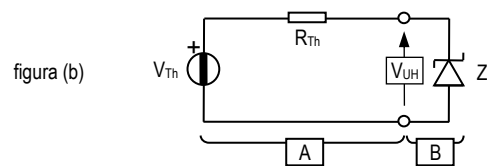
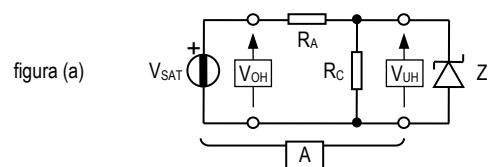
➤ Ricerca dei vincoli più restrittivi.

I vincoli del caso 1 sono più restrittivi di quelli del caso 2, quindi le condizioni complessive di vincolo sono le seguenti:

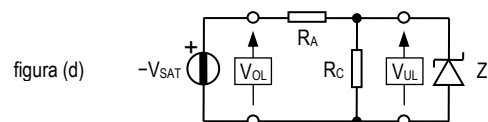
- 1) $V_Z < V_{SAT}$ → condizione sulla tensione di uscita alta $V_{UH}=V_Z$.
- 2) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_Z}$ → condizione sulla resistenza tampone R_A

Fine dimostrazione

Caso 1

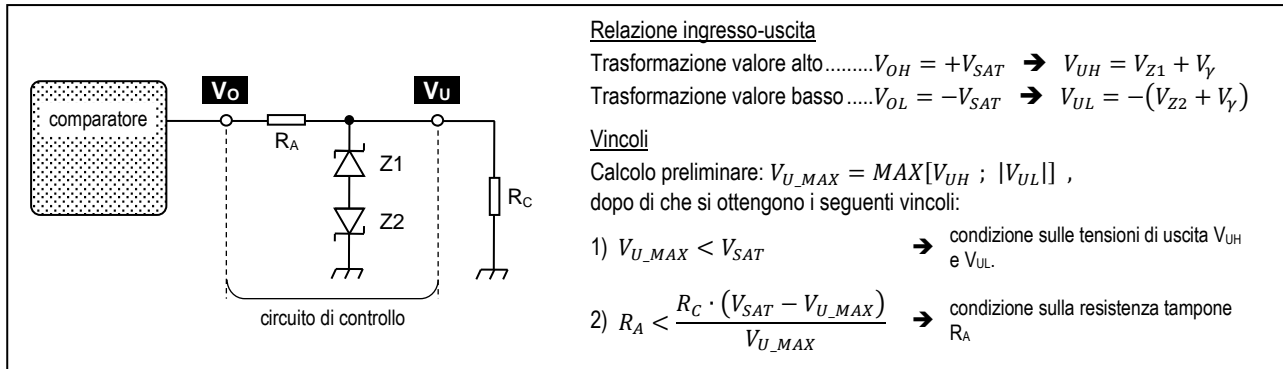


Caso 2



Circuito di controllo 3 -- due diodi Zener

Un terzo circuito di controllo è rappresentato nella figura che segue. A fianco è riportata la sua relazione ingresso-uscita e i vincoli da rispettare.



Dimostrazione

➤ Caso 1: $V_O = +V_{SAT}$.

Calcolo V_{UH} . In questo caso il circuito di controllo assume l'aspetto riportato nella figura (a). Notiamo che Z1 si trova in conduzione di breakdown e Z2 si trova in conduzione diretta, pertanto V_{UH} vale:

$$V_{UH} = V_{Z1} + V_Y.$$

Vincoli. Applicando Thevenin al bipolo A si giunge al circuito rappresentato nella figura (b). In questo circuito si ha:

$$V_{Th} = V_{SAT} \cdot \frac{R_C}{R_A + R_C}.$$

La tensione V_{UH} si ricava dall'intersezione delle caratteristiche statiche dei bipoli A e B come indicato nella figura (c). Affinchè l'ascissa di questo punto di intersezione, ossia V_{UH} , si mantenga uguale a $V_{Z1} + V_Y$ occorre che sia $V_{Th} > (V_{Z1} + V_Y)$. Sostituendo a V_{Th} l'espressione trovata sopra, si ottiene:

$$V_{SAT} \cdot \frac{R_C}{R_A + R_C} > V_{Z1} + V_Y$$

essendo $V_{Z1} + V_Y = V_{UH}$, questa formula diventa:

$$V_{SAT} \cdot \frac{R_C}{R_A + R_C} > V_{UH}.$$

Risolvendo rispetto a R_A si ottiene:

$$R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{UH})}{V_{UH}} \quad \text{vincolo 1.}$$

Inoltre questa disequazione ha senso solo se:

$$V_{UH} < V_{SAT} \quad \text{vincolo 2.}$$

➤ Caso 2: $V_O = -V_{SAT}$.

Calcolo V_{UL} . In questo caso il circuito di controllo assume l'aspetto riportato nella figura (d). Notiamo che Z1 si trova in conduzione diretta e Z2 si trova in conduzione di breakdown, pertanto V_{UL} vale:

$$V_{UL} = -(V_{Z2} + V_Y).$$

Vincoli. Procedendo in modo analogo al caso 1 si ottengono le formule:

$$R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - |V_{UL}|)}{|V_{UL}|} \quad \text{vincolo 1}$$

$$V_{UL} < V_{SAT} \quad \text{vincolo 2.}$$

➤ Ricerca dei vincoli più restrittivi.

