

Classe : **4A MAN - 5A IPAI**

A.S. : 2021-2022

Docente : Prof. Franco Tufoni Codocente: Prof. Enrico Ruggieri

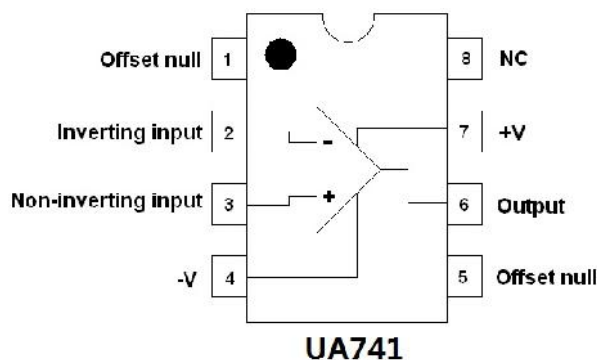
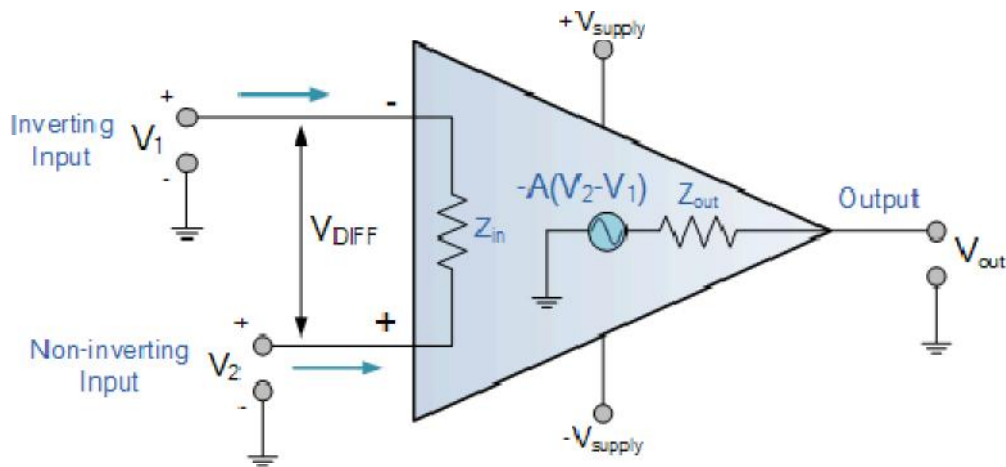
Disciplina: Tecnologie elettriche-elettroniche, dell'automazione e applicazioni

## **Amplificatori Operazionali**

### **Esercizi**

### **Circuiti Non Lineari**

### **Configurazioni - Schemi - Formule - Esempi**



Vers 3.5

## Circuiti non lineari

### Introduzione

Gli elementi circuitali, la cui caratteristica tensione-corrente non sia assimilabile ad una retta (diodi, transistor) determinano un funzionamento non lineare per il circuito che li contiene.

Nell'ambito delle reti non lineari, si possono distinguere due categorie:

- 1) reti che utilizzano sia il tratto di conduzione che quello di interdizione degli elementi non lineari in esse contenuti;
  - a) Limitatori
  - b) Raddrizzatori
  - c) Comparatori
  - d) Convertitori
  - e) Circuiti Sample/Hold (S/H)
  - f) .....
  
- 2) reti che sfruttano solo il tratto di conduzione degli elementi non lineari in esse contenuti.
  - a) Amplificatori logaritmici;
  - b) Amplificatori antilogaritmici
  - c) Moltiplicatori
  - d) Divisori
  - e) Estrattori di radice
  - f) Generator di forme d'onda
  - g) .....

Alcuni temi Ministeriali richiedono allo studente la capacità di analizzare reti non lineari, nonché una buona padronanza nell'uso dei dispositivi *limitatori* che consentono la trasformazione delle forme d'onda.

Inoltre è spesso necessario modificare una forma d'onda per rispettare le specifiche imposte dal problema o di adattare un particolare segnale al livello imposto dal circuito utilizzatore; a tal fine è importante acquisire familiarità con l'uso dei dispositivi limitatori.

### Limitatori

In generale, un circuito limitatore consente il passaggio di una parte del segnale d'ingresso, che può essere:

- ) Superiore ad un livello di riferimento
- ) Inferiore ad un livello di riferimento;

**Limitatori semplici** (compreso tra due livelli di riferimento)

**Esercizio 1 - Limitatore semplice**

Dato il circuito di fig. 1 e considerato il diodo reale ( $V_{\hat{}}=0,6V$ ), si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita, nel caso sia applicato all'ingresso il segnale riportato in fig.2.

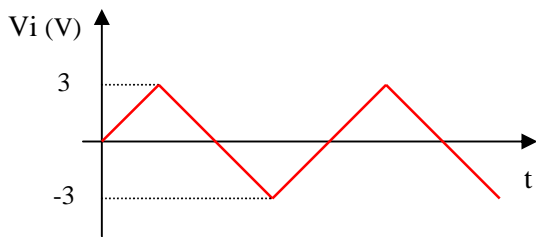


Fig.2

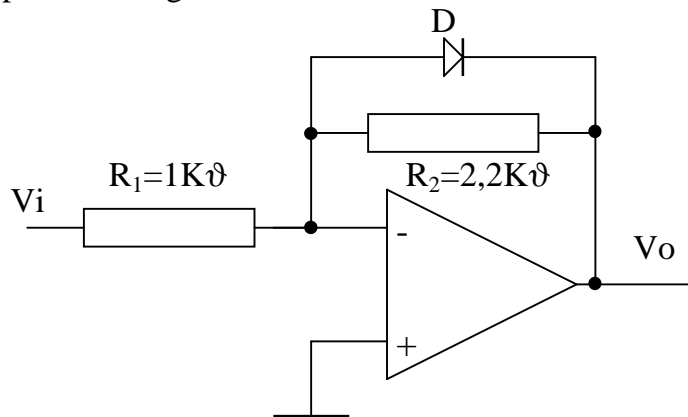


Fig. 1

**Soluzione**

Si ricavano le relazioni ingresso-uscita imposte dalla conduzione e dalla interdizione del diodo presente nel circuito.

**1)  $V_i < 0$**

Si suppone inizialmente negativo il segnale  $V_i$ ; l'ingresso è connesso al morsetto invertente, pertanto la corrispondente tensione di uscita  $V_o$  è positiva ed il diodo risulta polarizzato inversamente, quindi non conduce.

Il circuito funziona da amplificatore lineare invertente:

$$V_o = - \frac{R_2}{R_1} V_i$$

$$V_o = -2,2 V_i$$

**2)  $V_i > 0$**

Supposto di aumentare  $V_i$  si raggiunge un punto ( $V_i = V_{is}$ ) per il quale il diodo entra in conduzione, ossia la differenza di potenziale ai suoi capi uguaglia la tensione di soglia  $V_{\hat{}}$ . Con il diodo in conduzione ai capi di  $R_2$  si stabilisce la tensione  $V_{\hat{}}$ , quindi l'uscita  $V_o = -V_{\hat{}}$ .

$$V_o = -V_{\hat{}}$$

$$V_o = -0,6 V$$

Uguagliando l'espressione 1 con l'espressione 2 si ricava il valore di  $V_i$  che porta in conduzione il diodo

$$\frac{R_2}{R_1} V_{is} = -V_{\hat{}} \quad V_{is} = \frac{R_1}{R_2} V_{\hat{}} \quad V_{is} = \frac{1 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^3} \cdot 0,6 \quad V_{is} = 0,28 V$$

Per  $V_i = V_{is}$ , la resistenza  $R_2$  è percorsa dalla corrente di intensità  $I_2 = \frac{V_{\hat{}}}{R_2}$ .

Un incremento ulteriore di  $V_i$  aumenta l'intensità di corrente assorbita da  $R_1$ , mentre resta invariata l'intensità di corrente che attraversa  $R_2$ .

La maggior corrente scaturita dall'aumento di  $V_i$  è pertanto assorbita dal diodo in conduzione diretta. Con riferimento allo schema in fig.3, si determinano le espressioni delle intensità di corrente  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_d$ , che attraversano rispettivamente  $R_1$ ,  $R_2$  ed il diodo.

Quando il diodo è in conduzione, esso fissa la tensione ai capi di  $R_2$  al valore  $-V$ , e quindi rendendo costante la corrente  $I_2$  che vi circola. Un aumento di  $V_i$  causa un aumento di  $I_1$ ; essendo  $I_1 = I_d + I_2$ , tale aumento viene cortocircuitato dal diodo, mantenendo costante la corrente  $I_2$ , e quindi costante la tensione  $V_2 = -V = V_{OS}$ . La tensione d'uscita viene così limitata al valore  $V_{OS} = -V$ .

La tensione  $V_{is}$  viene detta tensione di soglia d'ingresso, quella  $V_{OS}$  tensione di soglia d'uscita.

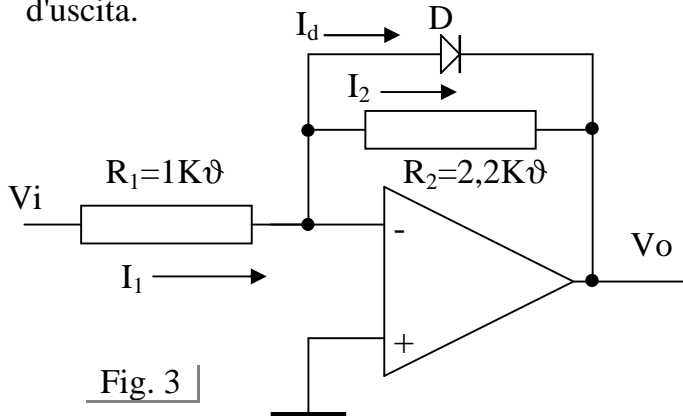


Fig. 3

$$I_1 \times \frac{V_i}{R_1} \quad I_2 \times \frac{V_x}{R_2}$$

$$I_1 \times I_d \Gamma I_2$$

$$I_d \times I_1 \times Z I_2$$

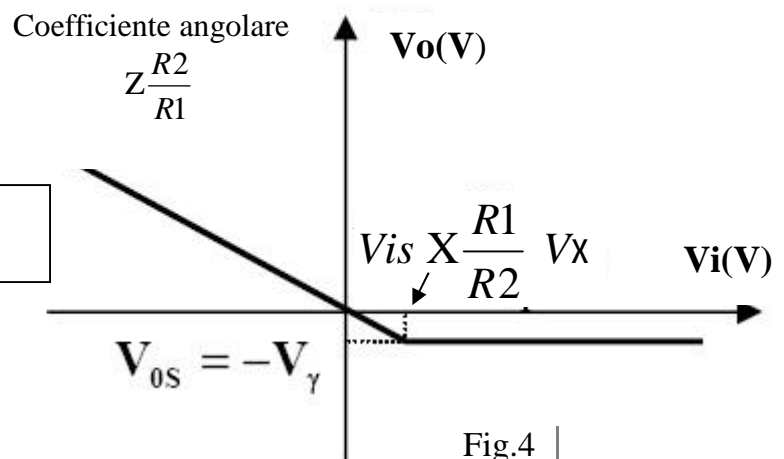


Fig.4

In fig. 4 è riportata la transcaratteristica  $V_o = f(V_i)$ .

In fig. 5 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.

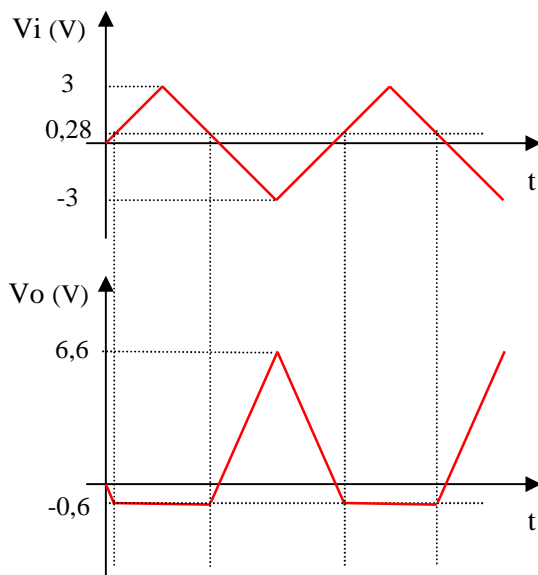
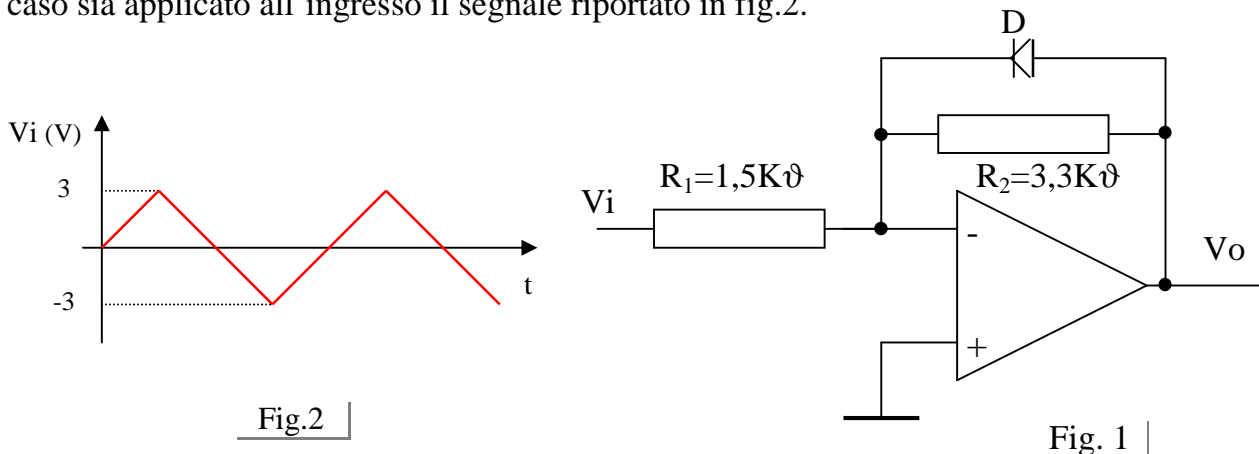


Fig.5

Si nota che la semionda positiva d'ingresso viene eliminata, mentre la semionda negativa viene capovolta ed amplificata di un fattore 2,2.

