

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

A.S. : 2021-2022

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

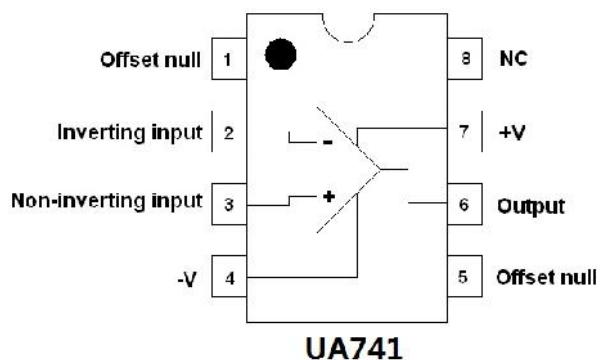
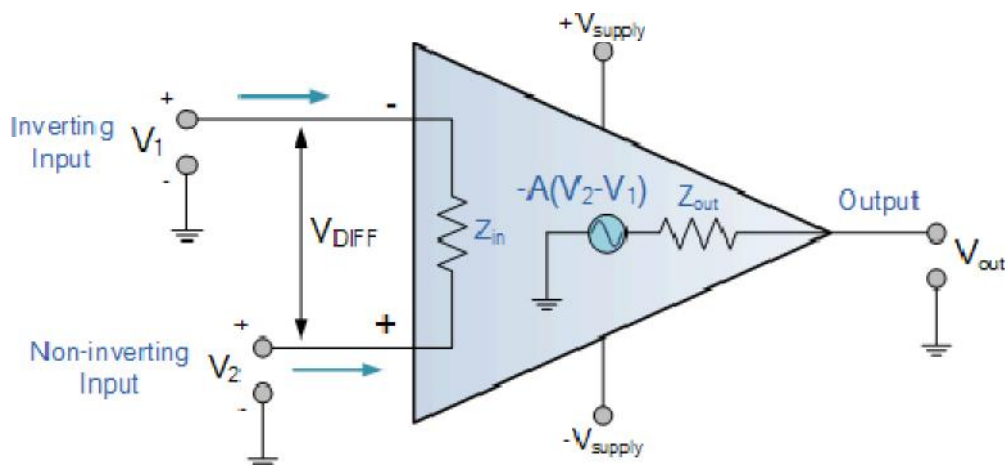
Disciplina: Tecnologie elettriche-elettroniche, dell'automazione e applicazioni

Amplificatori Operazionali

Esercizi

Circuiti Non Lineari

Configurazioni - Schemi - Formule - Esempi



Vers 3.5

Circuiti non lineari - Versione Base

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)