Occorre eseguire il calcolo preliminare:

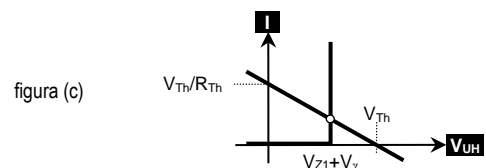
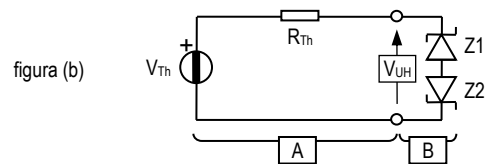
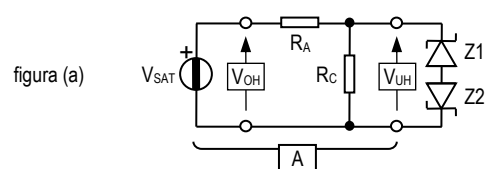
$$V_{U_MAX} = \text{MAX}[V_{UH} ; |V_{UL}|],$$

dopo di che si ottengono le seguenti condizioni complessive di vincolo:

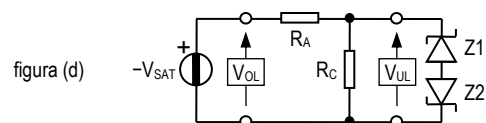
$$1) V_{U_MAX} < V_{SAT} \quad \rightarrow \text{condizione sulle tensioni di uscita } V_{UH} \text{ e } V_{UL}.$$

$$2) R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{U_MAX})}{V_{U_MAX}} \quad \rightarrow \text{condizione sulla resistenza tampone } R_A$$

Caso 1



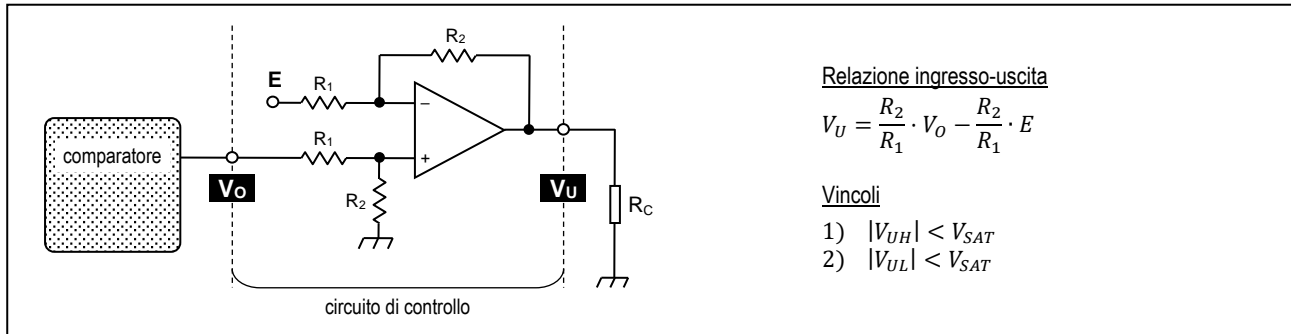
Caso 2



Fine dimostrazione

Circuito di controllo 4 -- traslatore di tensione di tipo diretto

Il circuito di controllo può essere realizzato anche attraverso un traslatore di tensione di tipo diretto. Nella figura seguente è rappresentato un traslatore di tensione di tipo diretto e, a fianco, è riportata la sua relazione ingresso-uscita e i vincoli da rispettare.



Indichiamo il procedimento con cui si esegue il progetto del circuito di controllo.

Il problema

Consideriamo una tensione di saturazione $V_{SAT}=10$ e ipotizziamo che si voglia ottenere la seguente relazione I/O:

- ➔ con $V_{OH}=+V_{SAT}$ si vuole ottenere l'uscita $V_{UH}=2$ (punto P_H del grafico seguente).
- ➔ con $V_{OL}=-V_{SAT}$ si vuole ottenere l'uscita $V_{UL}=0$ (punto P_L del grafico seguente);

La soluzione

- **Passo 1:** Individuare la relazione I/O che il circuito di controllo deve realizzare.

La relazione ingresso-uscita indicata sopra è rappresentata graficamente dal segmento di retta disegnato nella figura a lato.

Con semplici calcoli di geometria analitica si arriva alla seguente equazione della retta:

$$V_U = 0,1 \cdot V_O + 1$$

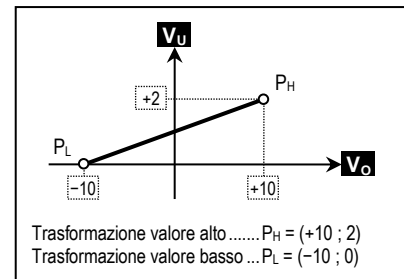
- **Passo 2:** Scrivere la relazione I/O del traslatore di tensione di tipo diretto.

$$V_U = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_O - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

- **Passo 3:** Calcolo parametri circuitali del traslatore di tensione.

