# Misure con l'oscilloscopio (e non) su circuiti con amplificatori operazionali

Edgardo Smerieri
Laura Faè

PLS - AIF - Corso Estivo di Fisica
Genova 2009

# Amplificatore “operazionale” perché ?

- Moltiplicazione per una costante
- Cambiamento di segno
- Somma
- Media
- Sottrazione
- Confronto
- Logaritmo
- Esponenziale
- Moltiplicazione
- Divisione
- Elevazione al quadrato
- Radice quadrata
- Derivata
- Integrale
- E tante altre cose ……

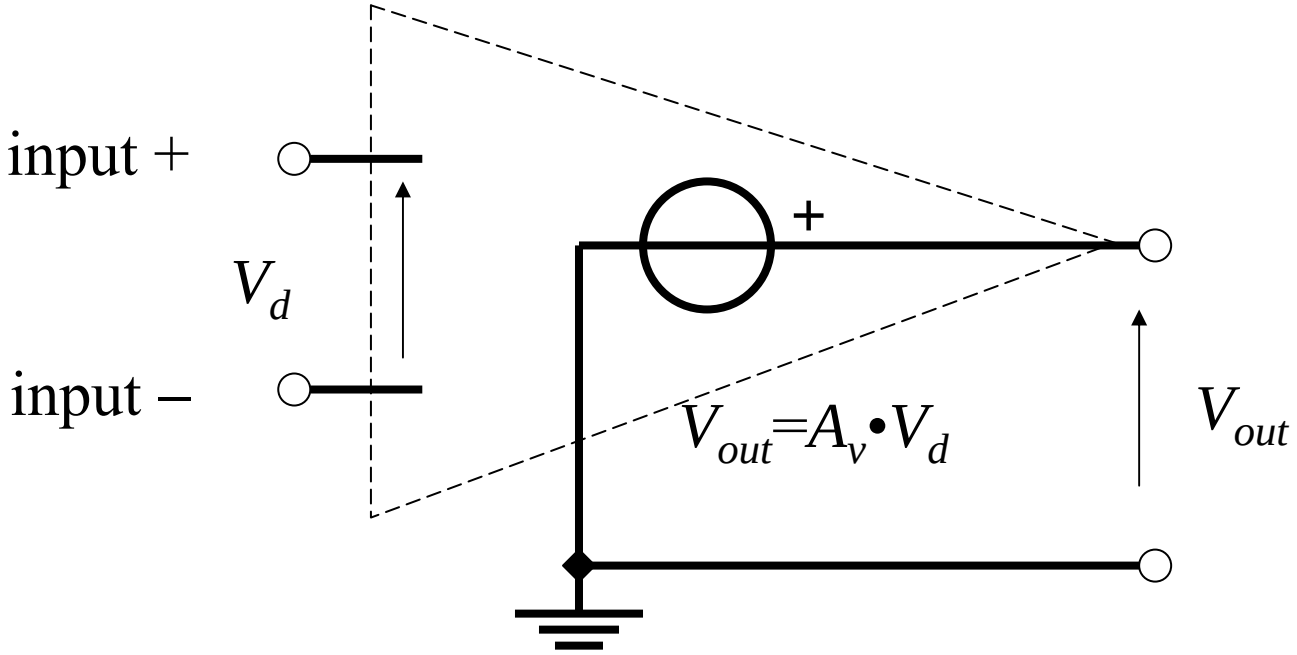
# Elenco delle misurazioni


1. Amplificatore invertente pag. 07
2. Amplificatore non invertente pag. 11
3. Inseguitore pag. 15
4. Sommatore invertente pag. 19
5. Media aritmetica pag. 23
6. Amplificatore a differenza pag. 24
7. Slew-rate di un Op.Amp. pag. 27
8. Comparatore pag. 30
9. Integratore invertente pag. 34
10. Derivatore invertente pag. 38
11. Amplificatore logaritmico pag. 41
12. Amplificatore esponenziale pag. 43
13. Modulazione AM con moltiplicatore pag. 51
14. Moltiplicazione di due segnali pag. 53
15. Diodo di precisione pag. 55

# Materiale necessario per le esperienze descritte di seguito

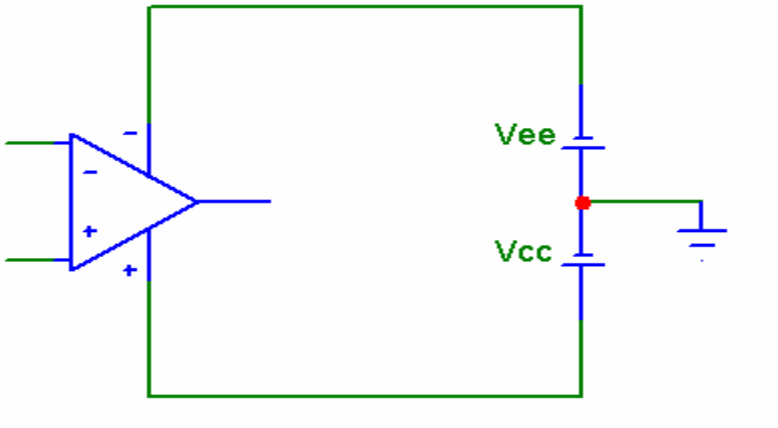
1. Un Alimentatore duale ±15V oppure ±12V
2. Un Alimentatore in continua a tensione variabile
3. Due Generatori di funzioni
4. Un Oscilloscopio a doppia traccia
5. Una Breadboard
6. Op.Amp. tipo LF351 e LM741
7. Diodo 1N4148
8. Resistenze di vario tipo

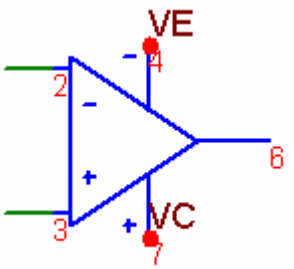
# Op.Amp. Ideale - Modello semplificato



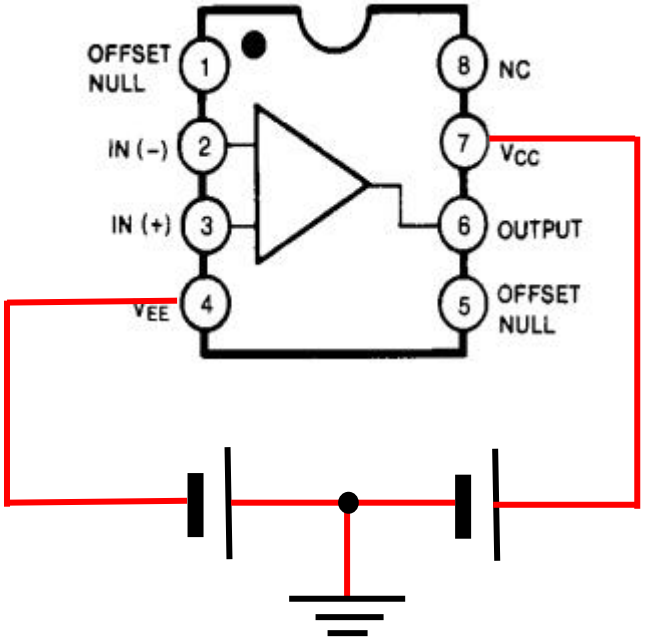

- Generatore di tensione $V_{out}$ pilotato dalla differenza di tensione $V_d$ fra gli ingressi
- Amplificazione di tensione $A_V$ idealmente infinita
- Resistenza d'ingresso $R_{in}$ infinita significa che gli ingressi non assorbono corrente
- Resistenza d'uscita $R_{out}$ nulla significa che la tensione d'uscita $V_{out}$ è indipendente dalla corrente erogata