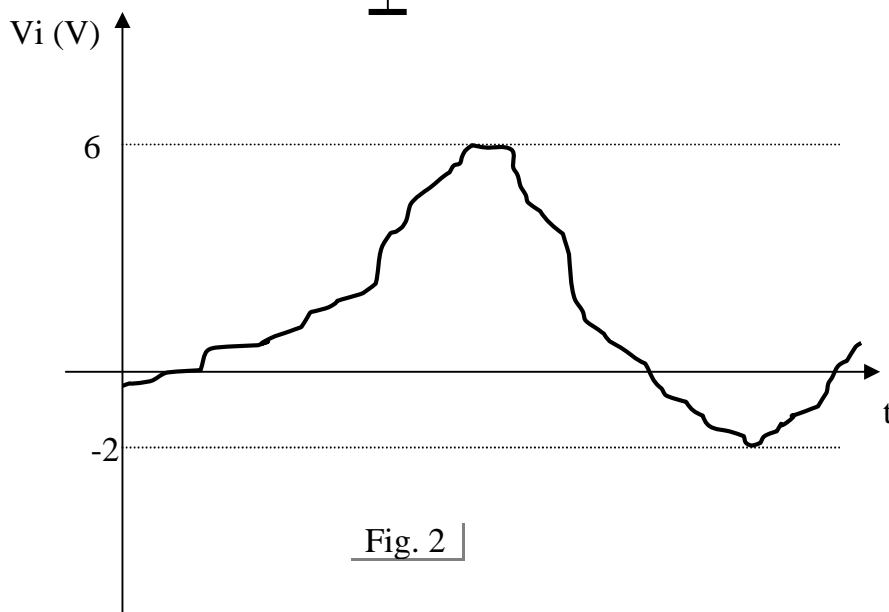
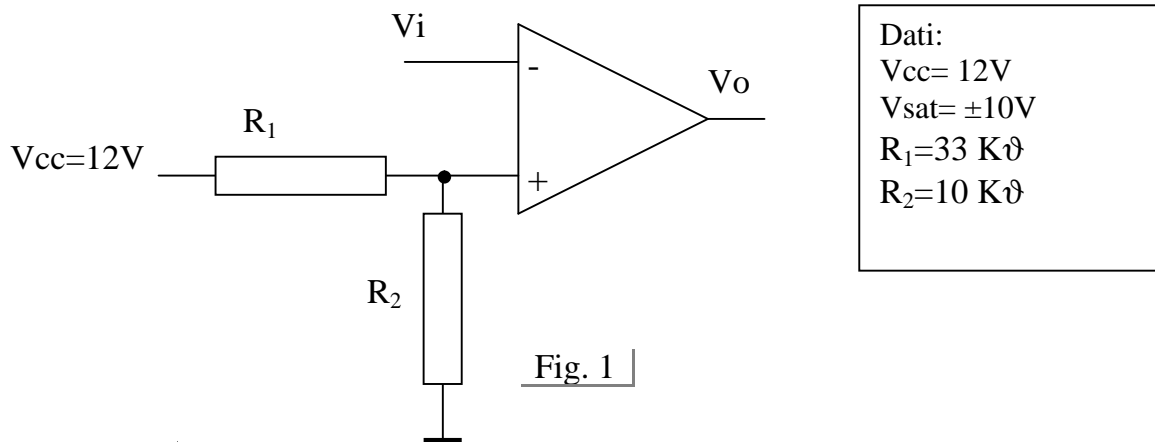
 **Esercizio 1 - Comparatore semplice**

 **Esercizio 2 - Comparatore a finestra**

 **Esercizio 3 - Limitatore semplice**

Esercizio 1A - 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

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

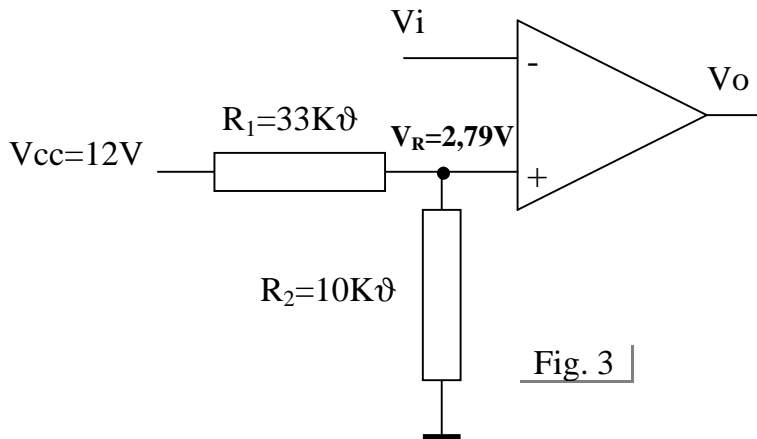


Fig. 3

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.