Affinchè il circuito del traslatore di tensione si comporti come indicato dalle specifiche di progetto, le rispettive equazioni devono essere uguali, il che si realizza se i coefficienti corrispondenti sono uguali. Si ottiene così il seguente sistema risolvibile:

$$\begin{cases} \frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{10} \\ -\frac{R_2}{R_1} \cdot E = 1 \end{cases} \quad \text{risolvendo si ottiene:} \quad \begin{cases} R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_1 = 10 \cdot 10^3 \\ E = -5 \end{cases}$$

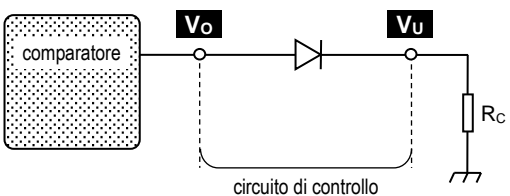


NOTA. La versatilità del traslatore di tensione. Il circuito di controllo effettuato tramite traslatore di tensione è il più efficiente tra quelli presentati. Infatti i valori alto e basso che il circuito di controllo fornisce in uscita possono avere qualsiasi valore, anche negativo, basta che al valore alto di ingresso V_{OH} corrisponda un valore alto di uscita V_{UH} e al valore basso di ingresso V_{OL} corrisponda un valore basso di uscita V_{UL} .

Nei convertitori a diodi questo non succede infatti:

- nel convertitore con diodo Raddrizzatore i valori di uscita sono fissi;
- nei convertitori con diodo Zener c'è maggiore libertà nella scelta delle tensioni di uscita, ma non si possono ottenere valori molto piccoli in quanto non esistono diodi Zener con tensione di breakdown inferiore a 4÷5 volt.

Esercizio -- Circuito di controllo 1 -- diodo Raddrizzatore

RICHIAMI TEORICI	
	<p><u>Relazione ingresso-uscita</u></p> <p>Trasformazione valore alto.....$V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_{SAT} - V_Y$</p> <p>Trasformazione valore basso.....$V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = 0$</p> <p><u>Vincoli</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) $V_{BD} > V_{SAT}$ 2) E' necessaria la presenza della resistenza di carico R_C

Problema di analisi

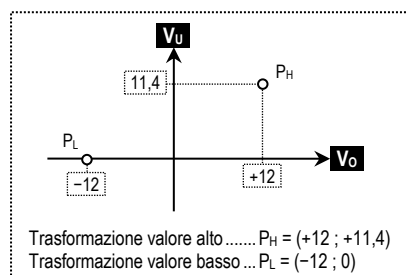
Analizzare il seguente circuito di controllo realizzato tramite diodo Raddrizzatore.	<u>Dati del comparatore</u>	<u>Dati del circuito di controllo</u>	<u>Quesiti</u>
	$V_{SAT} = 12$ $V_{OH} = +V_{SAT}$ $V_{OL} = -V_{SAT}$	$V_{BD} = 20$ $I_{OH_MAX} = 5 \cdot 10^{-3}$ $R_C = 4 \cdot 10^3$	Punti di trasferimento Controllo dei vincoli

- 1) $V_{UH} = V_{SAT} - V_Y$

$$\left[\begin{array}{l} V_{SAT} = 12 \text{ dato} \\ V_Y = 0,6 \text{ ipotesi} \end{array} \right. \rightarrow V_{UH} = 11,4$$
- 2) $|V_{BD}| > V_{SAT}$

$$\left[\begin{array}{l} V_{SAT} = 12 \text{ dato} \\ V_{BD} = 20 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow |20| > 12 \text{ OK}$$
- 3) $\frac{V_{UH}}{R_C} < I_{OH_MAX}$

$$\left[\begin{array}{l} V_{UH} = 11,4 \text{ calcolo 1} \\ R_C = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ I_{OH_MAX} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow 2,85 \cdot 10^{-3} < 5 \cdot 10^{-3} \text{ OK}$$



Problema di sintesi

Progettare il circuito di controllo dell'uscita di un comparatore che abbia le caratteristiche indicate a fianco. Questo circuito deve essere realizzato tramite diodo Raddrizzatore.	<u>Dati generali</u>	<u>Dati OUT del comparatore</u>	<u>Specifiche di progetto</u>
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 12$	$V_{OH} = +V_{SAT} = +12$ $V_{OL} = -V_{SAT} = -12$	$V_{UH} = 11,4$ $V_{UL} = 0$

- 1) $V_{UH} = V_{SAT} - V_Y$

$$\left[\begin{array}{l} V_{UH} = 11,4 \text{ dato} \\ V_{SAT} = 12 \text{ dato} \\ V_Y = 0,6 \text{ ipotesi} \end{array} \right. \rightarrow 11,4 = 11,4 \text{ OK}$$
- 2) $V_{UL} = 0$

$$[V_{UL} = 0 \text{ dato}] \rightarrow 0 = 0 \text{ OK}$$
- 3) $|V_{BD}| > V_{SAT}$

$$[V_{SAT} = 12 \text{ dato}] \rightarrow |V_{BD}| > 12 \quad |V_{BD}| = 25 \text{ (scelta)}$$

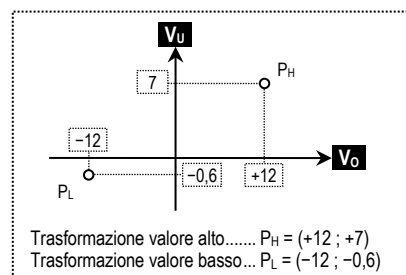
Esercizio -- Circuito di controllo 2 -- un diodo Zener