**Esercizio 2 - Limitatore semplice**

Dato il circuito di fig. 1 e considerato il diodo reale ( $V_{\hat{}}=0,6V$ ), si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita, nel caso sia applicato all'ingresso il segnale riportato in fig.2.



**Soluzione**

Si ricavano le relazioni ingresso-uscita imposte dalla conduzione e dalla interdizione del diodo presente nel circuito.

**1)  $V_i > 0$**

Si suppone inizialmente positivo il segnale  $V_i$ ; l'ingresso è connesso al morsetto invertente, pertanto la corrispondente tensione di uscita  $V_o$  è negativa ed il diodo risulta polarizzato inversamente, quindi non conduce.

Il circuito funziona da amplificatore lineare invertente:

$$V_o \times Z \frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \times Z \frac{3,3 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o \times Z 2,2 V_i}$$

**2)  $V_i < 0$**

Supposto di diminuire  $V_i$ , si raggiunge un punto ( $V_i=V_{is}$ ) per il quale il diodo entra in conduzione, ossia la differenza di potenziale ai suoi capi uguaglia la tensione di soglia  $V_{\hat{}}$ . Con il diodo in conduzione ai capi di  $R_2$  si stabilisce la tensione  $V_{\hat{}}$ , quindi l'uscita  $V_o=V_{\hat{}}$ .

$$\boxed{V_o \times V_{\hat{}}} \quad \boxed{V_o \times 0,6V}$$

Uguagliando l'espressione 1 con l'espressione 2 si ricava il valore di  $V_i$  che porta in conduzione il diodo

$$Z \frac{R_2}{R_1} V_{is} \times V_{\hat{}} \quad V_{is} \times Z \frac{R_1}{R_2} V_{\hat{}} \quad V_{is} \times Z \frac{1,5 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3} 0,6 \quad \boxed{V_{is} \times Z 0,273V}$$

Per  $V_i=V_{is}$ , la resistenza  $R_2$  è percorsa dalla corrente di intensità  $I_2 \times \frac{V_{\hat{}}}{R_2}$ .

Un incremento ulteriore di  $V_i$  aumenta l'intensità di corrente assorbita da  $R_1$ , mentre resta invariata l'intensità di corrente che attraversa  $R_2$ .

La maggior corrente scaturita dall'aumento di  $V_i$  è pertanto assorbita dal diodo in conduzione diretta. Con riferimento allo schema in fig.3, si determinano le espressioni delle intensità di corrente  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_d$ , che attraversano rispettivamente  $R_1$ ,  $R_2$  ed il diodo.

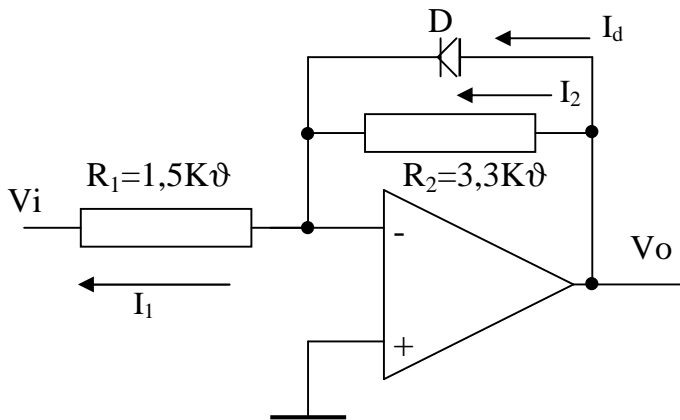


Fig. 3

$$I_1 \times \frac{V_i}{R_1} \quad I_2 \times \frac{V_x}{R_2}$$

$$I_1 \times I_d \Gamma I_2$$

$$I_d \times I_1 \times I_2$$

In fig. 4 è riportata la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$ .

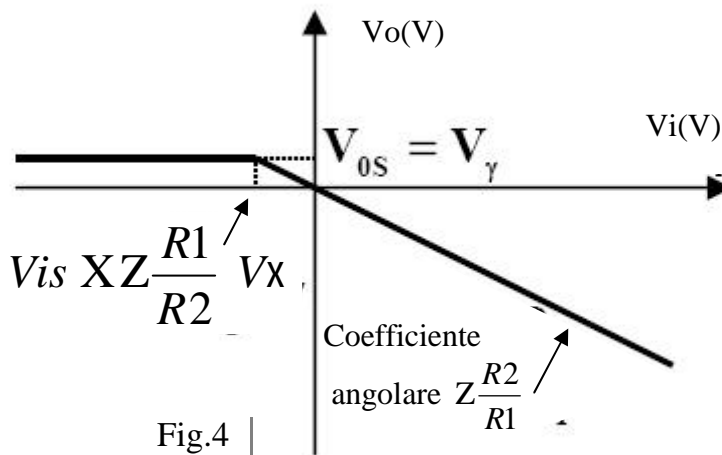


Fig.4

In fig. 5 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.

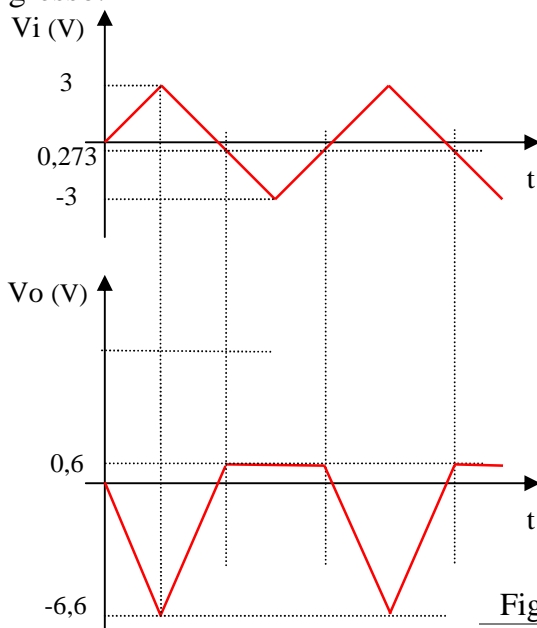
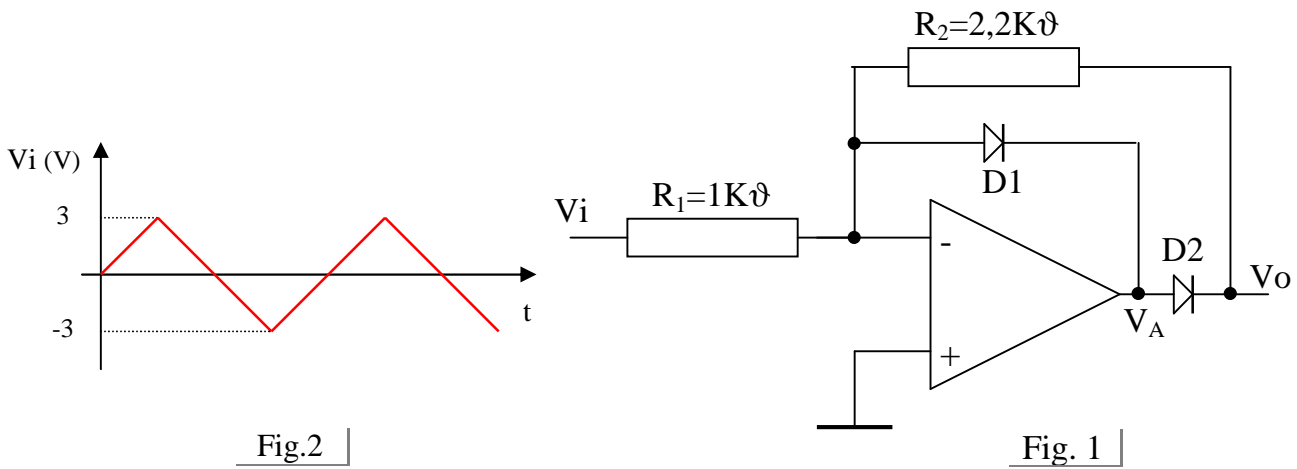


Fig.5

Si nota che la semionda negativa d'ingresso viene eliminata, mentre la semionda positiva viene capovolta ed amplificata di un fattore 2,2.

**Esercizio 3 - Limitatore di precisione**

Dato il circuito di fig. 1 e considerato il diodo reale ( $V_{\uparrow}=0,6V$ ), si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita, nel caso sia applicato all'ingresso il segnale riportato in fig.2.



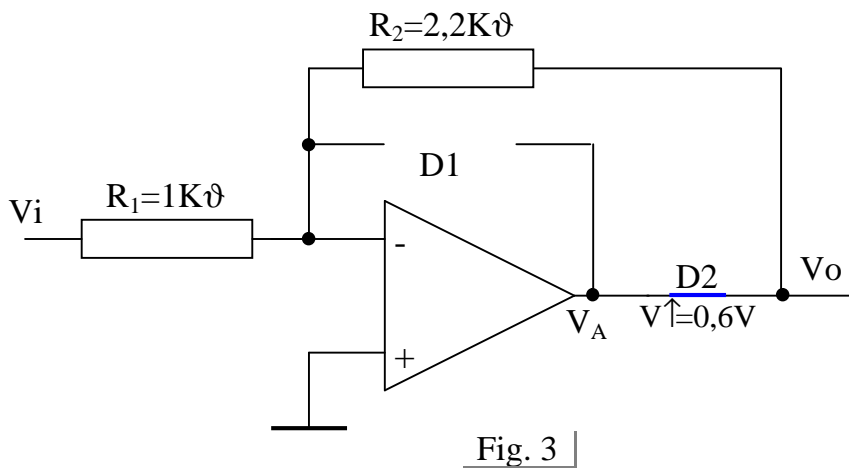
**Soluzione**

Si considerano separatamente i casi in cui il segnale d'ingresso assume valori negativi e quelli in cui assume valori positivi.

**1)  $V_i < 0$**

La struttura invertente del circuito genera, sull'uscita  $V_A$  dell'amplificatore operazionale, una tensione positiva che interdice il diodo D1 e pone in conduzione il diodo D2.

Il circuito di fig. 1 si semplifica nel circuito di fig. 3.



Il circuito si comporta da amplificatore invertente.

$$V_o \approx -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \approx -\frac{2,2 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o \approx -2,2 V_i}$$

2)  $V_i > 0$

La struttura invertente del circuito genera, sull'uscita  $V_A$  dell'amplificatore operazionale, una tensione negativa che interdice il diodo D2 e pone in condizione il diodo D1.

Il circuito di fig. 1 si semplifica nel circuito di fig. 4.

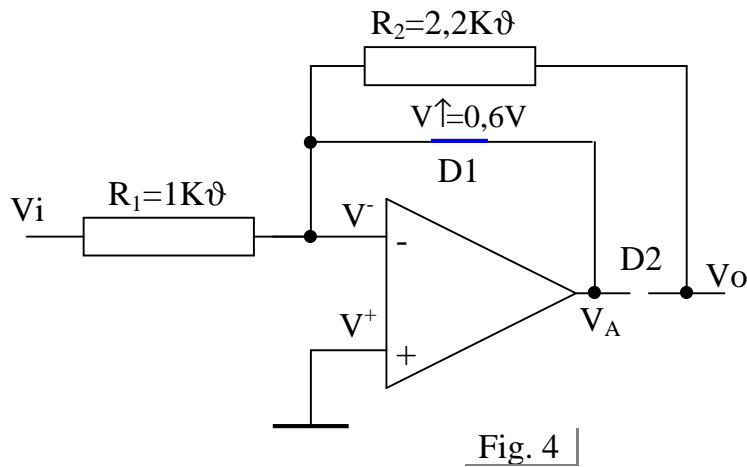


Fig. 4

L'interdizione di D2 comporta un'intensità di corrente nulla sulla resistenza R2 e, conseguentemente, una tensione d'uscita  $V_o$  nulla.

$$V_o = 0 \text{ V}$$

In fig. 5 è riportata la caratteristica  $V_o = f(V_i)$ .

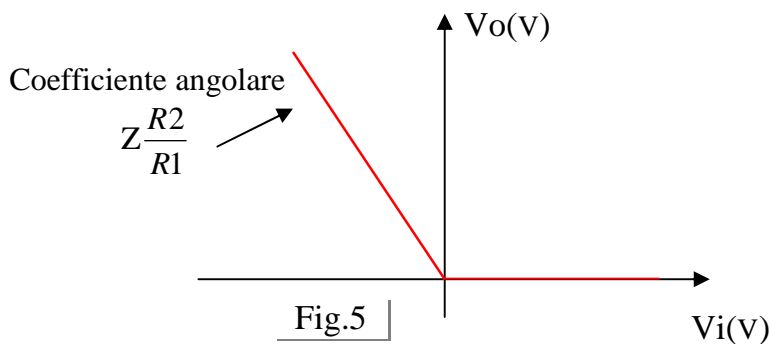


Fig.5

In fig. 6 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita ( $V_o$ ) correlato con il segnale d'ingresso ( $V_i$ ).

