



POLITECNICO
DI TORINO

DET

Department of Electronics and Telecommunications

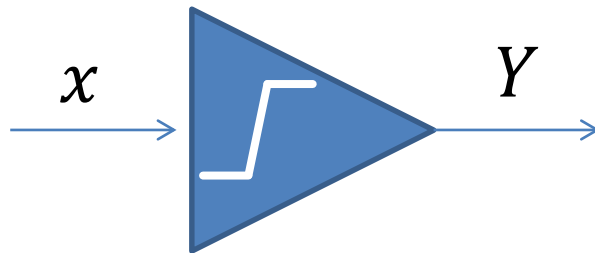
Comparatori di Soglia

Comparatore di Soglia

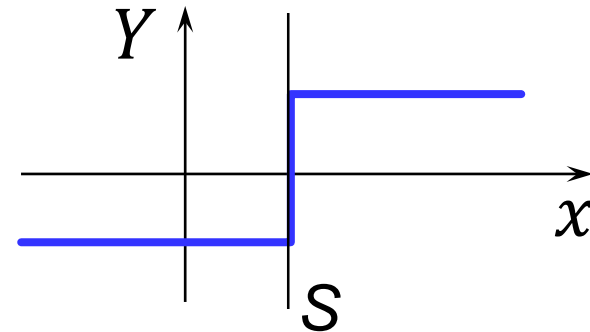
- E' un blocco con ingresso analogico e uscita digitale

comparatore non invertente

$$Y(x): \mathbb{R} \rightarrow \{0,1\}$$
$$x < S : Y = 0$$
$$x > S : Y = 1$$

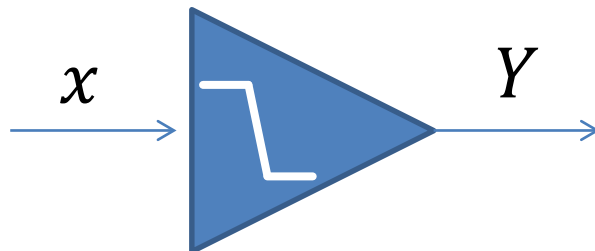


L'uscita Y è alta se e solo se l'ingresso analogico è **maggiore** di una soglia S .

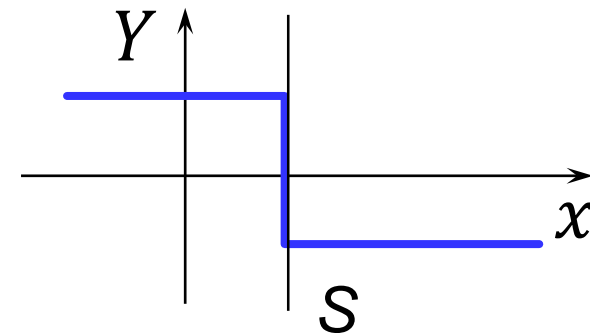


comparatore invertente

$$Y(x): \mathbb{R} \rightarrow \{0,1\}$$
$$x < S : Y = 1$$
$$x > S : Y = 0$$



L'uscita Y è alta se e solo se l'ingresso analogico è **minore** di una soglia S .



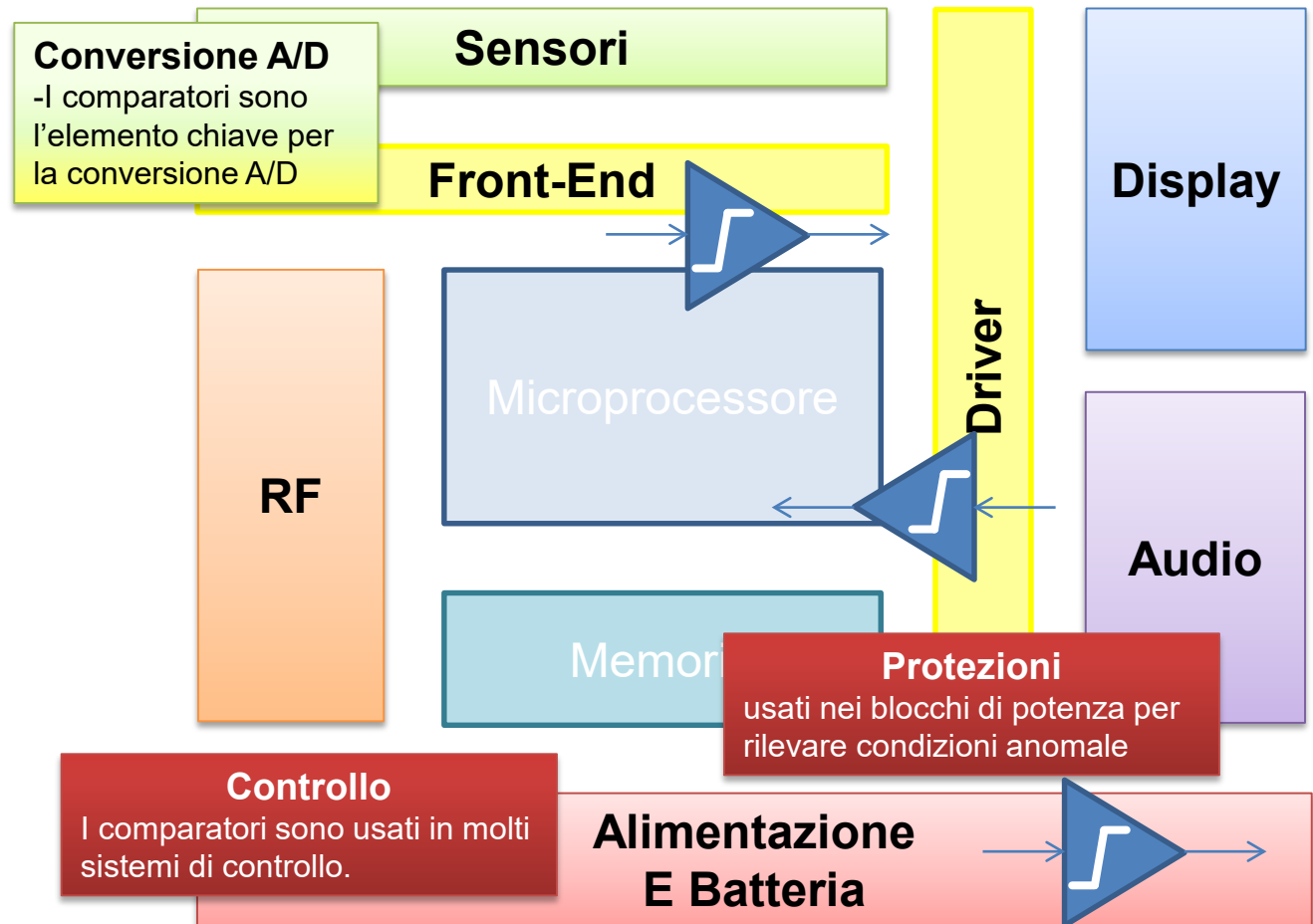
Comparatori nei Sistemi Elettronici

Schema a blocchi funzionale semplificato

Apple iPhone5



I comparatori sono l'elemento chiave per la conversione A/D e sono utilizzati in numerosi altri sottosistemi



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

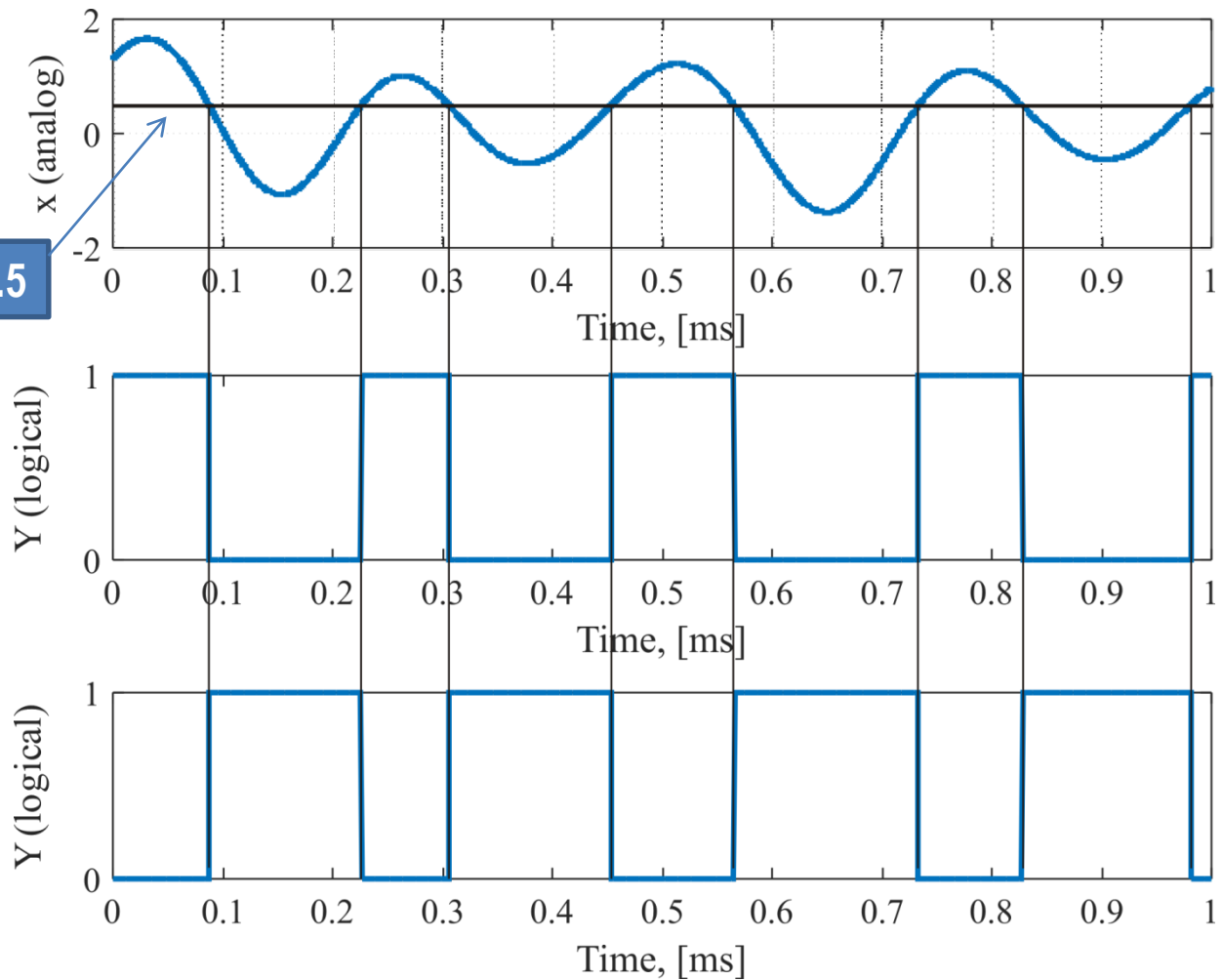
Comparatore di Soglia

Ingresso analogico

Soglia $S=0.5$

Uscita digitale:
**comparatore
non invertente**

Uscita digitale:
**comparatore
invertente**



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

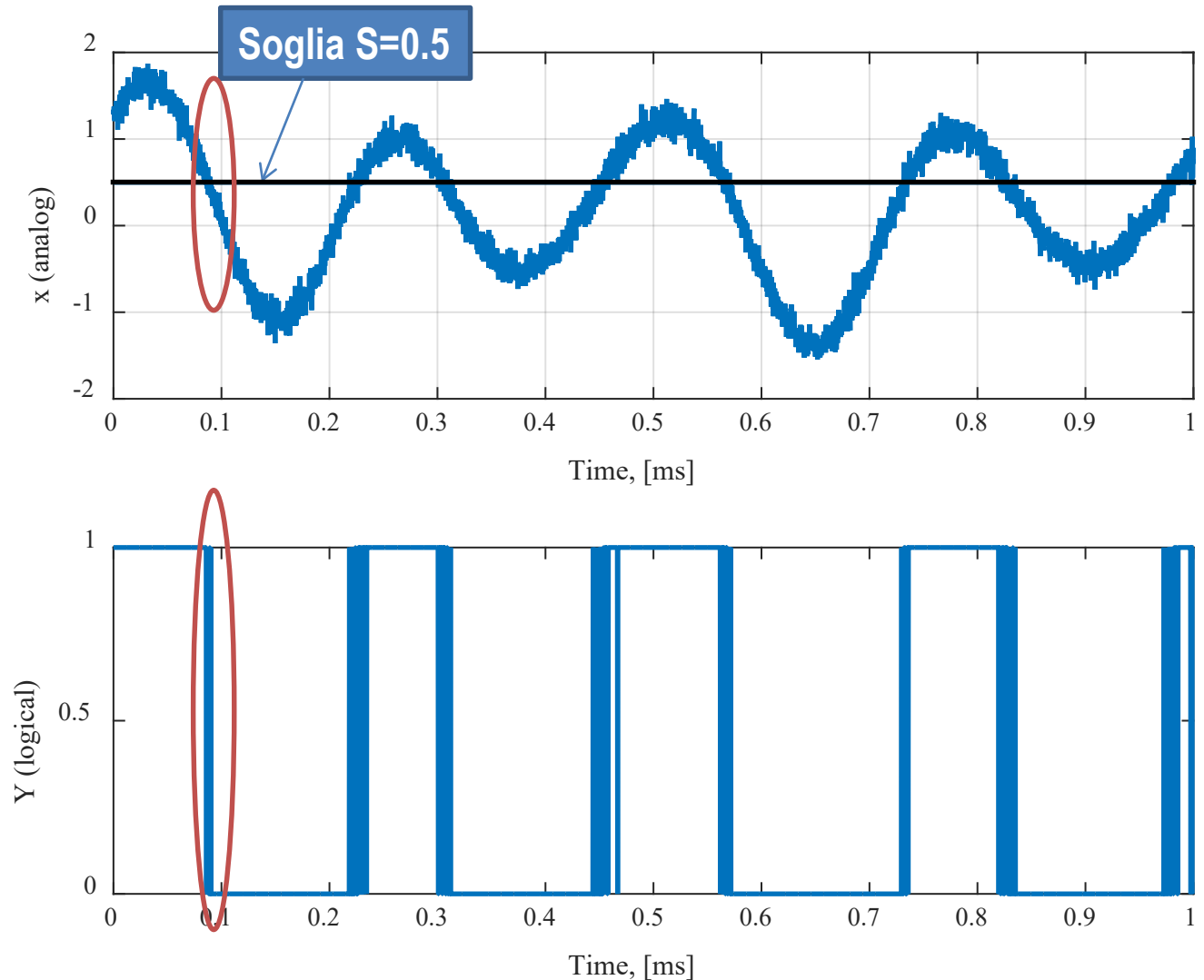
Comparatore di Soglia

Ingresso analogico
rumoroso

Si hanno
attraversamenti
multipli della soglia
dovuti al rumore

Uscita digitale:
**comparatore
non invertente**

L'uscita presenta
commutazioni
multiple indesiderate



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

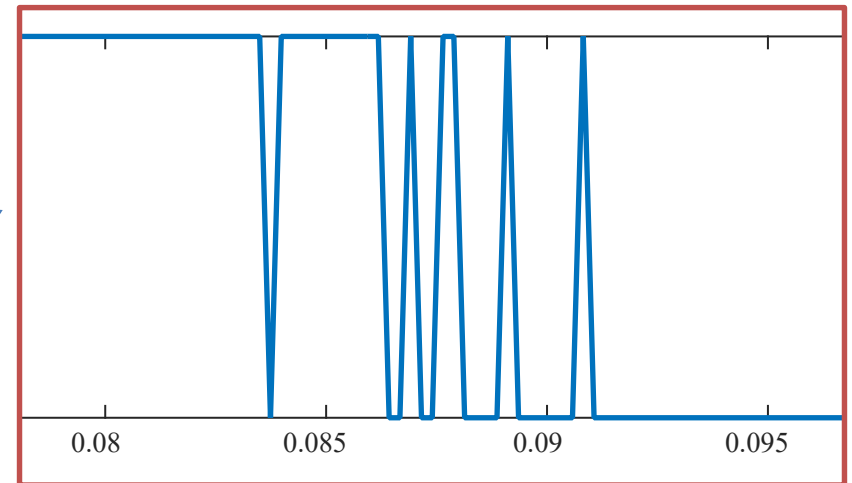
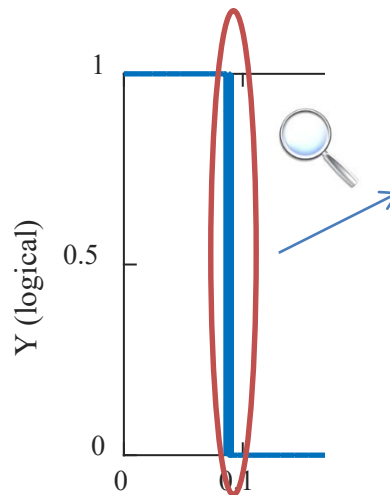
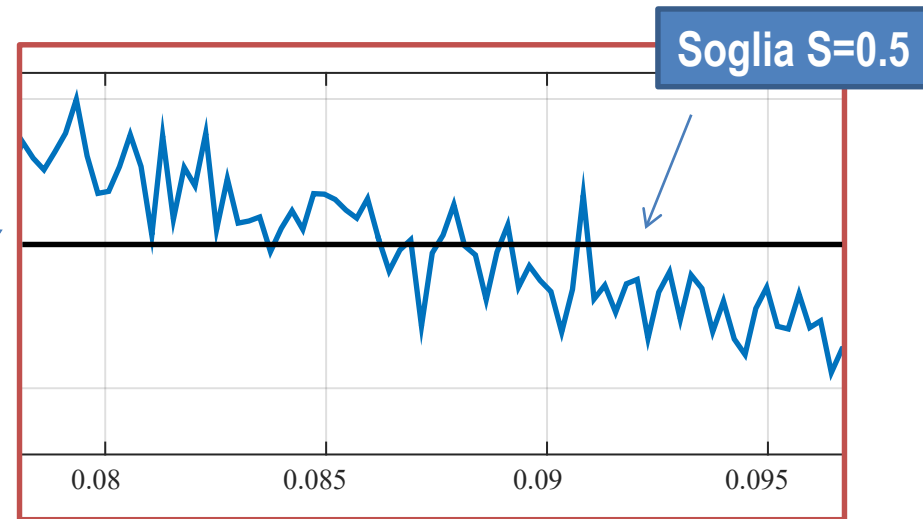
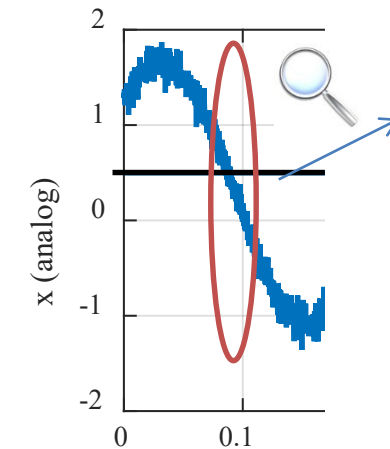
Comparatore di Soglia