RICHIAMI TEORICI	
	Relazione ingresso-uscita Trasformazione valore alto $V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_Z$ Trasformazione valore basso $V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -V_Y$
	Vincoli 1) $V_Z < V_{SAT}$ \rightarrow condizione sulla tensione di uscita alta $V_{UH} = V_Z$. 2) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_Z}$ \rightarrow condizione sulla resistenza tampone R_A

Problema di analisi

Analizzare il seguente circuito di controllo realizzato tramite diodo Zener.	Dati del comparatore $V_{SAT} = 12$ $V_{OH} = +V_{SAT}$ $V_{OL} = -V_{SAT}$	Dati del circuito di controllo $V_Z = 7$ $R_C = 8 \cdot 10^3$ $R_A = 4 \cdot 10^3$	Quesiti Punti di trasferimento Controllo dei vincoli

- 1) $V_{UH} = V_Z$ $[V_Z = 7 \text{ dato}] \rightarrow V_{UH} = 7$
- 2) $V_{UL} = -V_Y$ $[V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}] \rightarrow V_{UL} = -0,6$
- 3) $V_Z < V_{SAT}$ $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}] \rightarrow 7 < 12$
 $[V_Z = 7 \text{ dato}] \rightarrow \text{OK}$
- 4) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_Z}$ $[R_A = 4 \cdot 10^3 \text{ dato}] \rightarrow 4 \cdot 10^3 < 5,7 \cdot 10^3$
 $[R_C = 8 \cdot 10^3 \text{ dato}] \rightarrow \text{OK}$
 $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}]$
 $[V_Z = 7 \text{ dato}]$



Problema di sintesi

Progettare il circuito di controllo dell'uscita di un comparatore che abbia le caratteristiche indicate a fianco. Questo circuito deve essere realizzato tramite un diodo Zener.	Dati generali $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 12$	Dati OUT del comparatore $V_{OH} = +V_{SAT} = +12$ $V_{OL} = -V_{SAT} = -12$	Specifiche di progetto $V_{UH} = 6$ $V_{OL} = -0,6$ $R_C = 8 \cdot 10^3$

- 1) $V_{UH} = V_Z$ $[V_{UH} = 6 \text{ dato}] \rightarrow V_Z = 6$
- 2) $V_{UL} = -V_Y$ $[V_Y = -0,6 \text{ ipotesi}] \rightarrow -0,6 = -0,6$
 $[V_{UL} = 0,6 \text{ dato}] \rightarrow \text{OK}$
- 3) $V_Z < V_{SAT}$ $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}] \rightarrow 6 < 12$
 $[V_Z = 6 \text{ calcolo 1}] \rightarrow \text{OK}$
- 4) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_Z}$ $[R_C = 8 \cdot 10^3 \text{ dato}] \rightarrow R_A < 8 \cdot 10^3 \rightarrow R_A = 5 \cdot 10^3 \text{ scelta}$
 $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}]$
 $[V_Z = 6 \text{ calcolo 1}]$

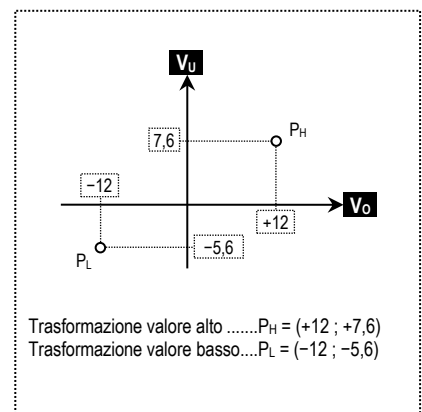
Esercizio -- Circuito di controllo 3 -- due diodi Zener

RICHIAMI TEORICI	
	Relazione ingresso-uscita Trasformazione valore alto..... $V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_{Z1} + V_Y$ Trasformazione valore basso..... $V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -(V_{Z2} + V_Y)$
	Vincoli Calcolo preliminare: $V_{U_MAX} = \text{MAX}[V_{UH} ; V_{UL}]$, dopo di che si ottengono i seguenti vincoli: 1) $V_{U_MAX} < V_{SAT}$ \rightarrow condizione sulle tensioni di uscita V_{UH} e V_{UL} . 2) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{U_MAX})}{V_{U_MAX}}$ \rightarrow condizione sulla resistenza tampone R_A

Problema di analisi

Analizzare il seguente circuito di controllo realizzato tramite due diodi Zener.	Dati del comparatore $V_{SAT} = 12$ $V_{OH} = +V_{SAT}$ $V_{OL} = -V_{SAT}$	Dati del circuito di controllo $R_C = 8 \cdot 10^3$ $R_A = 4 \cdot 10^3$ $V_{Z1} = 7$ $V_{Z2} = 5$	Quesiti Punti di trasferimento Controllo dei vincoli