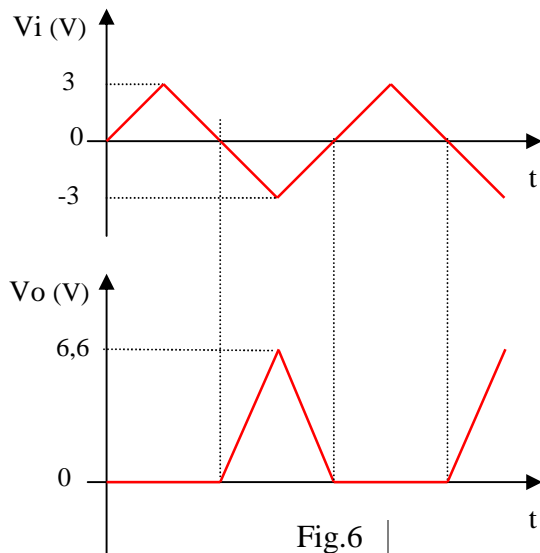


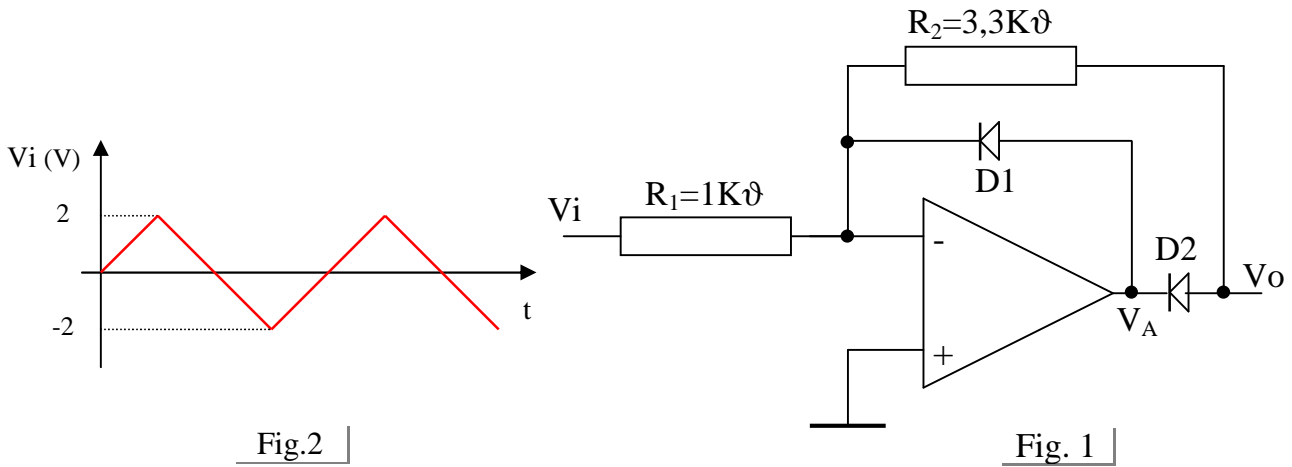
Fig.6

Si nota che la semionda positiva d'ingresso viene eliminata, mentre la semionda negativa viene capovolta ed amplificata di un fattore 2,2. Con il limitatore di precisione viene annullato l'effetto di  $V_{\uparrow}$ .



**Esercizio 4 - Limitatore di precisione**

Dato il circuito di fig. 1 e considerato il diodo reale ( $V_{\uparrow}=0,6V$ ), si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita, nel caso sia applicato all'ingresso il segnale riportato in fig.2.



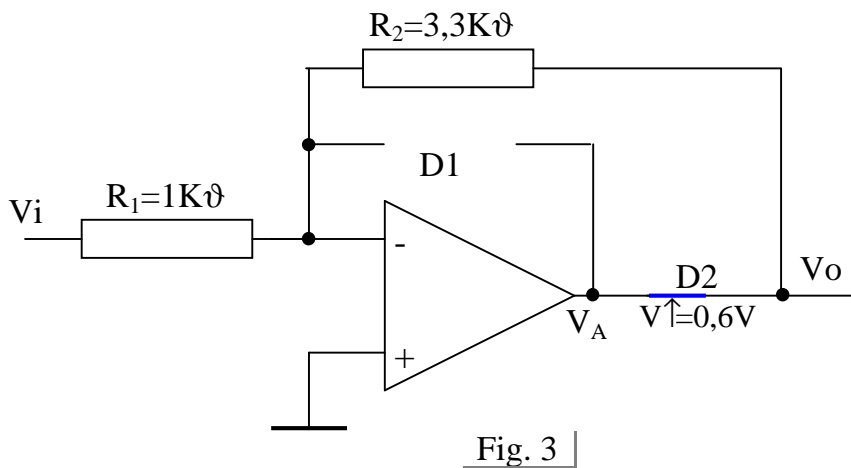
**Soluzione**

Si considerano separatamente i casi in cui il segnale d'ingresso assume valori negativi e quelli in cui assume valori positivi.

**1)  $V_i > 0$**

La struttura invertente del circuito genera, sull'uscita  $V_A$  dell'amplificatore operazionale, una tensione negativa che interdice il diodo D1 e pone in conduzione il diodo D2.

Il circuito di fig. 1 si semplifica nel circuito di fig. 3.



Il circuito si comporta da amplificatore invertente.

$$V_o \approx -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \approx -\frac{3,3 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o \approx -3,3 V_i}$$

2)  $V_i < 0$

La struttura invertente del circuito genera, sull'uscita  $V_A$  dell'amplificatore operazionale, una tensione positiva che interdica il diodo D2 e pone in condizione il diodo D1.

Il circuito di fig. 1 si semplifica nel circuito di fig. 4.

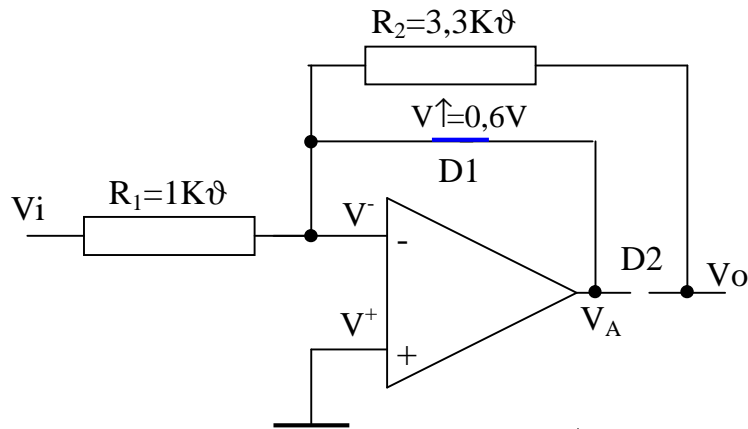


Fig. 4

L'interdizione di D2 comporta un'intensità di corrente nulla sulla resistenza R2 e, conseguentemente, una tensione d'uscita  $V_o$  nulla.

$$V_o = 0V$$

In fig. 5 è riportata la caratteristica  $V_o = f(V_i)$ .

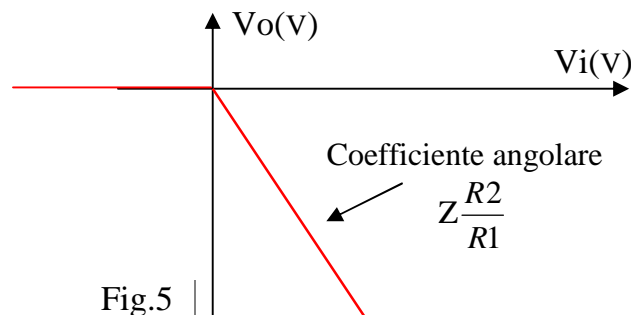


Fig.5

In fig. 6 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita ( $V_o$ ) correlato con il segnale d'ingresso ( $V_i$ ).

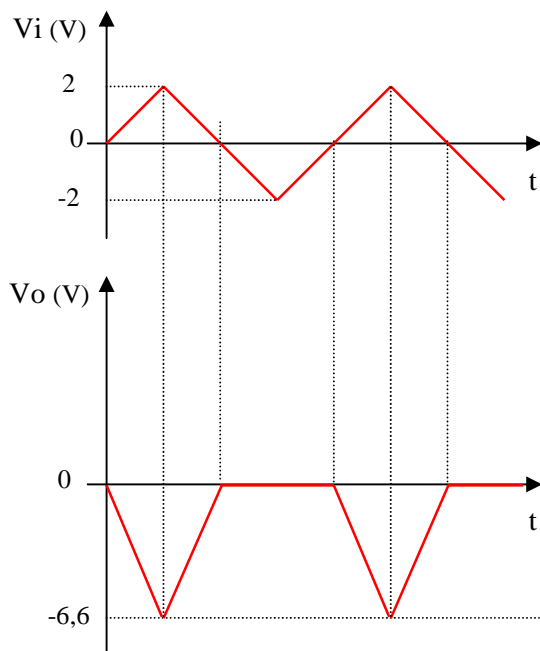


Fig.6

Si nota che la semionda negativa d'ingresso viene eliminata, mentre la semionda positiva viene capovolta ed amplificata di un fattore 3,3. Con il limitatore di precisione viene annullato l'effetto di  $V_{\uparrow}$ .

**Esercizio 5 - Limitatore semplice a un livello**

Dato il circuito di fig. 1, applicando in ingresso il segnale riportato in fig. 2, si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita. Si supponga il diodo zener ( $D_z$ ) reale con  $V_z=5,1V$  e  $V_{\hat{z}}=0,6V$ , il diodo  $D$  reale con  $V_{\hat{}}=0,6V$ .

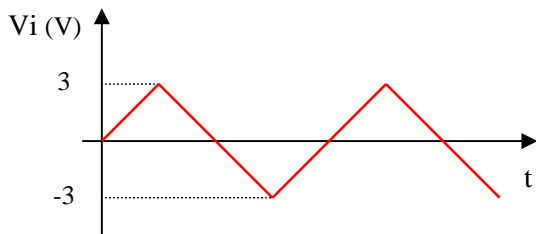


Fig. 2

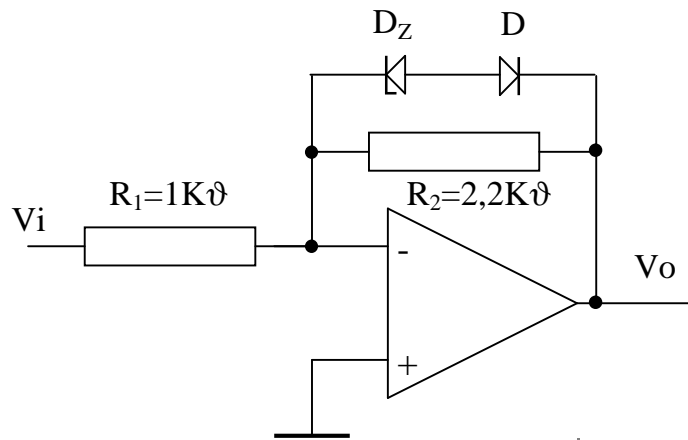


Fig. 1

**Soluzione**

Si ricavano le relazioni ingresso-uscita imposte dalla conduzione e dalla interdizione dei diodi presenti nel circuito.

**1)  $V_i > 0$**

Si suppone inizialmente positivo il segnale  $V_i$ ; l'ingresso è connesso al morsetto invertente, pertanto la corrispondente tensione di uscita  $V_o$  è negativa.

Il diodo  $D_z$  risulta polarizzato inversamente mentre il diodo  $D$  risulta polarizzato direttamente. Quando la tensione di ingresso supera il valore di soglia ( $V_{is}$ ) il ramo contenente i diodi entra in conduzione e la tensione di uscita diviene:

$$V_o \approx (V_z - V_{\hat{}}) \quad V_o \approx (5,1 - 0,6) \quad V_o \approx 5,7 \quad \boxed{V_o \approx 5,7V}$$

**2)  $V_i < 0$**

Il diodo  $D_z$  risulta polarizzato direttamente mentre il diodo  $D$  risulta polarizzato inversamente. Il ramo contenente i diodi risulta interdetto.

Il circuito funziona da amplificatore lineare invertente:

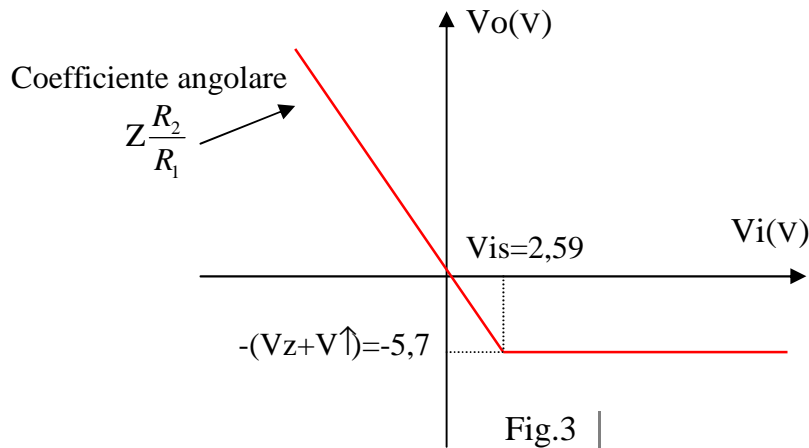
$$V_o \approx -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \approx -\frac{2,2 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o \approx -2,2 V_i}$$

**Calcolo tensione di soglia  $V_{is}$**

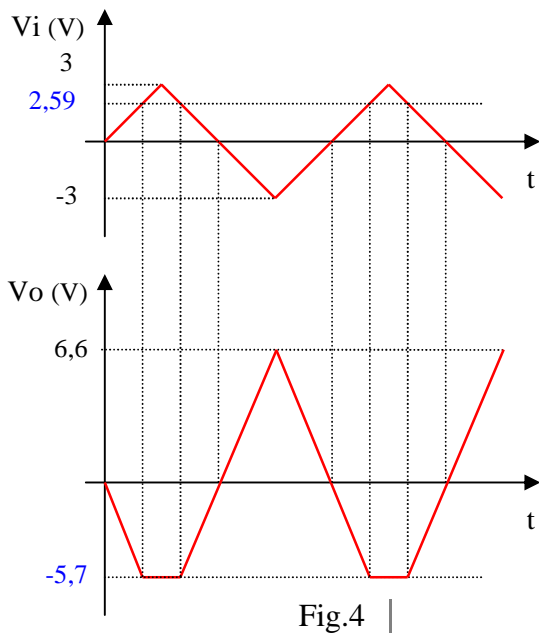
Quando la tensione di ingresso uguaglia la tensione di soglia ( $V_i = V_{is}$ ) l'espressione 1 uguaglia l'espressione 2, quindi:

$$(V_z - V_{\hat{}}) \approx -\frac{R_2}{R_1} V_{is} \quad V_{is} \approx -\frac{R_1}{R_2} (V_z - V_{\hat{}}) \quad V_{is} \approx -\frac{1 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^3} (5,1 - 0,6) \quad \boxed{V_{is} \approx -2,59V}$$

In fig. 3 è riportata la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$ .



