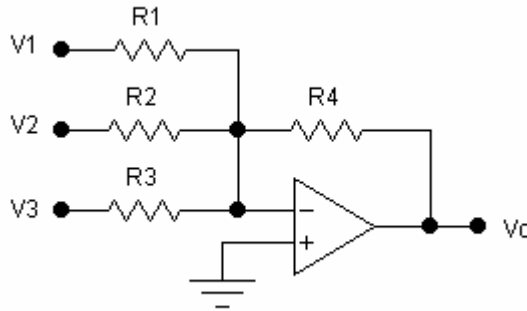


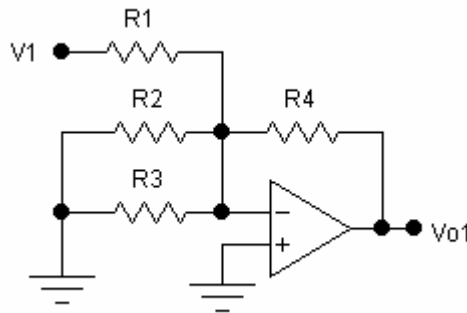
SOMMATORI

SOMMATORE INVERTENTE

Il circuito di figura, detto sommatore invertente, fornisce in uscita una combinazione lineare dei segnali d'ingresso, del tipo $V_o = A_1 V_1 + A_2 V_2 + A_3 V_3$.

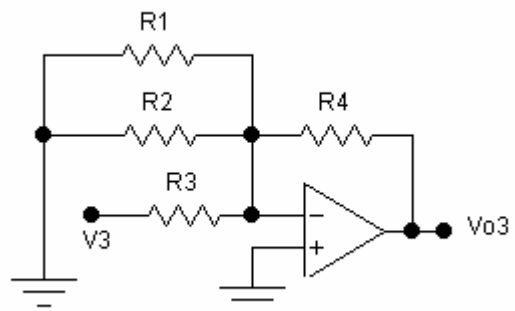
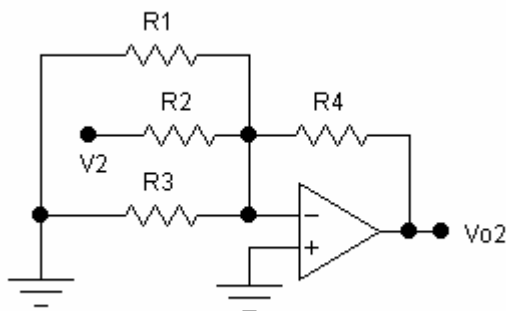


Essendo un circuito lineare in cui agiscono più cause, la funzione d'uscita si ottiene applicando il principio di sovrapposizione degli effetti. Si fa agire V_1 , mettendo a massa V_2 e V_3 , e si ottiene il contributo dell'uscita V_{o1} .



Le resistenze R_2 e R_3 sono collegate da un lato alla massa del circuito, dall'altro alla massa virtuale, pertanto, essendo nulle per esse la tensione e la corrente, risultano elettricamente scollegate. Il circuito si comporta da un amplificatore invertente con tensione d'uscita $V_{o1} = -\frac{R_4}{R_1} \cdot V_1$, contributo

di V_1 all'uscita. analogamente per gli altri due ingressi: $V_{o2} = -\frac{R_4}{R_2} \cdot V_2$ e $V_{o3} = -\frac{R_4}{R_3} \cdot V_3$.

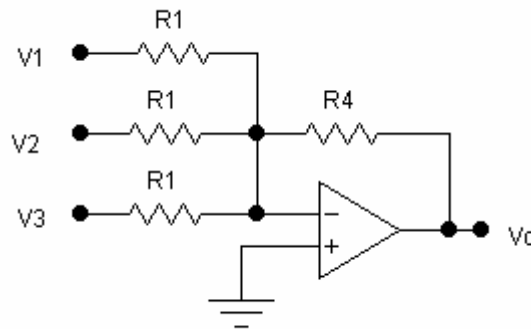


In totale si ha: $V_o = -\frac{R_4}{R_1} \cdot V_1 - \frac{R_4}{R_2} \cdot V_2 - \frac{R_4}{R_3} \cdot V_3$, che è una combinazione lineare degli ingressi.

Se si vuole ottenere in uscita un segnale proporzionale, a meno del segno, alla somma dei segnali d'ingresso, ossia una funzione del tipo $V_o = -A(V_1 + V_2 + V_3)$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, l'uguaglianza dei coefficienti:

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 \Rightarrow V_o = -\frac{R_4}{R_1}(V_1 + V_2 + V_3)$$

Per ottenere la funzione richiesta bisogna imporre l'uguaglianza delle resistenze d'ingresso. Il circuito diventa il seguente.



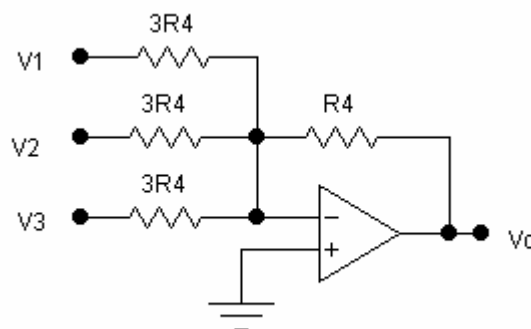
Se si vuole ottenere in uscita un segnale uguale, a meno del segno, alla somma dei segnali d'ingresso, ossia una funzione del tipo $V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, l'uguaglianza ad uno dei coefficienti:

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = 1 \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \Rightarrow V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

Per ottenere la funzione richiesta bisogna imporre l'uguaglianza di tutte le resistenze.

Se si vuole ottenere in uscita la media invertita dei segnali d'ingresso, ovvero $V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, che tutti i coefficienti siano uguali ad un terzo.

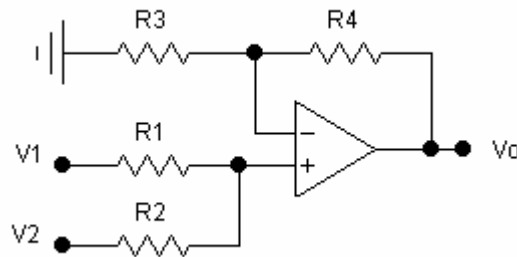
$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{3} \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = 3R_4 \Rightarrow V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$



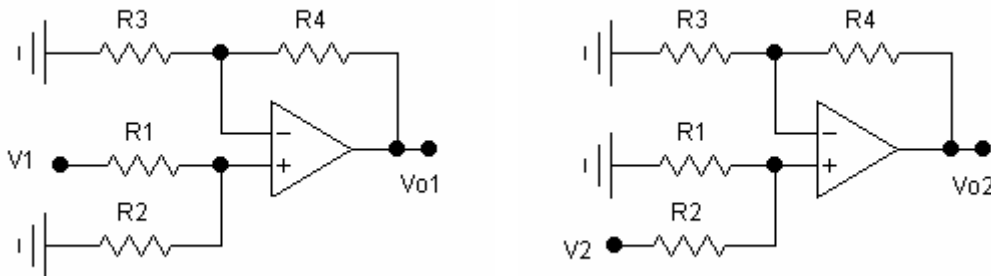
SOMMATTORE NON INVERTENTE

Sommatore con due ingressi

Il circuito di figura, detto sommatore non invertente, fornisce in uscita una combinazione lineare dei segnali d'ingresso, del tipo $V_o = A_1 V_1 + A_2 V_2$.



Essendo un circuito lineare in cui agiscono più cause, la funzione d'uscita si ottiene applicando il principio di sovrapposizione degli effetti. Si fa agire V_1 , mettendo a massa V_2 , e si ottiene il contributo dell'uscita V_{o1} .