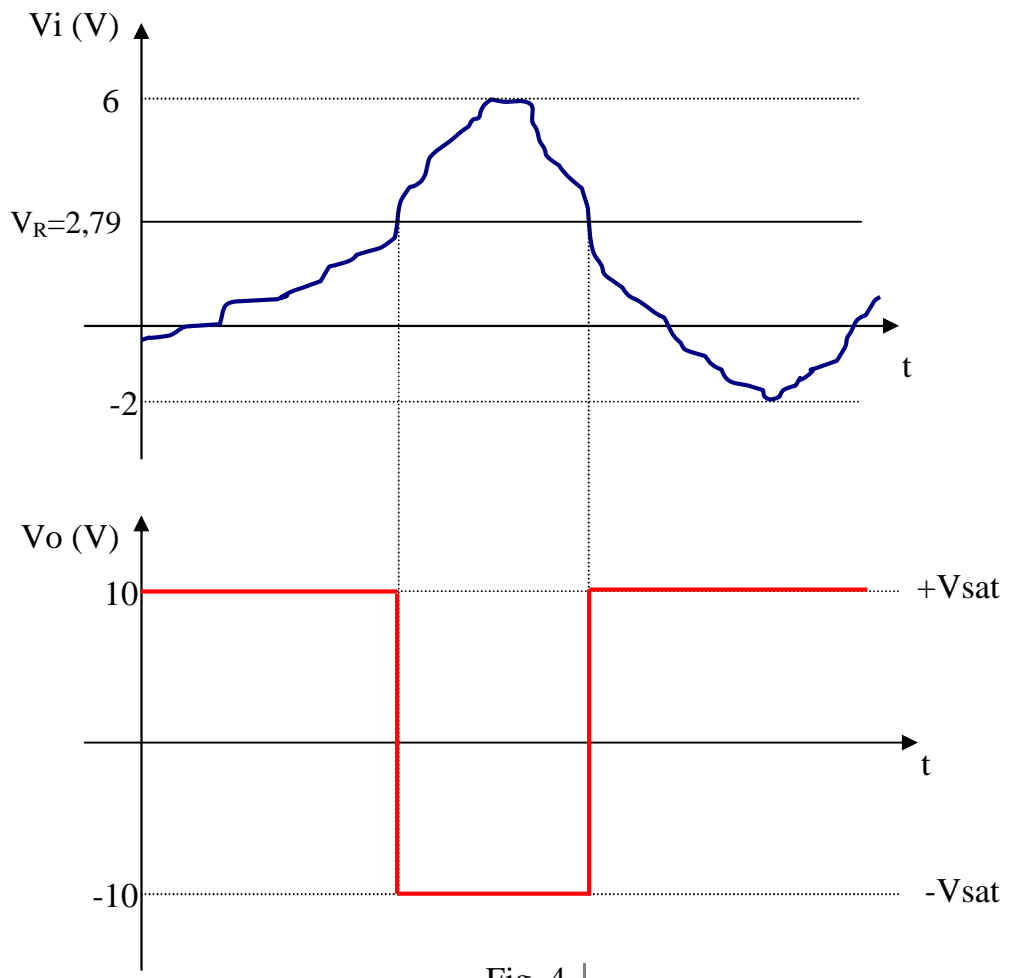


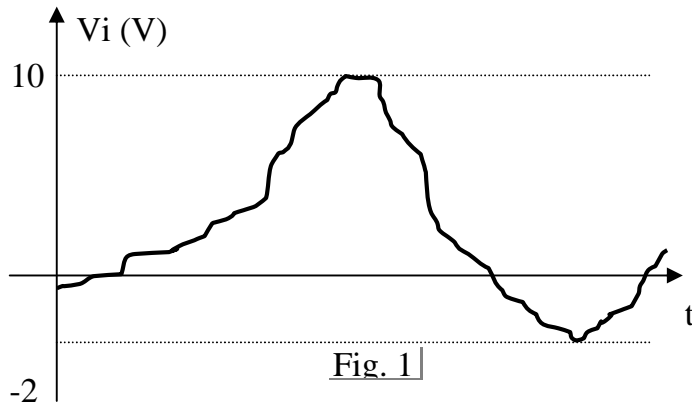
Fig. 4

Esercizio 1B - Comparatore semplice

Assegnato il segnale di fig.1 dimensionare un comparatore semplice non invertente con tensione di riferimento $V_R=5V$.

Disegnare il circuito, dimensionare il partitore, disegnare il grafico del segnale di uscita.

Dati: $V_{CC}=12V$ $V_{sat}=\pm 10V$



Esercizio 2A - 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.