In fig. 4 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.



Si nota che la semionda positiva d'ingresso viene limitata a  $-5,7$  V, mentre la semionda negativa viene capovolta ed amplificata di un fattore 2,2.

**Esercizio 6 - Limitatore semplice a un livello**

Dato il circuito di fig. 1, applicando in ingresso il segnale riportato in fig. 2, si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita. Si supponga il diodo zener ( $D_z$ ) reale con  $V_z=2,4V$  e  $V_{\hat{z}}=0,6V$ , il diodo  $D$  reale con  $V_{\hat{}}=0,6V$ .

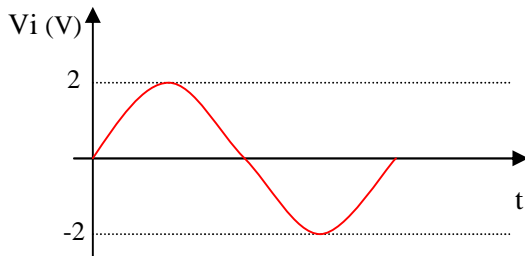


Fig. 2

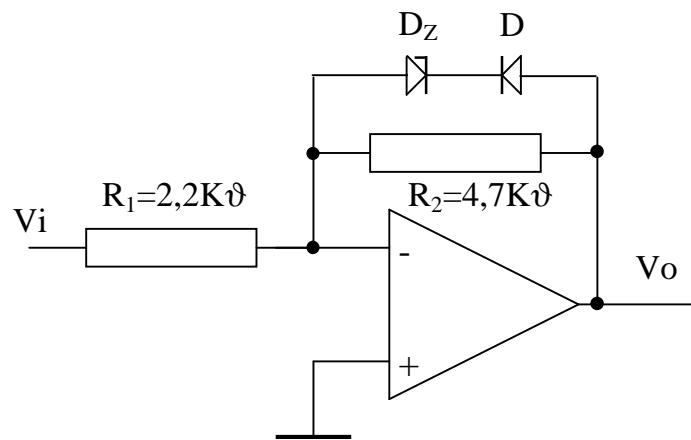


Fig. 1

**Soluzione**

Si ricavano le relazioni ingresso-uscita imposte dalla conduzione e dalla interdizione dei diodi presenti nel circuito.

**1)  $V_i > 0$**

Si suppone inizialmente positivo il segnale  $V_i$ ; l'ingresso è connesso al morsetto invertente, pertanto la corrispondente tensione di uscita  $V_o$  è negativa.

Il diodo  $D_z$  risulta polarizzato direttamente mentre il diodo  $D$  risulta polarizzato inversamente. Il ramo contenente i diodi risulta interdetto.

Il circuito funziona da amplificatore lineare invertente:

$$1) V_o \times Z \frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \times Z \frac{4,7 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^3} V_i \quad V_o \times Z 2,14 V_i$$

**2)  $V_i < 0$**

Il diodo  $D_z$  risulta polarizzato inversamente mentre il diodo  $D$  risulta polarizzato direttamente. Quando la tensione di ingresso supera il valore di soglia ( $V_{is}$ ) il ramo contenente i diodi entra in conduzione e la tensione di uscita diviene:

$$2) V_o \times (V_z \Gamma V_{\hat{}}) \quad V_o \times (2,4 \Gamma 0,6) \quad V_o \times 3,0V \quad V_o \times 3,0V$$

**Calcolo tensione di soglia  $V_{is}$**

Quando la tensione di ingresso uguaglia la tensione di soglia ( $V_i = V_{is}$ ) l'espressione 2 uguaglia l'espressione 1, quindi:

$$(V_z \Gamma V_{\hat{}}) \times Z \frac{R_2}{R_1} V_{is} \quad V_{is} \times Z \frac{R_1}{R_2} (V_z \Gamma V_{\hat{}}) \quad V_{is} \times Z \frac{2,2 \cdot 10^3}{4,7 \cdot 10^3} (2,4 \Gamma 0,6) \quad V_{is} \times Z 1,40V$$

In fig. 3 è riportata la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$ .

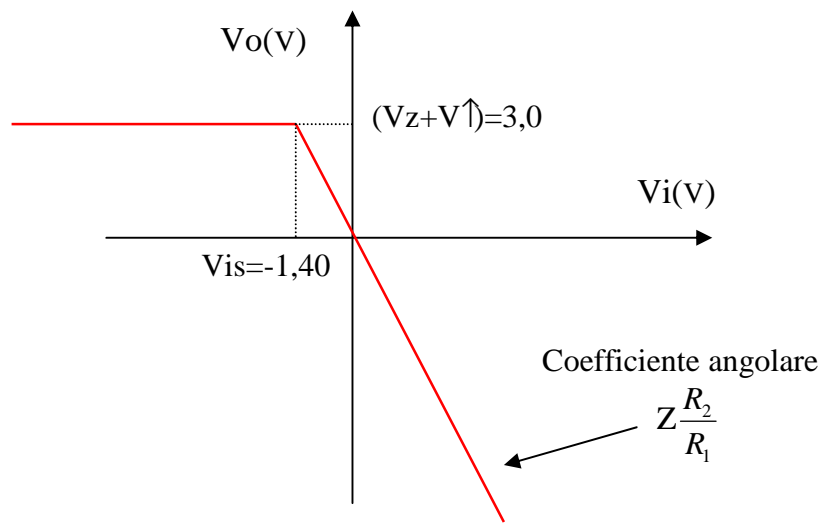


Fig.3

In fig. 4 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.

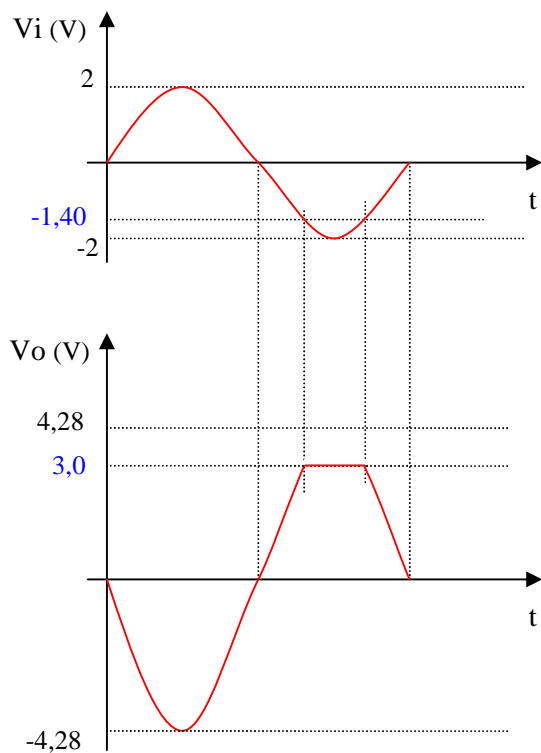
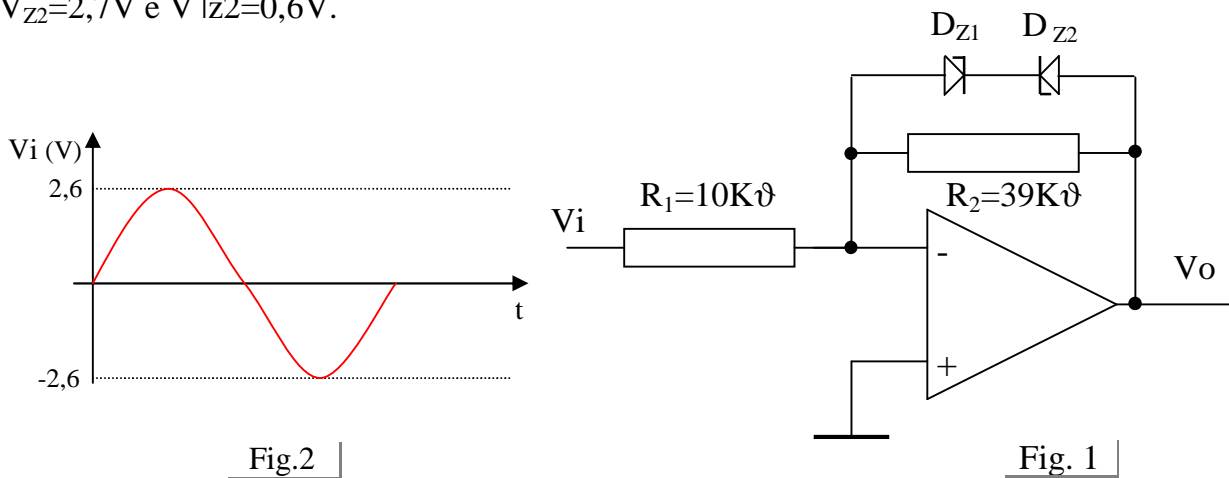


Fig.4

Si nota che la semionda negativa d'ingresso viene limitata a 3,0 V, mentre la semionda positiva viene capovolta ed amplificata di un fattore 2,14.

**Esercizio 7 - Limitatore doppio**

Dato il circuito di fig. 1, applicando in ingresso il segnale riportato in fig. 2, si disegni la transcaratteristica  $V_o=f(V_i)$  e si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita. Si supponga il diodo zener  $D_{z1}$  reale con  $V_{Z1}=2,2V$  e  $V_{\uparrow z1}=0,6V$ , il diodo  $D_{z2}$  reale con  $V_{Z2}=2,7V$  e  $V_{\uparrow z2}=0,6V$ .



**Soluzione**

Quando il ramo contenente i diodi zener non conduce, il circuito si comporta come un amplificatore lineare invertente.

$$V_o \approx -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \approx -\frac{39 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o \approx -3,9 V_i}$$

**1)  $V_i > 0$**

Il diodo  $D_{z1}$  risulta polarizzato direttamente mentre il diodo  $D_{z2}$  risulta polarizzato inversamente.

Quando la tensione di ingresso supera il valore di soglia ( $V_{iH}$ ) il ramo contenente i diodi entra in conduzione e la tensione di uscita diviene:

**a)**  $V_o \approx (V_{Z1} \Gamma V_{Z2}) \quad V_o \approx (0,6 \Gamma 2,7) \quad V_o \approx 3,3V \quad \boxed{V_o \approx 3,3V}$

Per  $0 < V_i < V_{iH}$  il circuito si comporta come un amplificatore lineare invertente.

**b)**  $V_o \approx -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o \approx -\frac{39 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o \approx -3,9 V_i}$

**Calcolo tensione di soglia  $V_{iH}$**

Quando la tensione di ingresso uguaglia la tensione di soglia ( $V_i = V_{iH}$ ) l'espressione **a** uguaglia l'espressione **b**, quindi:

$$(V_{Z1} \Gamma V_{Z2}) \approx -\frac{R_2}{R_1} V_{iH} \quad V_{iH} \approx -\frac{R_1}{R_2} (V_{Z1} \Gamma V_{Z2}) \quad V_{iH} \approx -\frac{10 \cdot 10^3}{39 \cdot 10^3} (0,6 \Gamma 2,7) \quad \boxed{V_{iH} \approx 0,85V}$$

**2)  $V_i < 0$**

Il diodo Dz1 risulta polarizzato inversamente mentre il diodo Dz2 risulta polarizzato direttamente.

Quando la tensione di ingresso supera il valore di soglia ( $V_{iL}$ ) il ramo contenente i diodi entra in conduzione e la tensione di uscita diviene:

a)  $V_o = V_{z1} \vee V_{z2} \quad V_o = 2,2 \vee 0,6 \quad V_o = 2,8V \quad \boxed{V_o = 2,8V}$

Per  $V_{iL} < V_i < 0$  il circuito si comporta come un amplificatore lineare invertente.

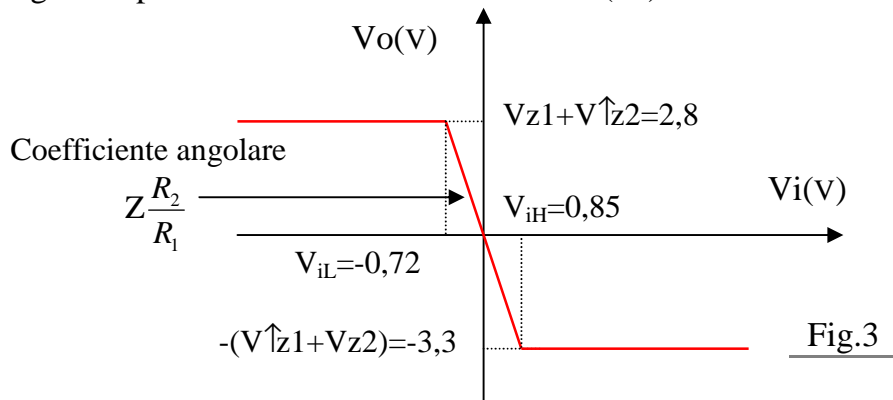
b)  $V_o = -Z \frac{R_2}{R_1} V_i \quad V_o = -Z \frac{39 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} V_i \quad \boxed{V_o = -3,9 V_i}$

**Calcolo tensione di soglia  $V_{iL}$**

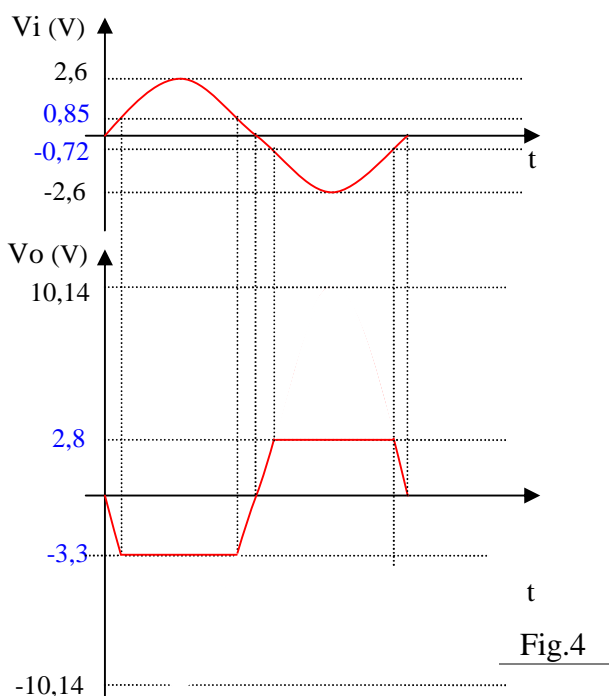
Quando la tensione di ingresso uguaglia la tensione di soglia ( $V_i = V_{iL}$ ) l'espressione a uguaglia l'espressione b, quindi:

$V_{z1} \vee V_{z2} = -Z \frac{R_2}{R_1} V_{iL} \quad V_{iL} = -Z \frac{R_1}{R_2} (V_{z1} \vee V_{z2}) \quad V_{iL} = -Z \frac{10 \cdot 10^3}{39 \cdot 10^3} (2,2 \vee 0,6) \quad \boxed{V_{iL} = -0,72V}$

In fig. 3 è riportata la transcaratteristica  $V_o = f(V_i)$ .