Poiché gli ingressi non assorbono corrente, le resistenze R_1 e R_2 risultano collegate in serie. Il circuito si comporta da un amplificatore non invertente con tensione d'uscita

$V_{o1} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1$, contributo di V_1 all'uscita. analogamente per l'altro ingresso:

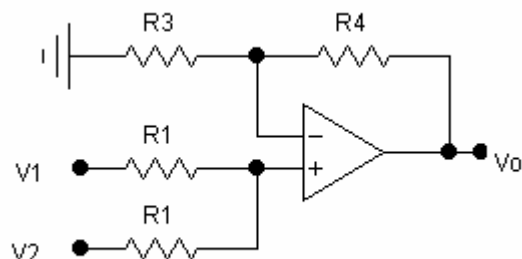
$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_2.$$

In totale si ha: $V_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_2\right)$, che è una combinazione lineare degli ingressi.

Se si vuole ottenere in uscita un segnale proporzionale alla somma dei segnali d'ingresso, ossia una funzione del tipo $V_o = A(V_1 + V_2)$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, l'uguaglianza dei coefficienti di V_1 e V_2 :

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_1 = R_2 \Rightarrow V_o = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot (V_1 + V_2)$$

Per ottenere la funzione richiesta bisogna imporre l'uguaglianza delle resistenze d'ingresso. Il circuito diventa il seguente.



Se si vuole ottenere in uscita un segnale uguale alla somma dei segnali d'ingresso, ossia una funzione del tipo $V_o = V_1 + V_2$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, l'uguaglianza ad uno dei coefficienti:

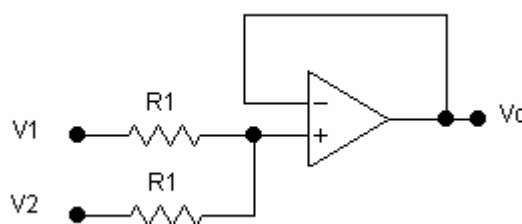
$$\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_4}{R_3} = 2 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 1 \Rightarrow R_4 = R_3 \Rightarrow V_o = V_1 + V_2$$

Per ottenere la funzione richiesta bisogna imporre l'uguaglianza di tutte le resistenze.

Se si vuole ottenere in uscita la media dei segnali d'ingresso, ovvero $V_o = \frac{V_1 + V_2}{2}$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, che tutti il coefficiente della somma sia uguale ad un mezzo:

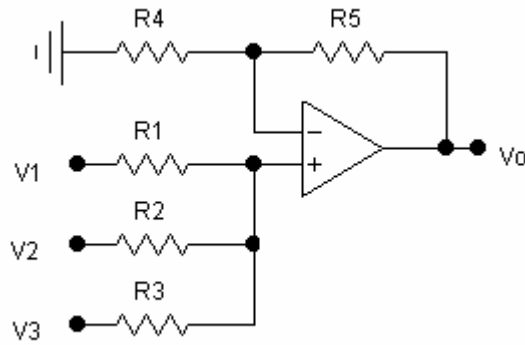
$$\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = \frac{1}{2} \Rightarrow 1 + \frac{R_4}{R_3} = 1 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 0 \Rightarrow \begin{cases} R_4 = 0 \\ R_3 = \infty \end{cases} \Rightarrow V_o = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Il circuito assume la configurazione di inseguitore, come mostrato in figura.



Sommatore con tre o più ingressi

Nel caso gli ingressi siano più di due, ad esempio tre, al fine di semplificare la progettazione bisogna imporre che gli ingressi vedano verso massa la stessa resistenza. Tale condizione semplifica notevolmente la progettazione del circuito, ma la precisione della risposta dipende fortemente dalla realizzazione di valori di resistenza più prossimi possibile a quelli di progetto.



Gli ingressi vedono la stessa resistenza verso massa quando $\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$.

Poiché la corrente entrante nei terminali d'ingresso può essere considerata nulla, la funzione s'uscita si ottiene dall'equipotenzialità degli ingressi e applicando il teorema di Millman all'ingresso invertente e a quello non invertente, si ha:

$$V_- = \frac{\frac{V_o}{R_5}}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = V_+$$

Utilizzando la condizione imposta che le resistenze viste dagli ingressi verso massa sono uguali, si semplificano i due denominatori e si ha:

$$\frac{V_o}{R_5} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \Rightarrow V_o = \frac{R_5}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_5}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R_5}{R_3} \cdot V_3$$

La funzione d'uscita risulta analoga a quella del sommatore invertente, e richiede semplici criteri di progettazione.

Se si vuole ottenere in uscita un segnale proporzionale alla somma dei segnali d'ingresso, ossia una funzione del tipo $V_o = A(V_1 + V_2 + V_3)$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, l'uguaglianza dei coefficienti:

$$\frac{R_5}{R_1} = \frac{R_5}{R_2} = \frac{R_5}{R_3} \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 \Rightarrow V_o = \frac{R_5}{R_1}(V_1 + V_2 + V_3)$$

Per ottenere la funzione richiesta bisogna imporre l'uguaglianza delle resistenze d'ingresso.

Se si vuole ottenere in uscita un segnale uguale alla somma dei segnali d'ingresso, ossia una funzione del tipo $V_o = V_1 + V_2 + V_3$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, l'uguaglianza ad uno dei coefficienti:

$$\frac{R_5}{R_1} = \frac{R_5}{R_2} = \frac{R_5}{R_3} = 1 \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R_5 \Rightarrow V_o = V_1 + V_2 + V_3$$

Per ottenere la funzione richiesta bisogna imporre l'uguaglianza di tutte le resistenze.

Se si vuole ottenere in uscita la media dei segnali d'ingresso, ovvero $V_o = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$, bisogna imporre, nella funzione d'uscita del sommatore, che tutti i coefficienti siano uguali ad un terzo.

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{3} \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = 3R_4 \Rightarrow V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

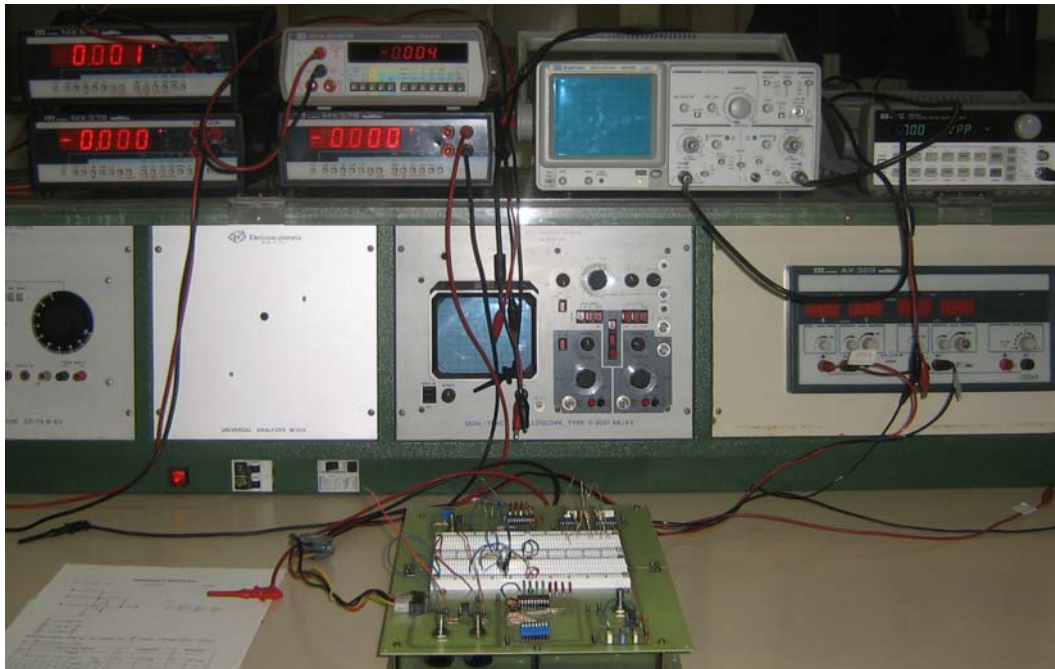
PROGETTO E VERIFICA DI CIRCUITI SOMMATORI

I circuiti verranno verificati sia in continua sia in alternata.

Si utilizzerà l'amplificatore operazionale TL081 alimentato con tensione duale $V_{CC} = \pm 12V$.