Ingresso analogico
rumoroso

Si hanno
attraversamenti
multipli della soglia
dovuti al rumore

Uscita digitale:
**comparatore
non invertente**

L'uscita presenta
commutazioni
multiple indesiderate



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Comparatore con Isteresi

- Due soglie, S_1 ed S_2 , la cui differenza è detta (ampiezza del ciclo di) **isteresi del comparatore**
- Il comportamento dipende dallo **stato** del comparatore (= valore logico passato dell'uscita) → elemento con memoria

allo **stato basso** ($Y = 0$):

si comporta come un comparatore non-invertente con soglia S_1 per commutare ($0 \rightarrow 1$), l'ingresso deve salire oltre S_1

allo **stato alto** ($Y = 1$):

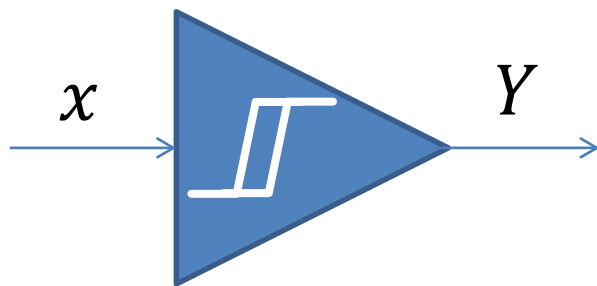
si comporta come un comparatore non-invertente con soglia S_2 per commutare ($1 \rightarrow 0$), l'ingresso deve scendere sotto S_2

$$Y: \mathbb{R} \times \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}$$

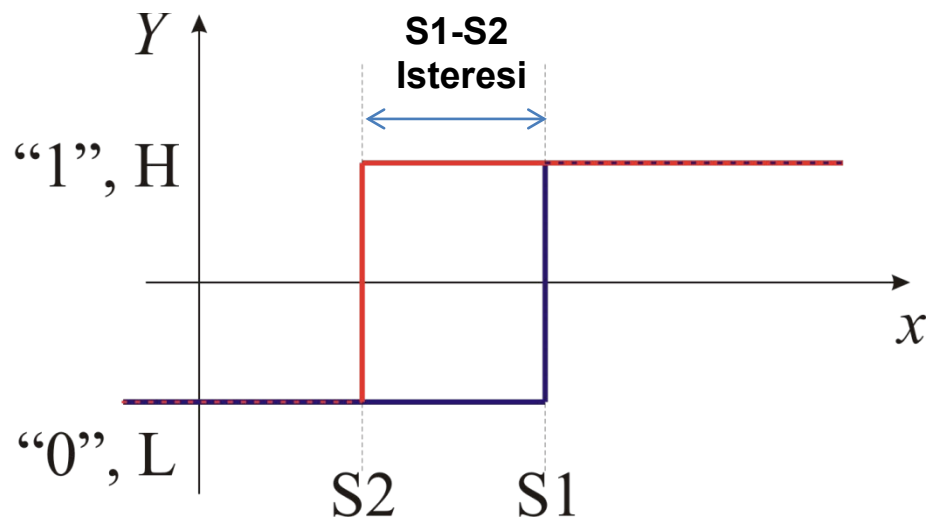
$$Y = 0: \begin{array}{l} x < S_1 : Y = 0 \\ x > S_1 : Y = 1 \end{array}$$

$$Y = 1: \begin{array}{l} x < S_2 : Y = 0 \\ x > S_2 : Y = 1 \end{array}$$

Comparatore con isteresi non invertente



La differenza $S_1 - S_2$ è detta (ampiezza del ciclo di) **isteresi del comparatore**

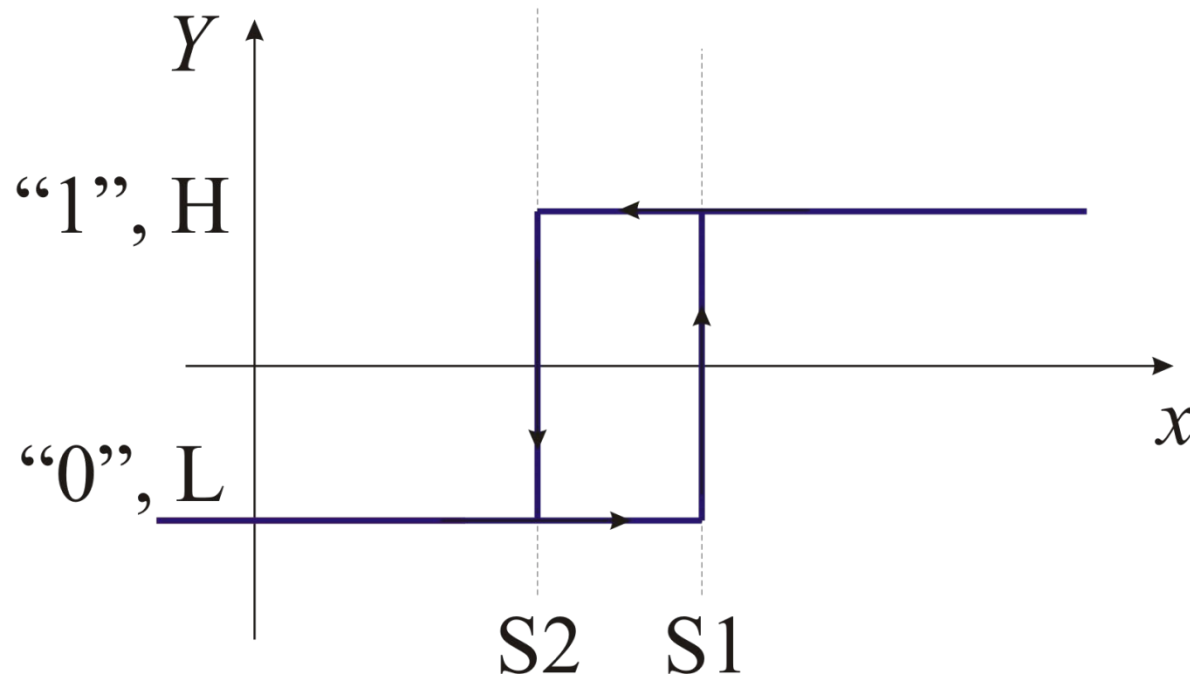


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Comparatore con Isteresi

- La caratteristica ingresso-uscita del comparatore con isteresi non è una funzione: ai valori di x compresi nel ciclo di isteresi non corrisponde un unico valore di Y .
- Si tratta di un sistema *dinamico*, per cui l'uscita non dipende solo dall'ingresso ad un dato istante, ma anche dalla storia passata.
- Conoscendo anche la storia passata (in particolare, il valore di Y negli istanti precedenti), l'ingresso è univocamente determinato.



Comparatori con Isteresi

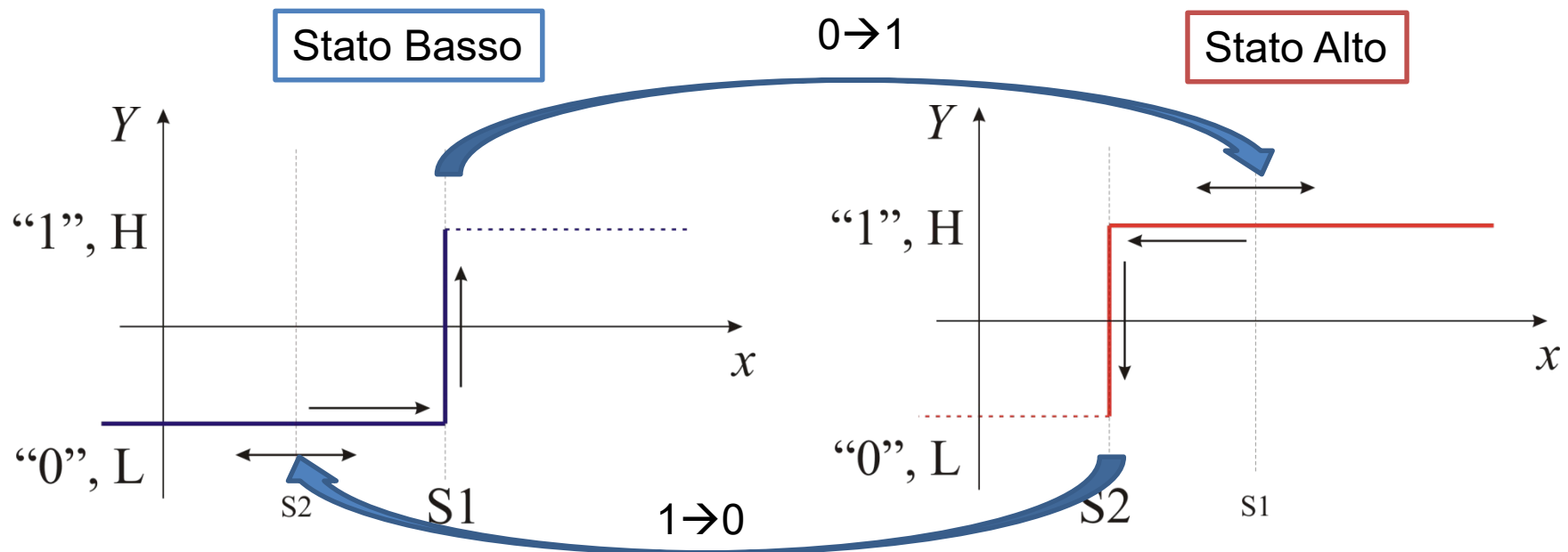
Comparatore con isteresi non invertente

allo **stato basso** ($Y = 0$):

- è insensibile agli attraversamenti della soglia S_2
- per la commutazione $0 \rightarrow 1$, deve essere $x > S_1$
- si comporta come un comparatore non-invertente con soglia S_1

allo **stato alto** ($Y = 1$):

- è insensibile agli attraversamenti della soglia S_1
- per la commutazione $1 \rightarrow 0$, l'ingresso deve scendere sotto S_2
- Si comporta come un comparatore non-invertente con soglia S_2



Comparatore con Isteresi

Lo stato iniziale del comparatore è basso, ma commuta subito ad alto perché $x > S_1$

1) x decresce e attraversa S_1 ma il comparatore non commuta perché è allo stato alto ($Y = 1$)

2) x decresce e attraversa S_2

il comparatore commuta:

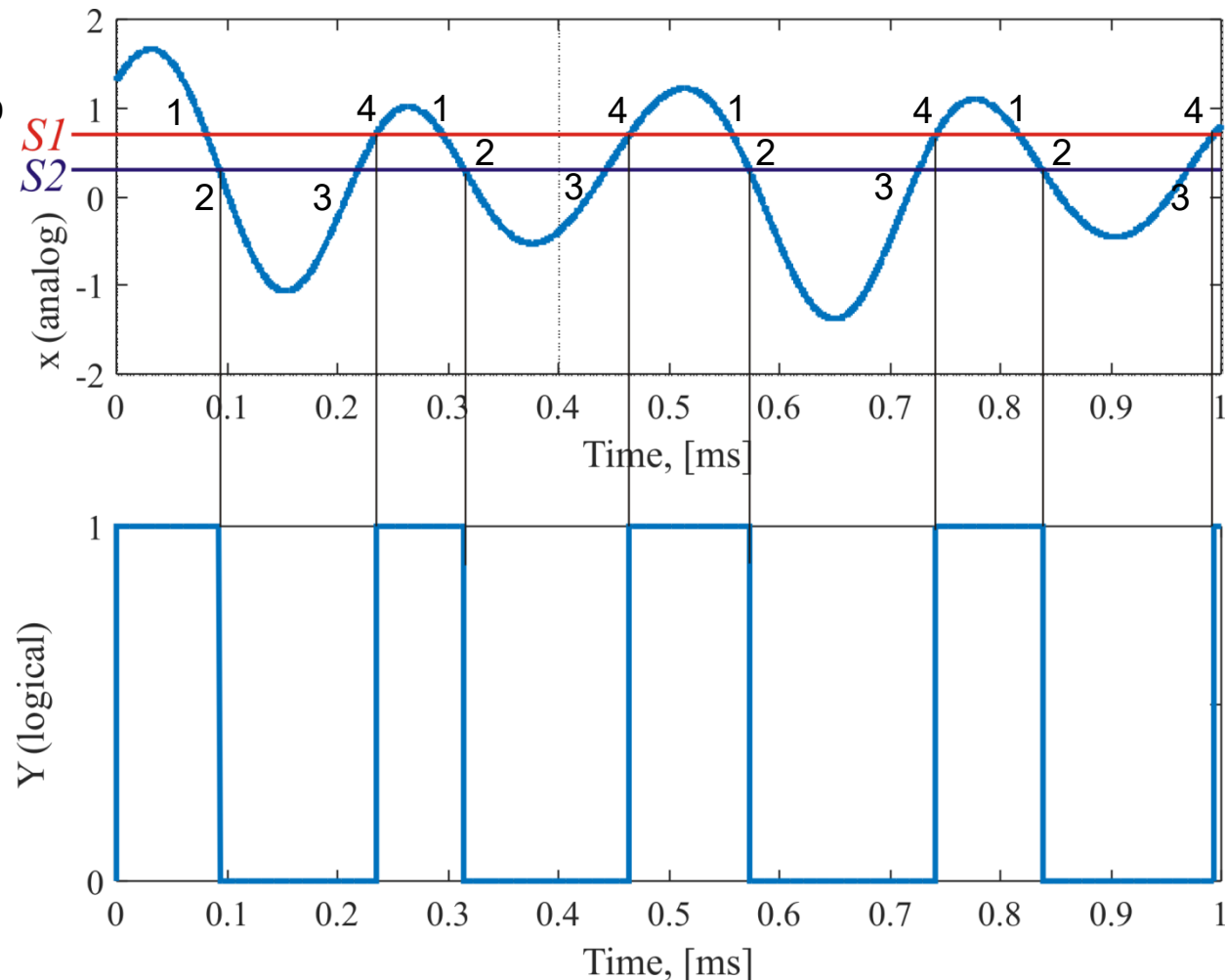
$Y = 1 \rightarrow 0$

3) x cresce e attraversa S_2 ma il comparatore non commuta perché è allo stato basso ($Y = 0$)

4) x cresce e attraversa S_1

il comparatore commuta:

$Y = 0 \rightarrow 1$



Comparatore con Isteresi

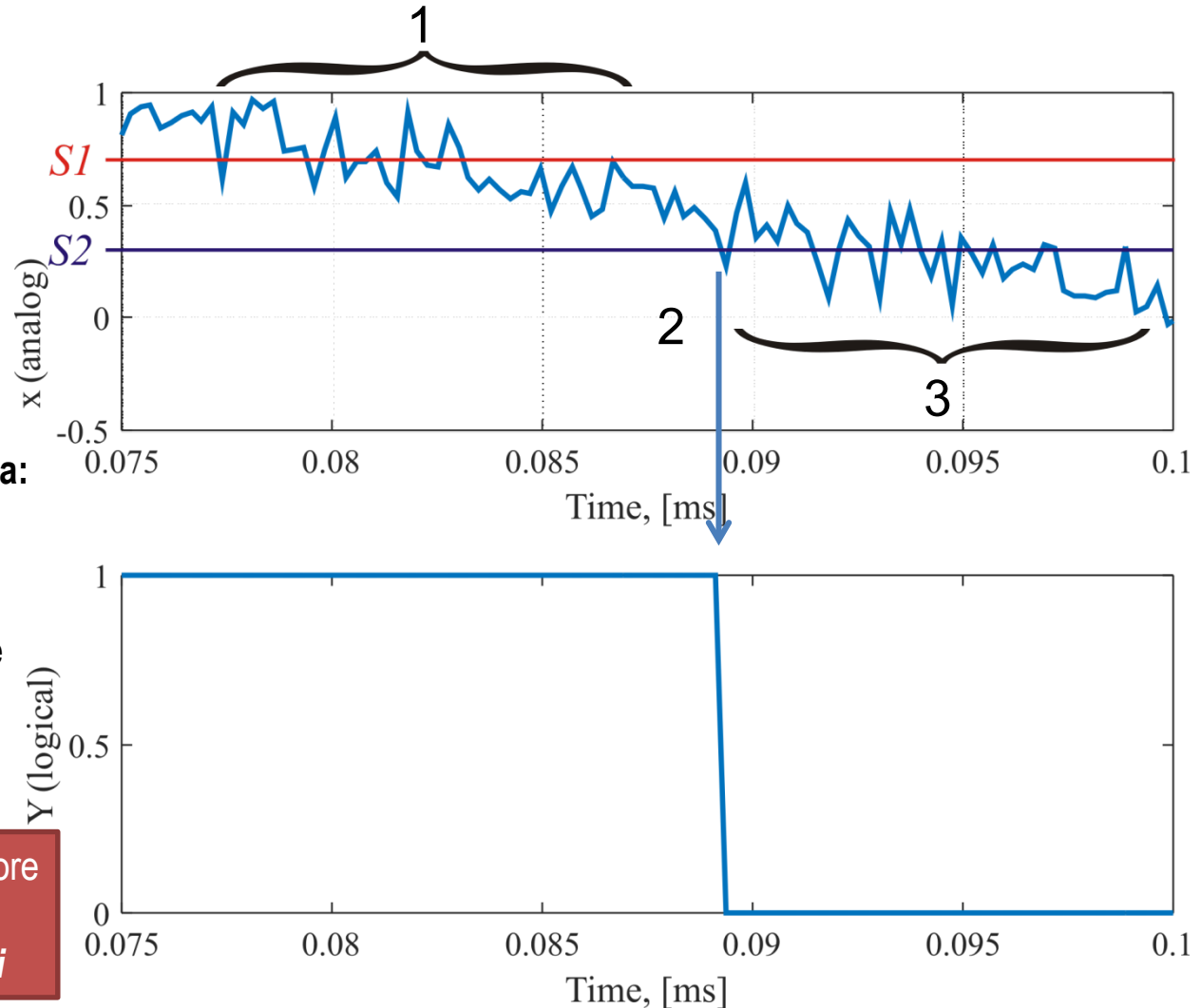
In presenza di rumore...