# Alimentazione duale

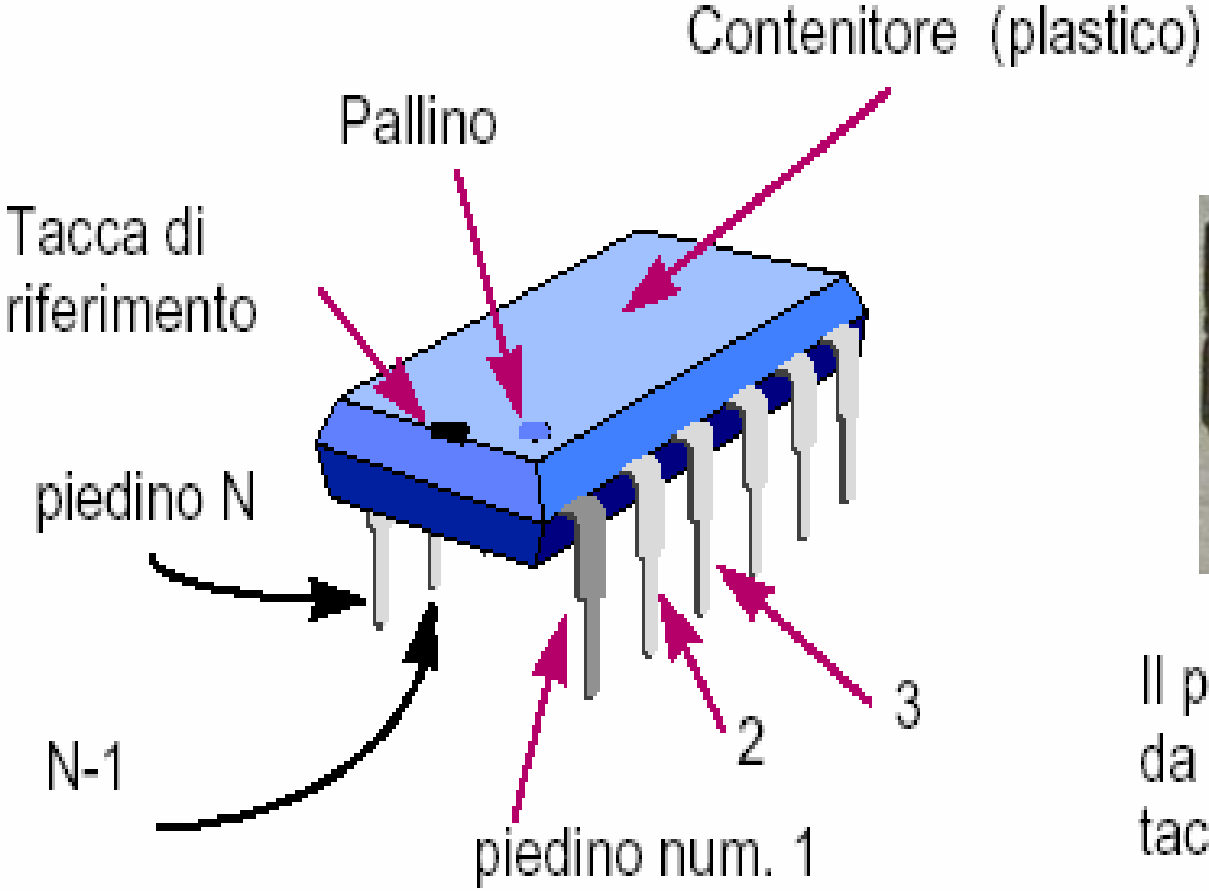



LM741 e LF351

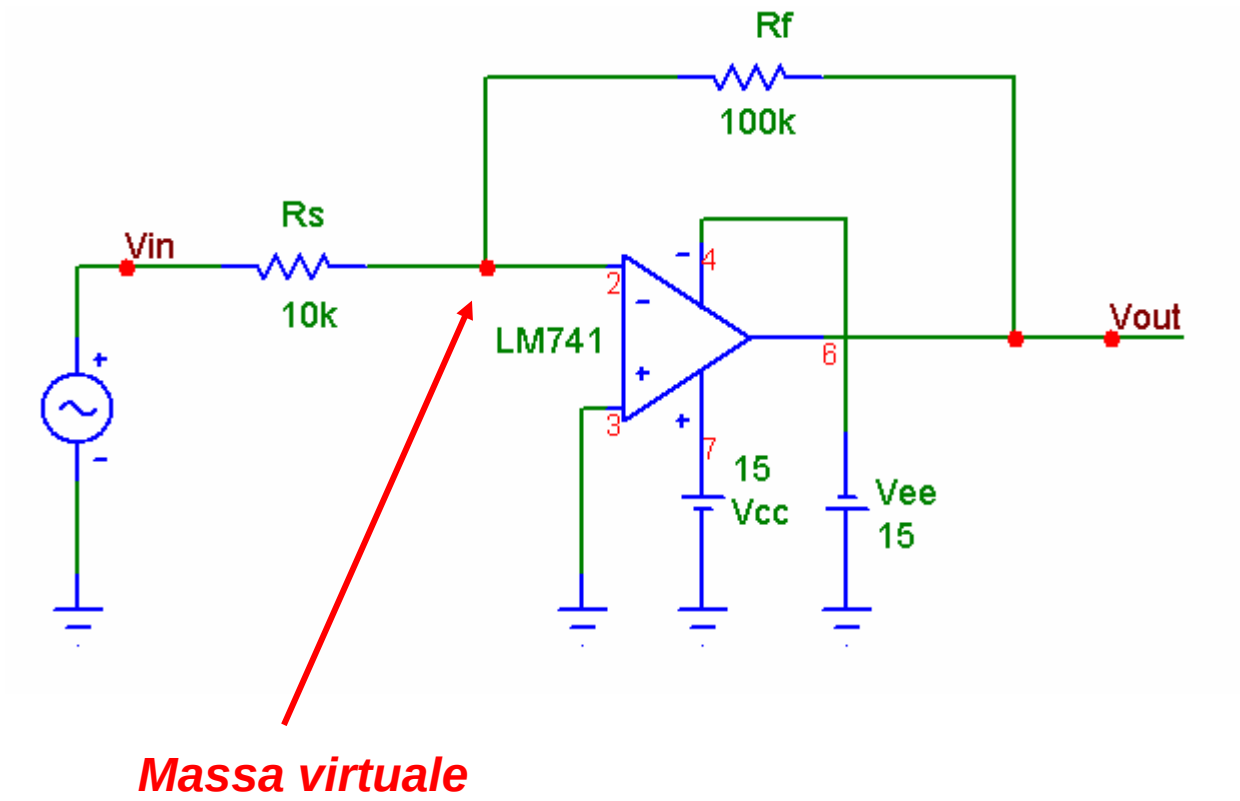


# Contenitori DIL (dual in line)

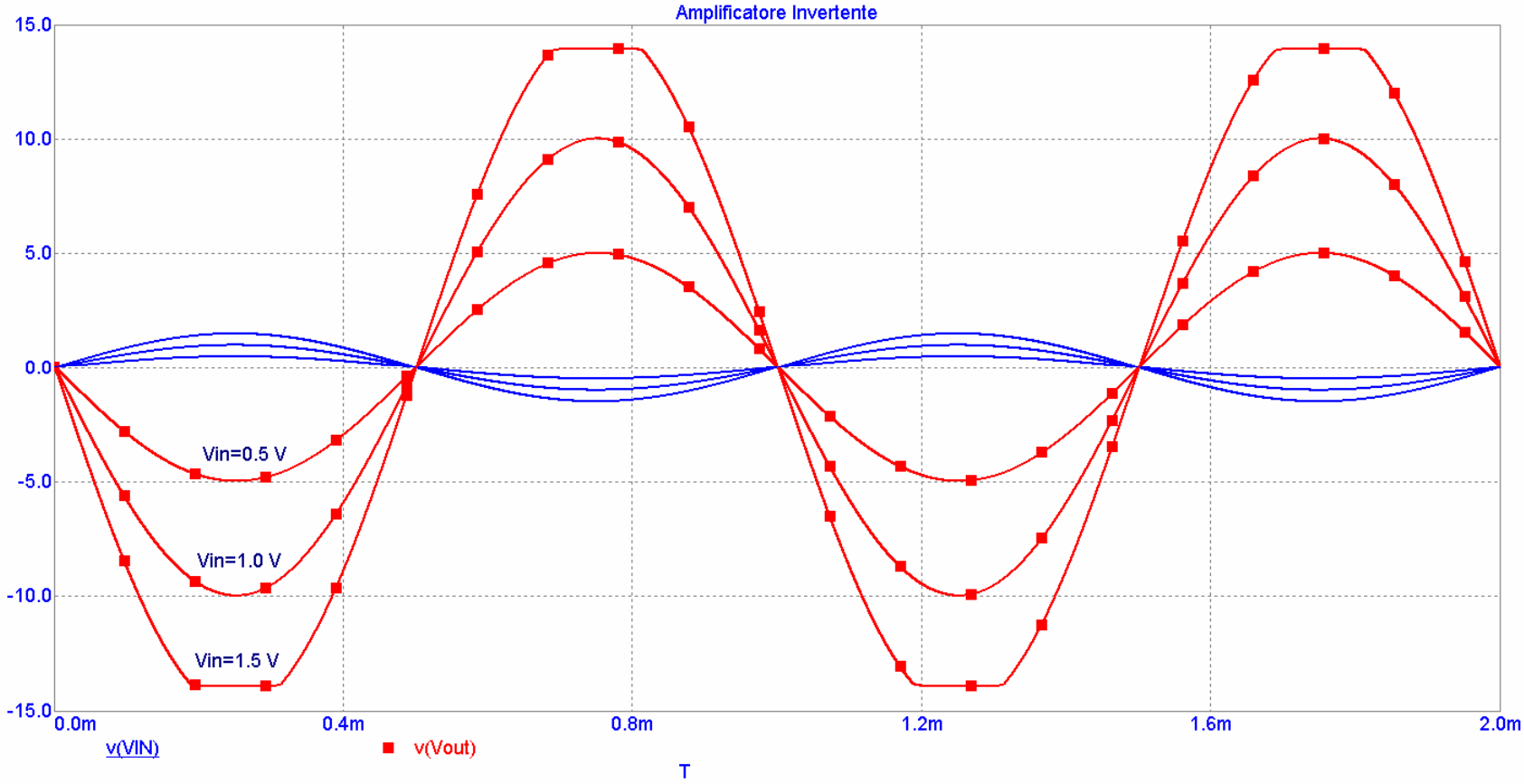


Il piedino 1 è indicato da un pallino o da una tacca sul contenitore

# Amplificatore invertente



# Amplificatore invertente




Se l'ampiezza del segnale d'ingresso supera un certo valore, che dipende dall'amplificazione, l'Operazionale "*va in saturazione*" per cui l'ampiezza della tensione d'uscita non aumenta più

# Misure sull'amplificatore invertente

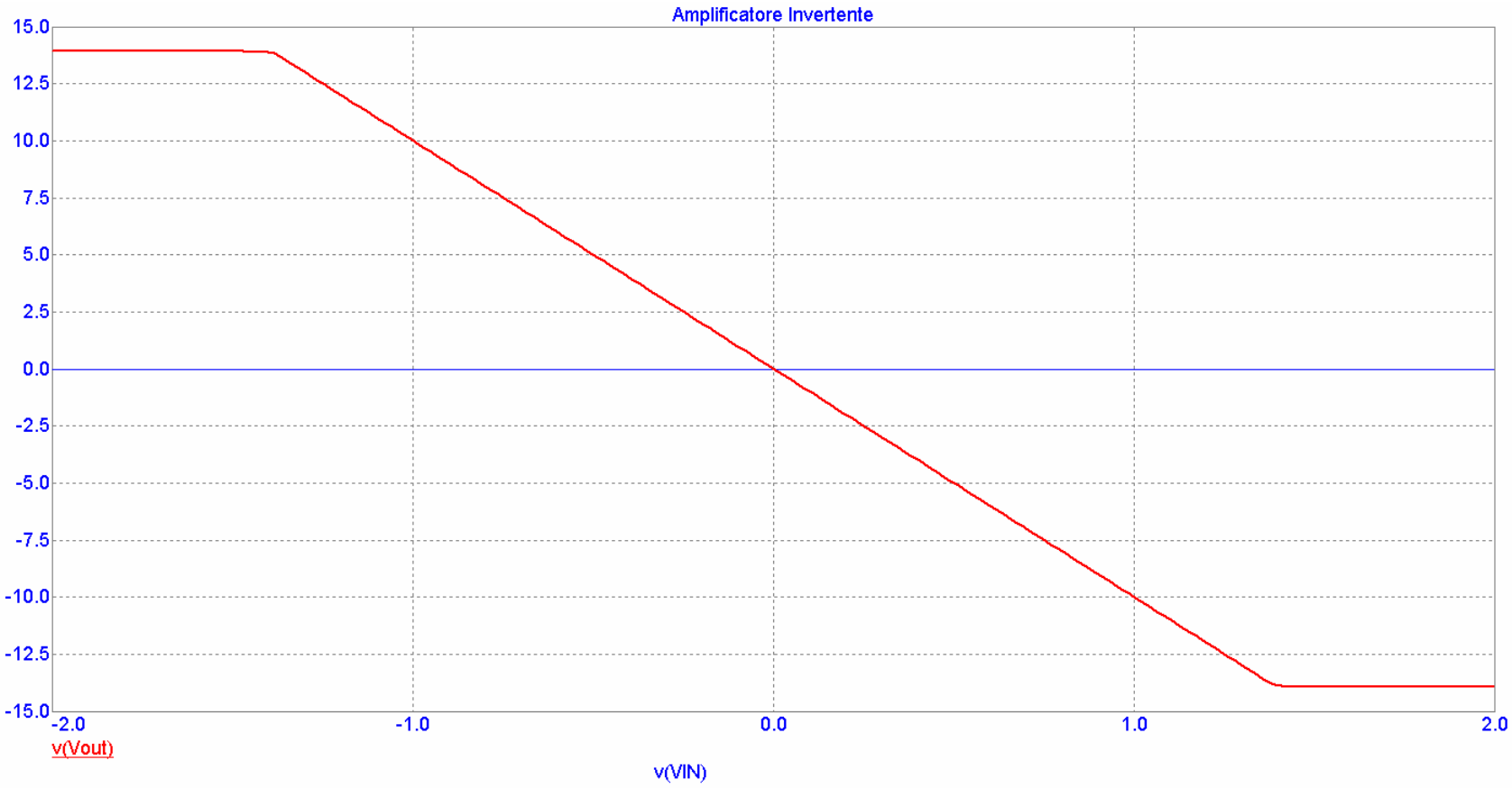
- Applicare in ingresso un segnale sinusoidale avente una frequenza di 1000 Hz (valore tipico standard per questo tipo di misure) e una ampiezza di 1 V
- Visualizzare sull'oscilloscopio sia la tensione d'ingresso sia la tensione d'uscita
- Misurare le ampiezze di $V_{in}$ e $V_{out}$
- Verificare che l'amplificazione vale -10 dove
  - il segno meno indica che il segnale di uscita è sfasato di 180° rispetto a quello d'ingresso (si dice anche semplicemente che è in opposizione)
  - il valore 10, che costituisce il valore dell'amplificazione, è dato dalla formula