Come strumenti di misura si utilizzeranno quattro multimetri digitali 4½ digit, un generatore di funzioni e un oscilloscopio a doppia traccia.

I circuiti saranno montati su una piastra sperimentale (figura) che dispone delle alimentazioni, di due generatori di tensione continua di precisione variabili da $-10V$ a $+10V$, un generatore di tensione di riferimento di precisione regolabile da 0 a 9V. Tali generatori variabili consentono di regolare la tensione con una precisione del millesimo di volt.

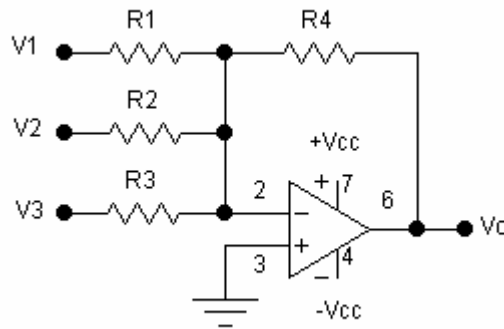


SOMMATORE INVERTENTE

Si progettano e si verificano i circuiti che danno le seguenti funzioni d'uscita:

- $V_o = -V_1 - 2V_2 - 3V_3$ combinazione lineare delle tensioni d'ingresso
- $V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$ somma invertita delle tensioni d'ingresso
- $V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$ media delle tensioni d'ingresso

Il circuito che realizza tali funzioni d'uscita è il sommatore invertente di figura.



La funzione d'uscita del sommatore è:
$$V_o = -\frac{R_4}{R_1} \cdot V_1 - \frac{R_4}{R_2} \cdot V_2 - \frac{R_4}{R_3} \cdot V_3$$

Combinazione lineare delle tensioni d'ingresso
$$V_o = -V_1 - 2V_2 - 3V_3$$

Bisogna imporre l'uguaglianza dei coefficienti della combinazione lineare richiesta con quelli della generica combinazione lineare d'uscita del sommatore:

$$-\frac{R_4}{R_1} = -1 \Rightarrow R_1 = R_4 \quad -\frac{R_4}{R_2} = -2 \Rightarrow R_2 = \frac{R_4}{2} \quad -\frac{R_4}{R_3} = -3 \Rightarrow R_3 = \frac{R_4}{3}$$

Posto $R_4 = 100\text{K}\Omega$, si ha:

$$R_1 = R_4 = 100\text{K}\Omega; \quad R_2 = \frac{R_4}{2} = 50\text{K}\Omega \rightarrow 47\text{K}\Omega; \quad R_3 = \frac{R_4}{3} = 33,33\text{K}\Omega \rightarrow 33\text{K}\Omega$$

Somma invertita delle tensioni d'ingresso
$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

Per ottenere tale funzione d'uscita è sufficiente porre nella funzione d'uscita del sommatore l'uguaglianza dei coefficienti della combinazione lineare:

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\text{K}\Omega$$

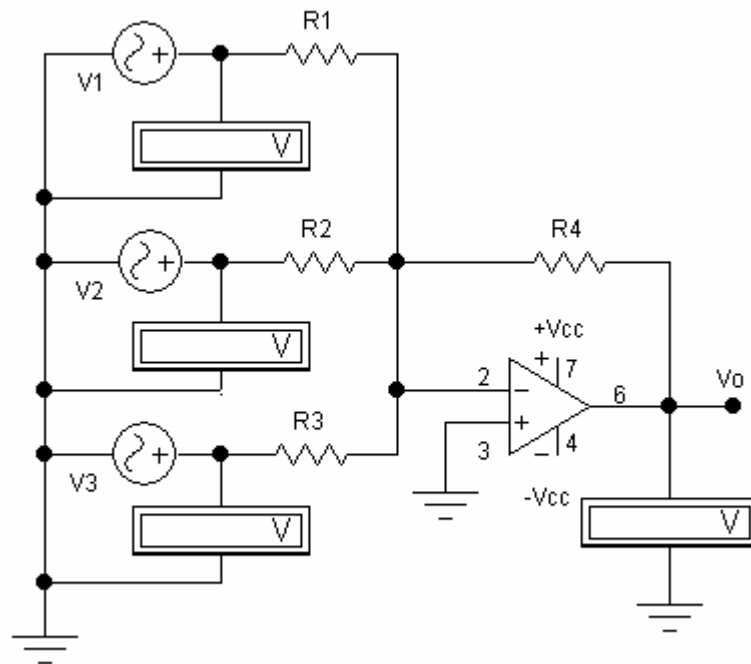
Media delle tensioni d'ingresso
$$V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

Per ottenere tale funzione d'uscita è sufficiente porre nella funzione d'uscita del sommatore che i coefficienti della combinazione lineare siano tutti uguali a un terzo:

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{3} \Rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = \frac{R_4}{3}$$

Posto $R_4 = 100\text{K}\Omega$, si ha:
$$R_1 = R_2 = R_3 = 33\text{K}\Omega$$

Il circuito di misura per la verifica in continua è il seguente:

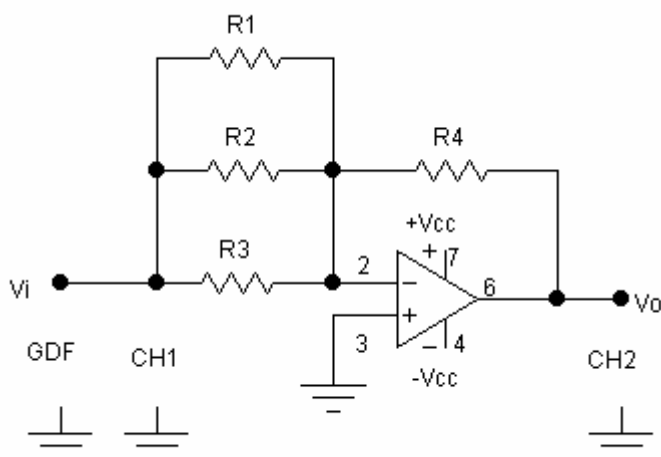


Per V_1 e V_2 si utilizzano i due generatori di tensione continua variabile, per V_3 si utilizza il generatore di tensione di riferimento. I valori misurati sono riportati nella tabella insieme ai valori calcolati per un immediato confronto.

N	Generatore combinazione lineare					Sommatore		Mediatore	
	Volt					Volt		Volt	
	V_1	V_2	V_3	V_o	V_o calc.	V_o	V_o calc.	V_o	V_o calc.
1	+1	+1	+1	-6,092	-6	-3	-3	-1	+1
2	-1	-1	+1	$-12 \cdot 10^{-3}$	0	+1,011	+1	+0,321	+0,33
3	-2	-2	+1	+3,019	+3	+3,024	+3	+0,979	+1
4	-3	-3	+2	+3,024	+3	+4,051	+4	+1,306	+1,33
5	-4	-2	+2	+1,990	+2	+4,063	+4	+1,308	+1,33
6	+1	-4	+2	+1,052	+1	+0,994	+1	0,324	+0,33
7	+2	-4	+2	$+53 \cdot 10^{-3}$	0	$+27 \cdot 10^{-3}$	0	$+20 \cdot 10^{-3}$	0
8	+2	-3	+1	+1,049	+1	$+35 \cdot 10^{-3}$	0	$+18 \cdot 10^{-3}$	0
9	-3	-5	+3	+4,065	+4	+5,058	+5	+1,633	+1,66
10	-5	-6	+3	+8,098	+8	+8,085	+8	+2,620	+2,66

I valori misurati sono in ottimo accordo con i valori teorici aspettati. In nessun caso si è misurato 0 volt in uscita per la presenza degli inevitabili offset. Altro motivo di leggere discordanze sono da attribuirsi alla tolleranza delle resistenze ed in particolare alla resistenza R_2 il cui valore è di $47\text{K}\Omega$ invece dei calcolati $50\text{K}\Omega$.