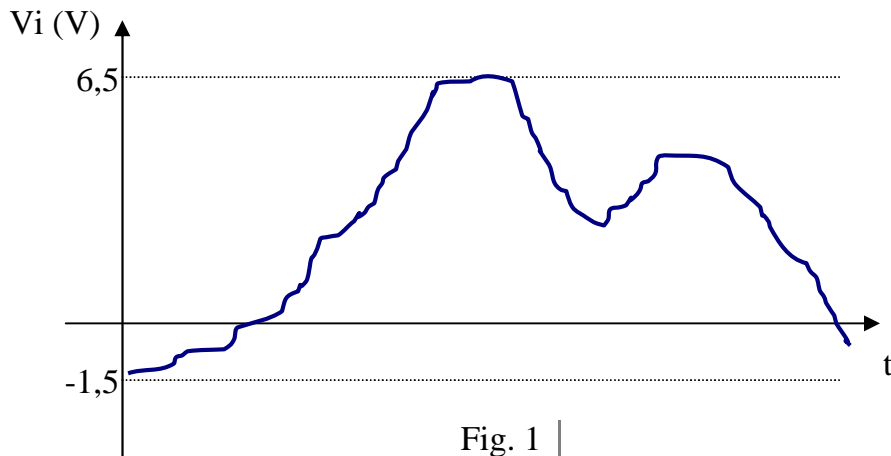


Fig. 1

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

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.

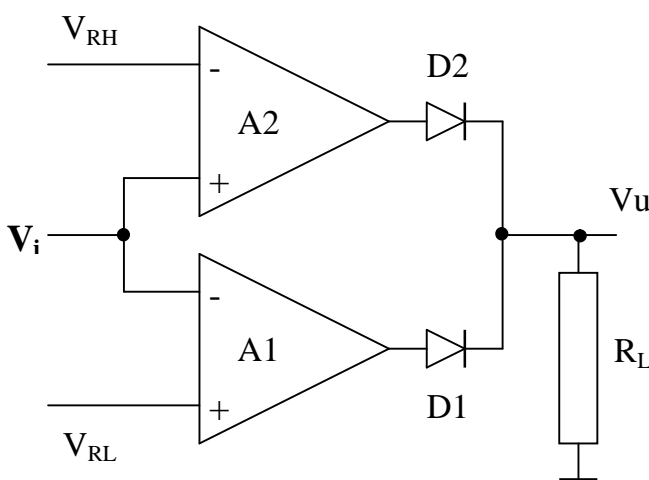


Fig. 2

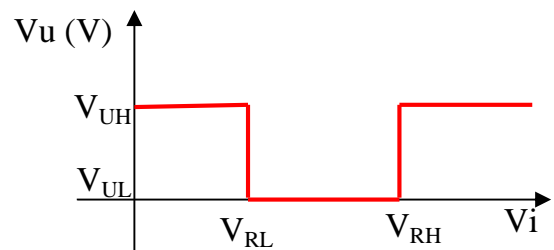


Fig. 3

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.