In fig. 4 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.





**Esercizio 8 - Raddrizzatore di precisione a doppia semionda**

Dato il circuito di fig. 1, applicando in ingresso il segnale riportato in fig. 2, si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita.

Si supponga il diodo D1 reale con  $V_{\hat{}}=0,6V$ , il diodo D2 reale con  $V_{\hat{}}=0,6V$ .

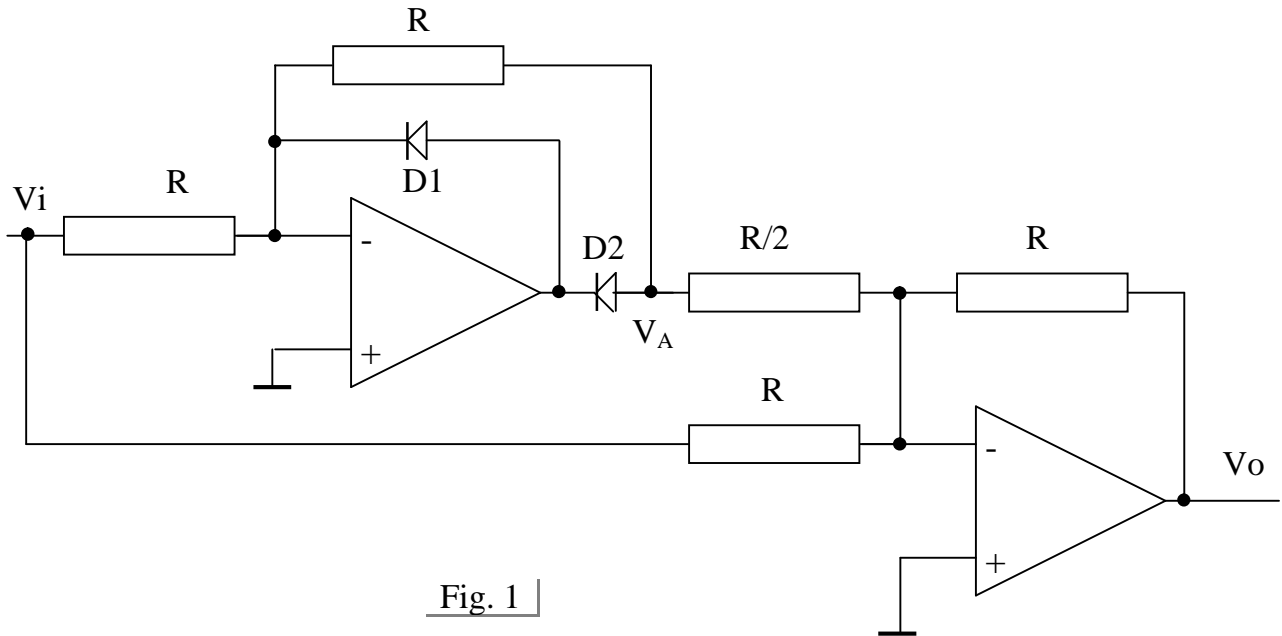


Fig. 1

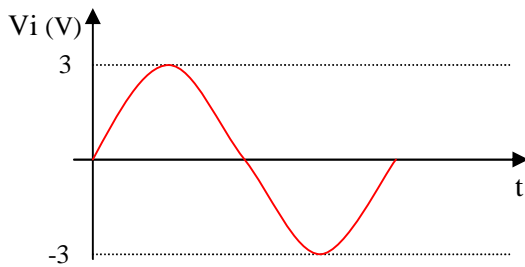


Fig.2

**Soluzione**

Il circuito riportato in Fig. 1 rappresenta un raddrizzatore a doppi semionda.

Il raddrizzatore a doppia semionda costituisce una importante applicazione dei limitatori; esso è ottenuto tramite la connessione di un limitatore di precisione con un sommatore invertente.

Il funzionamento va analizzato considerando separatamente la semionda positiva dalla semionda negativa del segnale d'ingresso.

**1)  $V_i > 0$**

La struttura invertente del circuito genera, sull'uscita  $V_A$  del primo amplificatore operazionale, una tensione negativa che interdice il diodo D1 e pone in conduzione il diodo D2. Il circuito di fig. 1 si semplifica nel circuito di fig. 3.

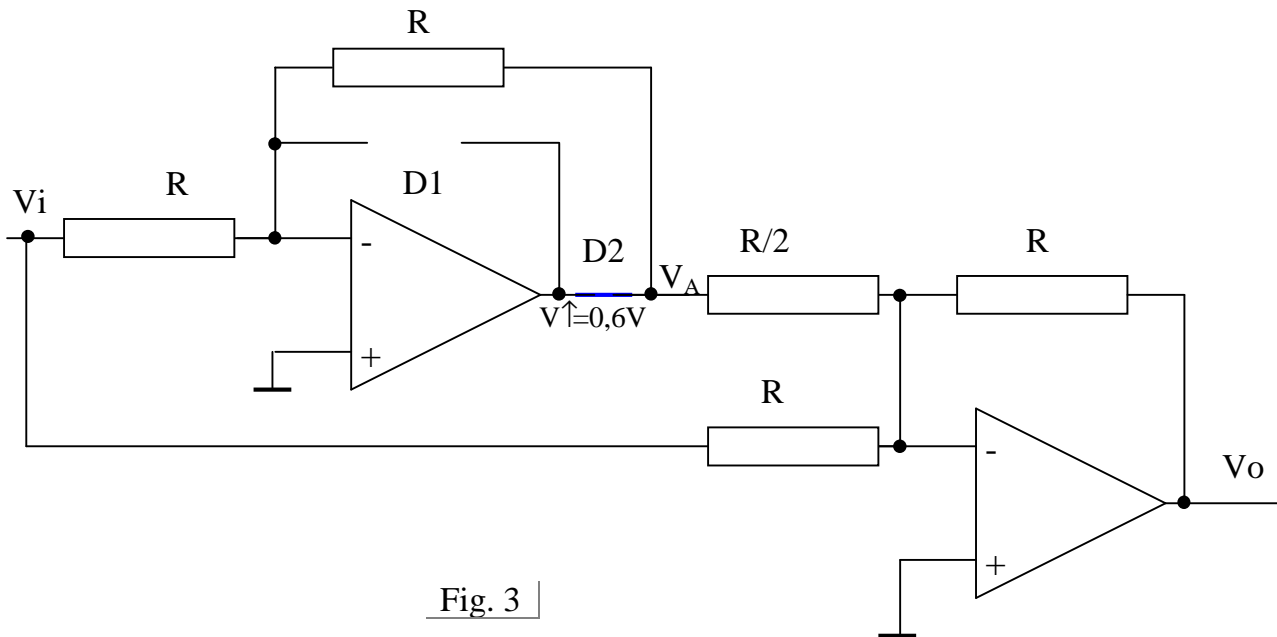


Fig. 3

Il circuito si comporta da amplificatore invertente.

$$V_A = -Z \frac{R}{R} V_i$$

$$V_A = -Z V_i$$

Dall'analisi del secondo stadio (sommatore invertente) si ricava l'uscita  $V_O$

$$V_O = -Z \frac{R}{R} V_A - Z \frac{R}{R} V_i$$

$$V_O = -Z \frac{R}{R} (-Z V_i) - Z \frac{R}{R} V_i$$

$$V_O = 2V_i - Z V_i$$

$$V_O = V_i$$

## 2) $V_i < 0$

La struttura invertente del circuito genera, sull'uscita  $V_A$  del primo amplificatore operazionale, una tensione positiva che interdice il diodo D2 e pone in conduzione il diodo D1. Il circuito di fig. 1 si semplifica nel circuito di fig. 4.

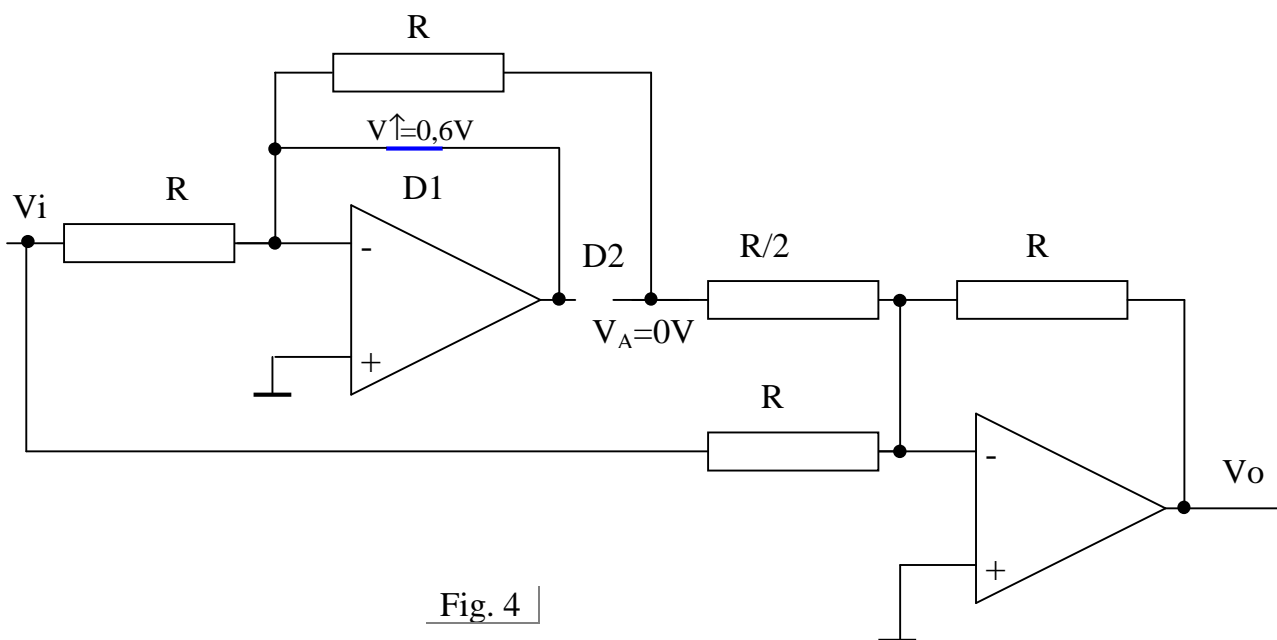


Fig. 4

L'interdizione di D2 comporta un'intensità di corrente nulla sulla resistenza R e, conseguentemente, una tensione d'uscita  $V_A$  nulla.

$$V_A = 0$$

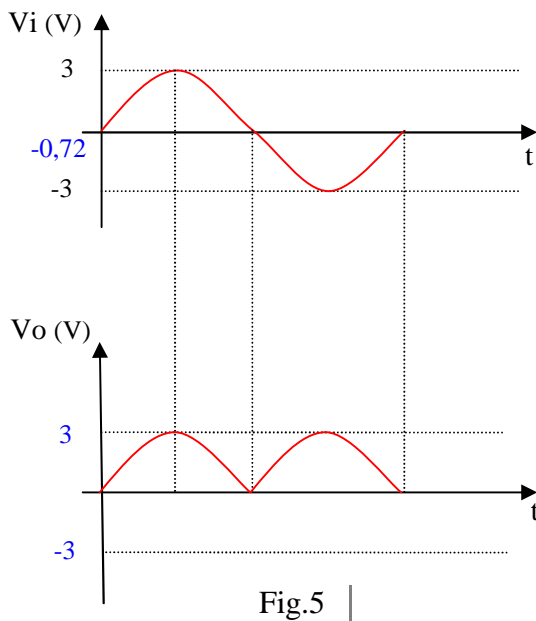
Dall'analisi del secondo stadio (sommatore invertente) si ricava l'uscita  $V_o$

$$V_o = -\frac{R}{R} V_A - \frac{R}{R} V_i = 0 - V_i = -V_i \quad \boxed{V_o = -V_i}$$