Il circuito di misura per la verifica in alternata è il seguente:



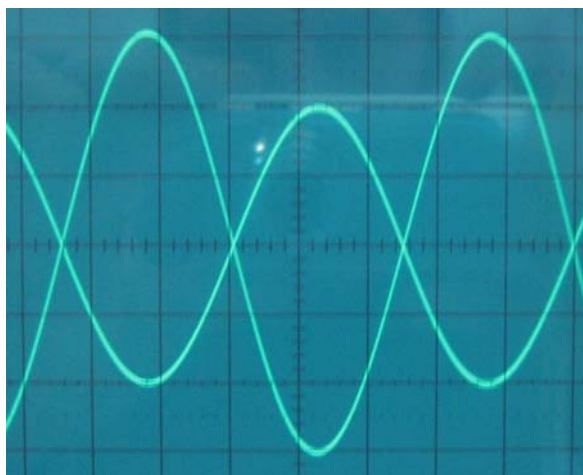
GDF sta ad indicare il generatore di funzioni; CH1 e CH2 i due canali dell'oscilloscopio.

Si utilizza lo stesso segnale per tutti gli ingressi: $V_1 = V_2 = V_3 = V_i(t) = [\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$, con $V_{iM} = 1V$ e $f = 1KHz$.

Combinazione lineare delle tensioni d'ingresso $V_o = -V_1 - 2V_2 - 3V_3$

In uscita si avrà: $V_{oM} = V_{iM} + 2V_{iM} + 3V_{iM} = 6V_{iM} = 6V$ e il segnale risulterà sfasato di 180° rispetto al segnale d'ingresso: $V_o(t) = [6\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t + 180^\circ)]V = [-6\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$

Si riporta la foto dell'oscillogramma dei segnali d'ingresso e d'uscita correlati.

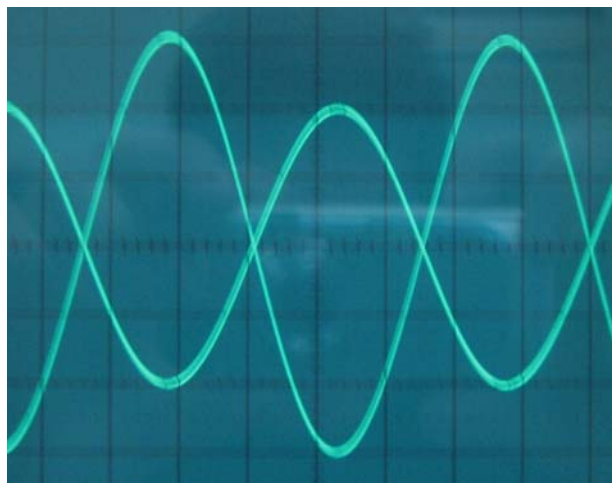


Il canale CH1 è posizionato a $0,5V/div$, il canale CH2 a $2V/div$. L'ampiezza d'ingresso è $1V$, quella d'uscita è $6V$; lo sfasamento è di 180° .

Somma invertita delle tensioni d'ingresso $V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$

In uscita si avrà: $V_{oM} = V_{iM} + V_{iM} + V_{iM} = 3V_{iM} = 3V$ e il segnale risulterà sfasato di 180° rispetto al segnale d'ingresso: $V_o(t) = [3\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t + 180^\circ)]V = [-3\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$

Si riporta la foto dell'oscillogramma dei segnali d'ingresso e d'uscita correlati.



Il canale CH1 è posizionato a 0,5V/div, il canale CH2 a 1V/div. L'ampiezza d'ingresso è 1V, quella d'uscita è 3V; lo sfasamento è di 180°.

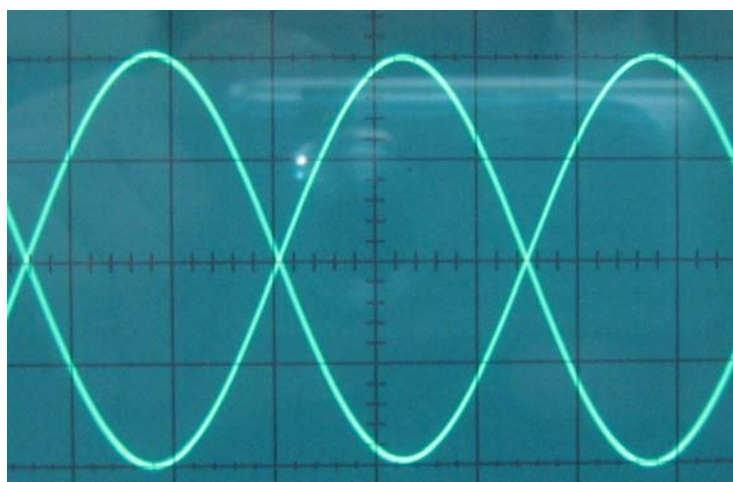
Media delle tensioni d'ingresso

$$V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

In uscita si avrà: $V_{oM} = \frac{V_{iM} + V_{iM} + V_{iM}}{3} = V_{iM} = 1V$ e il segnale risulterà sfasato di 180° rispetto al

segnale d'ingresso: $V_o(t) = [\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t + 180^\circ)]V = [-\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$

Si riporta la foto dell'oscillogramma dei segnali d'ingresso e d'uscita correlati.



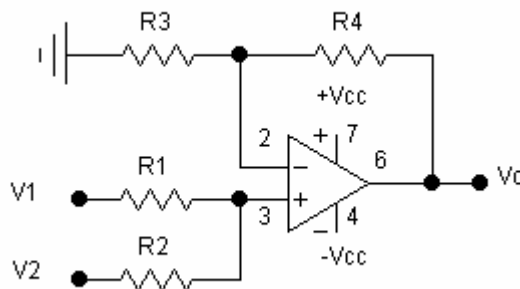
I canali CH1 e CH2 sono posizionati a 0,5V/div. L'ampiezza d'ingresso è 1V, quella d'uscita è 1V; lo sfasamento è di 180°.

SOMMATORE NON INVERTENTE A DUE INGRESSI

Si progettano e si verificano i circuiti che danno le seguenti funzioni d'uscita:

- $V_o = -V_1 - 2V_2 - 3V_3$ combinazione lineare delle tensioni d'ingresso
- $V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$ somma invertita delle tensioni d'ingresso
- $V_o = -\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$ media delle tensioni d'ingresso

Il circuito che realizza tali funzioni d'uscita è il sommatore invertente di figura.



La funzione d'uscita del sommatore è:
$$V_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_2 \right]$$

Combinazione lineare delle tensioni d'ingresso $V_o = 2V_1 + 3V_2$

Bisogna imporre l'uguaglianza dei coefficienti della combinazione lineare richiesta con quelli della generica combinazione lineare d'uscita del sommatore:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2 \\ \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 3 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{dividendo membro a membro si ha:}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{2}{3} \Rightarrow R_1 = \frac{3}{2} \cdot R_2 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_2 = 120\text{K}\Omega \\ R_1 = 180\text{K}\Omega \end{array} \right.$$

Sostituendo nel sistema, si ha:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{120 \cdot 10^3}{180 \cdot 10^3 + 120 \cdot 10^3} = 2 \Rightarrow \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{2}{5} = 2 \Rightarrow 1 + \frac{R_4}{R_3} = 5 \\ \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{180 \cdot 10^3}{180 \cdot 10^3 + 120 \cdot 10^3} = 3 \Rightarrow \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{3}{5} = 3 \Rightarrow 1 + \frac{R_4}{R_3} = 5 \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 4 \Rightarrow R_4 = 4R_3 \Rightarrow \begin{cases} R_3 = 82K\Omega \\ R_4 = 328K\Omega \rightarrow 330K\Omega \end{cases}$$

Riassumendo: $R_1 = 180K\Omega$; $R_2 = 120K\Omega$; $R_3 = 82K\Omega$; $R_4 = 330K\Omega$

Somma delle tensioni d'ingresso $V_o = V_1 + V_2$

Per ottenere tale funzione d'uscita è sufficiente porre nella funzione d'uscita del sommatore l'uguaglianza dei coefficienti della combinazione lineare:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1 \\ \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{dividendo membro a membro si ha:}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 \Rightarrow R_1 = R_2 = 120K\Omega \Rightarrow \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{1}{2} = 1 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 1 \Rightarrow R_3 = R_4 = 120K\Omega$$

Si prendono tutte le resistenze uguali di valore $120K\Omega$.