1) x attraversa ripetutamente S_1 ma il comparatore non commuta perché è allo stato alto ($Y = 1$)

2) x decresce e appena attraversa S_2 (picco negativo di rumore) **il comparatore commuta:**
 $Y = 1 \rightarrow 0$

3) a causa del rumore x attraversa ripetutamente S_2 ma il comparatore non commuta più perché ora è allo stato basso ($Y = 0$).

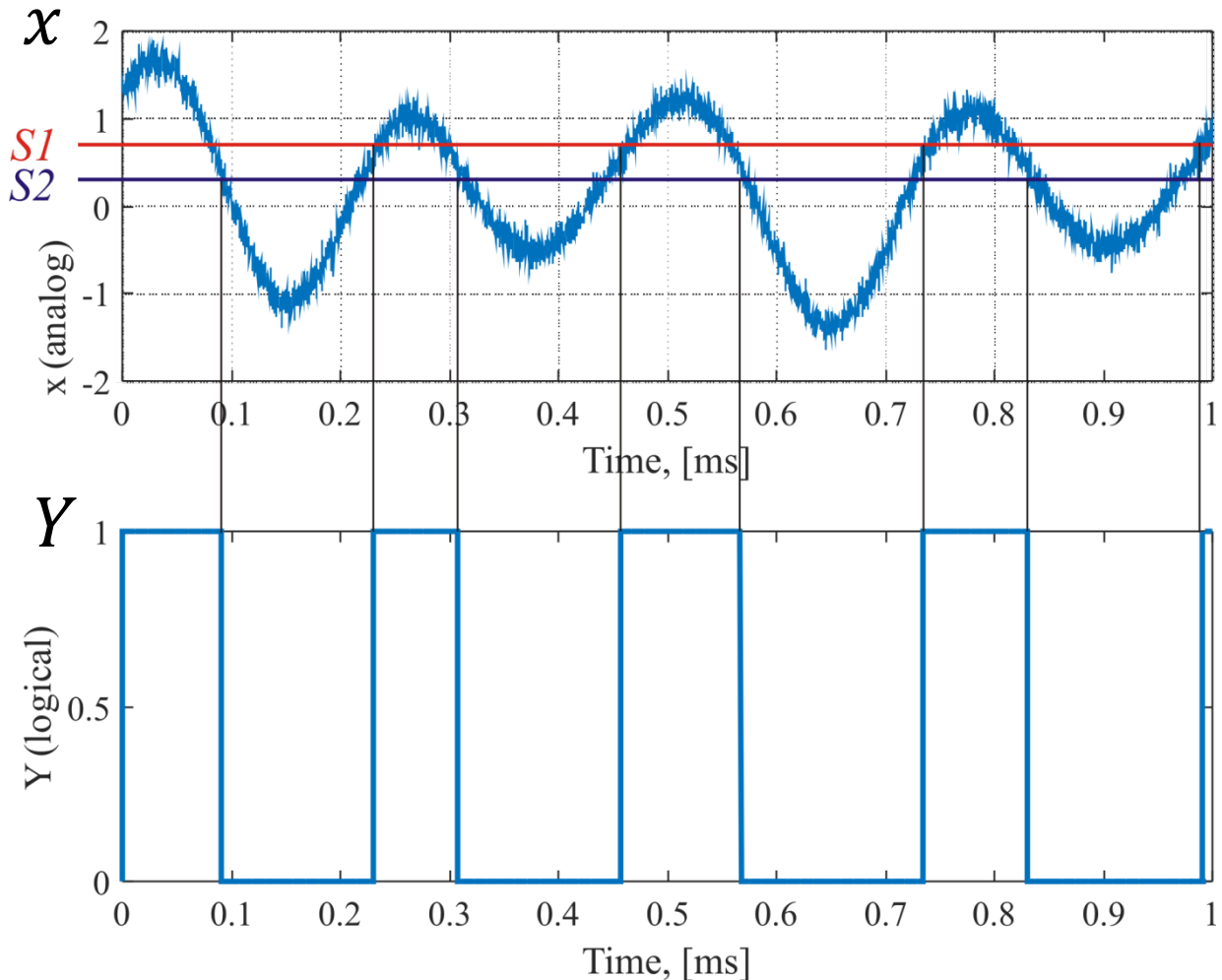
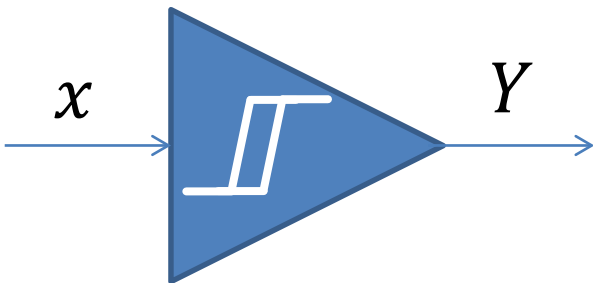
Se l'ampiezza picco-picco del rumore è minore dell'isteresi $S_1 - S_2$
non si hanno false commutazioni



Comparatore con Isteresi

In presenza di rumore...

Il discorso è generalizzabile per tutte le commutazioni:
se l'ampiezza picco-picco del rumore è inferiore all'isteresi, non si hanno false commutazioni!



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Comparatori con Isteresi

Anche il comparatore con isteresi può essere di tipo *invertente*.

Comparatori con isteresi invertente

Allo **stato basso** ($Y = 0$):

si comporta come un comparatore invertente con soglia S_2
per commutare allo stato alto, l'ingresso deve scendere sotto S_2

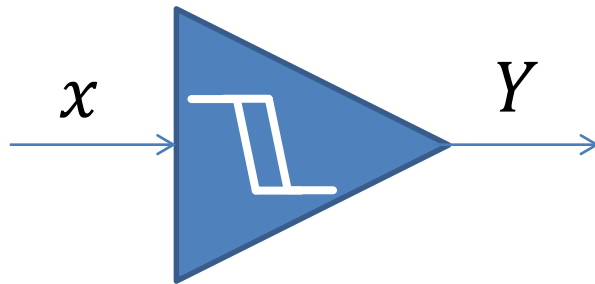
Allo **stato alto** ($Y = 1$):

si comporta come un comparatore invertente con soglia S_1
per commutare allo stato basso, deve essere $x > S_1$

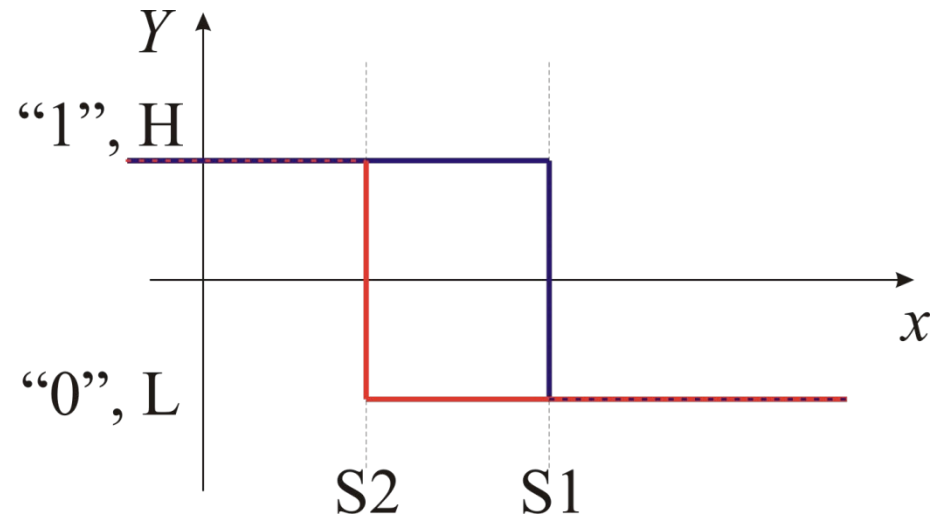
$$Y: \mathbb{R} \times \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}$$

$$Y = 0: \begin{array}{l} x > S_2 : Y = 0 \\ x < S_2 : Y = 1 \end{array}$$

$$Y = 1: \begin{array}{l} x > S_1 : Y = 0 \\ x < S_1 : Y = 1 \end{array}$$



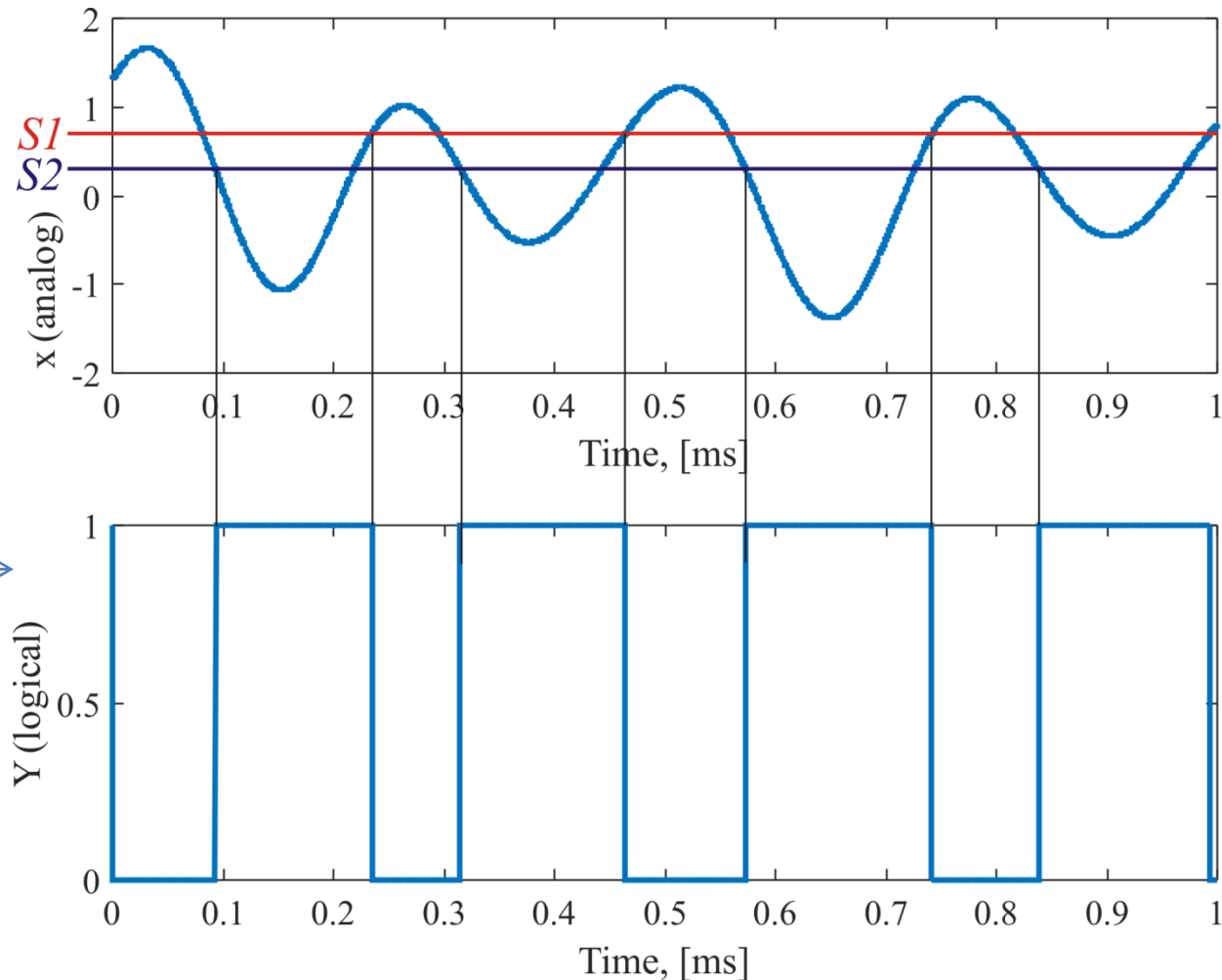
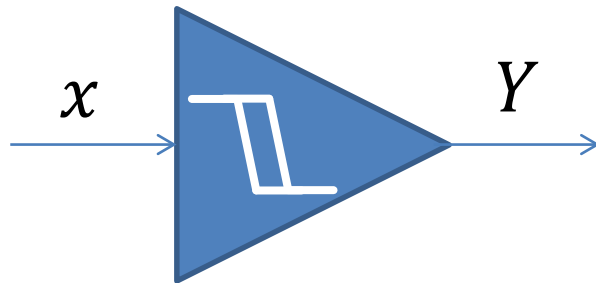
La differenza $S_1 - S_2$ è detta
(ampiezza del ciclo di) **isteresi del comparatore**



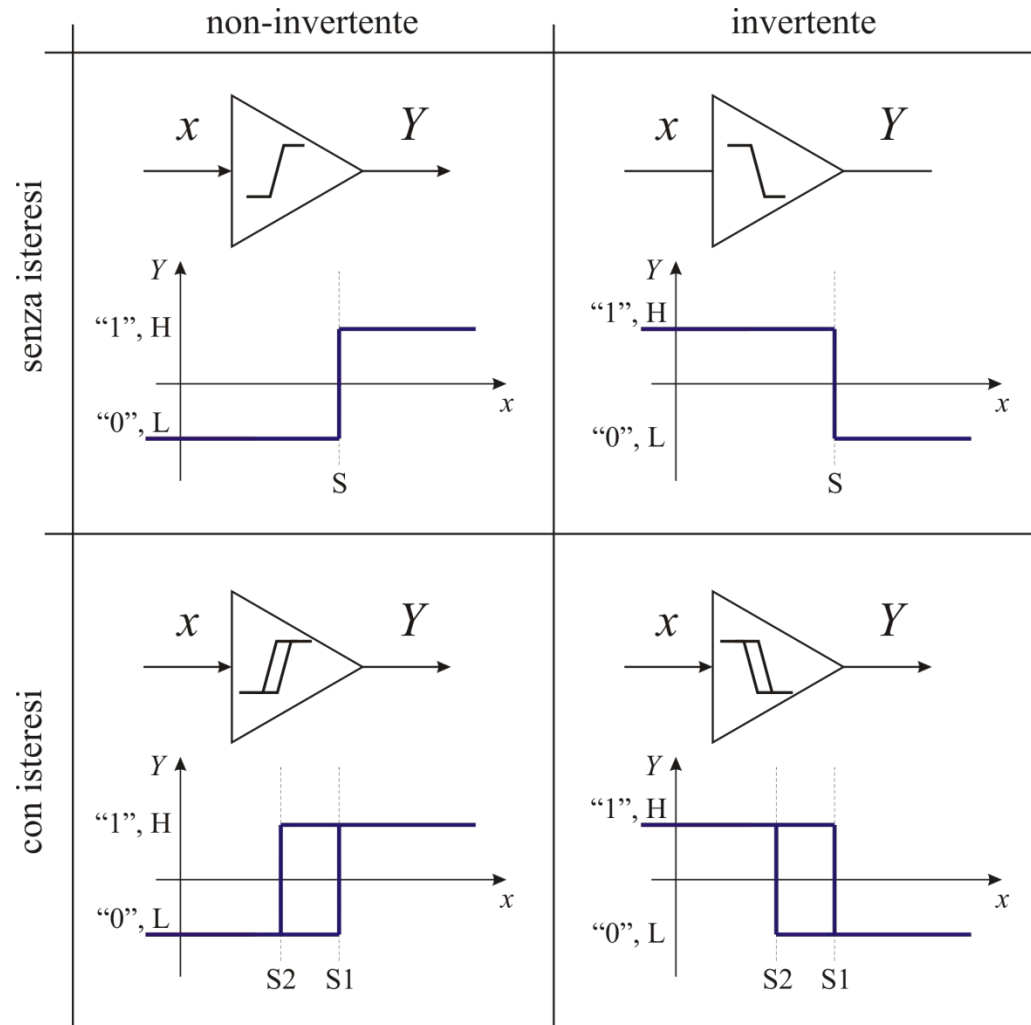
Comparatori con Isteresi

Anche il comparatore con isteresi può essere di tipo *invertente*.

Valgono le stesse considerazioni viste per il comparatore non invertente, a patto di complementare l'uscita

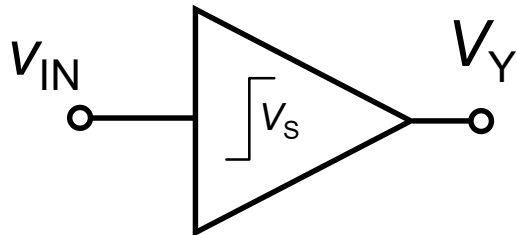


Comparatori di Soglia: Riepilogo

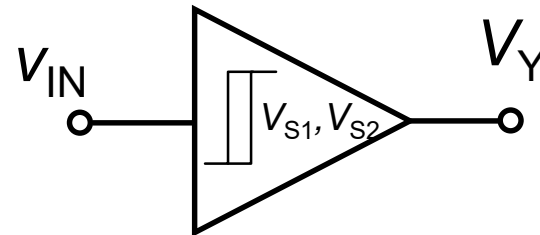


Circuiti comparatori: simbologia circuitale

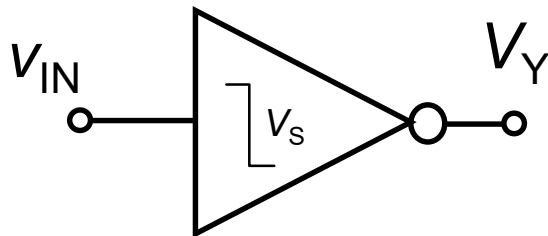
Comparatore di tensione
non-invertente senza isteresi



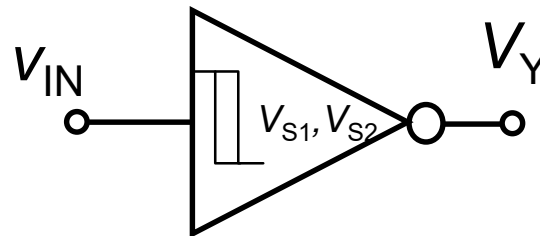
Comparatore di tensione
non-invertente con isteresi
(Trigger di Schmitt)



Comparatore di tensione
invertente senza isteresi



Comparatore di tensione
invertente con isteresi
(Trigger di Schmitt invertente)

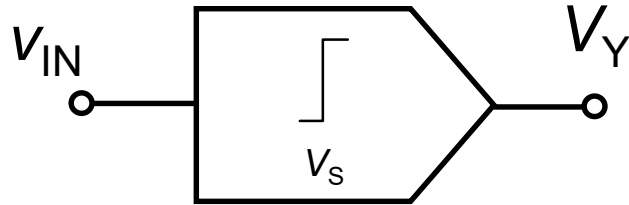


POLITECNICO
DI TORINO

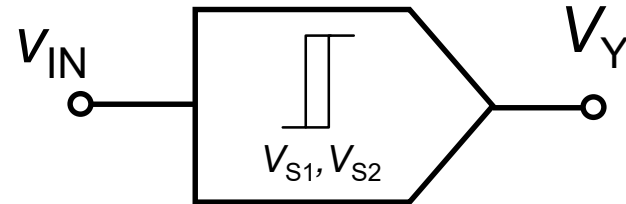
DET
Department of Electronics and Telecommunications