- 1) $V_{UH} = V_{Z1} + V_Y$ $[V_{Z1} = 7 \text{ dato}$ $\rightarrow V_{UH} = 7,6$
 $[V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}]$
- 2) $V_{UL} = -(V_{Z2} + V_Y)$ $[V_{Z2} = 5 \text{ dato}]$ $\rightarrow V_{UL} = -5,6$
 $[V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}]$
- 3) $V_{U_MAX} = \text{MAX}[V_{UH} ; |V_{UL}|]$ $[V_{UH} = 7,6 \text{ calcolo 1}]$ $\rightarrow V_{U_MAX} = 7,6$
 $[V_{UL} = -5,6 \text{ calcolo 2}]$
 $[V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}]$
- 4) $V_{U_MAX} < V_{SAT}$ $[V_{U_MAX} = 7,6 \text{ calcolo 3}]$ $\rightarrow 7,6 < 12$
 $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}]$ $\rightarrow \text{OK}$
- 5) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{U_MAX})}{V_{U_MAX}}$ $[R_A = 4 \cdot 10^3 \text{ dato}]$ $\rightarrow 4 \cdot 10^3 < 4,63 \cdot 10^3$
 $[R_C = 8 \cdot 10^3 \text{ dato}]$ $\rightarrow \text{OK}$
 $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}]$
 $[V_{U_MAX} = 7,6 \text{ calcolo 3}]$

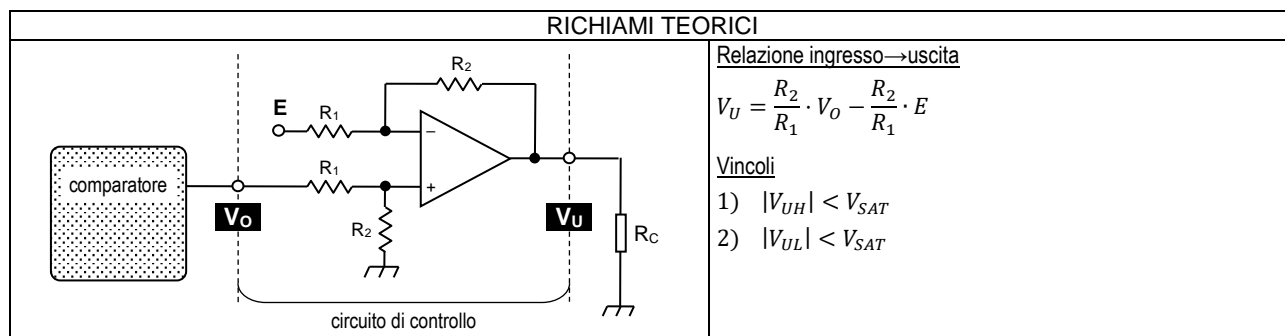


Problema di sintesi

Progettare il circuito di controllo dell'uscita di un comparatore che abbia le caratteristiche indicate a fianco. Questo circuito deve essere realizzato tramite due diodi Zener.	Dati del comparatore $V_{SAT} = 12$ $V_{OH} = +V_{SAT}$ $V_{OL} = -V_{SAT}$	Specifiche di progetto $V_{UH} = 8$ $V_{UL} = -5$ $R_C = 8 \cdot 10^3$	Quesiti Dimensionamento del circuito

- 1) $V_{UH} = V_{Z1} + V_Y$ $[V_{UH} = 8 \text{ dato}]$ $\rightarrow V_{Z1} = 7,4$
 $[V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}]$
- 2) $V_{UL} = -(V_{Z2} + V_Y)$ $[V_{UL} = -5 \text{ dato}]$ $\rightarrow V_{Z2} = 4,4$
 $[V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}]$
- 3) $V_{U_MAX} = \text{MAX}[V_{UH} ; |V_{UL}|]$ $[V_{UH} = 8 \text{ dato}]$ $\rightarrow V_{U_MAX} = 8$
 $[V_{UL} = -5 \text{ dato}]$
- 4) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{U_MAX})}{V_{U_MAX}}$ $[R_C = 8 \cdot 10^3 \text{ dato}]$ $\rightarrow R_A < 4 \cdot 10^3 \rightarrow R_A = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta}$
 $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}]$
 $[V_{U_MAX} = 8 \text{ calcolo 3}]$

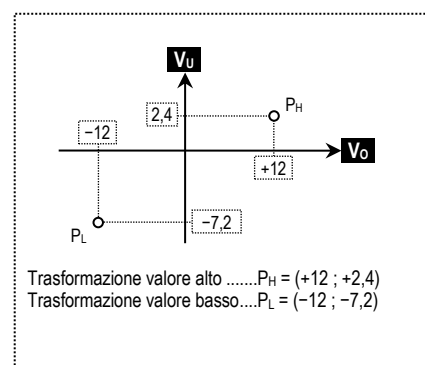
Esercizio -- Circuito di controllo 4 -- traslatore di tensione di tipo diretto



Problema di analisi

Analizzare il seguente circuito di controllo realizzato tramite traslatore di tensione di tipo diretto.	<u>Dati del comparatore</u>	<u>Dati del circuito di controllo</u>	<u>Quesiti</u>
	$V_{SAT} = 12$	$E = -6$	Punti di trasferimento
	$V_{OH} = +V_{SAT}$	$R_1 = 5 \cdot 10^3$	Controllo dei vincoli
	$V_{OL} = -V_{SAT}$	$R_2 = 2 \cdot 10^3$	