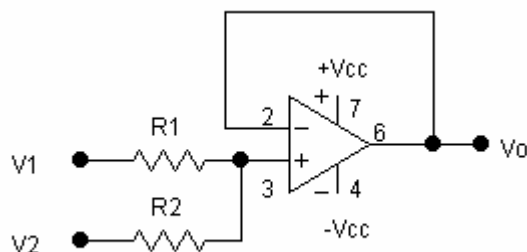
Media delle tensioni d'ingresso $V_o = \frac{V_1 + V_2}{2}$

Per ottenere tale funzione d'uscita è sufficiente porre nella funzione d'uscita del sommatore che i coefficienti della combinazione lineare siano tutti uguali a un mezzo:

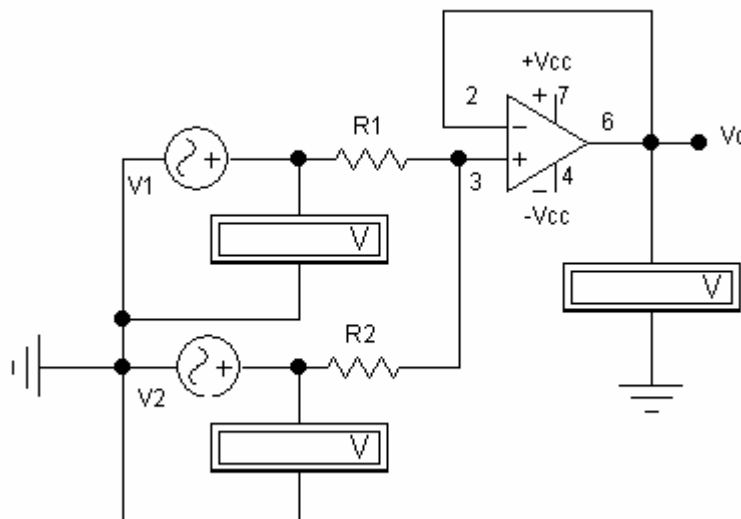
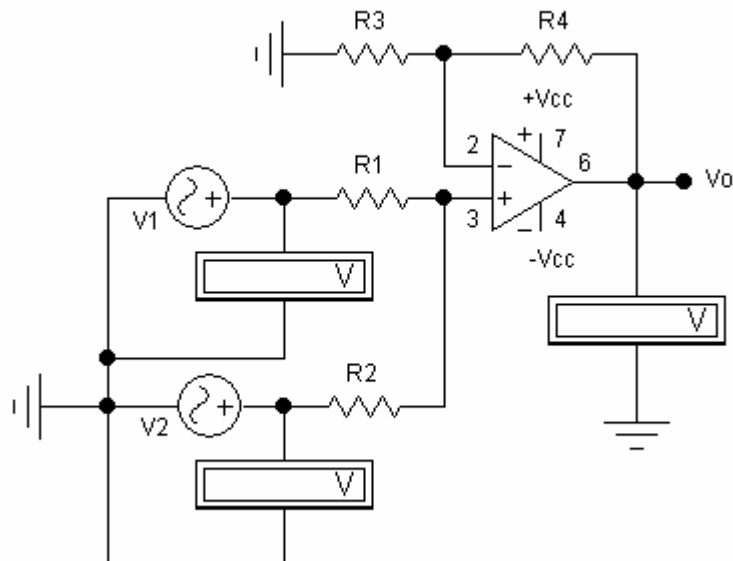
$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2} \\ \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{dividendo membro a membro si ha:}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 \Rightarrow R_1 = R_2 = 120K\Omega \Rightarrow \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 0 \Rightarrow \begin{cases} R_4 = 0 \\ R_3 = \infty \end{cases}$$

Il circuito è nella configurazione di inseguitore, come in figura.



I circuiti di misura per la verifica in continua sono i seguenti:

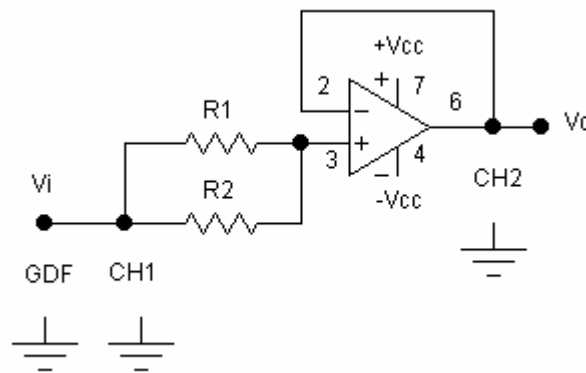
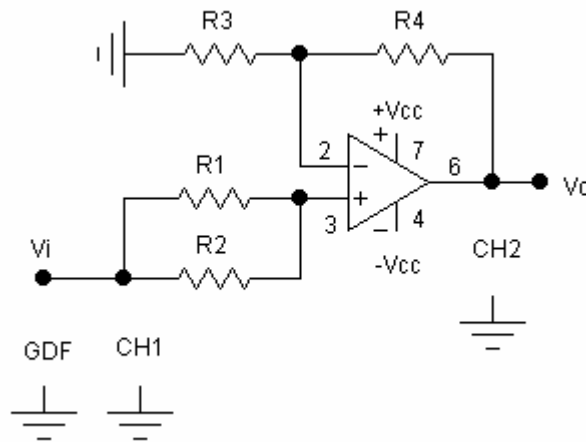


Per V_1 e V_2 si utilizzano i due generatori di tensione continua variabile. I valori misurati sono riportati nella tabella insieme ai valori calcolati per un immediato confronto.

N	Generatore combinazione lineare				Sommatore		Mediatore	
	Volt				Volt		Volt	
	V_1	V_2	V_o	V_o calc.	V_o	V_o calc.	V_o	V_o calc.
1	+1	+1	+5,040	+5	+2	+2	+0,997	+1
2	-1	+1	+0,968	+1	$+4 \cdot 10^{-3}$	0	$+2 \cdot 10^{-3}$	0
3	+1	-1	-1,010	-1	$+22 \cdot 10^{-3}$	0	$+15 \cdot 10^{-3}$	0
4	-2	+1	-1,058	-1	-1,002	-1	-0,501	-0,5
5	+2	-2	-1,977	-2	$+33 \cdot 10^{-3}$	0	$+19 \cdot 10^{-3}$	0
6	-3	+2	$+82 \cdot 10^{-3}$	0	-0,991	-1	-0,496	-0,5
7	+5	-2	+4,086	+4	+2,966	+3	+1,480	+1,5
8	-2	-1	-7,070	-7	-3,019	-3	-1,507	-1,5
9	+2	+1	+7,038	+7	+3,000	+3	+1,493	+1,5
10	+1	-0,5	+0,503	+0,5	+0,486	+0,5	+0,241	+0,250

I valori misurati sono in ottimo accordo con i valori teorici aspettati. In nessun caso si è misurato 0 volt in uscita per la presenza degli inevitabili offset. Altro motivo di leggere discordanze sono da attribuirsi alla tolleranza delle resistenze.

I circuiti di misura per la verifica in alternata sono i seguenti:

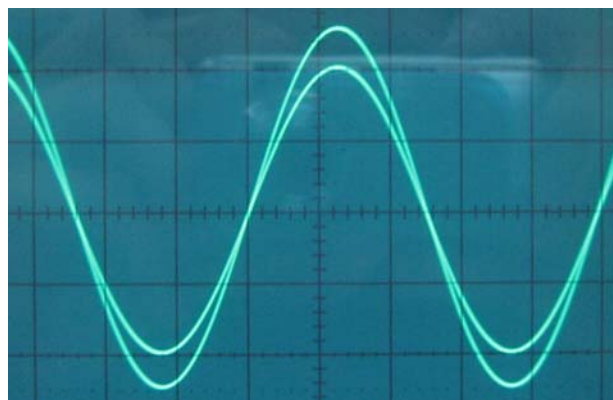


Si utilizza lo stesso segnale per tutti gli ingressi: $V_1 = V_2 = V_i(t) = [\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$, con $V_{iM} = 1V$ e $f = 1KHz$.