### Diagramma temporale della tensione di uscita

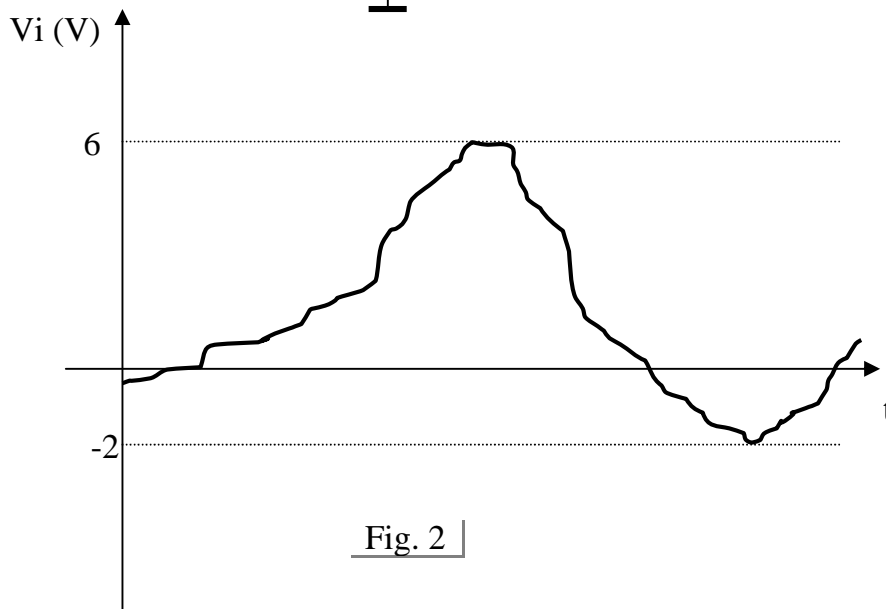
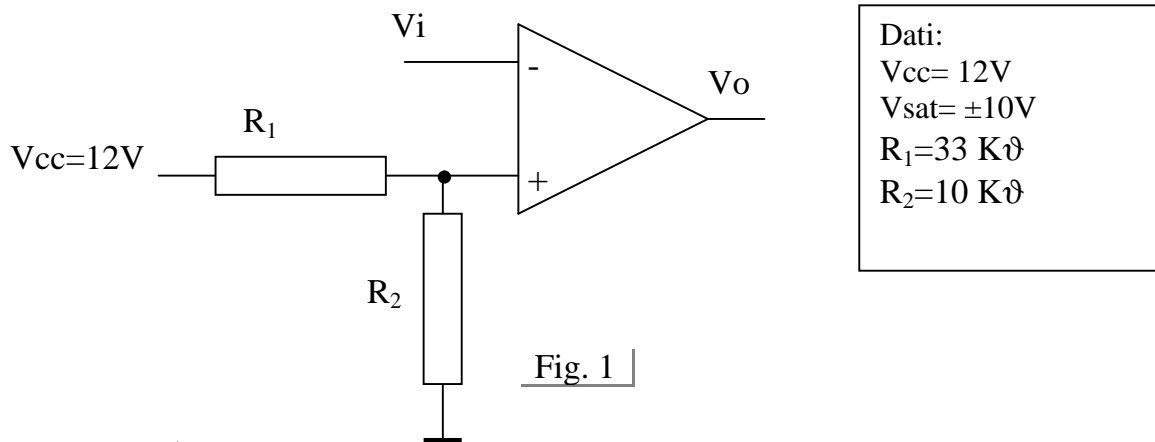
- 1)  $V_i > 0$  (semionda positiva)  $\longrightarrow$   $V_o = -V_i$
- 2)  $V_i < 0$  (semionda negativa)  $\longrightarrow$   $V_o = -V_i$

In fig. 5 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.



**Esercizio 9 - Comparatore semplice**

Dato il circuito di fig. 1, applicando in ingresso il segnale riportato in fig. 2, si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita.

**Soluzione**

Il circuito riportato in Fig. 1 rappresenta un comparatore invertente.

**Comparatori**

I comparatori sono circuiti utilizzati per confrontare tra loro due segnali che sono il segnale di riferimento  $V_R$  ed il segnale che si vuole confrontare  $V_i$ .

La tensione in uscita assume due soli livelli (saturazione positiva ( $+V_{sat}$ ) o negativa ( $-V_{sat}$ )) a seconda dell'esito del confronto.

Per limitare la tensione d'uscita a valori differenti dai valori di saturazione si possono utilizzare dei diodi Zener disposti in modo opportuno sulle uscite.

Un comparatore può essere non invertente o invertente.

Nel **comparatore non invertente** tra l'ingresso invertente e massa viene posto un segnale di riferimento  $V_R$ ; se il segnale d'ingresso  $V_i$  supera la tensione  $V_R$ , la tensione in uscita si trova in saturazione positiva ( $+V_{sat}$ ).

Nel **comparatore invertente** tra l'ingresso non invertente e massa viene posto un segnale di riferimento  $V_R$ ; se il segnale d'ingresso  $V_i$  supera la tensione  $V_R$ , la tensione in uscita si trova in saturazione negativa ( $-V_{sat}$ ).

**Calcolo  $V_R$**

$$V_R = V_{cc} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12 \times \frac{10 \times 10^3}{33 \times 10^3 + 10 \times 10^3} = 2,79V$$

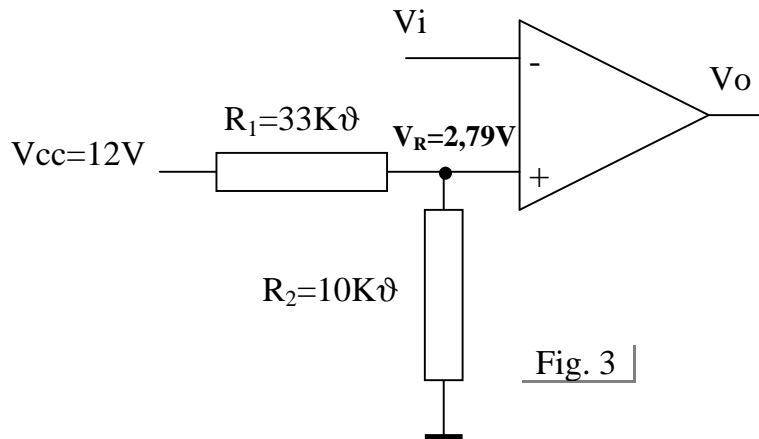


Fig. 3

**Diagramma temporale della tensione di uscita**

- 1)  $V_i < V_R$   $\longrightarrow$   $V_o \times \Gamma V_{sat}$
- 2)  $V_i > V_R$   $\longrightarrow$   $V_o \times Z V_{sat}$

In fig. 4 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.

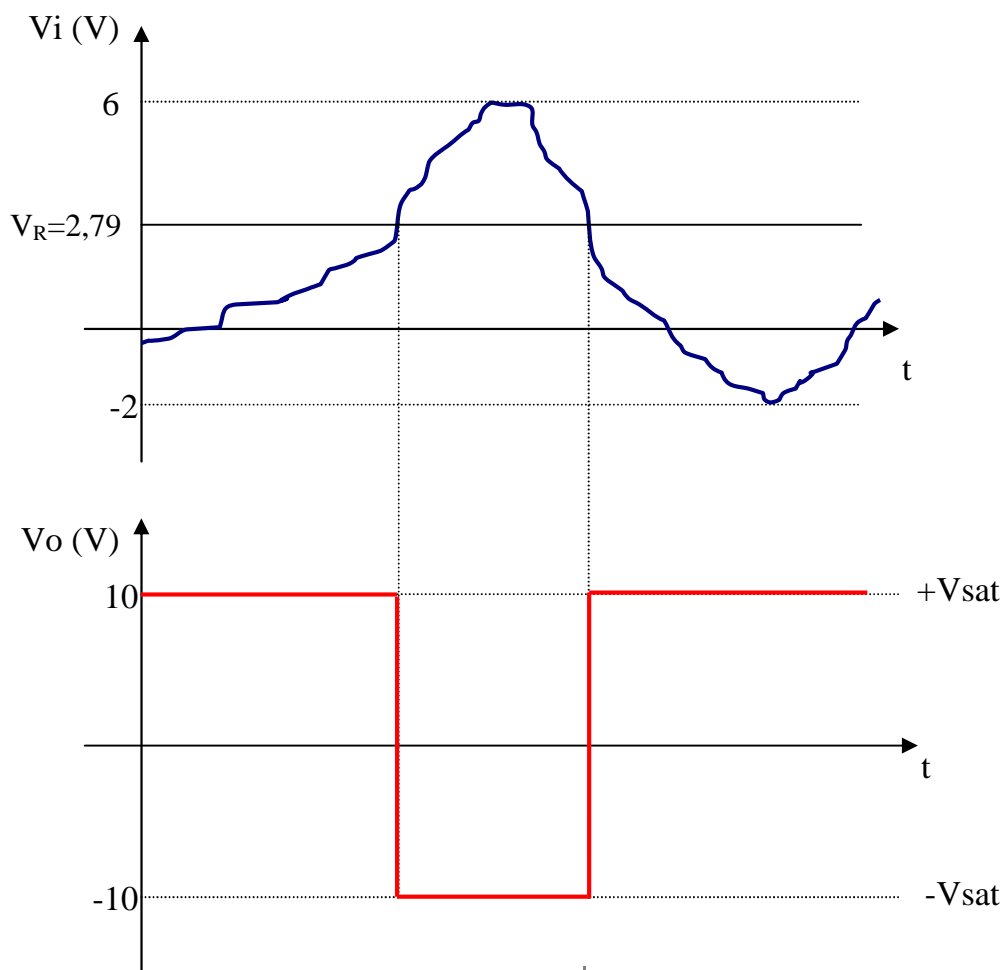


Fig. 4

**Esercizio 10 - Comparatore a finestra**

Dimensionare un comparatore a finestra con tensione di soglia inferiore pari a 2V e tensione di soglia superiore pari a 4V. Disegnare il diagramma temporale del segnale di uscita correlato con il segnale di ingresso riportato in fig. 1.

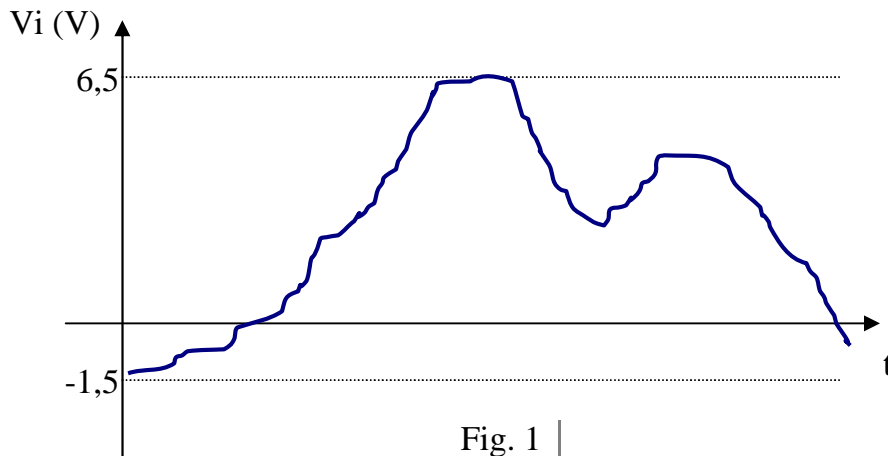


Fig. 1

**Soluzione**

**Comparatore a finestra**

Il comparatore a finestra è un circuito capace di riconoscere se una tensione  $V_i$  risulti compresa o non compresa in un intervallo limitato da una soglia inferiore  $V_{RL}$  e da una soglia superiore  $V_{RH}$  ( $V_{RH} > V_{RL}$ ). In fig. 2 lo schema elettrico.

- 1)  $V_i < V_{RL}$        $V_u = V_{UH}$       A1=+Vsat, D1=conduzione, A2=-Vsat, D2=interdetto
- 2)  $V_i > V_{RH}$        $V_u = V_{UH}$       A1=-Vsat, D1=interdetto, A2=+Vsat, D2=conduzione
- 3)  $V_{RL} < V_i < V_{RH}$        $V_u = V_{UL}$       A1=-Vsat, D1=interdetto, A2=-Vsat, D2=interdetto

Per valori di  $V_i$  esterni all'intervallo l'uscita  $V_u$  è a livello alto ( $V_u = V_{UH}$ ), per valori interni a livello basso ( $V_u = V_{UL}$ ). Questo circuito non può funzionare "a vuoto" (cioè senza carico), ma solo in presenza di una resistenza  $R_L$  che garantisce un passaggio di corrente sufficiente per polarizzare i due diodi in zona diretta (in conduzione).

In fig.3 la transcaratteristica.

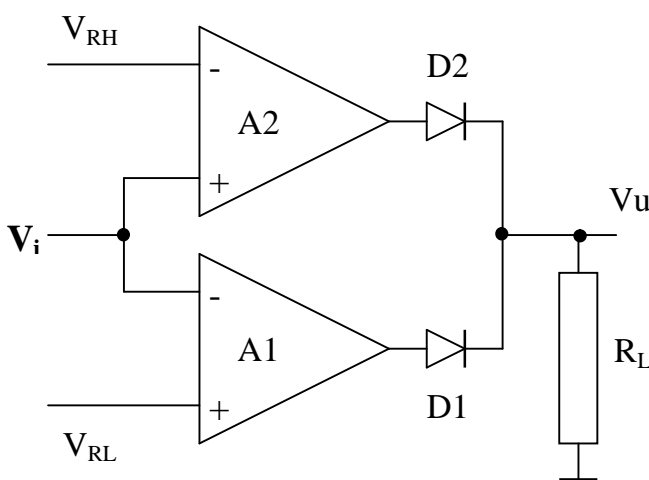


Fig. 2

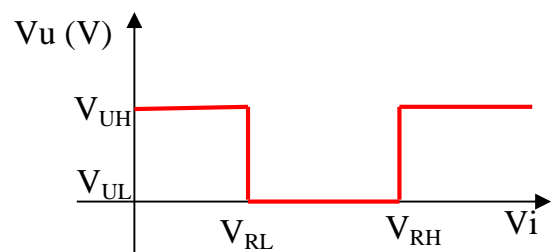


Fig. 3

**Dimensionamento del circuito**

Per impostare le tensioni di riferimento ( $V_{RL}$ ,  $V_{RH}$ ) si utilizza un partitore di tensione con tre resistenze. In fig. 4 lo schema completo del comparatore richiesto.