Circuiti comparatori: simbologia circuitale

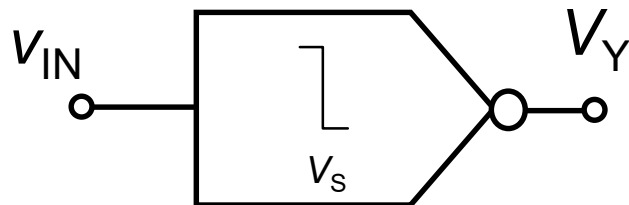
Comparatore di tensione
non-invertente senza isteresi



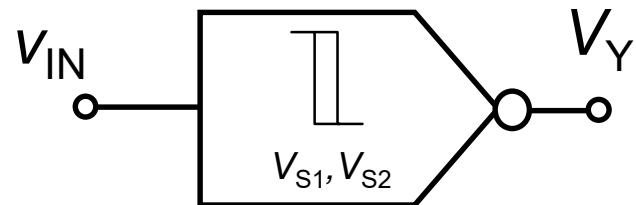
Comparatore di tensione
non-invertente con isteresi



Comparatore di tensione
invertente senza isteresi

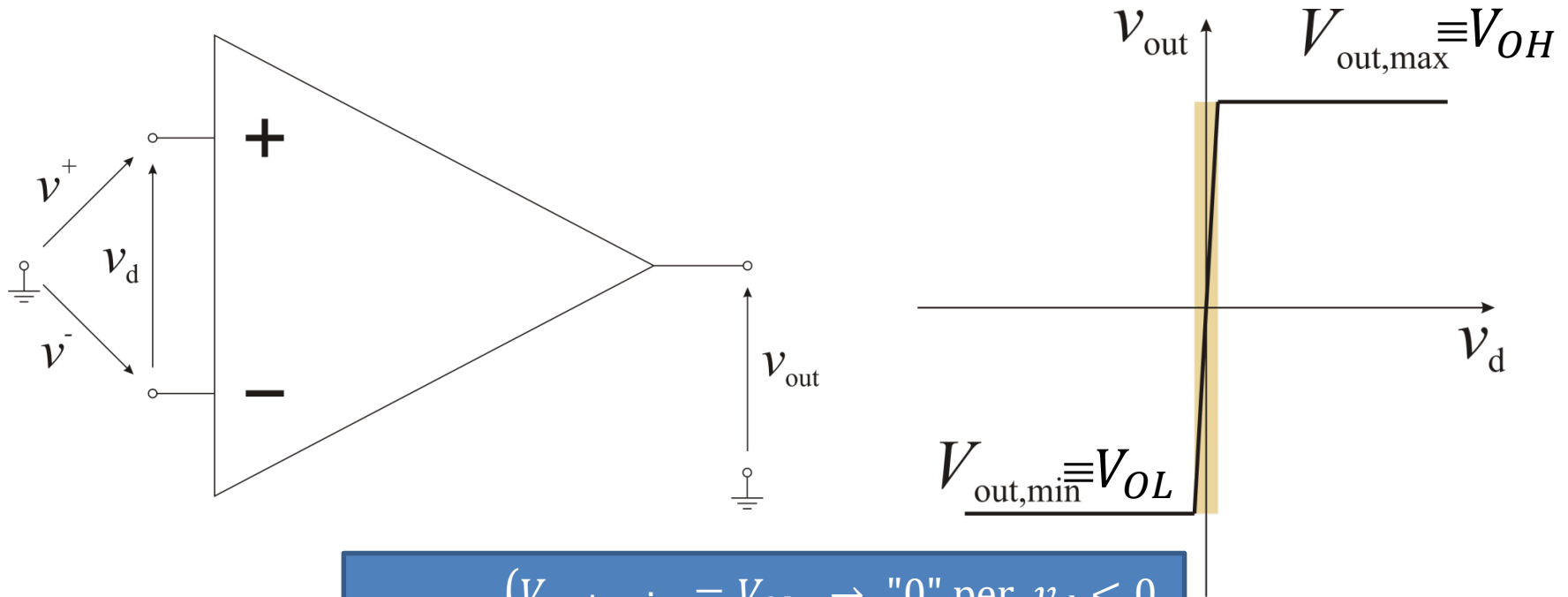


Comparatore di tensione
invertente con isteresi



Comparatori di Tensione Basati su Operazionali

La transcaratteristica $v_{out}(v_d)$ di un amplificatore operazionale ad anello aperto, con dinamica d'ingresso del modo differenziale molto ridotta e dinamica della tensione d'uscita limitata tra $V_{out,min}$ e $V_{out,max}$ può essere vista come quella di un comparatore di tensione non invertente con soglia $V_S = 0$ e livelli logici d'uscita $V_{OH} = V_{out,max}$ (1 logico) e $V_{OL} = V_{out,min}$ (0 logico)

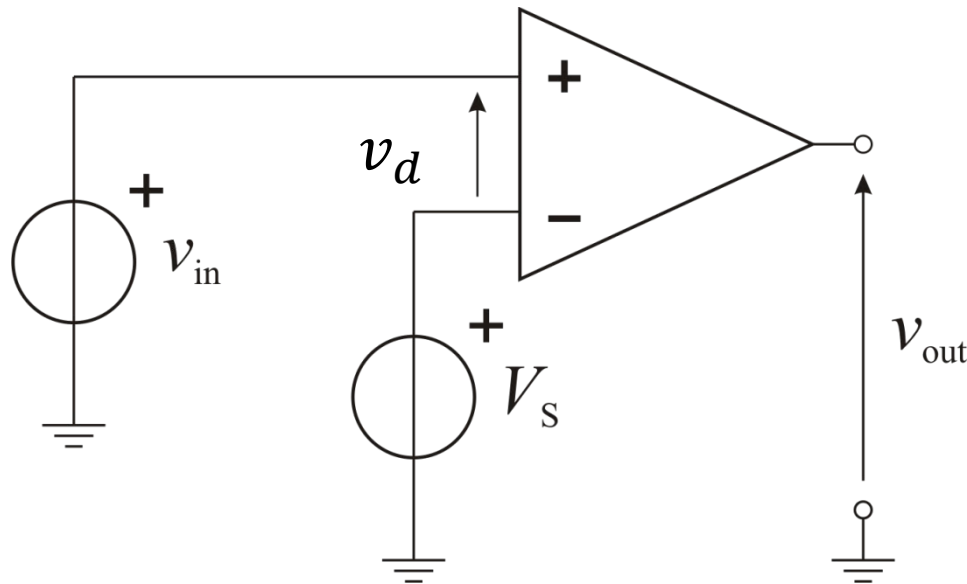


$$v_{out} = \begin{cases} V_{out,min} = V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_d < 0 \\ V_{out,max} = V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_d > 0 \end{cases}$$



Comparatore di tensione non invertente senza isteresi

Applicando **l'ingresso esterno v_{in}** all'ingresso non-invertente dell'operazionale ed una tensione costante V_S , pari alla soglia all'ingresso invertente, è possibile ottenere un **comparatore di tensione non invertente** con qualsiasi soglia V_S compatibile con le limitazioni di dinamica d'ingresso per il modo comune dell'operazionale.



Nota: l'operazionale è usato fuori linearità per cui v_d può essere molto diversa da zero!

operazionale

$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_D < 0 \\ V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_D > 0 \end{cases}$$

Essendo $v_d = v_{in} - V_S$

↓

$$v_d < 0 \rightarrow v_{in} < V_S$$

$$v_d > 0 \rightarrow v_{in} > V_S$$

↓

$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_{in} < V_S \\ V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_{in} > V_S \end{cases}$$

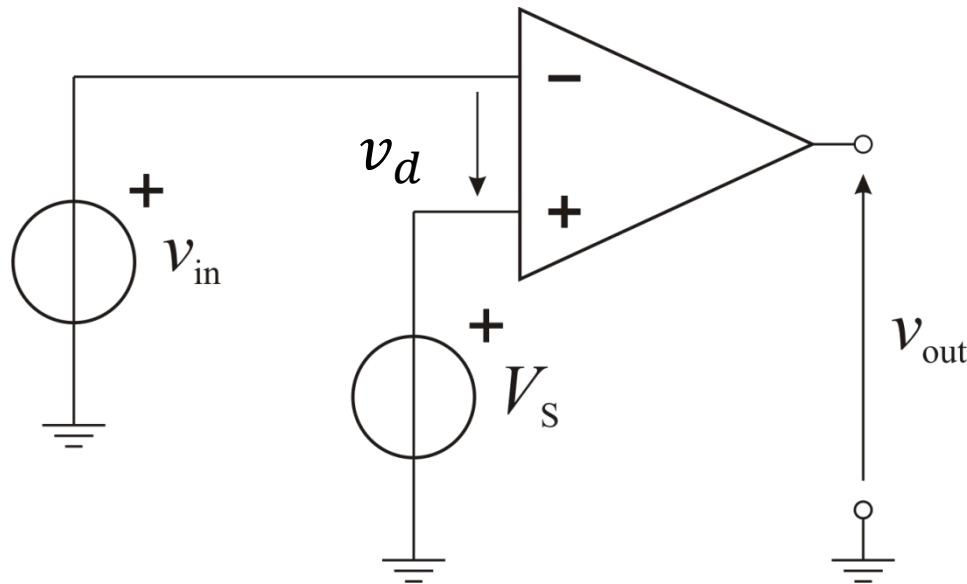
Comparatore di V non-invertente



Comparatore di tensione invertente senza isteresi

Applicando **l'ingresso esterno v_{in} all'ingresso invertente** dell'operazionale ed una tensione costante V_S , pari alla soglia, all'ingresso non-invertente, è possibile ottenere un **comparatore di tensione invertente** con qualsiasi soglia V_S compatibile con le limitazioni di dinamica d'ingresso per il modo comune dell'operazionale.

operazionale



$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow "0" & \text{per } v_d < 0 \\ V_{OH} \rightarrow "1" & \text{per } v_d > 0 \end{cases}$$

Essendo $v_d = V_S - v_{in}$

$$v_d < 0 \rightarrow v_{in} > V_S$$

$$v_d > 0 \rightarrow v_{in} < V_S$$

$$v_{out} = \begin{cases} V_{OH} \rightarrow "1" & \text{per } v_{in} < V_S \\ V_{OL} \rightarrow "0" & \text{per } v_{in} > V_S \end{cases}$$

Comparatore di V invertente

Nota: l'operazionale è usato fuori linearità per cui v_d può essere molto diverso da zero!



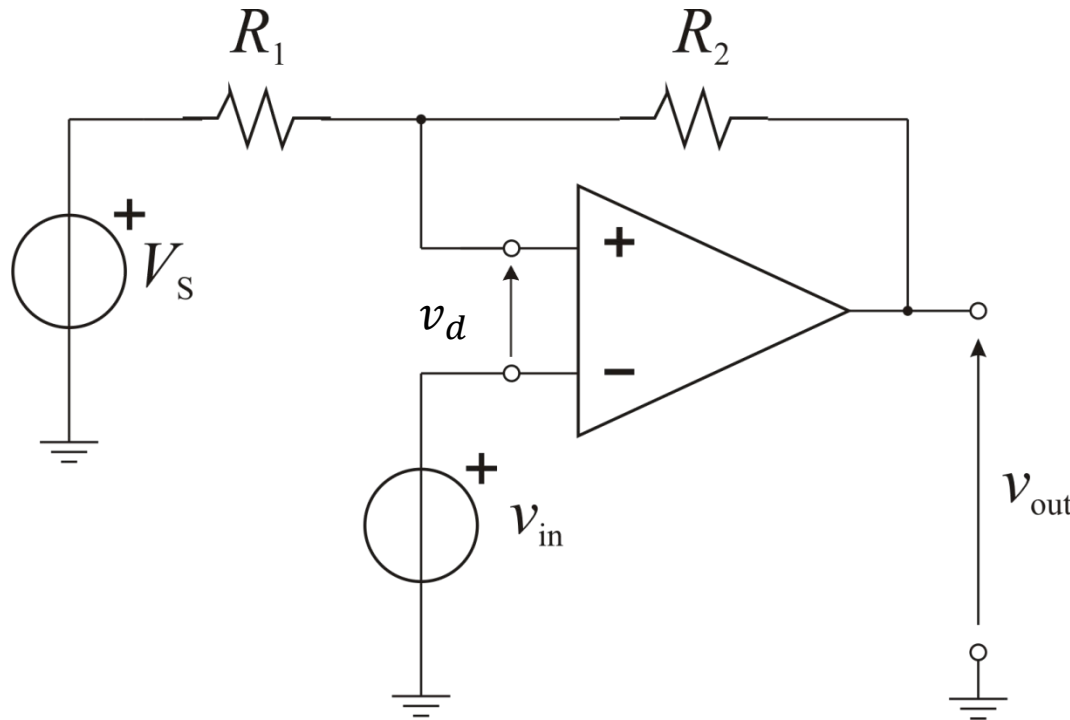
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Comparatore di tensione invertente con isteresi (I)

Introducendo **retroazione positiva** è possibile ottenere **comparatori con isteresi**.

- nei comparatori introdotti fin qui v_D dipendeva solo dall'ingresso e dalla soglia.
- se v_d dipendesse anche dalla tensione in uscita si avrebbe un comportamento diverso a seconda che l'uscita sia bassa o alta → **isteresi**



Assumendo per l'operazionale

$$R_{in} \rightarrow \infty, R_{out} = 0 \\ \text{(no effetti di carico)}$$

$$v^+ = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

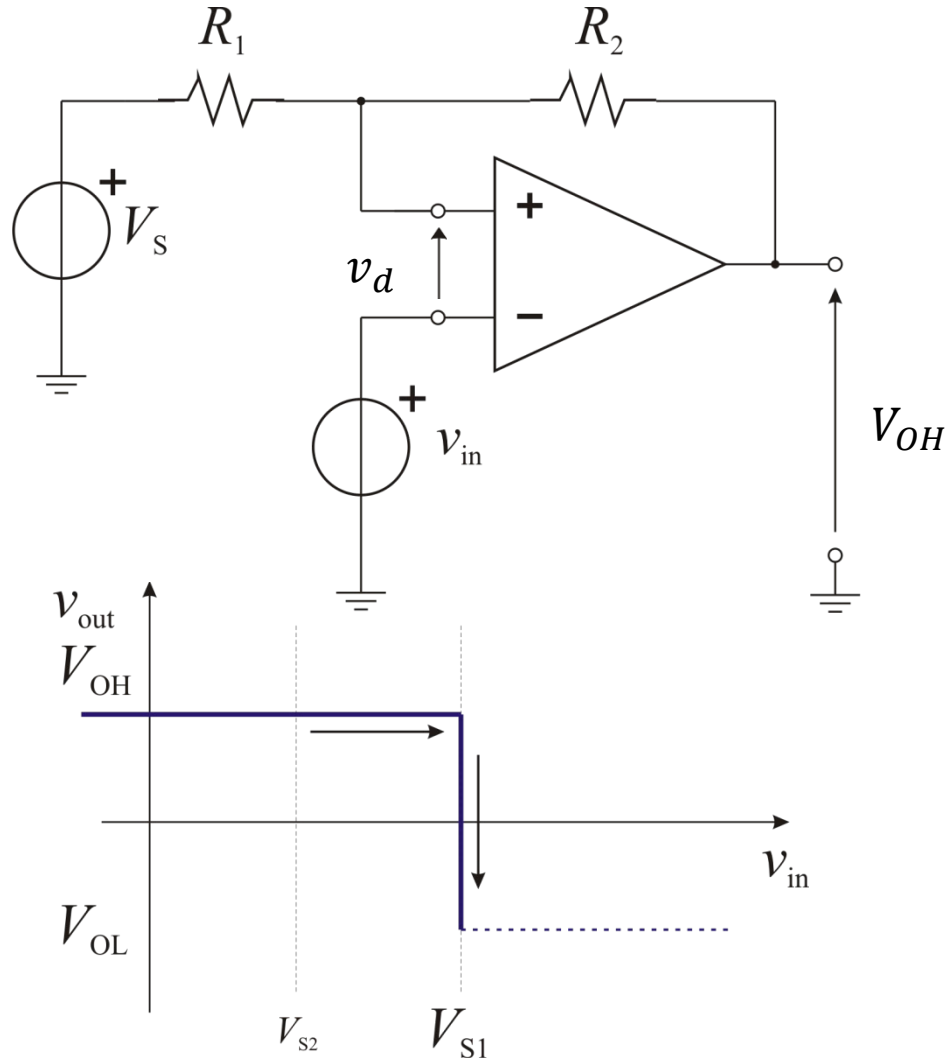
È la soglia del comparatore invertente, confrontata con v_{in} ($v_d = v^+ - v_{in}$)
e dipende da v_{out}

Si ha un comportamento diverso per:

$$v_{out} = V_{OH} \text{ stato alto} \\ v_{out} = V_{OL} \text{ stato basso}$$



Comparatore di tensione invertente con isteresi (II)



Allo **stato alto** $v_{out} = V_{OH}$:

$$v^+ = V_S \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OH} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}_{V_{S1}}$$

$$v_d = V_{S1} - v_{in}$$

$$v_d > 0 \rightarrow v_{in} < V_{S1}$$

$$v_d < 0 \rightarrow v_{in} > V_{S1}$$

Essendo poi:

$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_D < 0 \\ V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_D > 0 \end{cases}$$