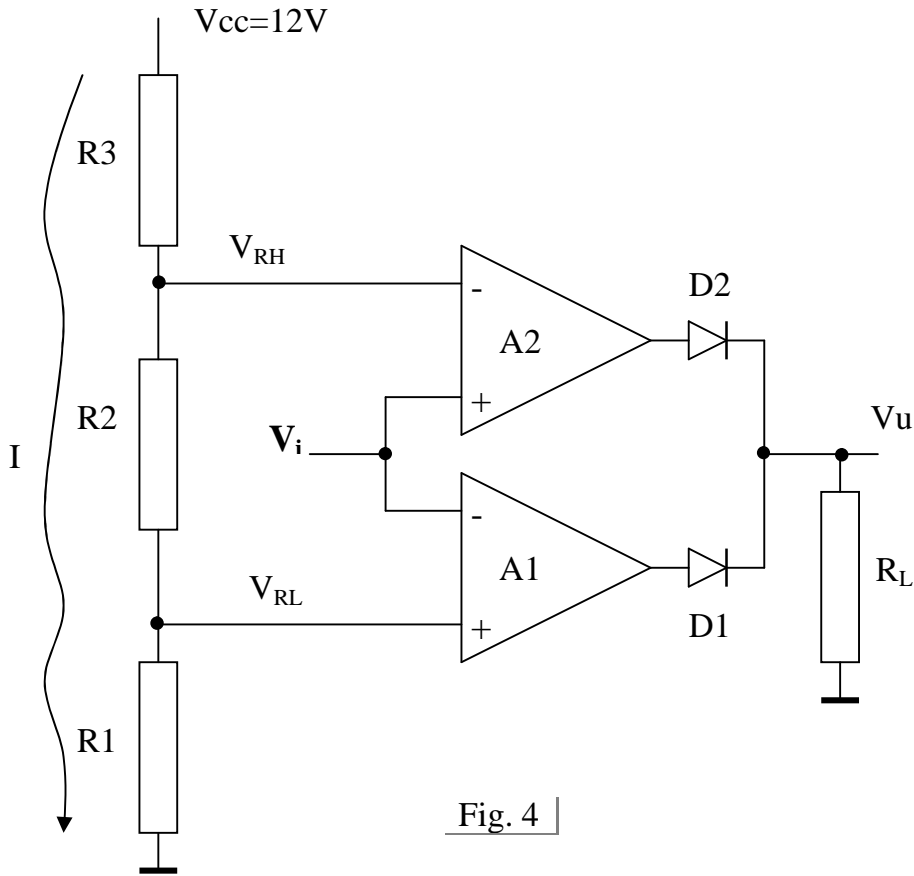


Fig. 4

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

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

$$2 \times R1 \ \frac{12}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3} \qquad 4 \times (R1 \ \Gamma \ R2) \ \frac{12}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$\frac{2}{12} \times \frac{R1}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3} \qquad \frac{4}{12} \times \frac{R1 \ \Gamma \ R2}{R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3}$$

$$R1 \ \times \ 2K\varnothing \qquad R1 \ \Gamma \ R2 \ \times \ 4K\varnothing \qquad R2 \ \times \ 2K\varnothing$$

$$R1 \ \Gamma \ R2 \ \Gamma \ R3 \ \times \ 12K\varnothing \qquad R3 \ \times \ 8K\varnothing$$

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.

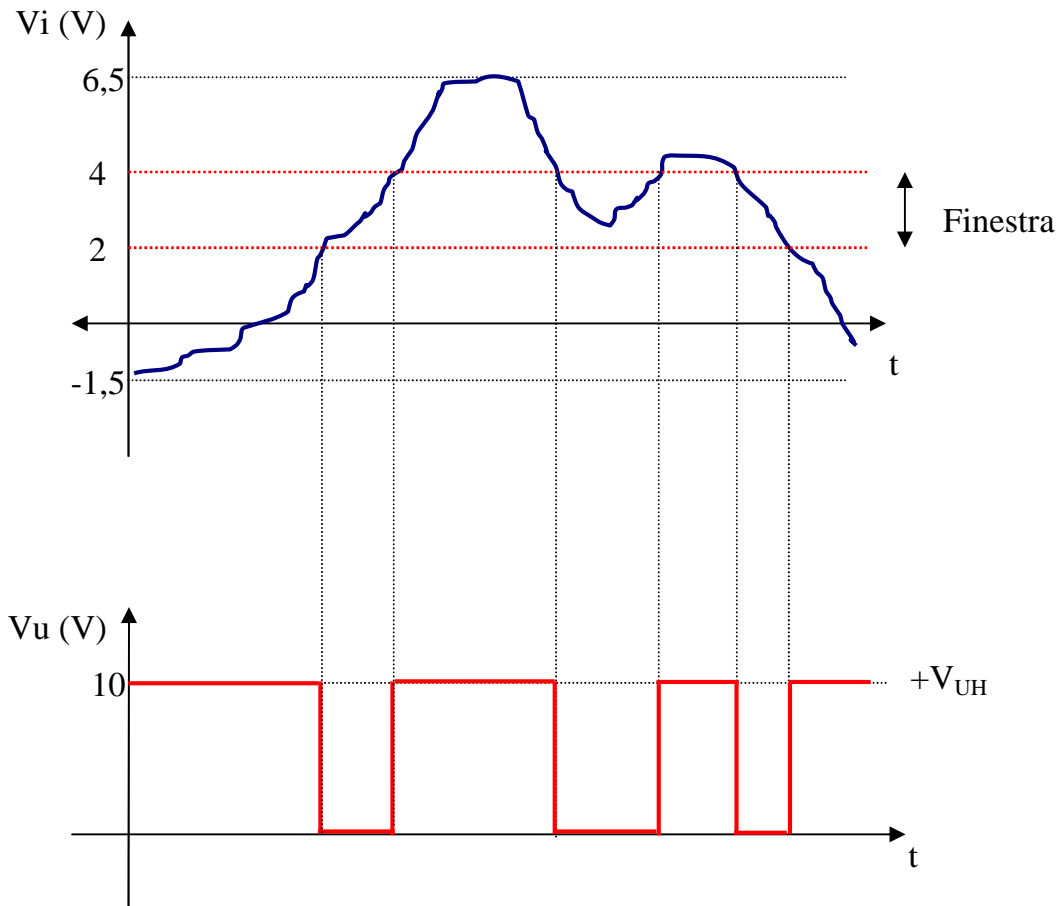
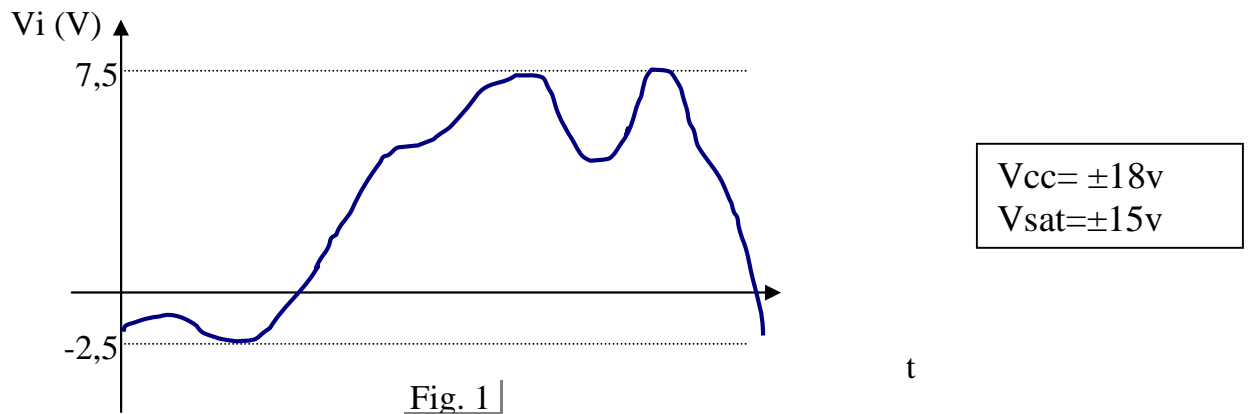