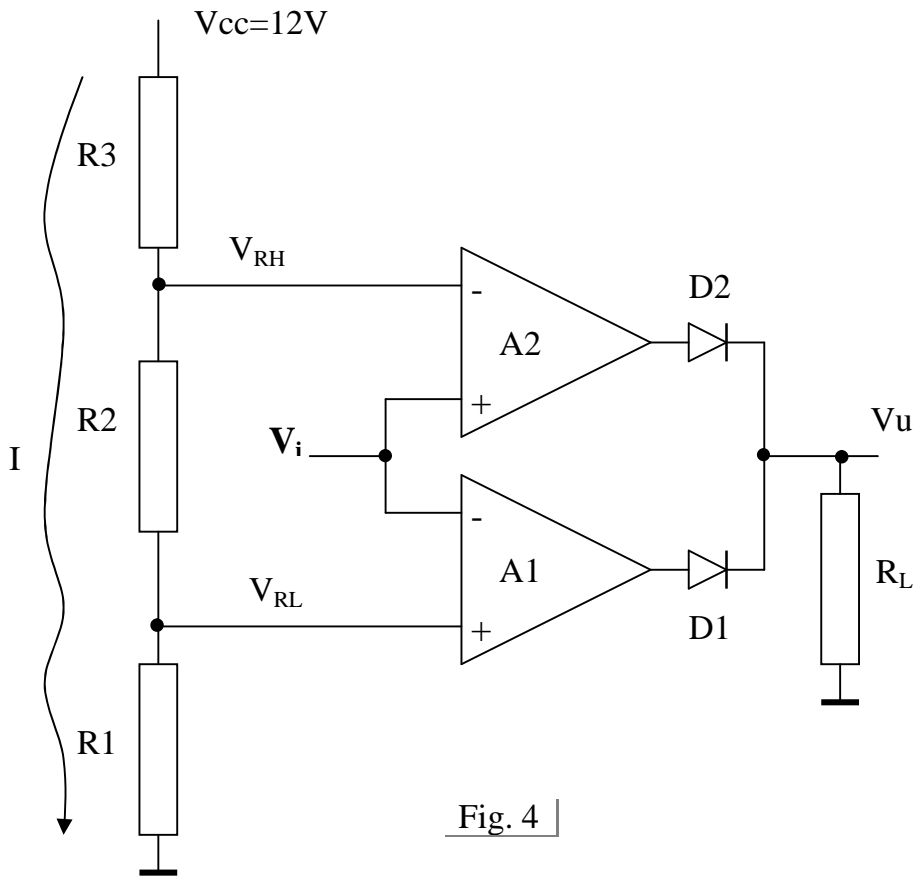


Fig. 4

$$V_{RL} \times R1 \ I$$

$$V_{RH} \times (R1 \ \Gamma \ R2) \ I$$

$$I \times \frac{V_{cc}}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$V_{RL} \times R1 \ \frac{V_{cc}}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$V_{RH} \times (R1 \ \Gamma \ R2) \ \frac{V_{cc}}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$2 \times R1 \ \frac{12}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$4 \times (R1 \ \Gamma \ R2) \ \frac{12}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$\frac{2}{12} \times \frac{R1}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$\frac{4}{12} \times \frac{R1 \ \Gamma \ R2}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$R1 \ \times \ 2K\varnothing$$

$$R1 \ \Gamma \ R2 \ \times \ 4K\varnothing$$

$$R2 \ \times \ 2K\varnothing$$

$$R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3 \ \times \ 12K\varnothing$$

$$R3 \ \times \ 8K\varnothing$$

**Diagramma temporale della tensione di uscita**

1)  $V_i < 2V; V_i > 4V$   $\longrightarrow$   $V_u \times V_{UH} \times \Gamma V_{sat} \times 10V$

2)  $2V < V_i < 4V$   $\longrightarrow$   $V_u \times 0V$

In fig. 5 è riportato il diagramma temporale del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.

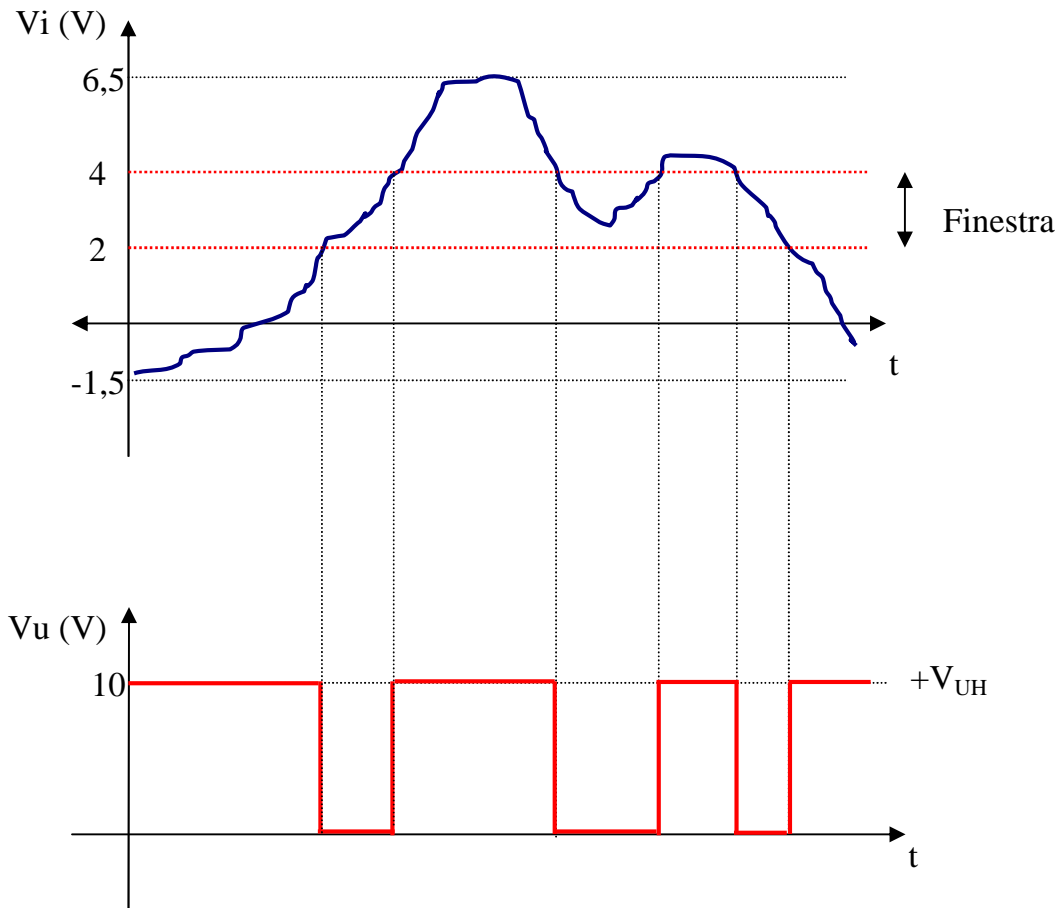


Fig. 5



**Esercizio 11 - Comparatore con Isteresi o Trigger di Schmitt (invertente)**

**Il rumore nei comparatori**

In Fi. 1 è illustrato un tipico comparatore che confronta il segnale  $V_i$  con il livello di riferimento  $V_r$ . Il generatore  $E_n$  rappresenta la tensione di rumore considerata come un treno di impulsi. In Fig 2 sono illustrati i diagrammi del segnale risultante  $V=V_i+E_n$  e la tensione d'uscita. Come si vede, durante il primo periodo, in cui si è ipotizzata l'assenza di disturbi ( $E_n$  cortocircuitato), l'uscita commuta regolarmente; in presenza di disturbi, invece, quando  $V_i$  avvicina  $V_r$ ,  $V_o$  presenta commutazioni indesiderate o oscillazioni incontrollate e la funzionalità del circuito risulta compromessa.

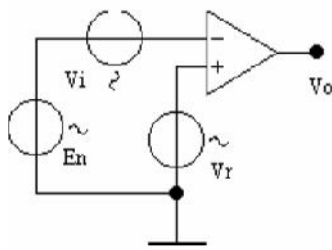


Fig. 1

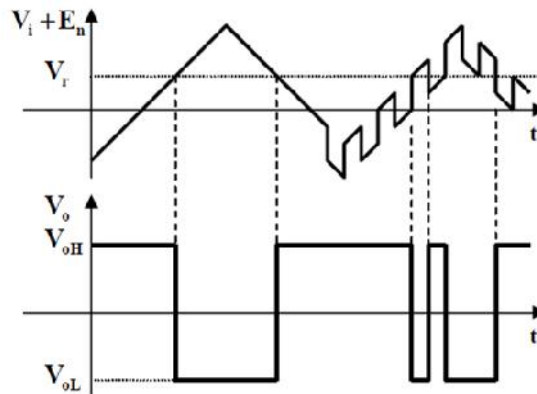


Fig. 2

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

La retroazione positiva viene realizzata applicando all'ingresso non invertente una parte della tensione di uscita, tramite un partitore resistivo, come in Fig. 3.

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

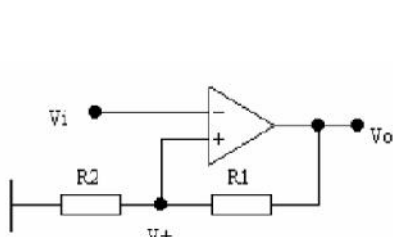
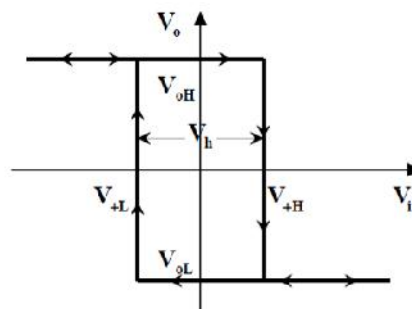


Fig. 3



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

La tensione  $V^+$  dipende dalla tensione d'uscita che può assumere due valori  $+V_{sat}$  e  $-V_{sat}$ , pertanto, si avranno due tensioni di soglia,  $V_{+H}$  e  $V_{+L}$ .

## Analisi del circuito

$$V_i \Psi V_H^\Gamma \quad \text{Apple} \quad | \quad V_o \times Z V_{sat}$$

$$V_i \Phi V_H^\Gamma \quad \text{Apple} \quad | \quad V_o \times \Gamma V_{sat}$$

1) Se  $V_o = +V_{sat}$       $V_H^\Gamma \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} V_{sat}$      Tensione di soglia superiore

2) Se  $V_o = -V_{sat}$       $V_H^\Gamma \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} (Z V_{sat})$      Tensione di soglia inferiore

Quando  $V_i$ , crescendo, uguaglia e tende a superare  $V_H^+$ , prevale l'ingresso invertente su quello non invertente provocando la commutazione dell'uscita da  $+V_{sat}$  a  $-V_{sat}$ , e la tensione sull'ingresso non invertente passa da  $V_H^+$  a  $V_L^+$ , ossia la tensione di soglia subisce una drastica variazione.

Una nuova commutazione dell'uscita si avrà quando la tensione d'ingresso  $V_i$ , decrescendo, uguaglia e tende a scendere al di sotto di  $V_L^+$ , prevale l'ingresso non invertente su quello invertente provocando la commutazione dell'uscita da  $-V_{sat}$  a  $+V_{sat}$ , e la tensione sull'ingresso non invertente passa da  $V_L^+$  a  $V_H^+$ , ossia la tensione di soglia subisce un'altra drastica variazione. In Fig. 4 è riportata la transcaratteristica

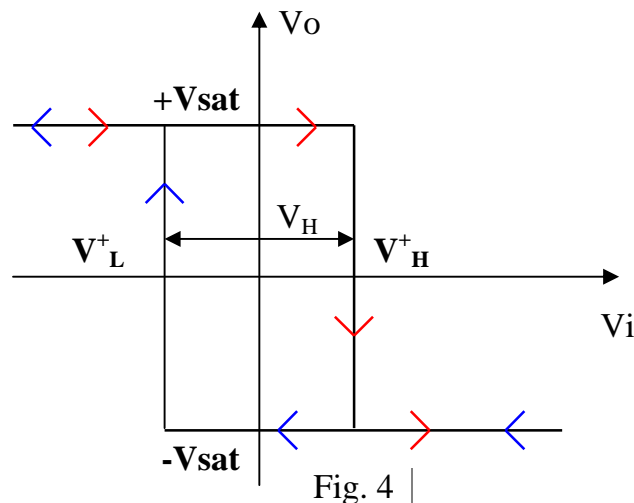


Fig. 4

Il circuito, come evidenziato dalla caratteristica di Fig. 4, presenta un'ampiezza d'isteresi  $V_H$ , ossia le commutazioni dell'uscita avvengono per valori della tensione di soglia ( $V_H^+$ ;  $V_L^+$ ) (Soglia Superiore ; Soglia Inferiore) diversi tra loro ed esiste un intervallo delle tensioni d'ingresso per le quali l'uscita rimane allo stato precedente.

### Riassumendo:

a)  $V_i \text{ TM } V_L^\Gamma \quad \text{Apple} \quad | \quad V_o \times \Gamma V_{sat}$

b)  $V_L^\Gamma \Phi V_i \Phi V_H^\Gamma \quad \text{Apple} \quad | \quad V_o \times \text{Stato precedente}$

c)  $V_i \quad | \quad V_H^\Gamma \quad \text{Apple} \quad | \quad V_o \times Z V_{sat}$

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

La differenza  $V_H = V_H^+ - V_L^+$  fra le due soglie di commutazione prende il nome di ampiezza dell'isteresi. Per evitare false commutazioni occorre dunque  $V_H$  sia maggiore dell'ampiezza picco-picco dei disturbi; così l'ampiezza dell'isteresi indicherà l'ampiezza del segnale di rumore che può essere tollerata o il margine di rumore.