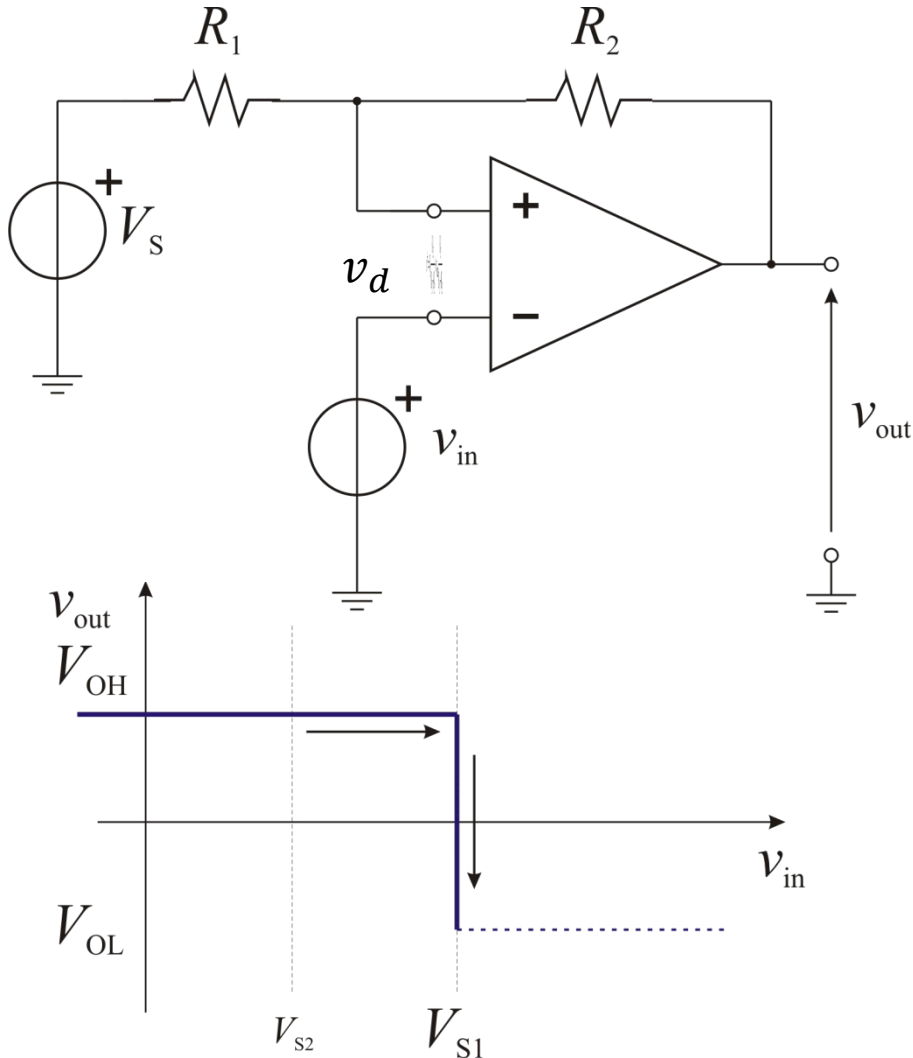
Se $v_{in} < V_{S1}$, $v_d > 0$ e lo stato alto del comparatore $v_{out} = V_{OH}$ è confermato

Se $v_{in} > V_{S1}$, $v_d < 0$ il comparatore commuta allo stato basso $v_{out} = V_{OL}$

Allo stato basso, l'ipotesi iniziale non è più verificata \rightarrow la soglia cambia



Comparatore di tensione invertente con isteresi (III)



Se $v_{in} > V_{S1}$, $v_d < 0$ il comparatore commuta allo stato basso $v_{out} = V_{OL}$

Quando v_{in} si avvicina a v^+ l'operazionale è in linearità

Amplificatore con A_d molto elevata:
piccole variazioni di $v_d \rightarrow$ grandi variazioni di v_{out}

$$v_d = v^+ - v_{in} \Rightarrow v_{out} = A_d v_d$$

$$\Rightarrow v^+ = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

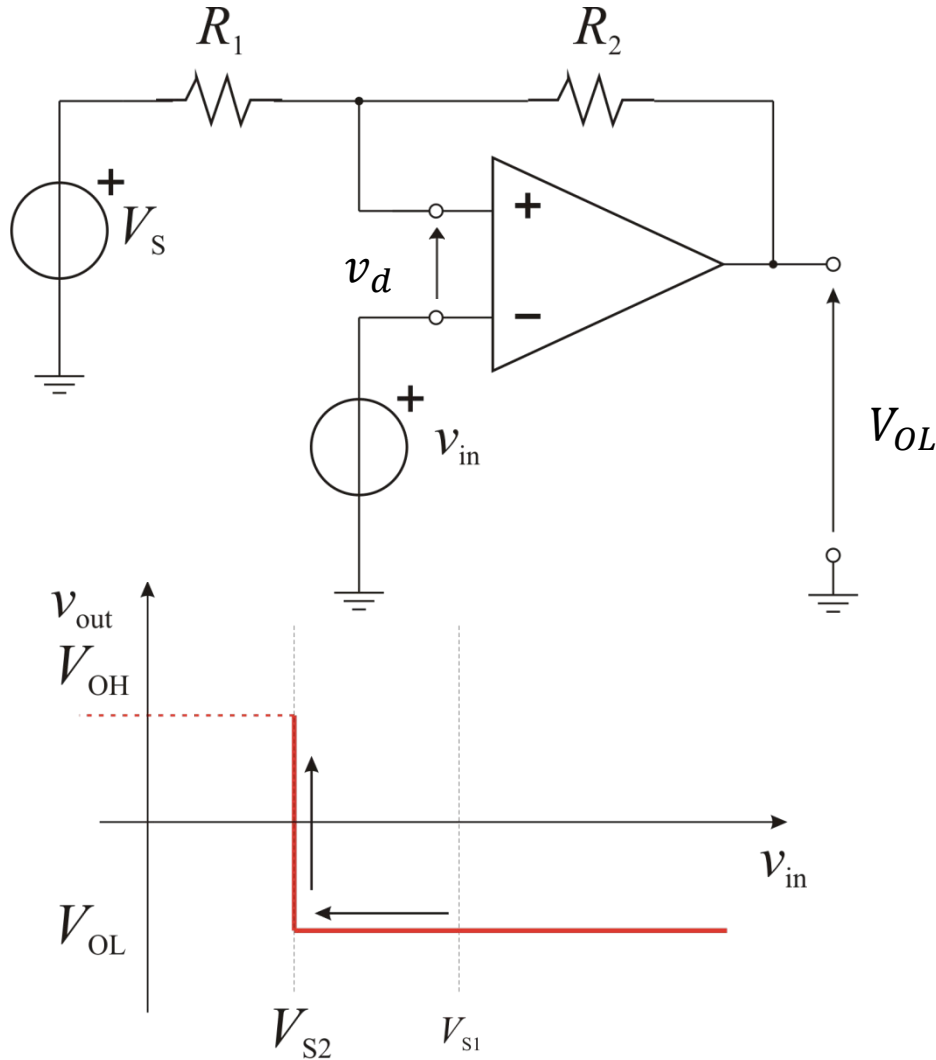
$$v_d \downarrow \Rightarrow v_{out} \downarrow \Rightarrow v_d \downarrow \downarrow$$

La diminuzione di v_d (inizialmente dovuta a v_{in}) comporta una diminuzione di v_{out} che si traduce in un'ulteriore diminuzione di $v_d \dots \rightarrow$ si innesca la **retroazione positiva**: al contrario della retroazione negativa, tende a far aumentare v_d in modulo

Indipendentemente da v_{in}, v_{out} continua a decrescere, fino a quando l'operazionale va fuori linearità, $v_{out} = V_{OL}$ e la commutazione è compiuta.



Comparatore di tensione invertente con isteresi (IV)



Allo **stato basso** $v_{out} = V_{OL}$:

$$v^+ = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

V_{S2} $V_{S2} < V_{S1}$
perché $V_{OL} < V_{OH}$

$$v_d = V_{S2} - v_{in}$$

$$v_d > 0 \rightarrow v_{in} < V_{S2}$$

$$v_d < 0 \rightarrow v_{in} > V_{S2}$$

Essendo poi:

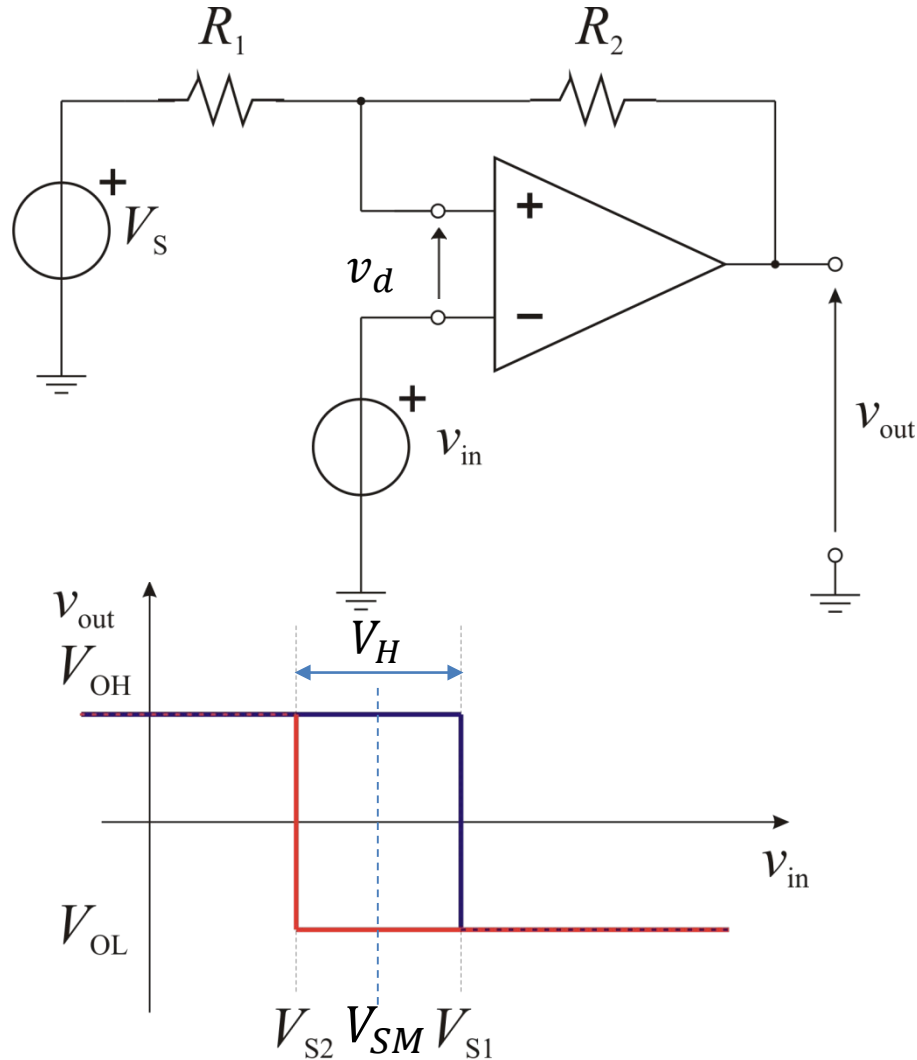
$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_D < 0 \\ V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_D > 0 \end{cases}$$

Se $v_{in} < V_{S2}$, $v_d > 0$ e il comparatore commuta allo stato alto $v_{out} = V_{OH}$

Se $v_{in} > V_{S2}$, $v_d < 0$ e lo stato basso $v_{out} = V_{OL}$ è confermato



Comparatore di tensione invertente con isteresi (V)



Globalmente il circuito si comporta come un **comparatore di tensione invertente con isteresi**

Soglie:

$$V_{S1} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OH} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{S2} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ampiezza ciclo d'isteresi:

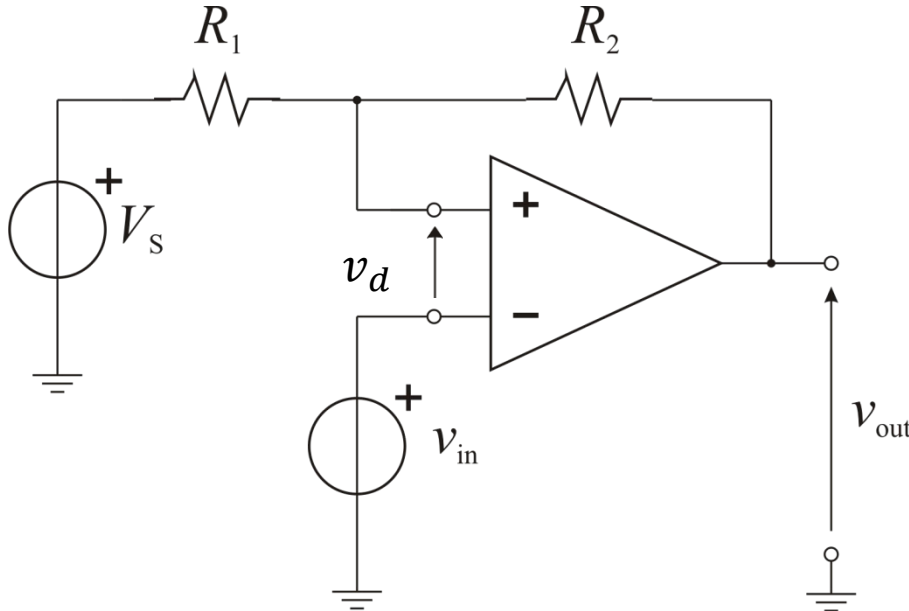
$$V_H = V_{S1} - V_{S2} = (V_{OH} - V_{OL}) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Valor medio soglie:

$$\begin{aligned} V_{SM} &= \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} \\ &= V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$



Comparatore di tensione invertente con isteresi (VI)



Soglie:

$$V_{S1} = V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OH} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{S2} = V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ampiezza ciclo d'isteresi:

$$V_H = (V_{OH} - V_{OL}) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Valor medio soglie:

$$V_{SM} = V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Esempio numerico

A partire da un operazionale con $V_{OL} = 0$ e $V_{OH} = V_{DD} = 5V$ si vuole realizzare un comparatore con isteresi invertente con soglie $V_{S1} = 3V$ e $V_{S2} = 1V$

$$V_H = V_{S1} - V_{S2} = 2V \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_H} - 1 = \frac{3}{2}$$

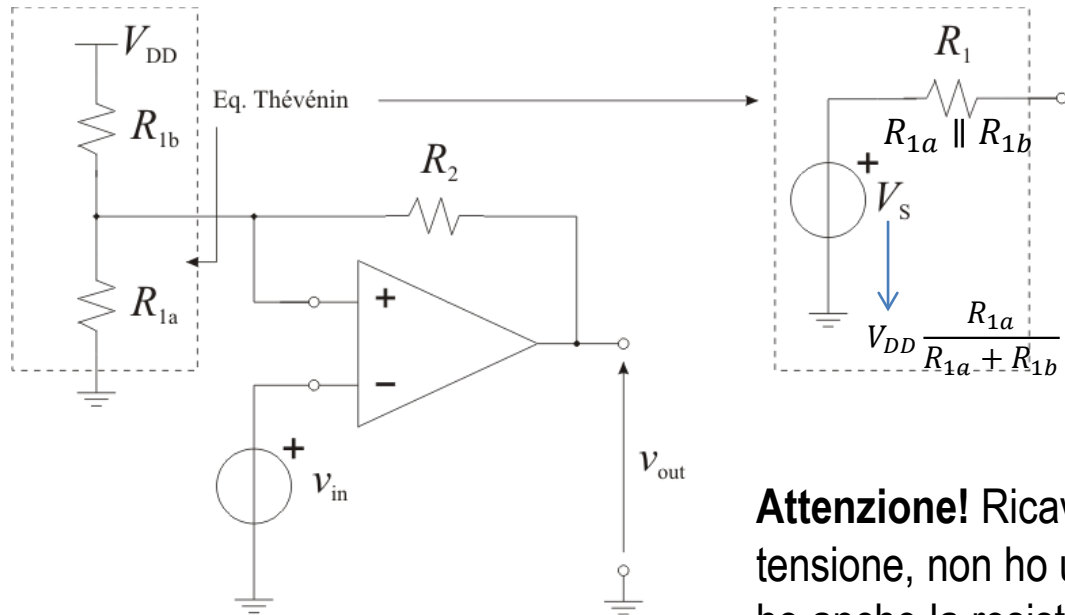
$$V_{SM} = \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} = 2V \rightarrow V_s = V_{SM} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \frac{R_1}{R_2} = \frac{5}{3} V$$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Comparatore di tensione invertente con isteresi (MII)



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_H} - 1 = \frac{3}{2}$$

$$V_S = V_{SM} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \frac{V_{DD}}{2} \frac{R_1}{R_2} = \frac{5}{3} V$$

E' conveniente ricavare V_S a partire dall'alimentazione V_{DD} .

Attenzione! Ricavando V_S da V_{DD} con un partitore di tensione, non ho un generatore ideale di tensione V_S ... ho anche la resistenza equivalente \rightarrow ma posso sfruttarla per realizzare R_1

Esempio numerico

$$V_S = V_{DD} \frac{R_{1a}}{R_{1a} + R_{1b}} \rightarrow \frac{R_{1b}}{R_{1a}} = \frac{V_{DD}}{V_S} - 1 = 2$$

$$R_1 = R_{1a} \parallel R_{1b} \quad R_1 = \frac{2}{3} R_{1a}$$

Prendendo $R_{1a} = R = 30k\Omega$:

$$R_{1b} = 2R = 60k\Omega$$

$$R_1 = \frac{2}{3} R = 40k\Omega$$

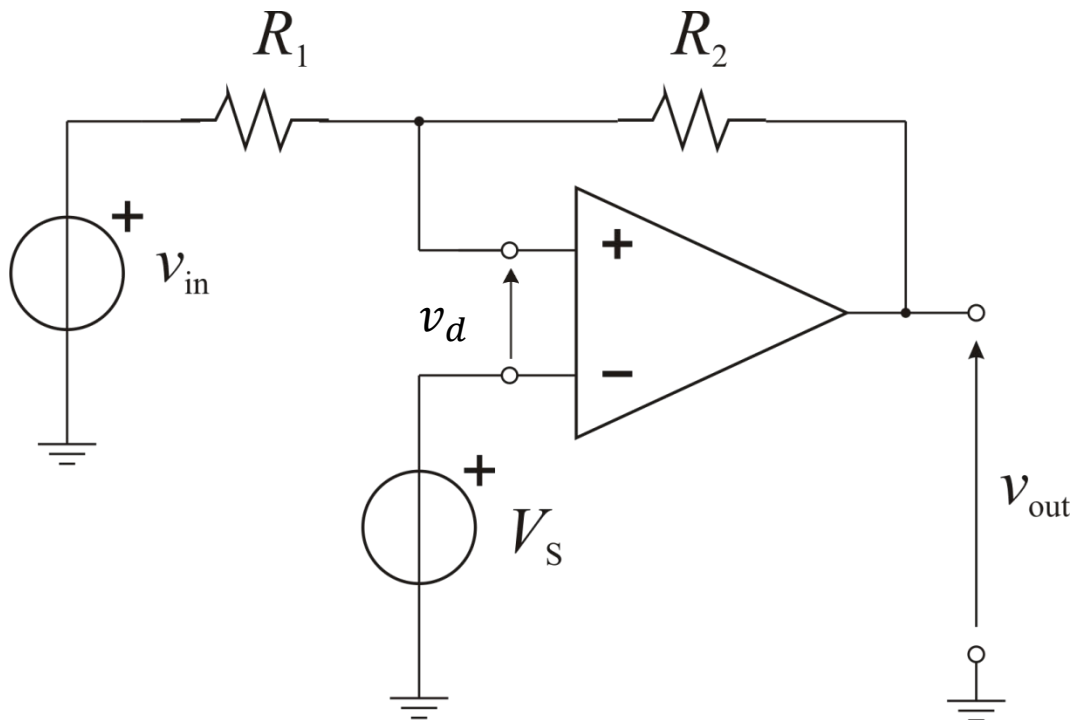
$$R_2 = R = 30k\Omega$$



Comparatore di tensione non-invertente con isteresi (I)

Scambiando le connessioni di V_S e di v_{in} si può ottenere **un comparatore di tensione non invertente con isteresi**.