- | | | |
|--|---|--|
| 1) $V_{UH} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{OH} - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$ | $\left\{ \begin{array}{l} V_{OH} = 12 \text{ dato} \\ R_1 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ E = -6 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow V_{UH} = 2,4$ | |
| 2) $V_{UL} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{OL} - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$ | $\left\{ \begin{array}{l} V_{OL} = -12 \text{ dato} \\ R_1 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ E = -6 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow V_{UL} = -7,2$ | |
| 3) $ V_{UH} < V_{SAT}$ | $\left\{ \begin{array}{l} V_{UH} = 2,4 \text{ calcolo 1} \\ V_{SAT} = 12 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} 2,4 < 12 \\ \text{OK} \end{array}$ | |
| 4) $ V_{UL} < V_{SAT}$ | $\left\{ \begin{array}{l} V_{UL} = -7,2 \text{ calcolo 2} \\ V_{SAT} = 12 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} 7,2 < 12 \\ \text{OK} \end{array}$ | |



Problema di sintesi

<p>Progettare il circuito di controllo dell'uscita di un comparatore che abbia le caratteristiche indicate a fianco. Questo circuito deve essere realizzato tramite traslatore di tensione.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><th style="text-align: left; padding: 2px;"><u>Dati generali</u></th></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{CC} = \pm 15$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{SAT} = 12$</td></tr></table>	<u>Dati generali</u>	$V_{CC} = \pm 15$	$V_{SAT} = 12$	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><th style="text-align: left; padding: 2px;"><u>Dati OUT del comparatore</u></th></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{OH} = +V_{SAT} = +12$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{OL} = -V_{SAT} = -12$</td></tr></table>	<u>Dati OUT del comparatore</u>	$V_{OH} = +V_{SAT} = +12$	$V_{OL} = -V_{SAT} = -12$	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><th style="text-align: left; padding: 2px;"><u>Specifiche di progetto</u></th></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{UH} = 6$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{UL} = -5$</td></tr></table>	<u>Specifiche di progetto</u>	$V_{UH} = 6$	$V_{UL} = -5$
<u>Dati generali</u>												
$V_{CC} = \pm 15$												
$V_{SAT} = 12$												
<u>Dati OUT del comparatore</u>												
$V_{OH} = +V_{SAT} = +12$												
$V_{OL} = -V_{SAT} = -12$												
<u>Specifiche di progetto</u>												
$V_{UH} = 6$												
$V_{UL} = -5$												

➤ **Passo 1:** Individuare la relazione I/O indicata dalle specifiche di progetto.

La relazione ingresso-uscita indicata sopra è rappresentata graficamente dal segmento di retta disegnato nella figura a lato. L'equazione della retta è:

$$V_U = \frac{11}{24} \cdot V_O + \frac{1}{2}$$

➤ **Passo 2:** Scrivere la relazione I/O fornita dal traslatore di tensione di tipo diretto.

$$V_U = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_O - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

➤ **Passo 3:** Calcolo parametri circuitali.

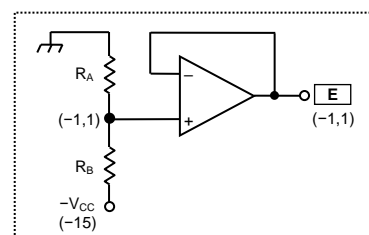
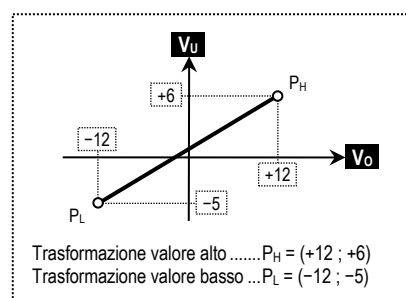
Affinchè il circuito si comporti come indicato dalle specifiche di progetto, le rispettive equazioni devono essere uguali, il che si realizza se i coefficienti corrispondenti sono uguali. Si ottiene così il seguente sistema risolvibile:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_2}{R_1} = \frac{11}{24} \\ -\frac{R_2}{R_1} \cdot E = \frac{1}{2} \end{array} \right. \text{risolvendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_2 = 11 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_1 = 24 \cdot 10^3 \\ E = -1,1 \end{array} \right.$$

La tensione $E = -1,1$ si ottiene tramite un partitore di tensione seguito da un inseguitore di tensione. L'inseguitore di tensione è necessario in quanto impedisce che ci sia prelievo di corrente dal partitore. Il dimensionamento delle resistenze è il seguente:

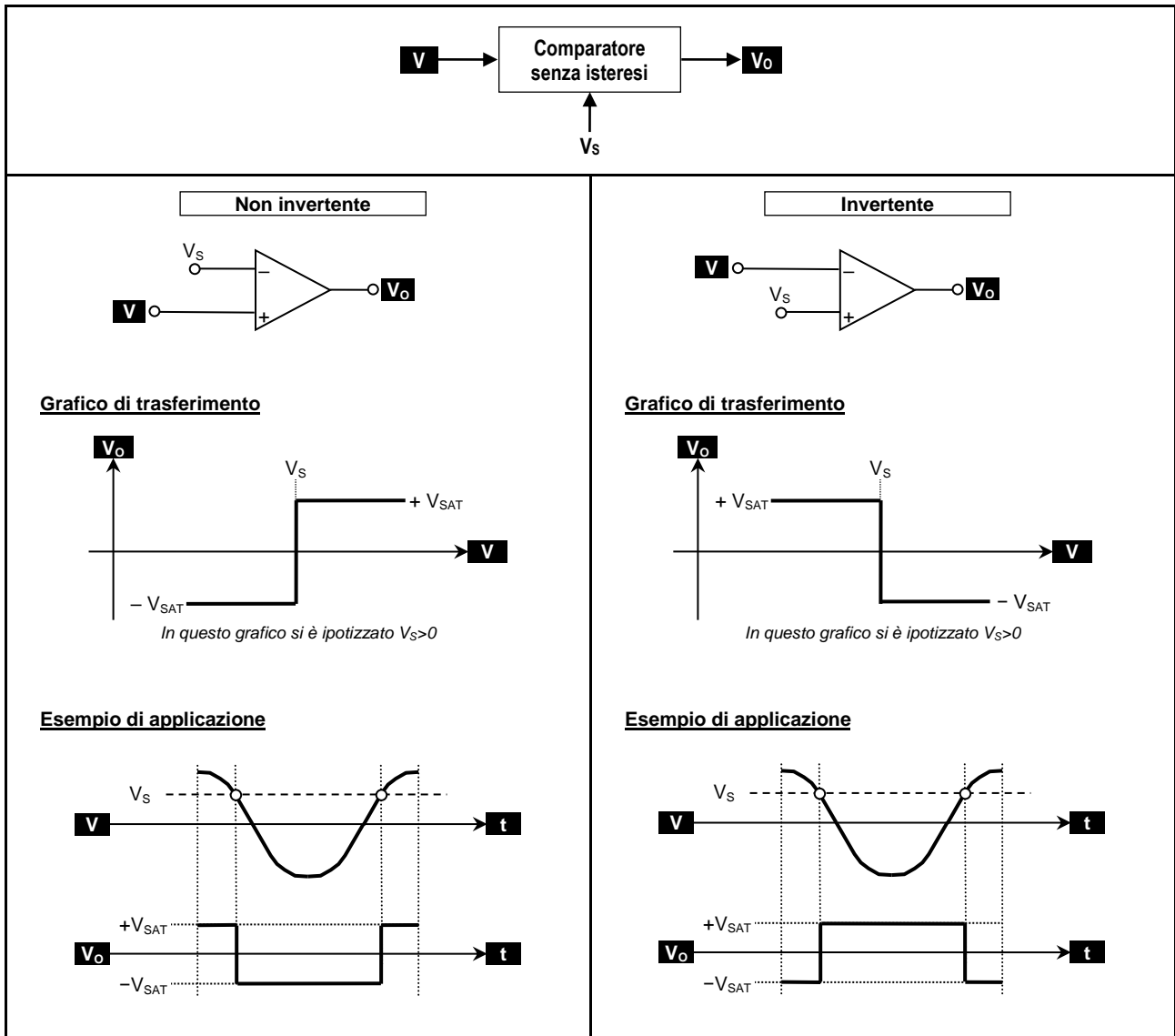
$$\Delta V_{RA} = 1,1 \rightarrow R_A = 1,1 \cdot 10^3$$

$$\Delta V_{RB} = 13,9 \rightarrow R_B = 13,9 \cdot 10^3$$

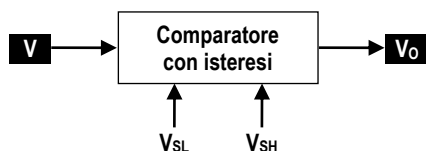


Quadri riassuntivi

Comparatori senza isteresi



Comparatori con isteresi



Non invertente

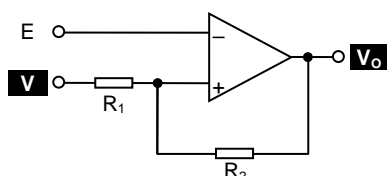
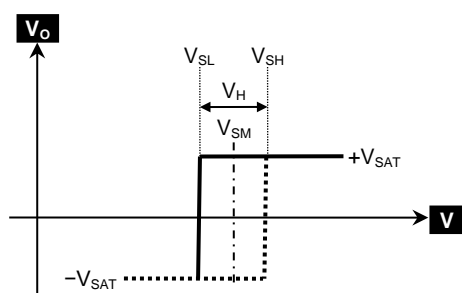


Grafico di trasferimento



In questo grafico abbiamo ipotizzato $V_{SL} > 0$ e $V_{SH} > 0$

Le formule fondamentali sono:

$$V_{SL} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

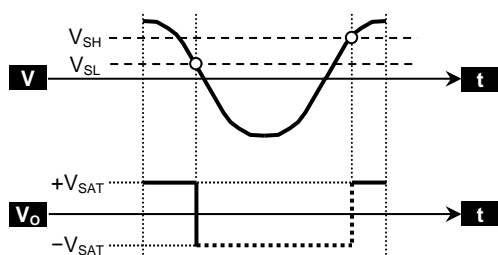
$$V_{SH} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Da cui si ricavano:

$$V_{SM} = \frac{V_{SL} + V_{SH}}{2} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$V_H = V_{SH} - V_{SL} = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Esempio di applicazione