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_s}$$

Successivamente

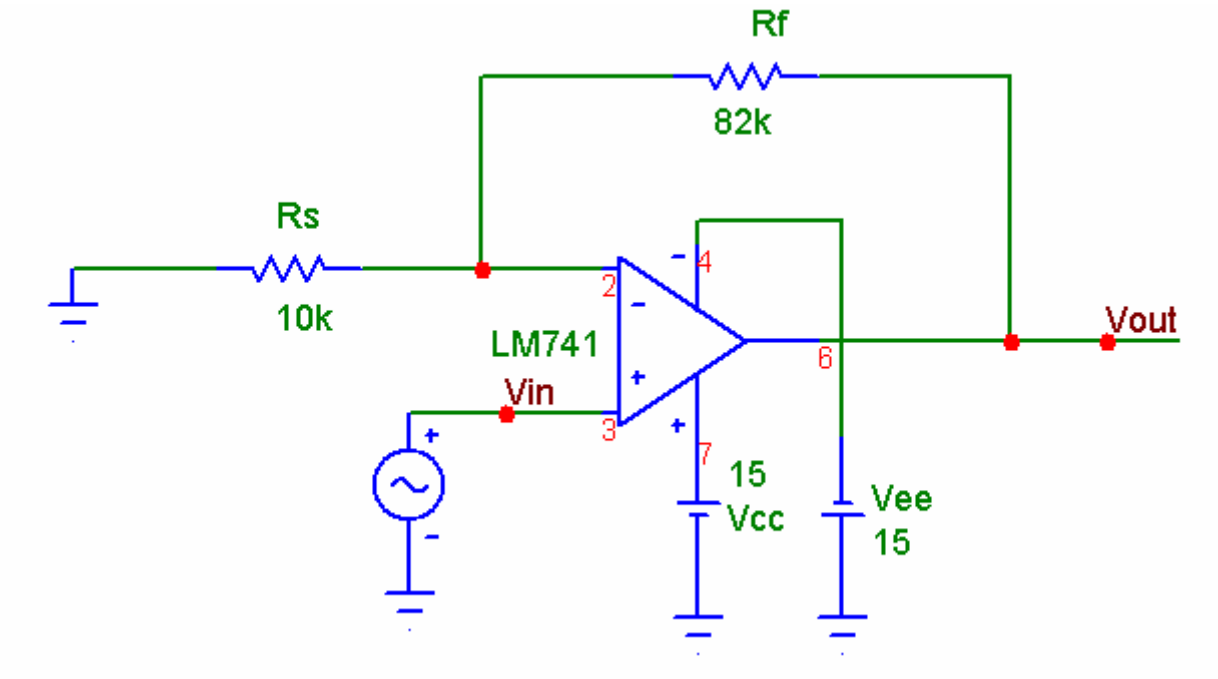
- Applicare in ingresso un segnale di frequenza costante (1000 Hz) ed ampiezza variabile, misurando di volta in volta sia l'ampiezza di $V_{in}$ sia l'ampiezza di $V_{out}$; far variare il valore di $V_{in}$ tra – 2V e +2V
- Fare il grafico di $V_{out}$ in funzione di $V_{in}$

# Amp.Inv. – Caratteristica $V_{out}$-$V_{in}$

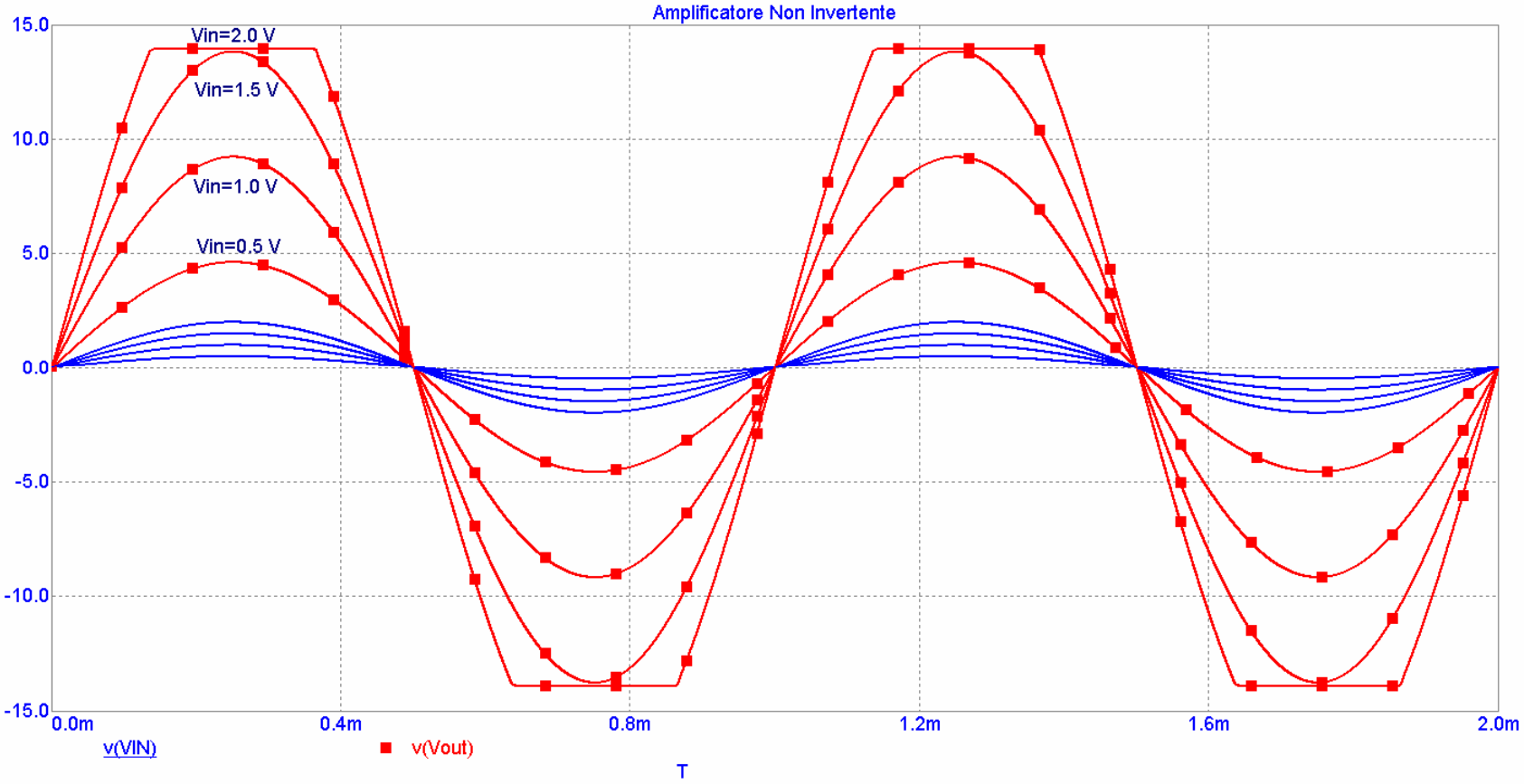



La caratteristica $V_{out}$-$V_{in}$ può essere rilevata anche utilizzando due multimetri in DC con una tensione continua e variabile tra –2V e +2V come segnale d'ingresso