- Nota: anche se l'operazionale presenta $R_{in} \rightarrow \infty, R_{out} = 0$, a differenza del caso invertente c'è effetto di carico sull'ingresso dovuto a $R_1, R_2 \rightarrow$ per semplicità, assumiamo che v_{in} sia fornita da un generatore ideale di tensione oltre che $R_{in} \rightarrow \infty, R_{out} = 0$.



$$v^+ = v_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$v^- = V_S$ è fissa, ma la tensione al morsetto + è una somma pesata dell'ingresso esterno e dell'uscita

$$v_d = v^+ - V_S$$

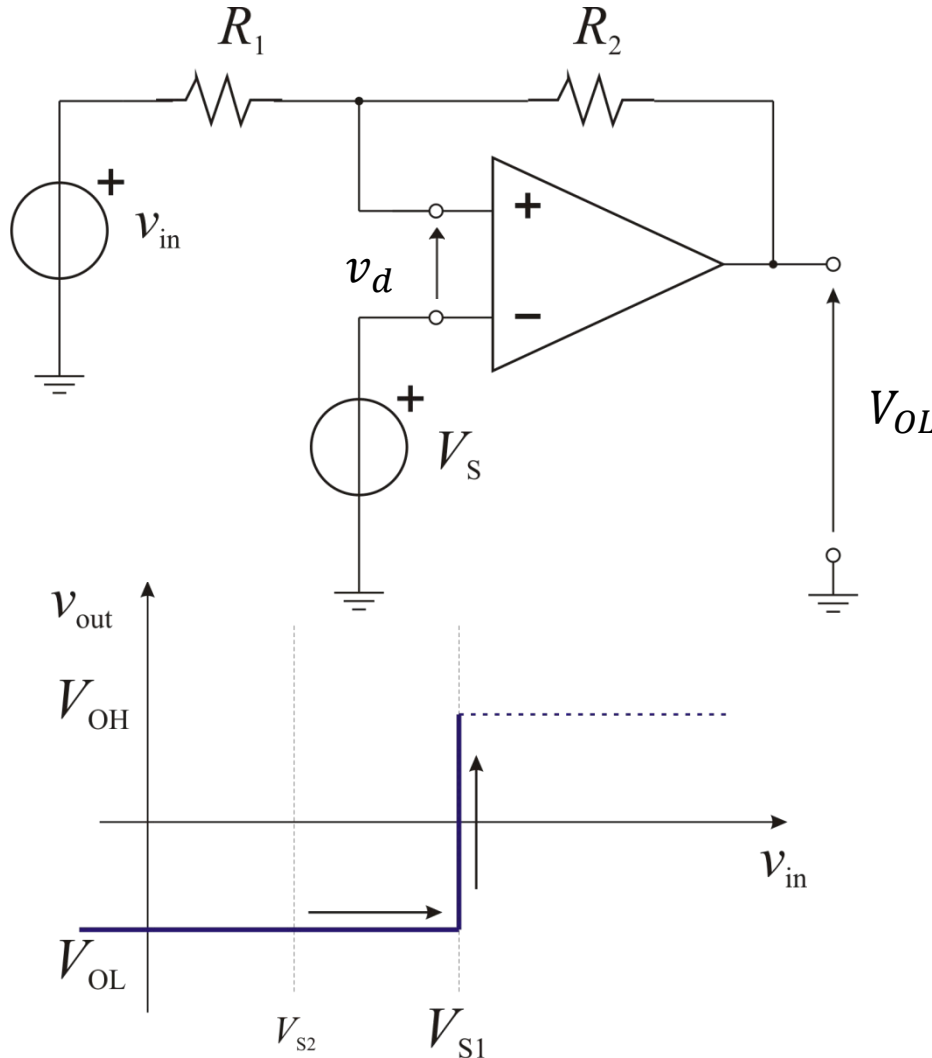
e dipende da v_{out}

Si ha un comportamento diverso per:

$$\begin{aligned} v_{out} &= V_{OH} \text{ stato alto} \\ v_{out} &= V_{OL} \text{ stato basso} \end{aligned}$$



Comparatore di tensione non-invertente con isteresi (II)



Allo **stato basso** $v_{out} = V_{OL}$:

$$v^+ = v_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_d = v^+ - V_S$$

$$v_d > 0 \rightarrow v^+ > V_S \quad \text{cioè:}$$

$$v_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2} > V_S$$

$$v_{in} > \underbrace{V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_{OL} \frac{R_1}{R_2}}_{V_{S1}}$$

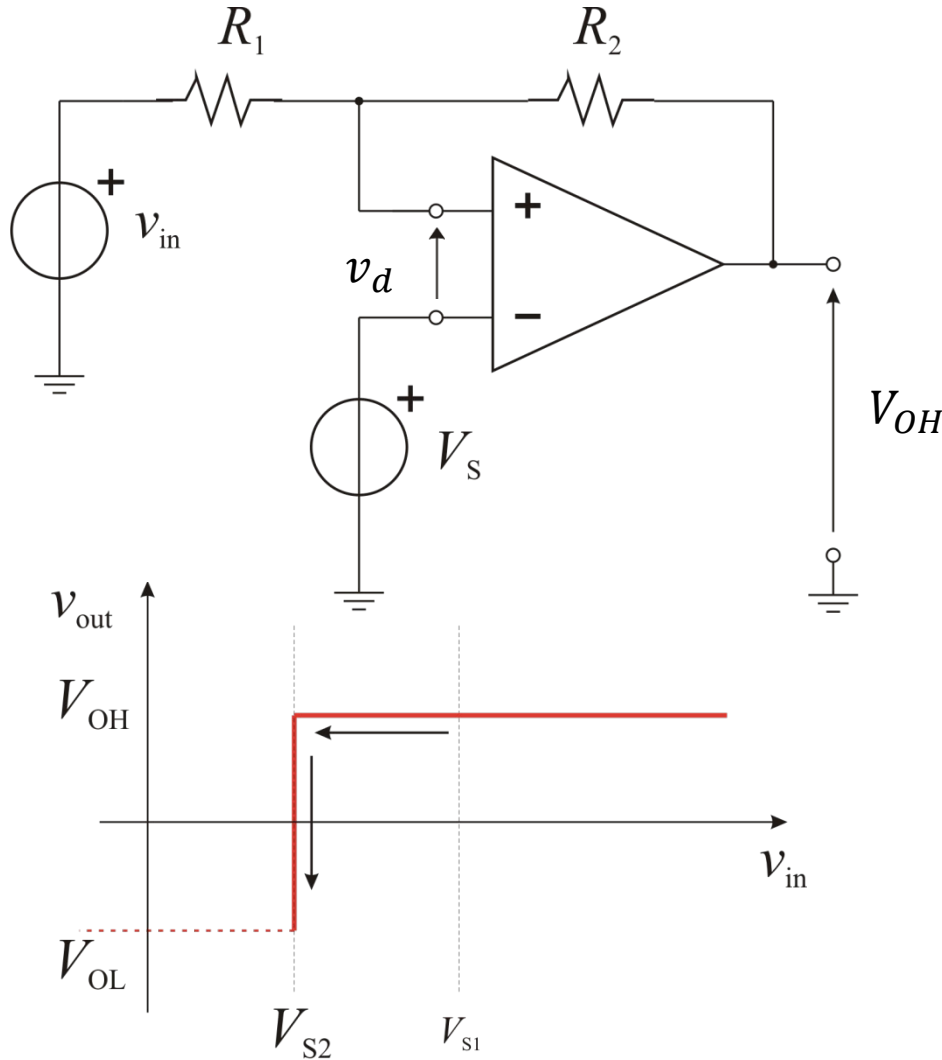
$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_d < 0 \\ V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_d > 0 \end{cases}$$

Se $v_{in} < V_{S1}$, $v_d < 0$ e lo stato basso del comparatore $v_{out} = V_{OL}$ è confermato

Se $v_{in} > V_{S1}$, $v_d > 0$ il comparatore commuta allo stato alto $v_{out} = V_{OH}$



Comparatore di tensione non-invertente con isteresi (III)



Allo **stato alto** $v_{out} = V_{OH}$:

$$v^+ = v_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OH} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_d = v^+ - V_S$$

$$v_d > 0 \rightarrow v^+ > V_S \quad \text{cioè:}$$

$$v_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2} > V_S$$

$$v_{in} > \underbrace{V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_{OH} \frac{R_1}{R_2}}_{V_{S2}}$$

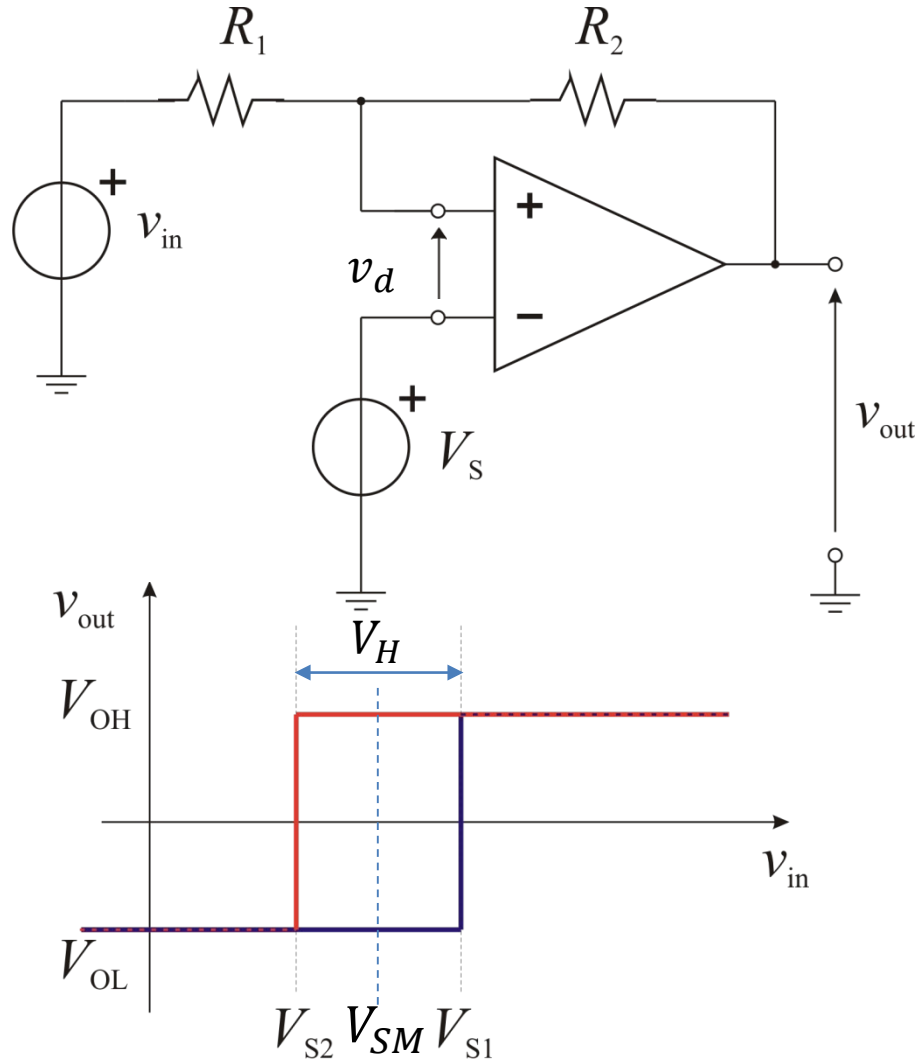
$$v_{out} = \begin{cases} V_{OL} \rightarrow \text{"0"} & \text{per } v_D < 0 \\ V_{OH} \rightarrow \text{"1"} & \text{per } v_D > 0 \end{cases}$$

Se $v_{in} < V_{S2}$, $v_d < 0$ il comparatore commuta allo stato basso $v_{out} = V_{OL}$

Se $v_{in} > V_{S1}$, $v_d > 0$ e lo stato alto del comparatore $v_{out} = V_{OH}$ è confermato



Comparatore di tensione non-invertente con isteresi (IV)



Globalmente il circuito si comporta come un **comparatore di tensione invertente con isteresi**

Soglie:

$$V_{S1} = V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_{OL} \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{S2} = V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_{OH} \frac{R_1}{R_2}$$

Ampiezza ciclo d'isteresi:

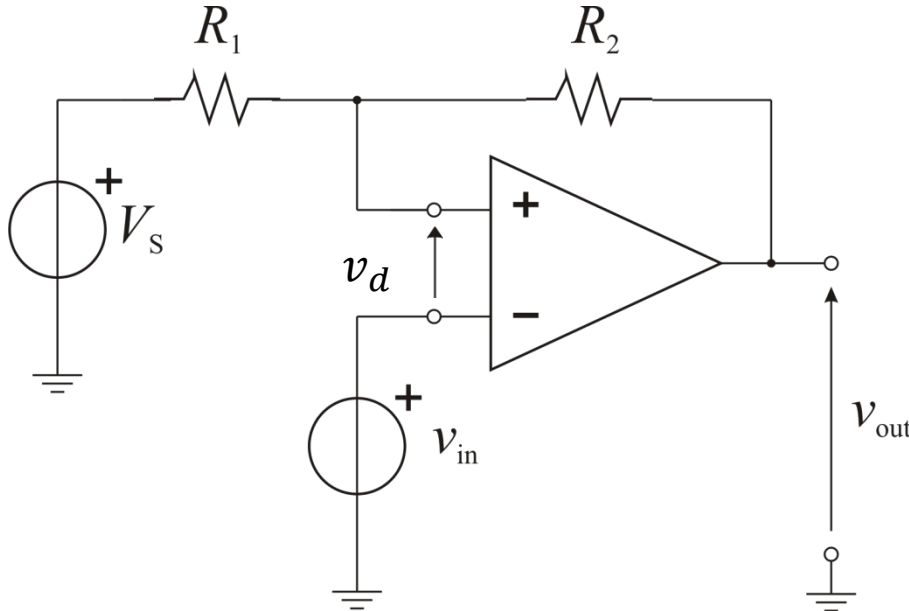
$$V_H = V_{S1} - V_{S2} = (V_{OH} - V_{OL}) \frac{R_1}{R_2}$$

Valor medio soglie:

$$\begin{aligned} V_{SM} &= \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} \\ &= V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$



Comparatore di tensione invertente con isteresi (V)



Soglie:

$$V_{S1} = V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_{OL} \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{S2} = V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_{OH} \frac{R_1}{R_2}$$

Ampiezza ciclo d'isteresi:

$$V_H = (V_{OH} - V_{OL}) \frac{R_1}{R_2}$$

Valor medio soglie:

$$V_{SM} = V_S \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \frac{R_1}{R_2}$$

Esempio numerico

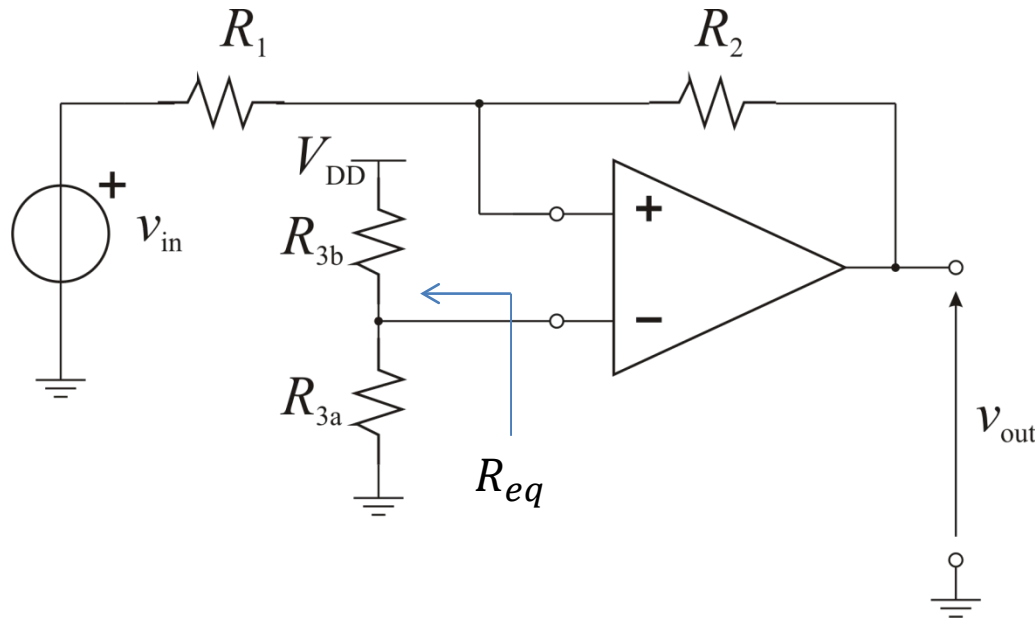
A partire da un operazionale con $V_{OL} = 0$ e $V_{OH} = V_{DD} = 5V$ si vuole realizzare un comparatore con isteresi non invertente con soglie $V_{S1} = 3V$ e $V_{S2} = 1V$

$$V_H = V_{S1} - V_{S2} = 2V \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_H} = \frac{5}{2}$$

$$V_{SM} = \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2} = 2V \rightarrow V_S = V_{SM} \frac{R_2}{R_2 + R_1} + \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \frac{R_1}{R_2 + R_1} = \frac{15}{7} V$$



Comparatore di tensione invertente con isteresi (M)



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_H} = \frac{5}{2}$$

$$V_S = V_{SM} \frac{R_2}{R_2 + R_1} + \frac{V_{DD}}{2} \frac{R_1}{R_2 + R_1} = \frac{15}{7} V$$

E' conveniente ricavare V_S a partire dall'alimentazione V_{DD} .

A differenza del comparatore invertente, V_S è collegata al morsetto - dell'operazionale. Se la resistenza d'ingresso dell'operazionale è suff. grande, la resistenza interna del generatore che fornisce V_S non dà luogo ad effetto di carico. → si può ricavare V_S con un partitore senza preoccuparsi della resistenza equivalente.