Fig. 5

 **Esercizio 2B - Comparatore a finestra**

Dimensionare un comparatore a finestra con tensione di soglia inferiore pari a 1V e tensione di soglia superiore pari a 5V. Disegnare il diagramma temporale del segnale di uscita correlato con il segnale di ingresso riportato in fig. 1.



Esercizio 3A - 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.

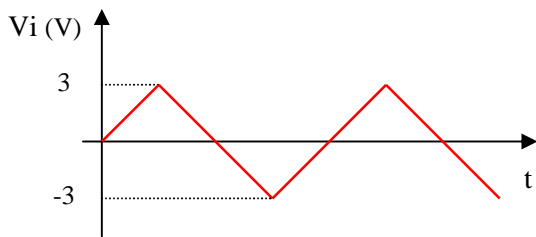


Fig.2

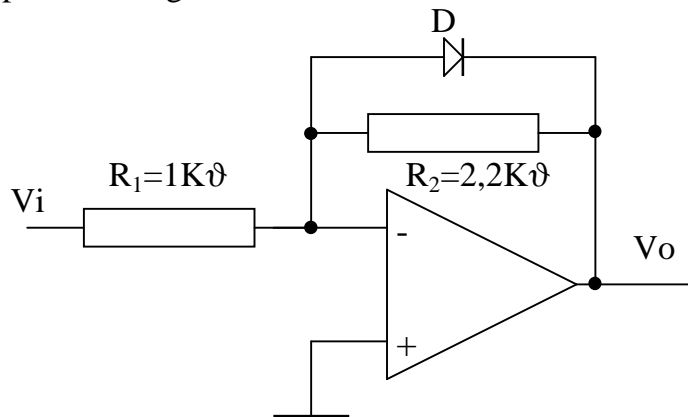


Fig. 1

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:

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

$$V_o = -Z 2,2 V_i$$

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

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

$$V_o = -Z 0,6 V$$

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

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

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.