# Amplificatore non invertente



# Amplificatore non invertente




Se l'ampiezza del segnale d'ingresso supera un certo valore, che dipende dall'amplificazione, l'Operazionale "*va in saturazione*" per cui l'ampiezza della tensione d'uscita non aumenta più

# Misure sull'amplificatore non invertente

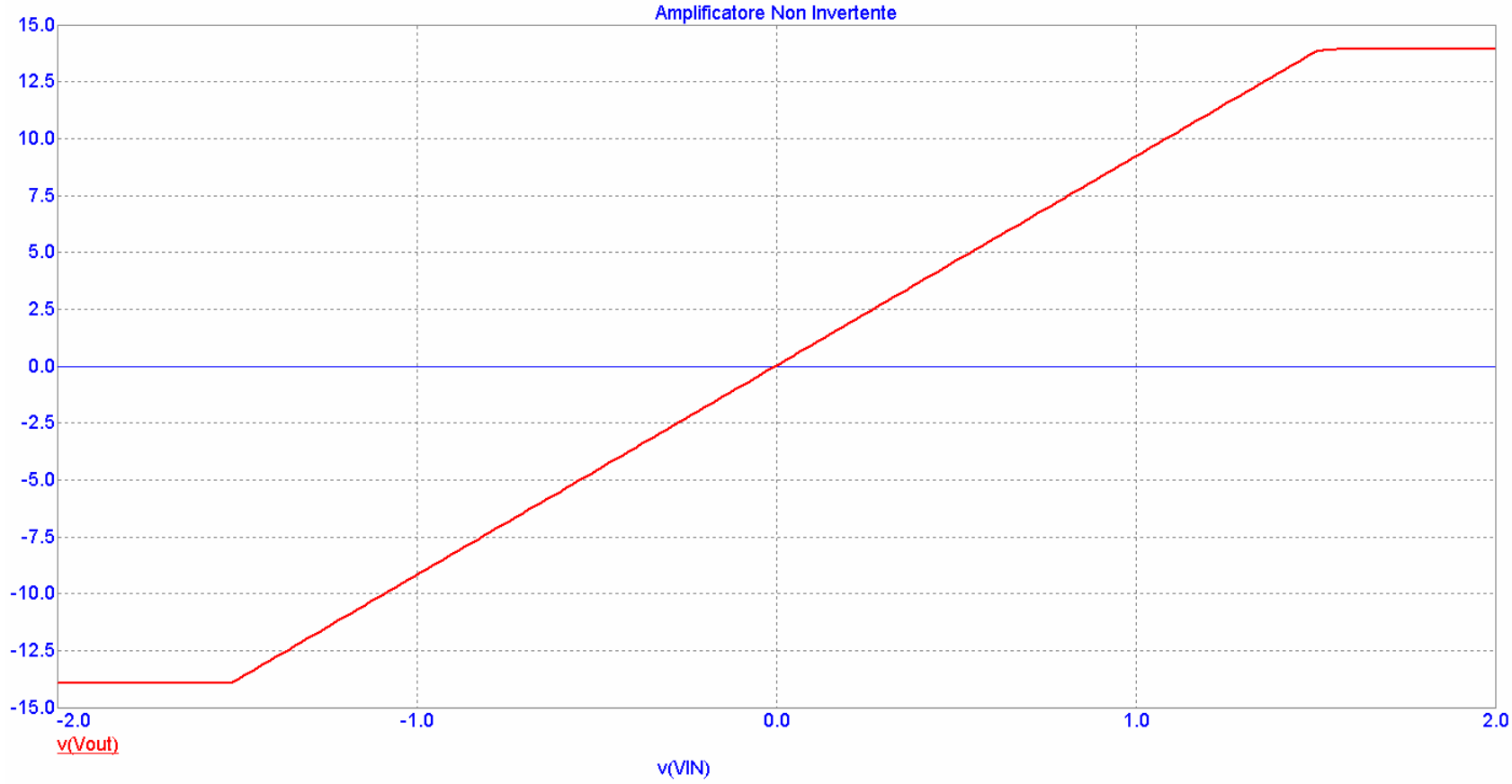
- Applicare in ingresso un segnale sinusoidale avente una frequenza di 1000 Hz (valore tipico standard per questo tipo di misure) e una ampiezza di 1 V
- Visualizzare sull'oscilloscopio sia la tensione d'ingresso sia la tensione d'uscita
- Misurare le ampiezze di $V_{in}$ e $V_{out}$
- Verificare che l'amplificazione vale +9.2 dove
  - il segno più indica che il segnale di uscita è in fase rispetto a quello d'ingresso
  - il valore 9.2 che costituisce il valore dell'amplificazione è dato dalla formula

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_s}$$

Successivamente

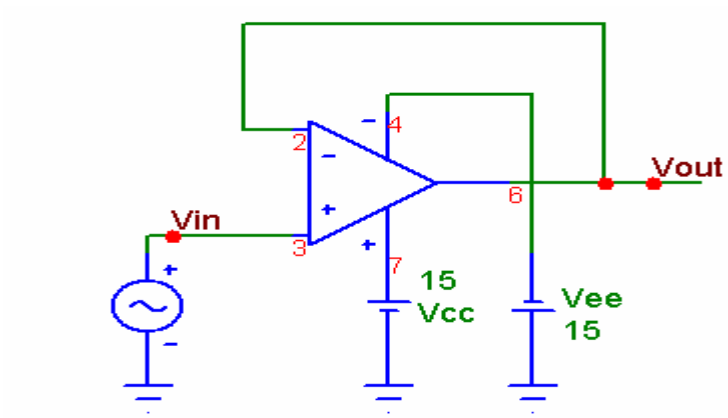
- Applicare in ingresso un segnale di frequenza costante (1000 Hz) ed ampiezza variabile, misurando di volta in volta sia l'ampiezza di $V_{in}$ sia l'ampiezza di $V_{out}$; far variare il valore di Vin tra – 2V e +2V
- Fare il grafico di $V_{out}$ in funzione di $V_{in}$

# Amp. Non Inv. – Caratteristica $V_{out}$-$V_{in}$




La caratteristica $V_{out}$-$V_{in}$ può essere rilevata anche utilizzando due multimetri in DC con una tensione continua e variabile tra –2V e +2V come segnale d'ingresso