Combinazione lineare delle tensioni d'ingresso $V_o = 2V_1 + 3V_2$

In uscita si avrà: $V_{oM} = 2V_{iM} + 3V_{iM} = 5V_{iM} = 5V$ e il segnale risulterà in fase col segnale d'ingresso: $V_o(t) = [5\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$.

Si riporta la foto dell'oscillogramma dei segnali d'ingresso e d'uscita correlati.



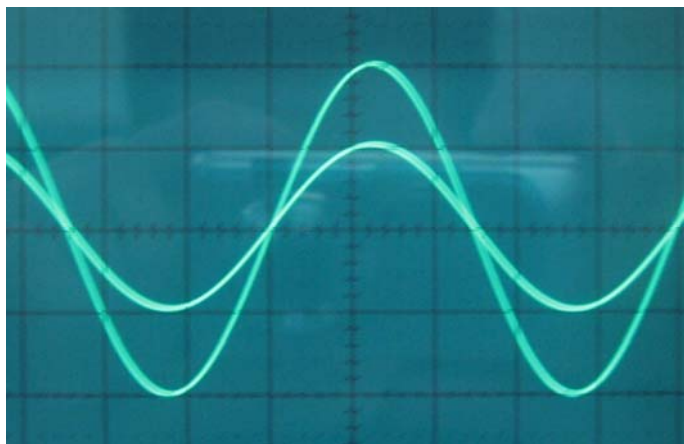
Il canale CH1 è posizionato a 0,5V/div, il canale CH2 a 2V/div. L'ampiezza d'ingresso è 1V, quella d'uscita è 5V; lo sfasamento è di 0°.

Somma delle tensioni d'ingresso $V_o = V_1 + V_2$

In uscita si avrà: $V_{oM} = V_{iM} + V_{iM} = 2V_{iM} = 3V$ e il segnale risulterà in fase col segnale d'ingresso:

$$V_o(t) = [2\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$$

Si riporta la foto dell'oscillogramma dei segnali d'ingresso e d'uscita correlati.



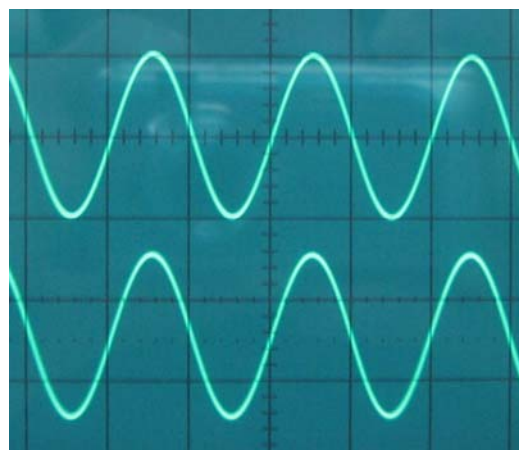
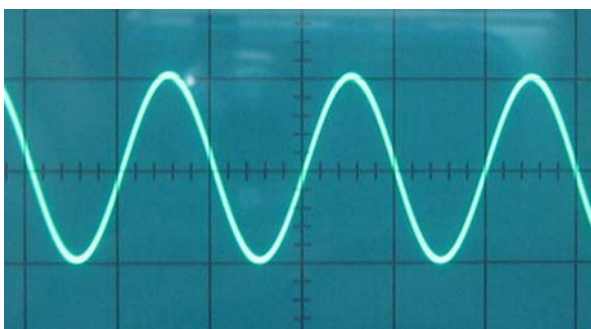
I canali CH1 e CH2 sono posizionati a 1V/div. L'ampiezza d'ingresso è 1V, quella d'uscita è 2V; lo sfasamento è di 0°.

Media delle tensioni d'ingresso $V_o = \frac{V_1 + V_2}{2}$

In uscita si avrà: $V_{oM} = \frac{V_{iM} + V_{iM}}{2} = V_{iM} = 1V$ e il segnale risulterà in fase col segnale d'ingresso:

$$V_o(t) = [\text{sen}(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)]V$$

Si riporta la foto dell'oscillogramma dei segnali d'ingresso e d'uscita correlati.



I canali CH1 e CH2 sono posizionati a 1V/div. L'ampiezza d'ingresso è 1V, quella d'uscita è 1V; lo sfasamento è di 0°.

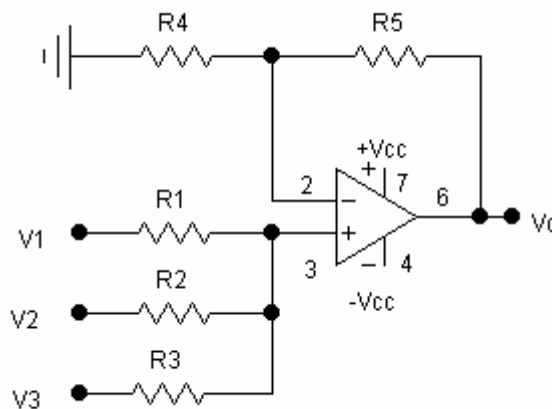
La prima foto riporta l'oscillogramma dei due segnali di ingresso e di uscita esattamente sovrapposti, la seconda foto mostra lo stesso oscillogramma con il segnale d'uscita spostato verso il basso.

SOMMATORE NON INVERTENTE A TRE O PIÙ INGRESSI

Si progettano e si verificano in continua i circuiti che danno le seguenti funzioni d'uscita:

- $V_o = V_1 + 2V_2 + 3V_3$ combinazione lineare delle tensioni d'ingresso
- $V_o = 3V_1 + 2V_2 + 4V_3$ combinazione lineare delle tensioni d'ingresso

Il circuito che realizza tali funzioni d'uscita è il sommatore non invertente di figura.



La funzione d'uscita del sommatore è: $V_o = \frac{R_5}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_5}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R_5}{R_3} \cdot V_3$, con la condizione

$$\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (\text{gli ingressi vedono verso massa la stessa resistenza}).$$

Progetto primo circuito per la funzione $V_o = V_1 + 2V_2 + 3V_3$

Bisogna imporre l'uguaglianza dei coefficienti della combinazione lineare richiesta con quelli della generica combinazione lineare d'uscita del sommatore:

$$\frac{R_5}{R_1} = 1 \Rightarrow R_1 = R_5 \quad \frac{R_5}{R_2} = 2 \Rightarrow R_2 = \frac{R_5}{2} \quad \frac{R_5}{R_3} = 3 \Rightarrow R_3 = \frac{R_5}{3}$$

Posto $R_5 = 100\text{K}\Omega$, si ha:

$$R_1 = R_5 = 100\text{K}\Omega; \quad R_2 = \frac{R_5}{2} = 50\text{K}\Omega \rightarrow 100\text{K}\Omega // 100\text{K}\Omega; \quad R_3 = \frac{R_5}{3} = 33,33\text{K}\Omega \rightarrow 33\text{K}\Omega$$

Si determina il valore di R_4 dalla condizione sulle resistenze viste dagli ingressi verso massa.

$$\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{R_5}{R_4} + 1 = \frac{R_5}{R_1} + \frac{R_5}{R_2} + \frac{R_5}{R_3} \Rightarrow \frac{R_5}{R_4} + 1 = 1 + 2 + 3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R_5}{R_4} = 5 \Rightarrow R_4 = \frac{R_5}{5} = \frac{100 \cdot 10^3}{5} = 20\text{K}\Omega \rightarrow 10\text{K}\Omega + 10\text{K}\Omega$$