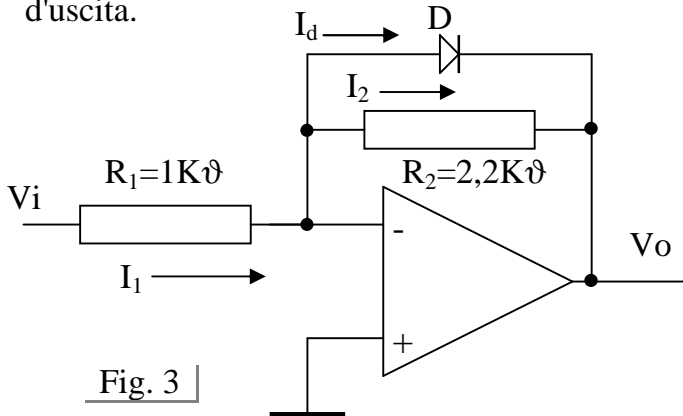


Fig. 3

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

$$I_1 \times I_d \Gamma I_2$$

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

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

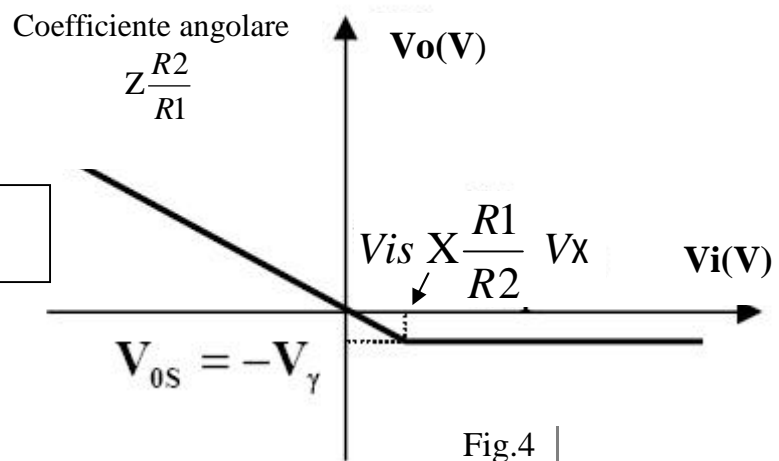


Fig.4

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

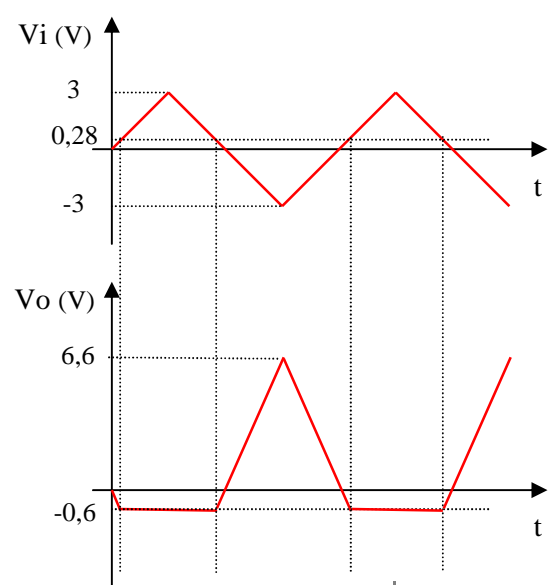


Fig.5

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

Esercizio 3B - 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.