# Un caso particolare
# L'inseguitore di tensione

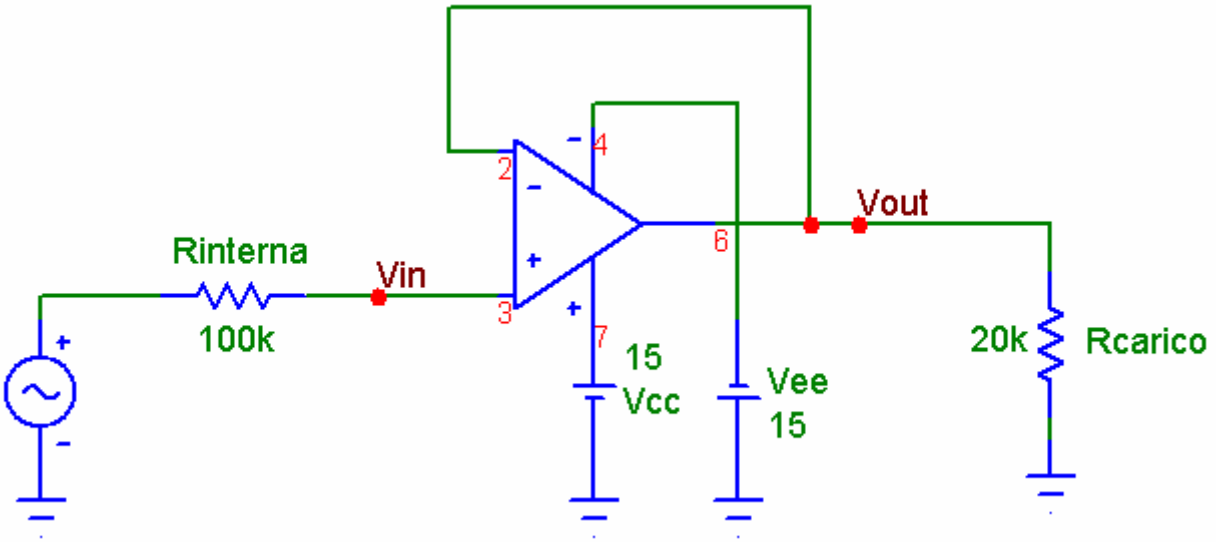



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

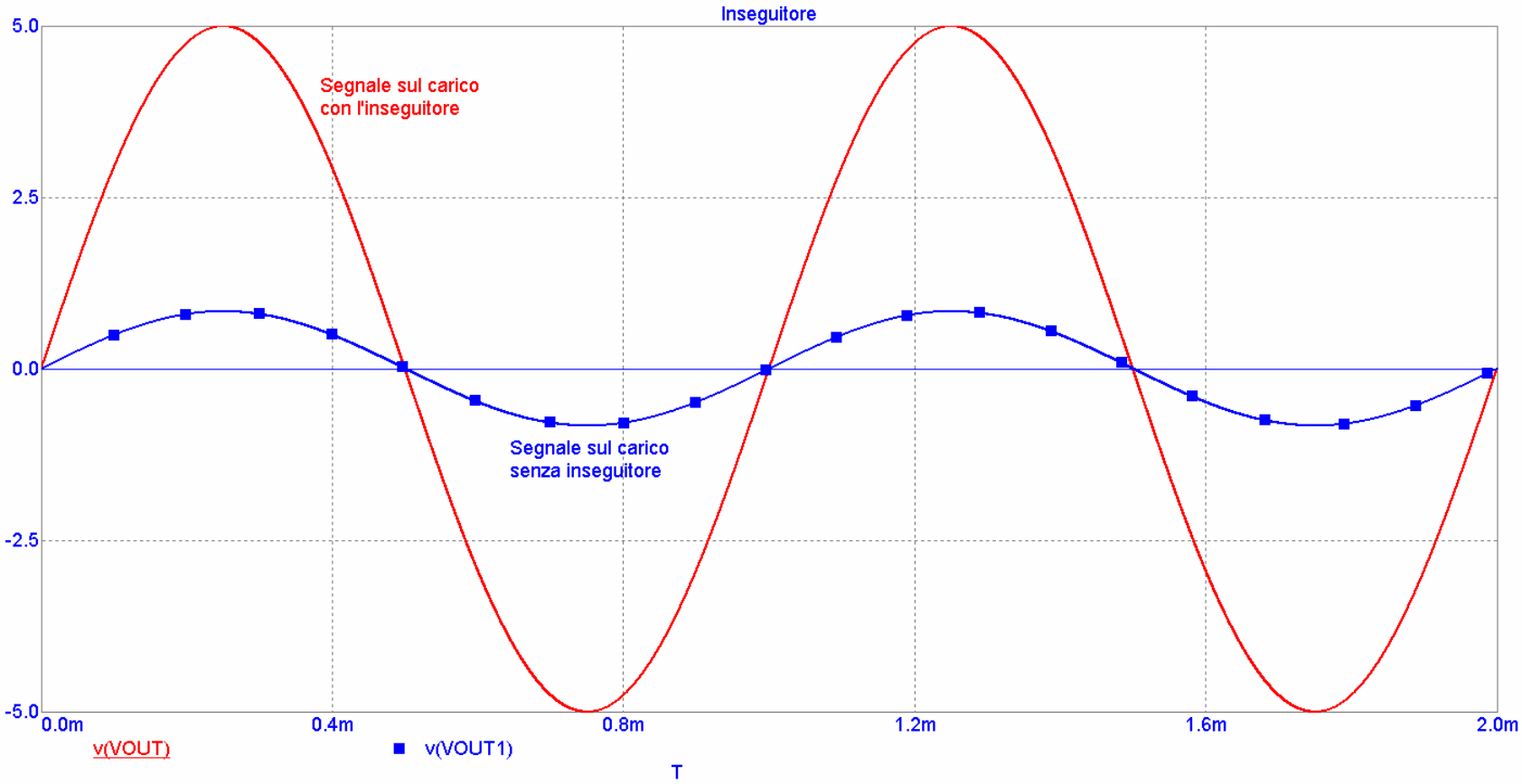
Qual è l'utilità di un amplificatore la cui amplificazione è 1 ?

L'inseguitore è utile in tutti quei casi in cui si deve prelevare un segnale da un generatore con una elevata resistenza interna e fornire detto segnale ad una resistenza di carico di valore molto inferiore.