Esempio numerico

$$V_S = V_{DD} \frac{R_{3a}}{R_{3a} + R_{3b}} \rightarrow \frac{R_{3b}}{R_{3a}} = \frac{V_{DD}}{V_S} - 1 = \frac{4}{3}$$

$$R_{eq} = R_{3a} \parallel R_{3b} = \frac{4}{7} R_{3a} \ll R_{in,d}$$

Prendendo $R_{3a} = R_1 = R = 10k\Omega$:

$$R_{3b} = \frac{4}{3} R_{3a} = \frac{4}{3} R = \frac{40}{3} k\Omega$$

$$R_2 = \frac{5}{2} R_1 = \frac{5}{2} R = 25k\Omega$$



Comparatori vs. Amplificatori basati su operazionale

Negli amplificatori basati su operazionali:

- si ha **sempre** retroazione negativa, i.e. la tensione del morsetto invertente dipende dalla tensione d'uscita (raramente anche retroazione positiva).
- per A_d sufficientemente grande, $v_d \simeq 0$ ($v_d = 0$ per operazionali ideali). La resistenza al morsetto non invertente tende a ∞ e la resistenza d'uscita tende a 0.
- L'operazionale è utilizzato in linearità, all'interno della dinamica d'ingresso per il modo differenziale

Nei comparatori basati su operazionali:

- l'operazionale è utilizzato ad **anello aperto** (senza isteresi) **o con retroazione positiva** (con isteresi). Non è presente retroazione negativa.
- v_d è normalmente diversa da 0. $v_d = 0$ solo quando il comparatore commuta (condizione di commutazione)
- L'operazionale è fuori linearità, l'uscita può valere $V_{OH} = V_{out,max}$ o $V_{OL} = V_{out,min}$.
- Le resistenze d'ingresso/uscita dell'operazionale sono quelle ad anello aperto $R_{in,d}$, $R_{in,cm}$, R_{out} .

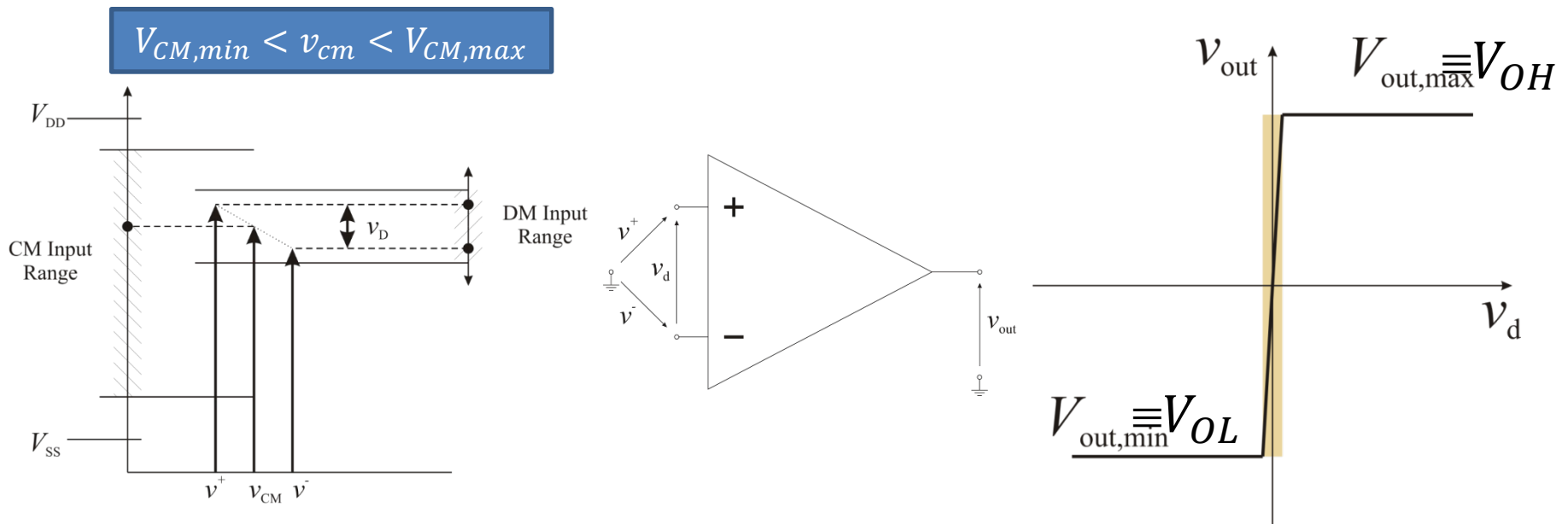


Limitazioni dei comparatori reali

Limitazioni di Dinamica: il parametro più importante è la **dinamica d'ingresso per il modo comune**, che di fatto costituisce un limite ai segnali applicabili e/o per il valore delle soglie.

Gli estremi della dinamica della tensione della tensione d'uscita, non sono propriamente 'limitazioni' per un comparatore, ma sono i **livelli logici alto V_{OH} e basso V_{OL}** dell'uscita digitale.

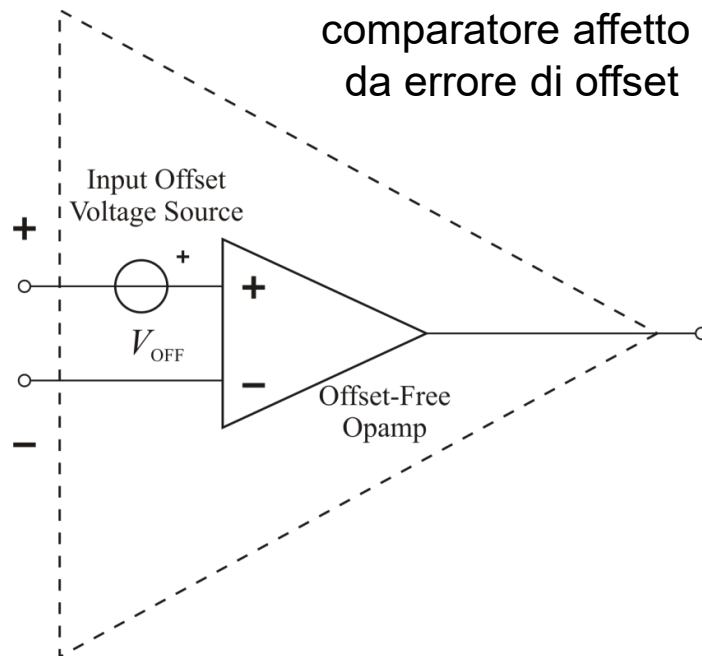
Il limite sulla corrente erogabile dall'uscita è sempre d'interesse e limita il carico all'uscita digitale



Limitazioni dei comparatori reali

Offset: può essere descritto come per l'operazionale con il generatore di offset in ingresso (valore aleatorio), considerando che durante le commutazioni il comparatore è di fatto in linearità.

Questo parametro è **particolarmente importante e critico per un comparatore**, perché dà luogo ad errori diversi da dispositivo a dispositivo sulle soglie di commutazione.



Condizione di commutazione
(caso ideale)

$$v_d = 0$$

Condizione di commutazione
(caso con offset)

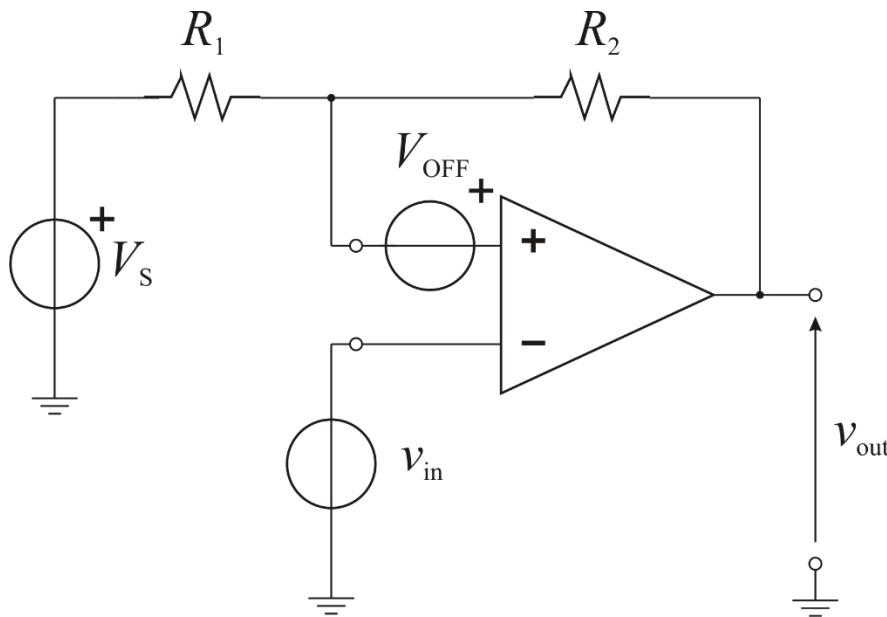
$$v_d + V_{OFF} = 0$$

Limitazioni dei comparatori reali

Offset: può essere descritto come per l'operazionale con il generatore di offset in ingresso (valore aleatorio), considerando che durante le commutazioni il comparatore è di fatto in linearità.

Questo parametro è **particolarmente importante e critico per un comparatore**, perché dà luogo ad errori diversi da dispositivo a dispositivo sulle soglie di commutazione.

comparatore affetto da errore di offset



Condizione di commutazione
(caso ideale)

$$v_{in} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_{out} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Condizione di commutazione
(con offset)

$$v_{in} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_{out} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{OFF}$$

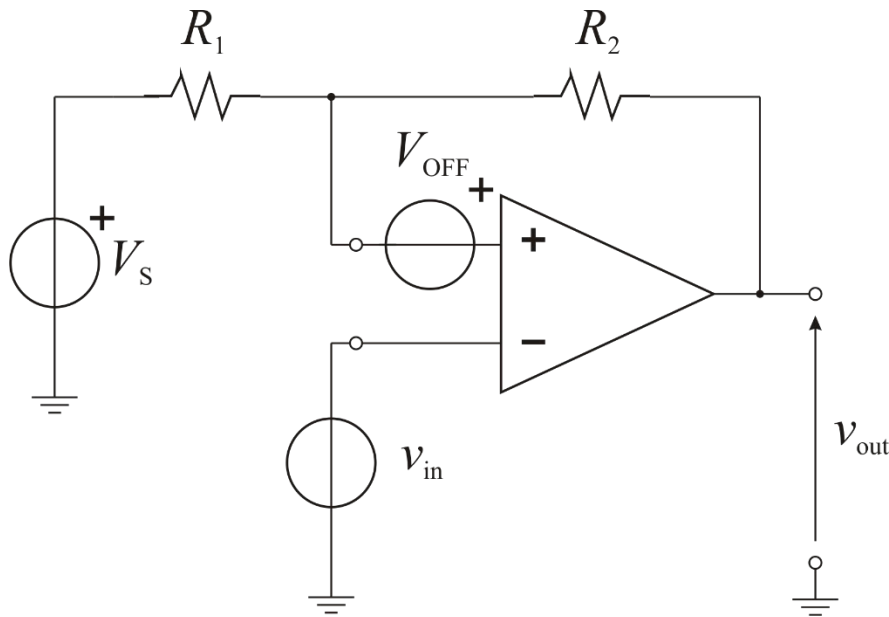


Limitazioni dei comparatori reali

Offset: può essere descritto come per l'operazionale con il generatore di offset in ingresso (valore aleatorio), considerando che durante le commutazioni il comparatore è di fatto in linearità.

Questo parametro è **particolarmente importante e critico per un comparatore**, perché dà luogo ad errori diversi da dispositivo a dispositivo sulle soglie di commutazione.

comparatore affetto da errore di offset



Soglie di commutazione
(caso ideale)

$$V_{S1} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OH} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{S2} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Soglie di commutazione
(con offset)

$$V_{S1} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OH} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_{OFF}$$

$$V_{S2} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{OL} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_{OFF}$$



Limitazioni dei comparatori reali

Ritardi (Banda-Slew Rate): Circuito non lineare → no analisi nel dominio della frequenza

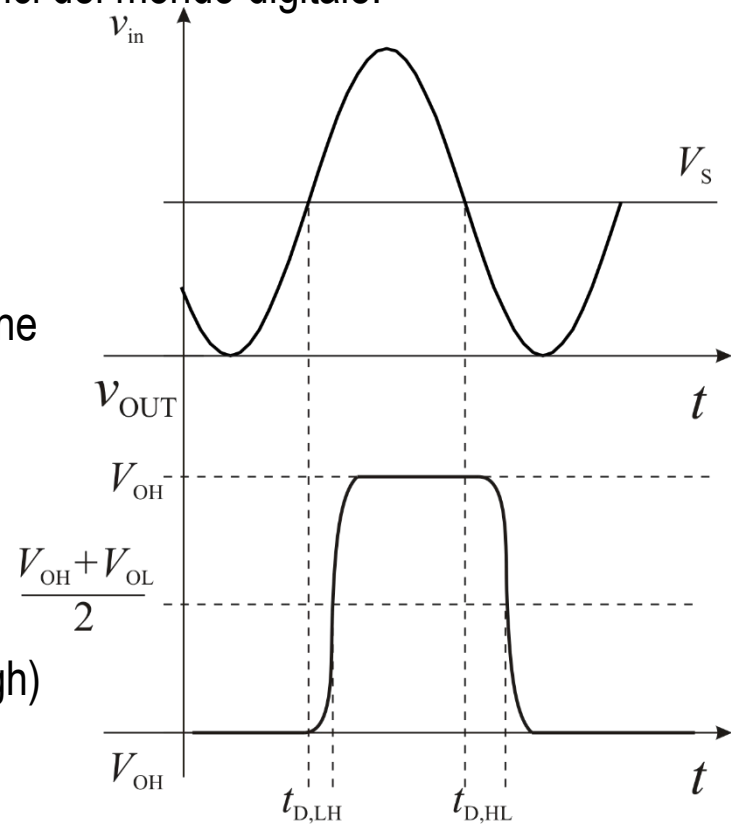
Gli stessi effetti reattivi che danno luogo alle limitazioni di banda e slew rate dell'operazionale fanno sì che le commutazioni di un comparatore non siano istantanee.

Questi effetti sono descritti per i comparatori con parametri tipici del mondo digitale:

Tempi di ritardo:

$t_{D,HL}$ ritardo (D → Delay) tra l'istante in cui l'ingresso attraversa la soglia innescando la commutazione e l'istante in cui l'uscita raggiunge il 50% della dinamica in una transizione da livello alto ad basso (HL → High-to-Low)

$t_{D,LH}$ ritardo (D → Delay) tra l'istante in cui l'ingresso attraversa la soglia innescando la commutazione e l'istante in cui l'uscita raggiunge il 50% della dinamica per una transizione da livello basso ad alto (LH → Low-to-High)



Limitazioni dei comparatori reali

Ritardi (Banda-Slew Rate): Circuito non lineare → no analisi nel dominio della frequenza

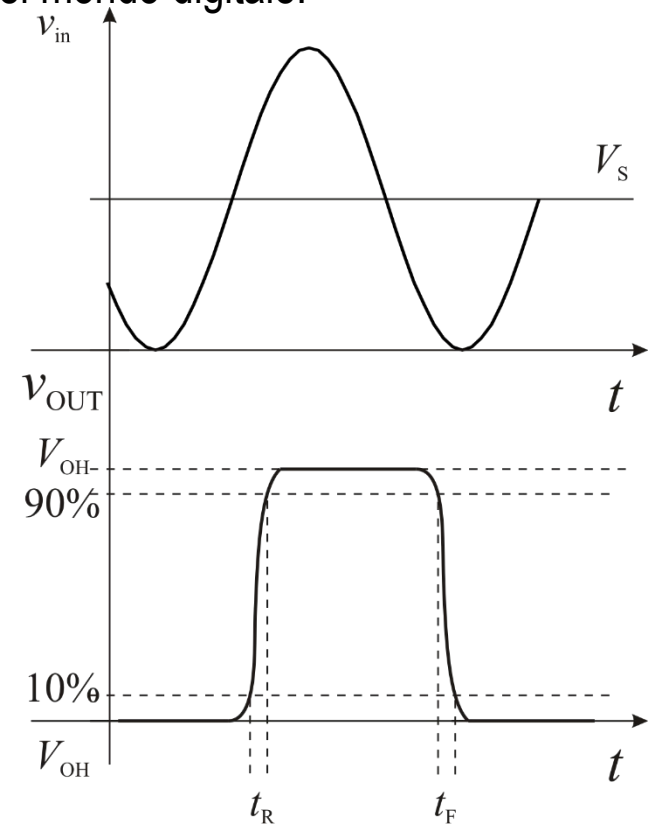
Gli stessi effetti reattivi che danno luogo alle limitazioni di banda e slew rate dell'operazionale fanno sì che le commutazioni di un comparatore non siano istantanee.

Questi effetti sono descritti per i comparatori con parametri tipici del mondo digitale:

Tempi di ritardo:

t_R tempo di salita (R → Rise): tempo necessario all'uscita per salire dal 10% al 90% della dinamica durante una commutazione basso-alto.

t_F tempo di discesa (F → Fall): tempo necessario all'uscita per scendere dal 90% al 10% della dinamica durante una commutazione alto-basso



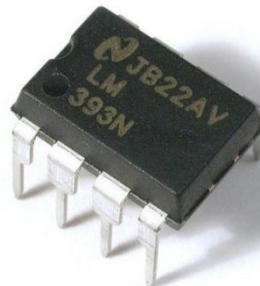
Comparatori vs. Amplificatori Operazionali

Per realizzare un comparatore si può partire da un operazionale, come discusso.

Esistono però anche integrati venduti esplicitamente come 'comparatori'.

Si tratta sostanzialmente di operazionali in cui:

- Non c'è la rete per garantire la risposta in frequenza integrativa, usata per avere stabilità ad anello chiuso negli operazionali con retroazione negativa (→ questo permette avere *slew rate* più elevato e minori ritardi)
- Lo stadio di uscita segue le specifiche di una famiglia logica (→ vedi prossimo corso di elettronica digitale...)