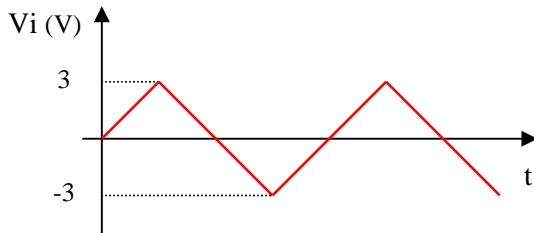


Fig.2

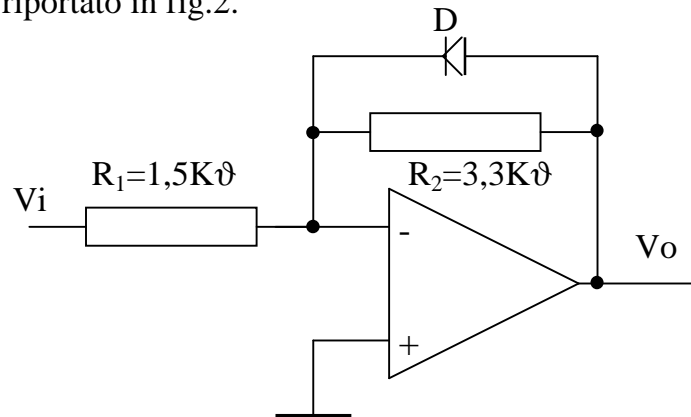


Fig. 1

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 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:

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

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

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

$$\boxed{V_o = 0,6V}$$

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

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

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

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.

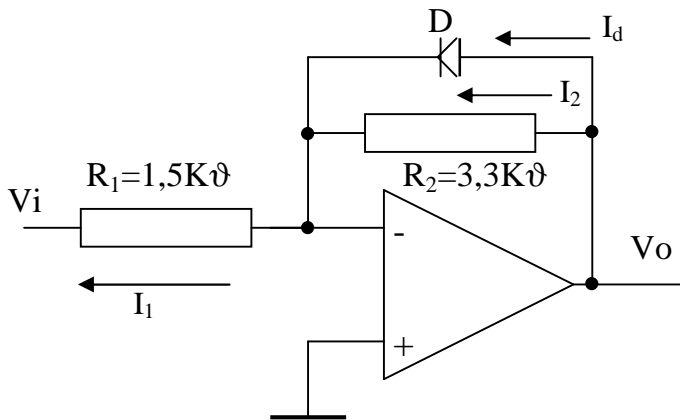


Fig. 3

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

$$I_1 \times I_d \Gamma I_2$$

$$I_d \times I_1 \times I_2$$

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

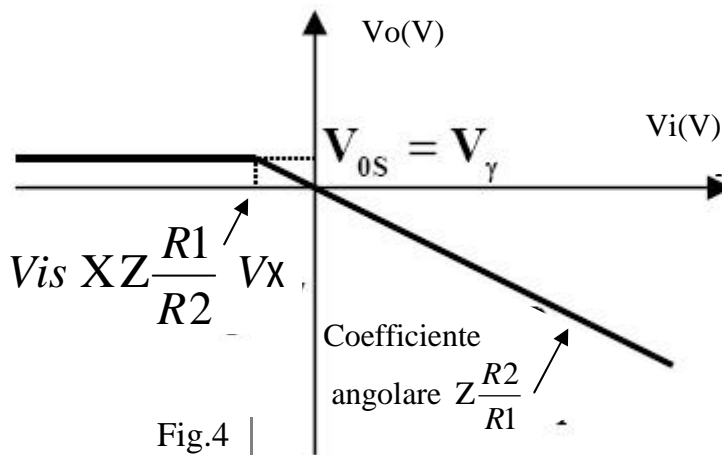


Fig.4

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

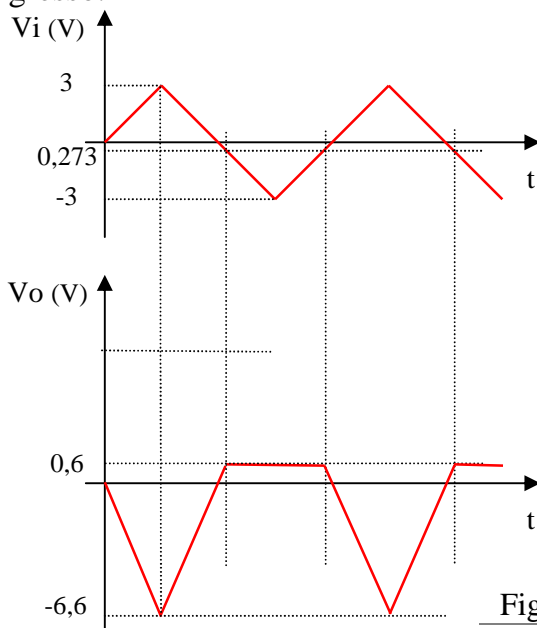


Fig.5

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