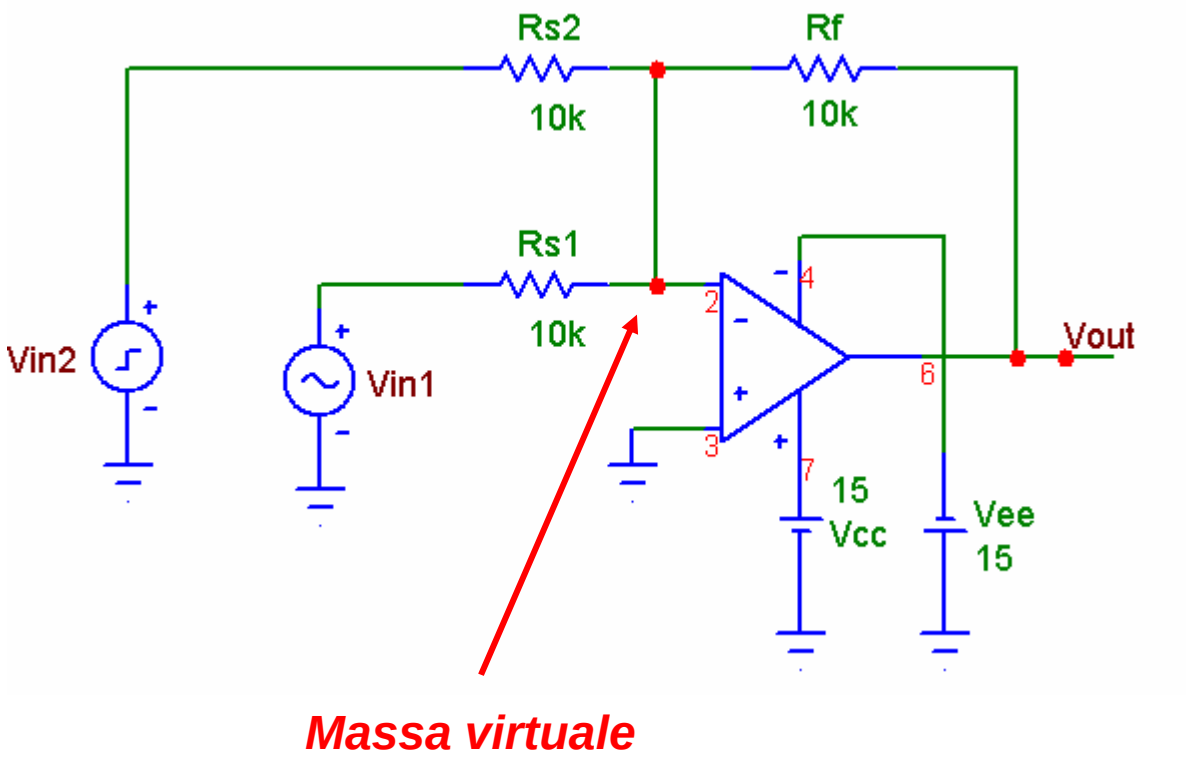
# L’inseguitore di tensione



# L’inseguitore di tensione



# Sommatore invertente

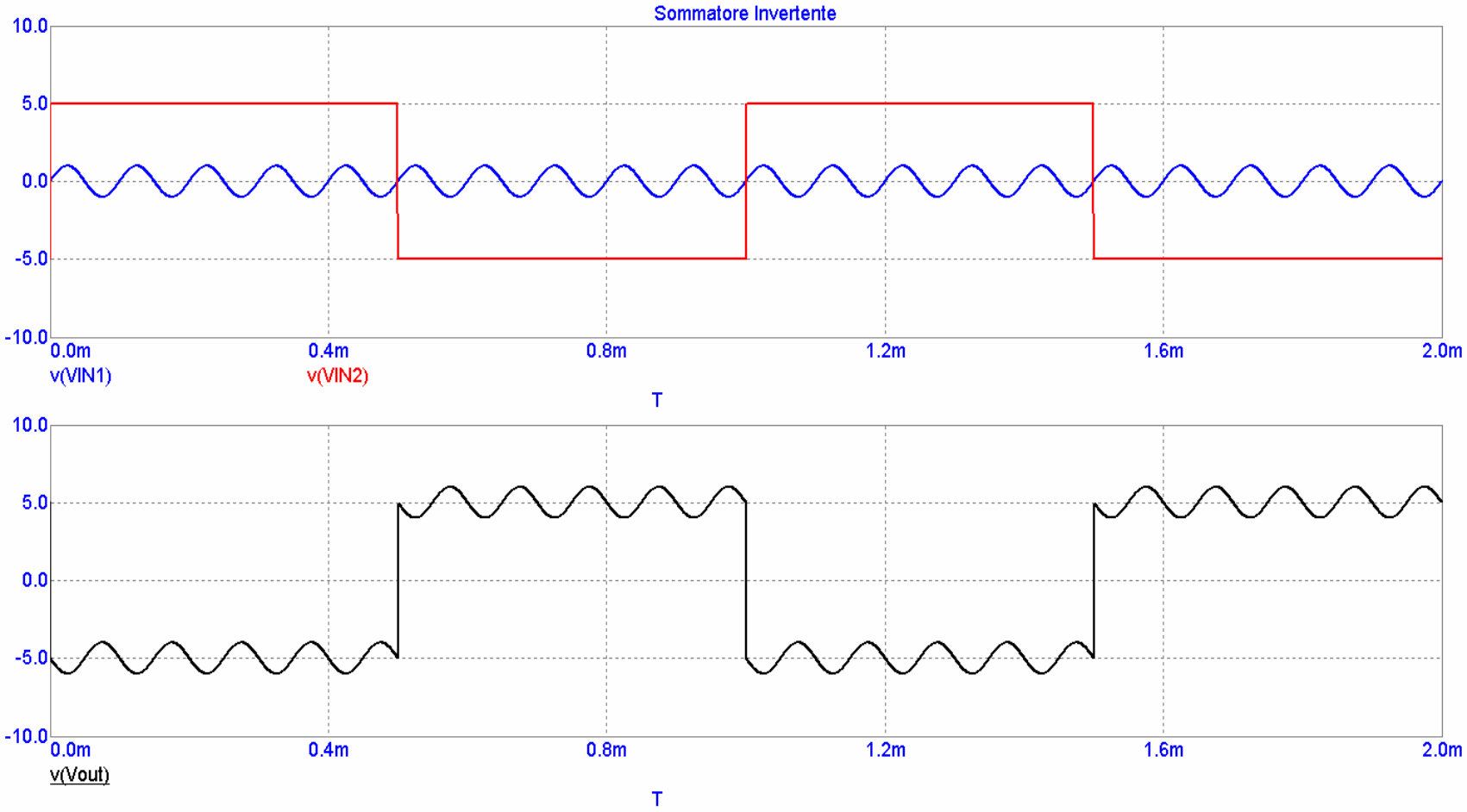



$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{s1}} V_{in1} - \frac{R_f}{R_{s2}} V_{in2} = -\frac{R_f}{R_s}\left(V_{in1} + V_{in2}\right) = -\left(V_{in1} + V_{in2}\right)$$