Riassumendo:

$$R_1 = 100\text{K}\Omega ; R_2 = 100\text{K}\Omega // 100\text{K}\Omega ; R_3 = 33\text{K}\Omega ; R_4 = 10\text{K}\Omega + 10\text{K}\Omega ; R_5 = 100\text{K}\Omega$$

Progetto secondo circuito per la funzione $V_o = 3V_1 + 2V_2 + 4V_3$

Bisogna imporre l'uguaglianza dei coefficienti della combinazione lineare richiesta con quelli della generica combinazione lineare d'uscita del sommatore:

$$\frac{R_5}{R_1} = 3 \Rightarrow R_1 = \frac{R_5}{3} \quad \frac{R_5}{R_2} = 2 \Rightarrow R_2 = \frac{R_5}{2} \quad \frac{R_5}{R_3} = 4 \Rightarrow R_3 = \frac{R_5}{4}$$

Posto $R_5 = 100\text{K}\Omega$, si ha:

$$R_1 = \frac{R_5}{3} = 33\text{K}\Omega ; R_2 = \frac{R_5}{2} = 50\text{K}\Omega \rightarrow 100\text{K}\Omega // 100\text{K}\Omega ; R_3 = \frac{R_5}{4} = 25\text{K}\Omega \rightarrow 10\text{K}\Omega + 15\text{K}\Omega$$

Si determina il valore di R_4 dalla condizione sulle resistenze viste dagli ingressi verso massa.

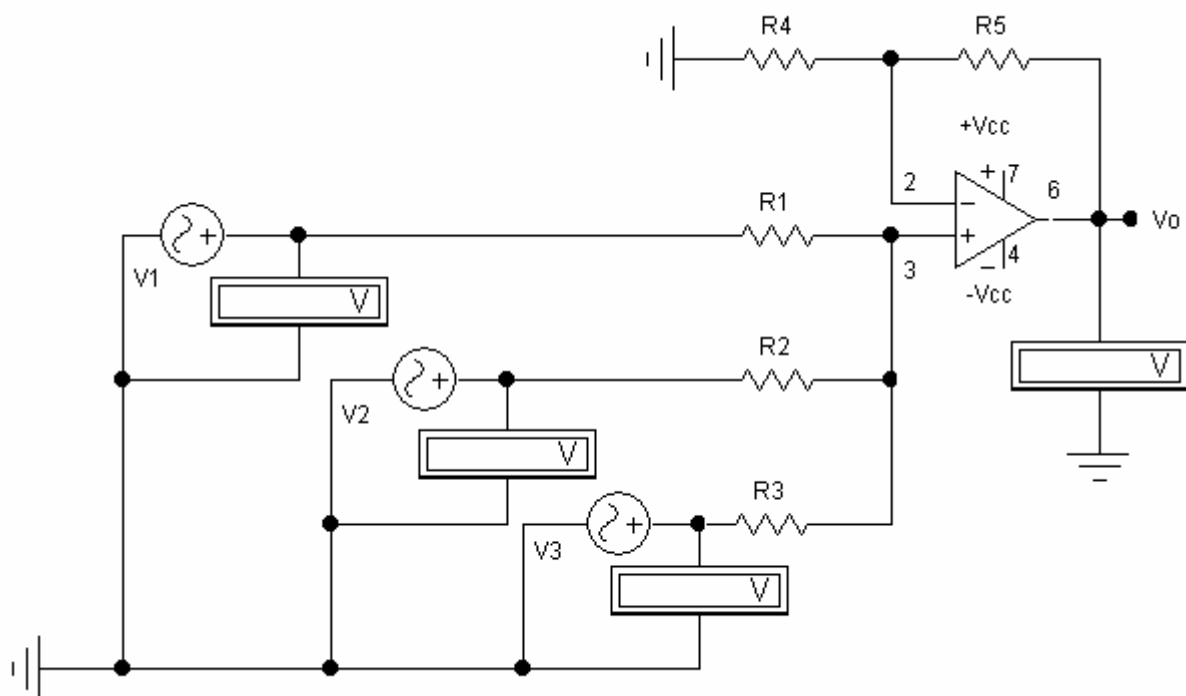
$$\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{R_5}{R_4} + 1 = \frac{R_5}{R_1} + \frac{R_5}{R_2} + \frac{R_5}{R_3} \Rightarrow \frac{R_5}{R_4} + 1 = 3 + 2 + 4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R_5}{R_4} = 8 \Rightarrow R_4 = \frac{R_5}{8} = \frac{100 \cdot 10^3}{8} = 12,5\text{K}\Omega \rightarrow 12\text{K}\Omega$$

Riassumendo:

$$R_1 = 33\text{K}\Omega ; R_2 = 100\text{K}\Omega // 100\text{K}\Omega ; R_3 = 10\text{K}\Omega + 15\text{K}\Omega ; R_4 = 12\text{K}\Omega ; R_5 = 100\text{K}\Omega$$

Il circuito di misura per la verifica in continua è il seguente:



Per V_1 e V_2 si utilizzano i due generatori di tensione continua variabile, per V_3 si utilizza il generatore di tensione di riferimento. I valori misurati sono riportati nella tabella insieme ai valori calcolati per un immediato confronto.

N	$V_o = V_1 + 2V_2 + 3V_3$					$V_o = 3V_1 + 2V_2 + 4V_3$	
	Volt					Volt	
	V_1	V_2	V_3	V_o	V_o calc.	V_o	V_o calc.
1	+1	-1	+1	+2,04	+2	+5,21	+5
2	-1	-1	+1	+0,04	0	-1,06	-1
3	-2	-2	+1	-2,95	-3	-6,21	-6
4	-3	-3	+2	-2,93	-3	-7,26	+7
5	-4	+2	+2	+6,06	+6	-0,12	0
6	+1	-4	+2	-0,91	-1	+3,18	+3
7	+2	-4	+2	+0,08	0	+6,31	+6
8	+2	-3	+1	-0,94	-1	+4,22	+4
9	+3	-5	+1	-3,92	-4	+3,27	+3

Poiché i valori, soprattutto per il secondo circuito, si discostano sensibilmente dai valori calcolati, si è misurata la tensione di offset in uscita con tutti gli ingressi a massa. Il valore misurato per entrambi i circuiti è 0,01V. tale valore non giustifica la discordanza, dovuta alla non perfetta uguaglianza delle resistenze verso massa viste da ogni ingresso.

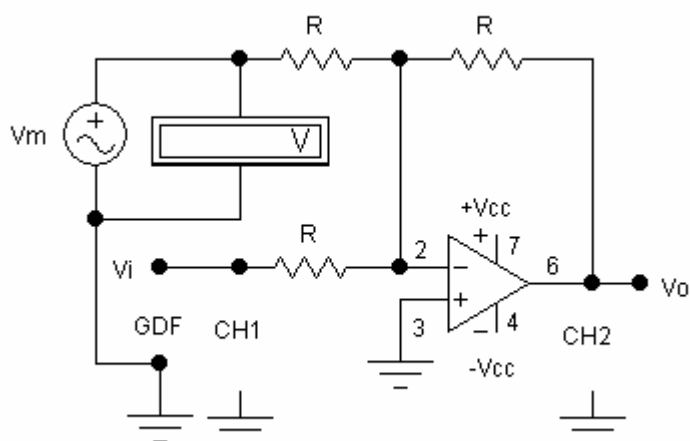
INSERIMENTO DI UN VALORE MEDIO IN UN SEGNALE A VALORE MEDIO NULLO

Con un sommatore è possibile inserire un valore medio in un segnale a valore medio nullo. È sufficiente utilizzare un sommatore invertente o non invertente a due ingressi: ad un ingresso si collega il segnale, all'altro ingresso il valore continuo che si vuole inserire nel segnale a valore medio nullo.

Si utilizzano le forme d'onda sinusoidale, triangolare e quadra, di ampiezza $V_{iM} = 4V$ e frequenza 1KHz. Come valore medio si sceglie $V_m = 2V$.