### Ampiezza dell'Isteresi $V_H$

$$V_H \times V_H^\Gamma \times Z V_L^\Gamma \quad V_H \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times V_{sat} \times Z \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times f Z V_{sat} A$$

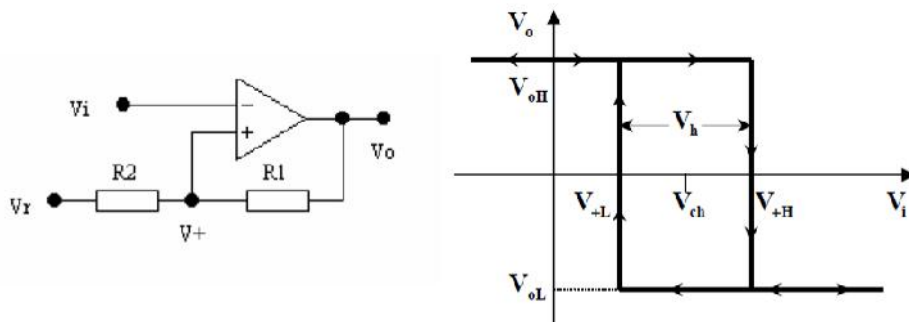
$$V_H \times 2 \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times V_{sat}$$

### Centro dell'Isteresi $V_{CH}$

$$V_{CH} \times \frac{V_H^\Gamma \Gamma V_L^\Gamma}{2} \text{ in questo caso è zero}$$

### Comparatore con isteresi invertente con centro diverso da zero

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



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

$$V_H^\Gamma \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times V_{sat} \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r$$

$$V_L^\Gamma \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times f Z V_{sat} A \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r$$

### Ampiezza dell'Isteresi $V_H$

$$V_H \times V_H^\Gamma \times Z V_L^\Gamma$$

$$V_H \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times V_{sat} \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r \times Z \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times f Z V_{sat} A \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r$$

$$V_H \times 2 \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times V_{sat}$$

### Centro dell'Isteresi $V_{CH}$

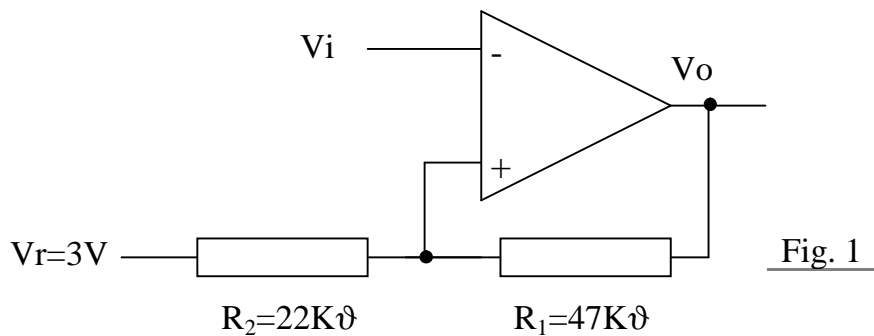
$$V_{CH} \times \frac{V_H^\Gamma \Gamma V_L^\Gamma}{2}$$

$$V_{CH} \times \frac{\frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times V_{sat} \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r \Gamma \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} \times f Z V_{sat} A \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r}{2}$$

$$V_{CH} \times \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} \times V_r$$

**Esercizio 12 - Comparatore con isteresi o Trigger di Schmitt (invertente)**

Dato il circuito di fig. 1, si tracci il diagramma temporale della tensione d'uscita in risposta ad un segnale triangolare di valore picco-picco 8V sovrapposto ad una componente continua pari a 2V.



**Soluzione**

**Tensione di soglia superiore**

$$V_H^\Gamma \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} V_{sat} \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} V_r$$

$$V_H^\Gamma \times \frac{22 \cdot 10^3}{(47 \Gamma 22) \cdot 10^3} 10 \Gamma \frac{47 \cdot 10^3}{(47 \Gamma 22) \cdot 10^3} 3$$

$$V_H^\Gamma \times 3,19 \Gamma 2,04$$

$$V_H^\Gamma \times 5,23 \text{ V}$$

**Tensione di soglia inferiore**

$$V_L^\Gamma \times \frac{R_2}{R_1 \Gamma R_2} fZ V_{sat} \Gamma \frac{R_1}{R_1 \Gamma R_2} V_r$$

$$V_L^\Gamma \times \frac{22 \cdot 10^3}{(47 \Gamma 22) \cdot 10^3} (Z10) \Gamma \frac{47 \cdot 10^3}{(47 \Gamma 22) \cdot 10^3} 3$$

$$V_L^\Gamma \times Z3,19 \Gamma 2,04$$

$$V_L^\Gamma \times Z1,15 \text{ V}$$

**Ampiezza dell'Isteresi V<sub>H</sub>**

$$V_H \times V_H^\Gamma \Gamma V_L^\Gamma \quad V_H \times 5,23 \Gamma (Z1,15)$$

$$V_H \times 6,38 \text{ V}$$

**Centro dell'Isteresi V<sub>CH</sub>**

$$V_{CH} \times \frac{V_H^\Gamma \Gamma V_L^\Gamma}{2} \quad V_{CH} \times \frac{5,23 \Gamma Z1,15}{2}$$

$$V_{CH} \times 2,04 \text{ V}$$

In Fig. 2 è riportata la transcaratteristica

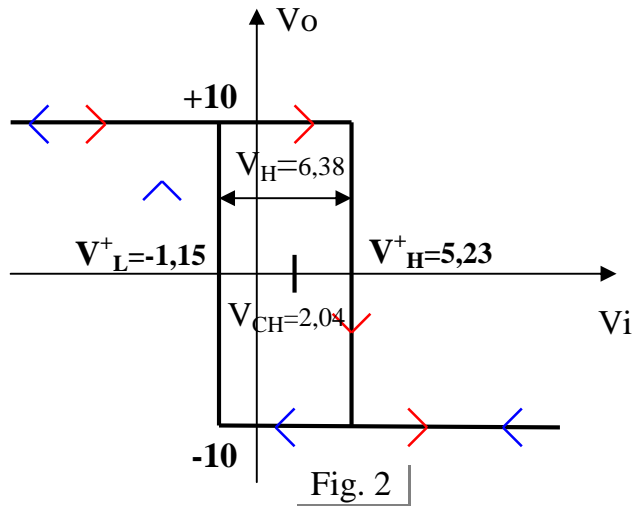


Fig. 2

In Fig. 3 è riportato l'andamento del segnale d'uscita correlato con il segnale d'ingresso.

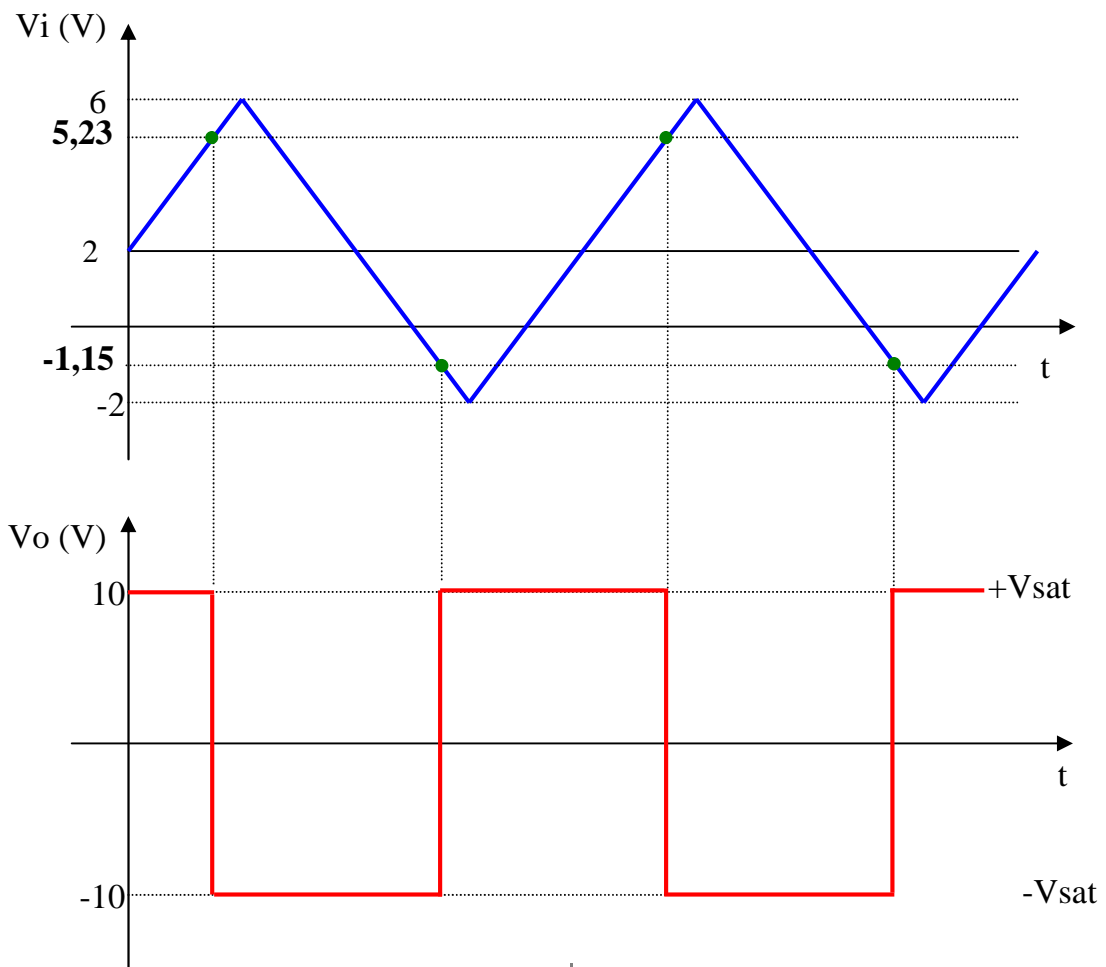


Fig. 3

**Esercizio 13 - Comparatore con isteresi o Trigger di Schmitt (non invertente)**

Descrivere il comparatore con isteresi non invertente

**Soluzione**

Il comparatore con isteresi non invertente si ottiene invertendo tra loro le tensioni d'ingresso e di riferimento. In fig. 1 è riportato lo schema elettrico e la transcaratteristica.

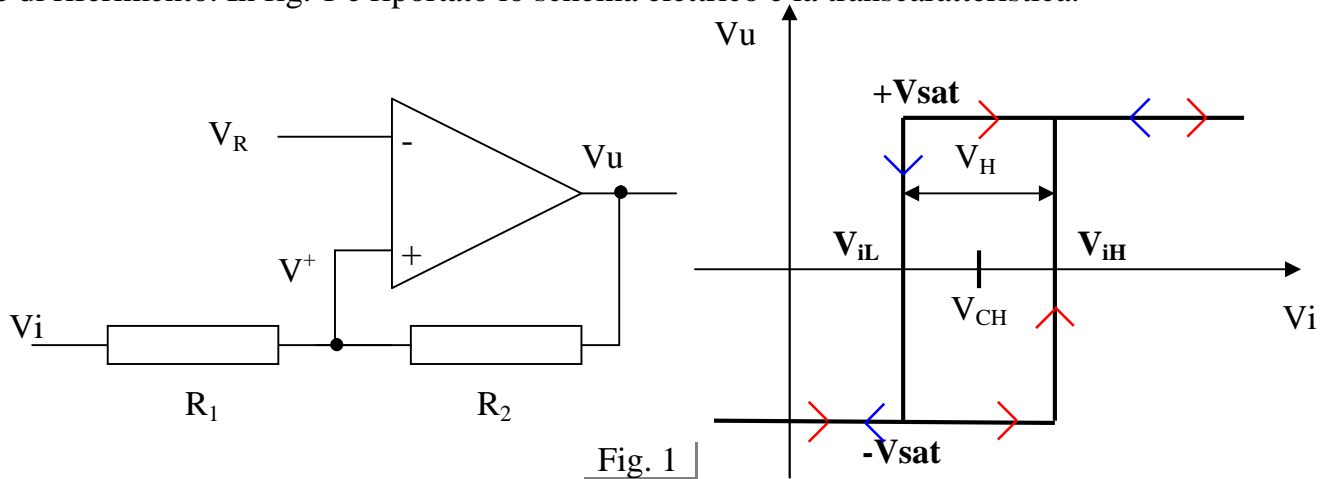


Fig. 1

La commutazione dell'uscita si ha ogni qualvolta la tensione  $V^+$  uguaglia la tensione  $V_R = V^-$ . Alla tensione  $V^+$  contribuiscono due cause,  $V_u$  e  $V_i$ ; applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha:

$$V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_u$$

Supponendo la tensione d'uscita a livello alto,  $V_u = +V_{sat}$ , la tensione  $V^+$  deve essere necessariamente maggiore della tensione  $V_R = V^-$ .

$$\text{Se } V_u = +V_{sat} \quad V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{sat}) > V_R$$

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

$$V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{iL} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{sat}) = V_R \quad V_{iL} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_R - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

Supponendo la tensione d'uscita a livello basso,  $V_u = -V_{sat}$ , la tensione  $V^+$  deve essere necessariamente minore della tensione  $V_R = V^-$ .

$$\text{Se } V_u = -V_{sat} \quad V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{sat}) < V_R$$

La commutazione dell'uscita da  $-V_{sat}$  a  $+V_{sat}$  si avrà quando, aumentando la tensione d'ingresso  $V_i$  la tensione  $V^+$  uguaglia e tende a superare la tensione  $V_R$ , per un valore della tensione d'ingresso  $V_{iH}$ , che è anche il valore della tensione di **soglia superiore**.

Si impone, quindi, che:

$$V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{iH} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{sat}) = V_R \quad V_{iH} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_R + \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

**Riepilogo formule Comparatore con isteresi o Trigger di Schmitt (non invertente)**

) Tensione di soglia inferiore  $V_{iL} = \frac{R_1 \Gamma R_2}{R_2} V_R - Z \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

) Tensione di soglia superiore  $V_{iH} = \frac{R_1 \Gamma R_2}{R_2} V_R + \Gamma \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

) Centro dell'isteresi  $V_{CH} = \frac{V_{iL} + V_{iH}}{2} = \frac{R_1 \Gamma R_2}{R_2} V_R$

) Ampiezza dell'isteresi  $V_H = V_{iH} - V_{iL} = 2 \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

In Fig. 2 è riportata la transcaratteristica