Invertente

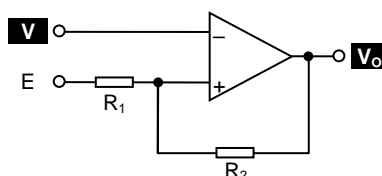
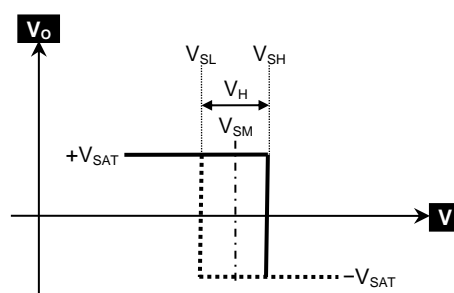


Grafico di trasferimento



In questo grafico abbiamo ipotizzato $V_{SL} > 0$ e $V_{SH} > 0$

Le formule fondamentali sono:

$$V_{SL} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

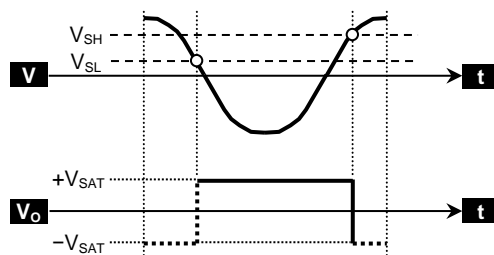
$$V_{SH} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Da cui si ricavano:

$$V_{SM} = \frac{V_{SL} + V_{SH}}{2} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_H = V_{SH} - V_{SL} = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

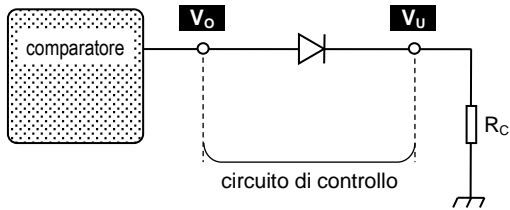
Esempio di applicazione



Circuiti di controllo della tensione di uscita

In questa sezione presentiamo soltanto alcuni esempi di circuiti di controllo della tensione di uscita.

Circuito di controllo con diodo Raddrizzatore



Relazione ingresso-uscita

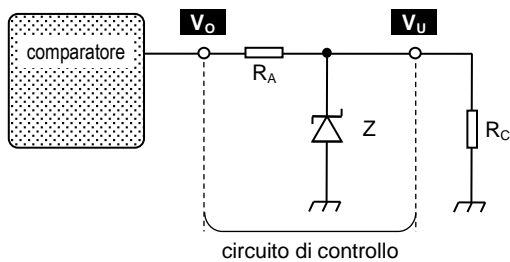
Trasformazione valore alto..... $V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_{SAT} - V_Y$

Trasformazione valore basso..... $V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = 0$

Vincoli

- 1) $|V_{BD}| > |V_{SAT}|$
- 2) E' necessaria la presenza della resistenza di carico R_C

Circuito di controllo con un diodo Zener



Relazione ingresso-uscita

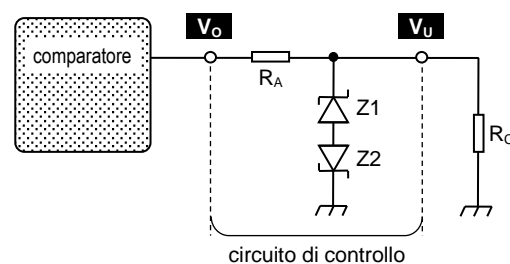
Trasformazione valore alto..... $V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_Z$

Trasformazione valore basso..... $V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -V_Y$

Vincoli

- 1) $V_Z < V_{SAT}$ \rightarrow condizione sulla tensione di uscita alta $V_{UH}=V_Z$.
- 2) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_Z}$ \rightarrow condizione sulla resistenza tampone R_A

Circuito di controllo con due diodi Zener



Relazione ingresso-uscita

Trasformazione valore alto..... $V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_{Z1} + V_Y$

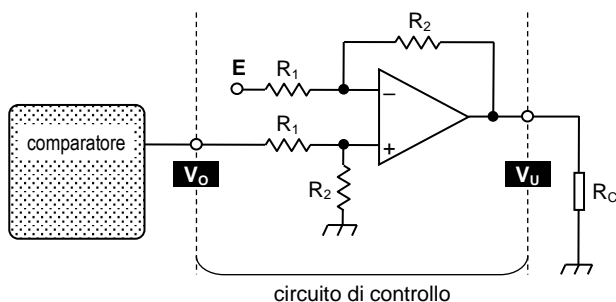
Trasformazione valore basso..... $V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -(V_{Z2} + V_Y)$

Vincoli

Calcolo preliminare: $V_{U_MAX} = \text{MAX}[V_{UH} ; |V_{UL}|]$,
dopo di che si ottengono i seguenti vincoli:

- 1) $V_{U_MAX} < V_{SAT}$ \rightarrow condizione sulle tensioni di uscita V_{UH} e V_{UL} .
- 2) $R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{U_MAX})}{V_{U_MAX}}$ \rightarrow condizione sulla resistenza tampone R_A

Circuito di controllo con traslatore di tensione di tipo diretto



Relazione ingresso-uscita

$$V_U = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_O - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

Vincoli

- 1) $|V_{UH}| < V_{SAT}$
- 2) $|V_{UL}| < V_{SAT}$