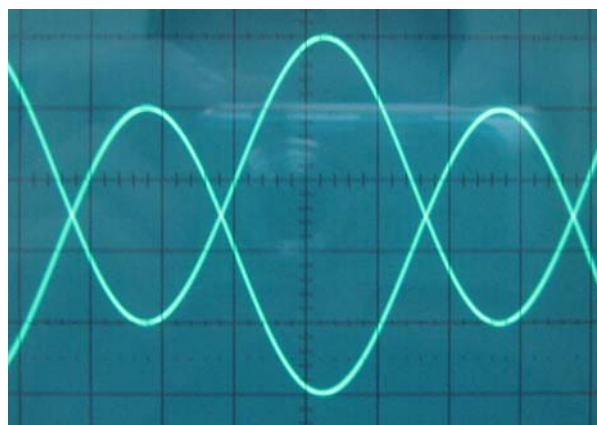
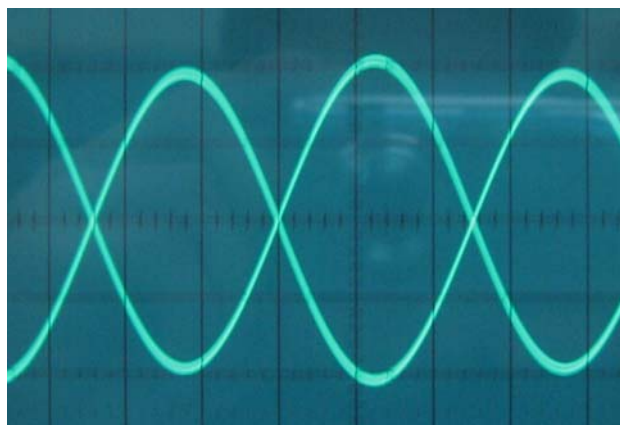
Si testa il circuito con $V_m = 0$ e $V_m = 2V$. Di ogni forma d'onda si riporta l'oscillogramma quando $V_m = 0$ e $V_m = 2V$ (primo oscillogramma con $V_m = 0$, secondo oscillogramma $V_m = 2V$). Entrambi i canali dell'oscilloscopio sono posizionati a 2V/div.

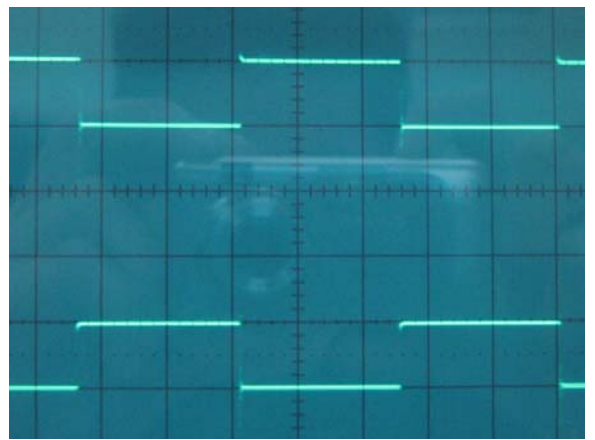
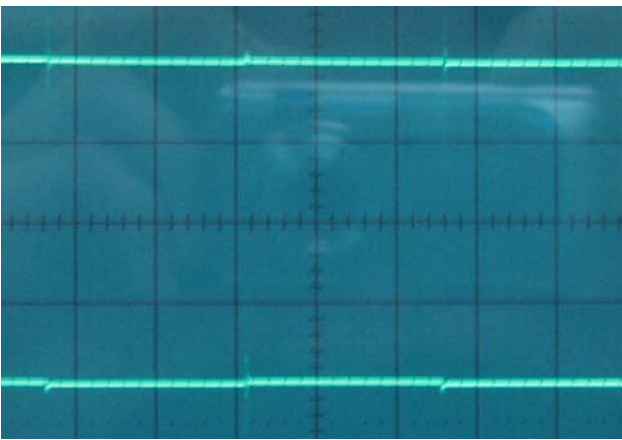
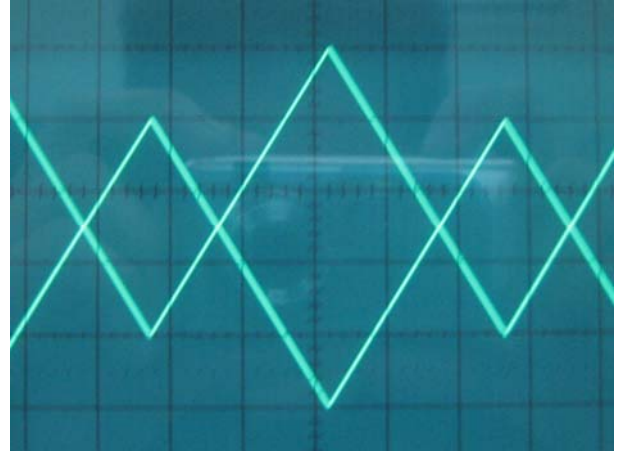
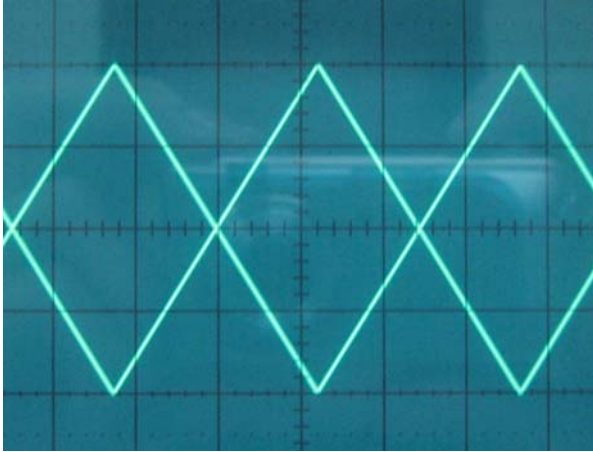
Circuito invertente



Volendo ottenere la funzione d'uscita $V_o = -(V_m + V_i)$, si prendono tutte le resistenze uguali tra loro e di valore 120K Ω .

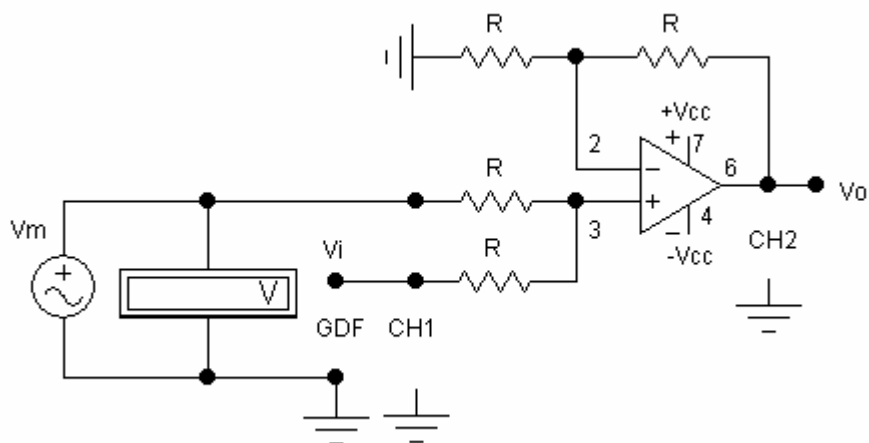
Nel primo oscillogramma i segnali hanno uguale ampiezza, sono sfasati di 180° ed entrambi a valore medio nullo; nel secondo i segnali hanno uguale ampiezza, sono sfasati di 180° e quello d'uscita ha un valore medio di 2V.





Analogamente, è possibile l'operazione inversa, ossia eliminare il valore medio da un segnale a valore medio non nullo.

Circuito non invertente



Volendo ottenere la funzione d'uscita $V_o = V_m + V_i$, si prendono tutte le resistenze uguali tra loro e di valore 120K Ω .

Nel primo oscillogramma i segnali hanno uguale ampiezza, sono in fase ed entrambi a valore medio nullo (sono sovrapposti e risulta come un unico segnale); nel secondo i segnali hanno uguale ampiezza, sono in fase e quello d'uscita ha un valore medio di 2V.