© Solarbotics Ltd. WWW.SOLARBOTICS.COM



POLITECNICO
DI TORINO

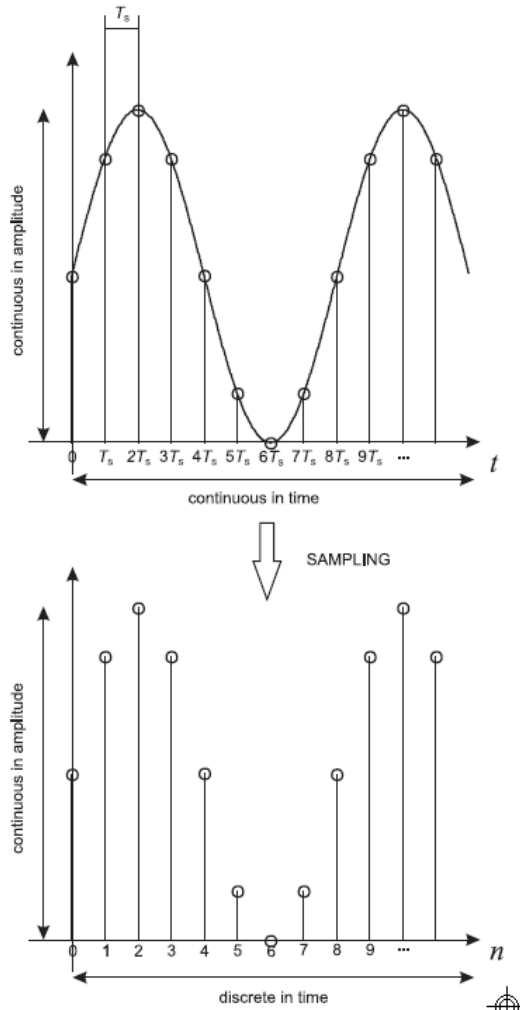
DET
Department of Electronics and Telecommunications

Conversione Analogico → Digitale (A/D)

- Comporta tre passaggi concettuali:
 - **Campionamento** (discretizzazione nel tempo)
 - **Quantizzazione** (discretizzazione in ampiezza)
 - **Codifica binaria**



Conversione Analogico → Digitale (A/D)



Da **segnale analogico**
CONTINUO nel tempo
CONTINUO in ampiezza

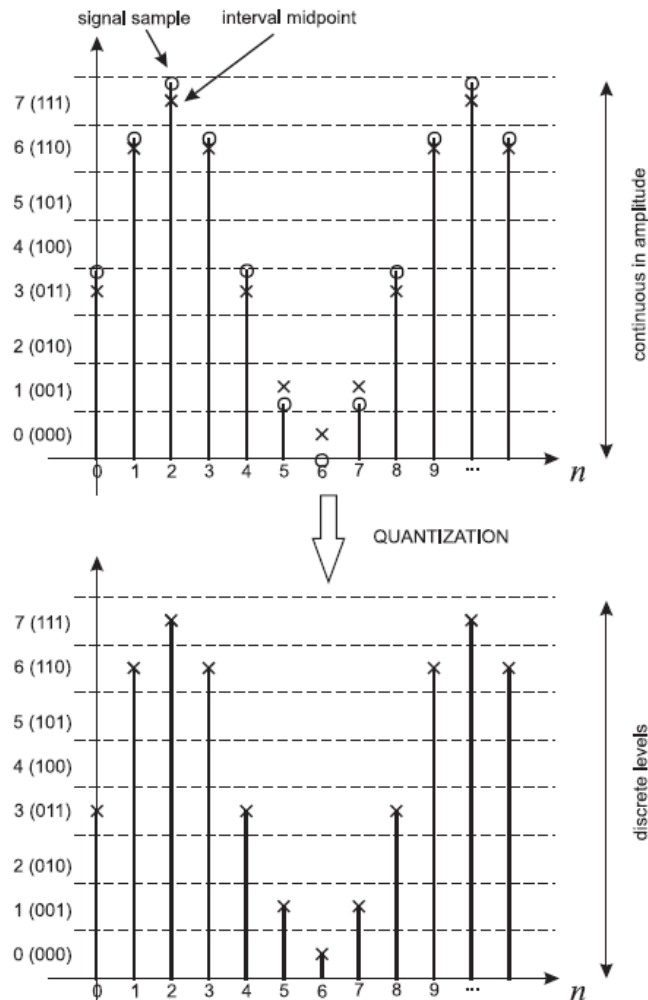
CAMPIONAMENTO

- discretizzazione nel tempo
- Vengono prelevati i valori del segnale (campioni) ogni T .
- **Teorema del campionamento:** se un segnale ha banda limitata B e $1/T > 2B$ (Frequenza di Nyquist) **il campionamento non comporta perdita di informazione.**

A **segnale campionato**
DISCRETO nel tempo
CONTINUO in ampiezza



Conversione Analogico → Digitale (A/D)



Da segnale campionato

DISCRETO nel tempo

CONTINUO in ampiezza

QUANTIZZAZIONE

discretizzazione delle ampiezze:

- La dinamica è divisa in 2^N intervalli
- Ogni campione è associato al valor medio dell'intervallo in cui cade
- Errore di quantizzazione

$$|\varepsilon| < \frac{S}{2^{N+1}} = \frac{1}{2} \text{LSB}$$

A segnale digitale a livelli

DISCRETO nel tempo

DISCRETO in ampiezza (su più livelli)

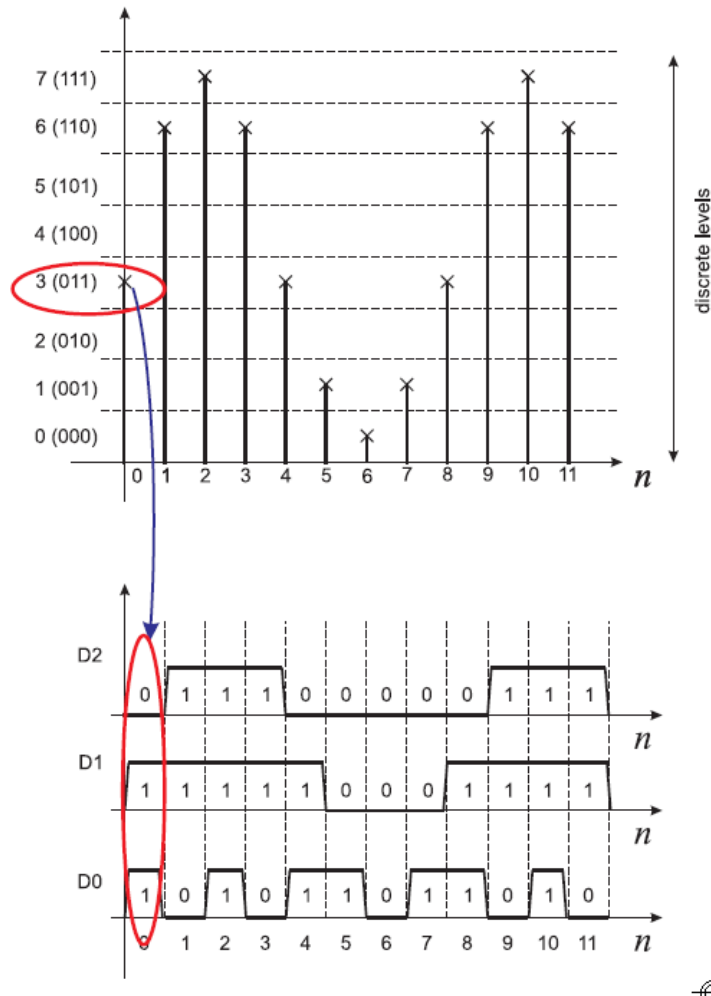
Per capire in quale intervallo della dinamica cade il segnale si usano comparatori



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Conversione Analogico → Digitale (A/D)



da **segnale a livelli**

DISCRETO nel tempo

DISCRETO in ampiezza (più livelli)

CODIFICA

- A ciascun intervallo è associato a un numero binario.
- Vengono generati segnali digitali a due livelli corrispondenti alle cifre binarie

A **segnale(i) digitali binari**

DISCRETO nel tempo

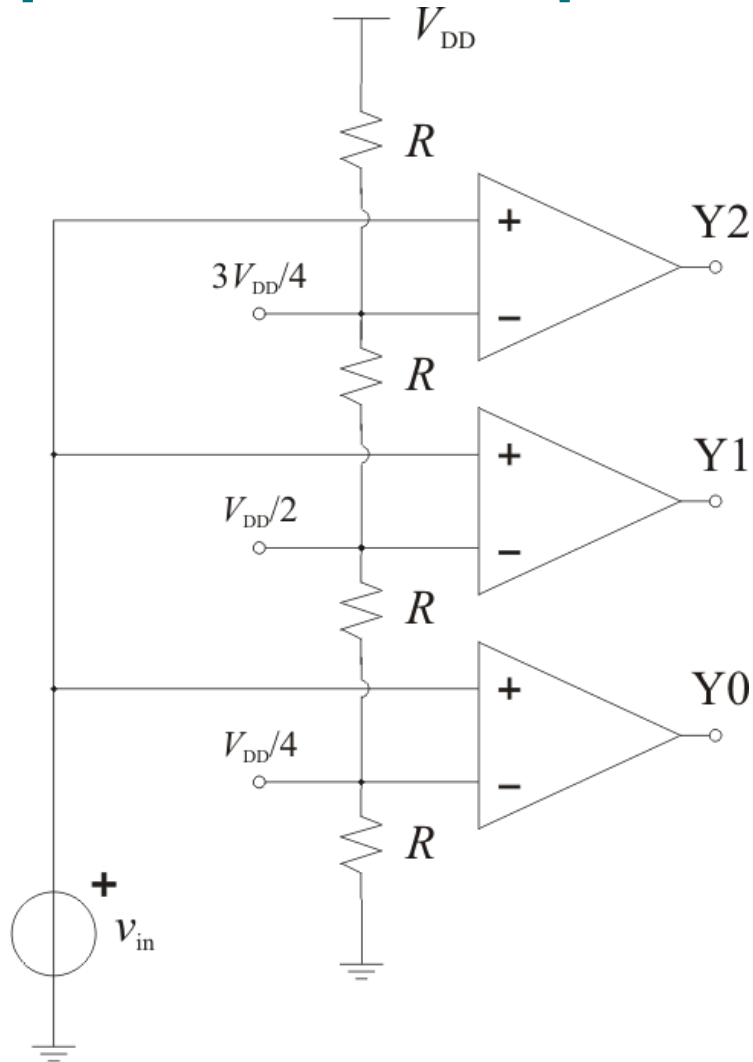
DISCRETO in ampiezza (due livelli, 0 e 1)



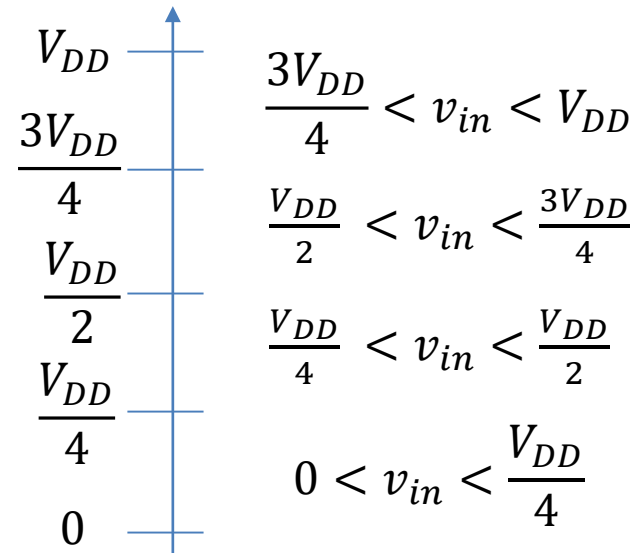
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Applicazioni dei Comparatori: Conversione A/D



Esempio: A/D a 2 bit \rightarrow 4 intervalli

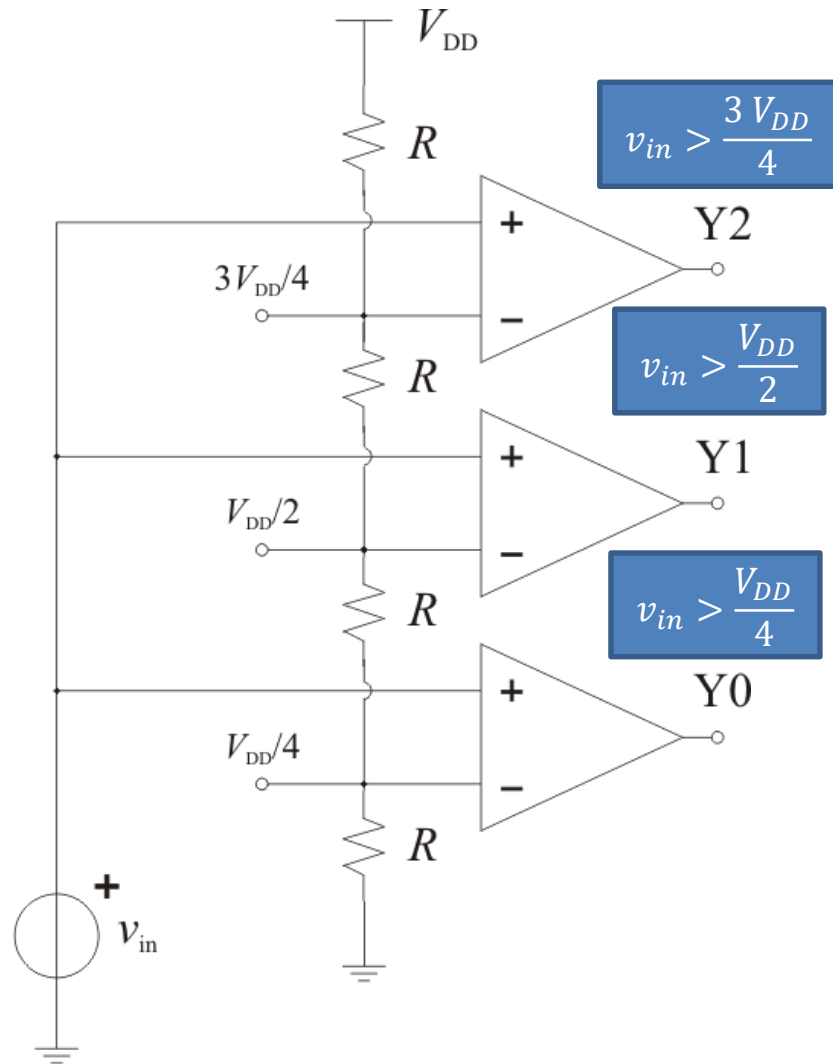


Se v_{in} ha dinamica $(0, V_{DD})$ si sa già che $v_{in} > 0$ $v_{in} < V_{DD}$

Si confronta v_{in} con $\frac{V_{DD}}{4}$, $\frac{V_{DD}}{2}$ e $\frac{3V_{DD}}{4}$
(ricavate mediante partitori)
utilizzando tre comparatori



Applicazioni dei Comparatori: Conversione A/D



$$\begin{cases} Y_2 = 1 \leftrightarrow v_{in} > \frac{3V_{DD}}{4} \\ Y_1 = 1 \leftrightarrow v_{in} > \frac{3V_{DD}}{2} \\ Y_0 = 1 \leftrightarrow v_{in} > \frac{V_{DD}}{4} \end{cases}$$

	Y2	Y1	Y0
$\frac{3V_{DD}}{4} < v_{in} < V_{DD}$	1	1	1
$\frac{V_{DD}}{2} < v_{in} < \frac{3V_{DD}}{4}$	0	1	1
$\frac{V_{DD}}{4} < v_{in} < \frac{V_{DD}}{2}$	0	0	1
$0 < v_{in} < \frac{V_{DD}}{4}$	0	0	0

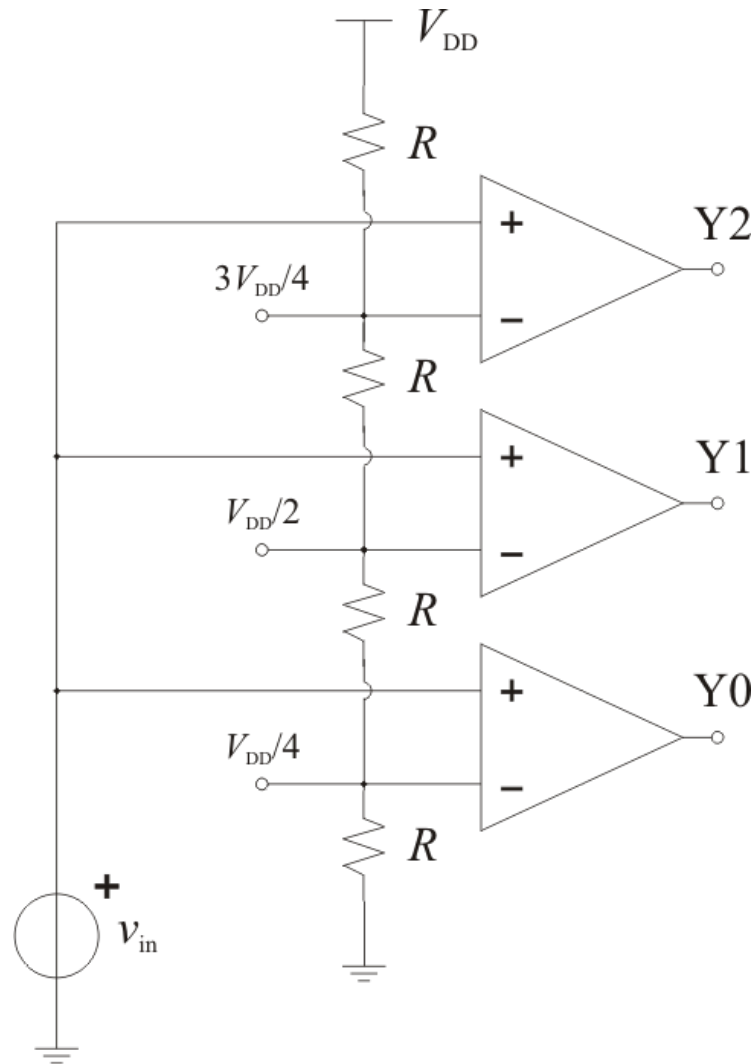
Ad ogni intervallo di quantizzazione corrisponde una ed una sola combinazione di Y2, Y1, Y0.

CODIFICA TERMOMETRICA

Si può passare alla codifica binaria tradizionale utilizzando un circuito digitale (rete combinatoria)



Applicazioni dei Comparatori: Conversione A/D



Convertitore A/D Flash:

- l'approccio è generalizzabile a N bit
- N bit $\rightarrow 2^N$ intervalli $\rightarrow 2^N - 1$ comparatori

Vantaggi:

molto veloce (c'è solo il ritardo di un comparatore)

Svantaggi:

$2^N - 1$ comparatori \rightarrow molto oneroso per $N > 8$

Al di là del numero dei comparatori, le non idealità dei comparatori (offset in particolare) non consentono elevata precisione