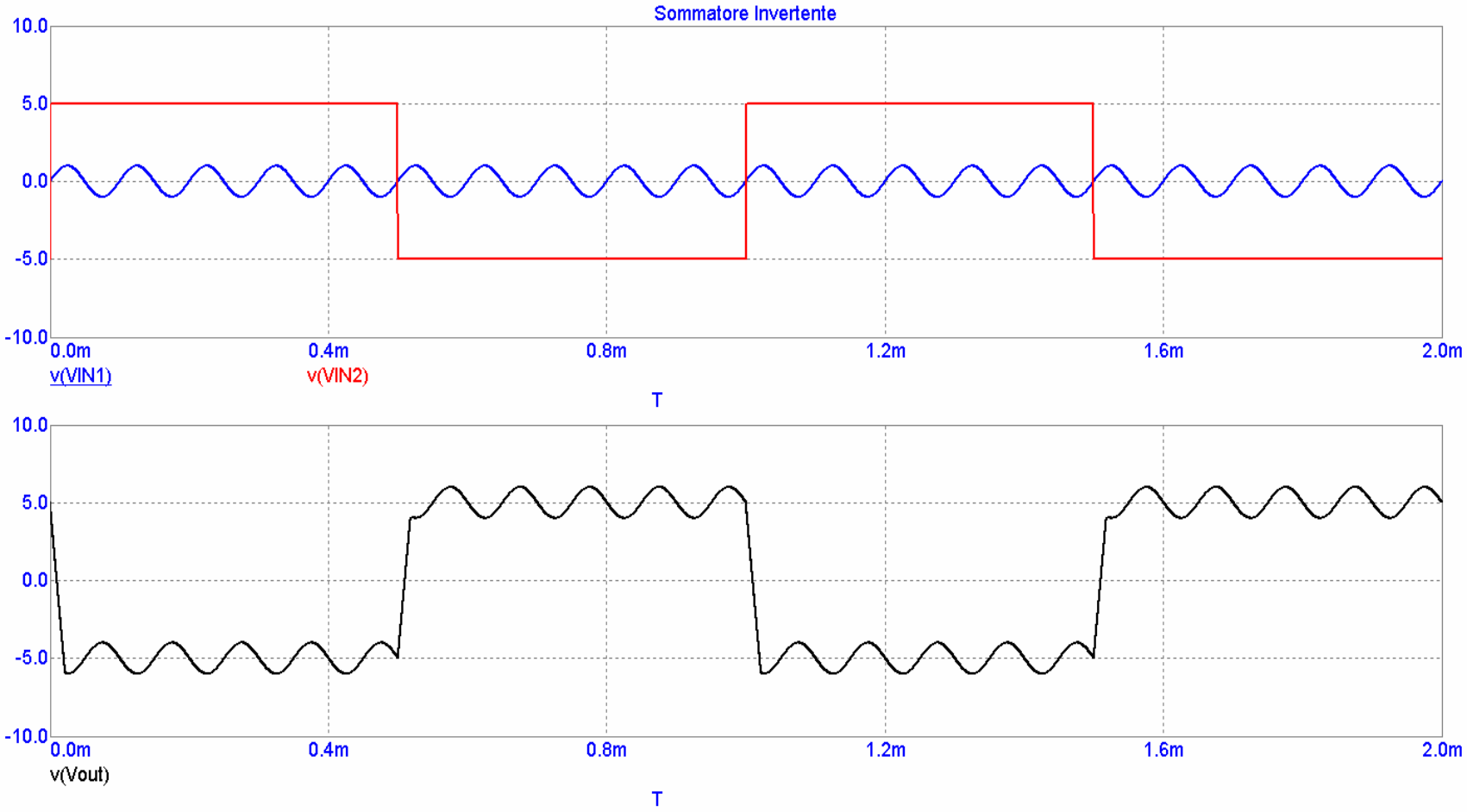
# Sommatore invertente - Misura

- Per questa misura occorrono due generatori di segnale
- $V_{in1}$ è un segnale sinusoidale di 1V di ampiezza e con frequenza di 10 kHz
- $V_{in2}$ è un segnale ad onda quadra con ampiezza variabile tra –5V e + 5V e con frequenza di 1 kHz
- Il segnale $V_{out}$ somma amplificata sull'oscilloscopio normalmente "scorre" poiché i due generatori di segnale non sono sincronizzati fra loro
- Per l'esperienza utilizzare una volta l'amplificatore operazionale LF741 ed un'altra volta l'amplificatore operazionale LF351

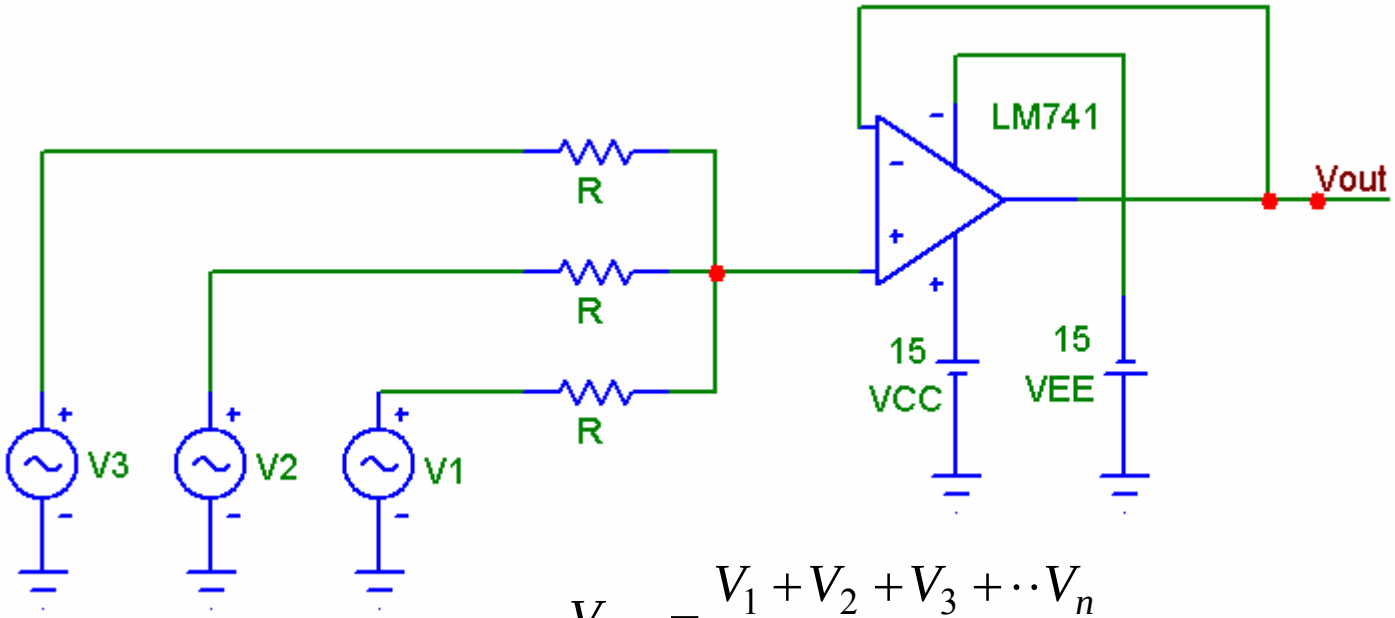
# Sommatore invertente con LF351



# Sommatore invertente con LM741



# Media aritmetica di più segnali



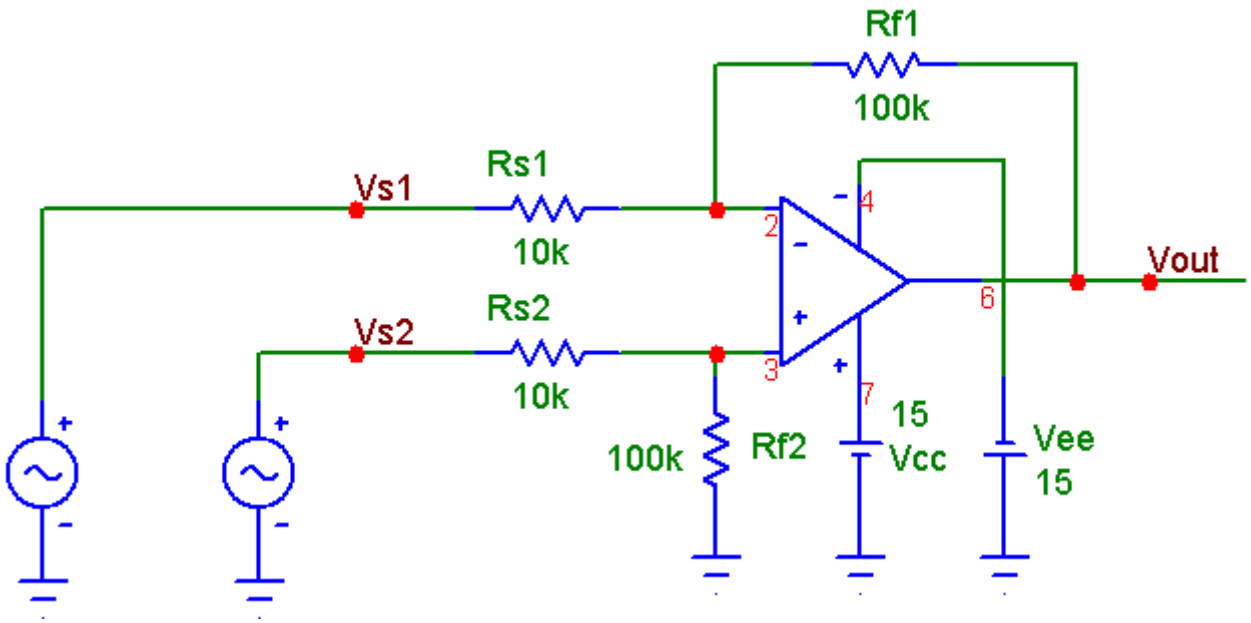

$$V_{out} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \cdot\cdot V_n}{n}$$

Se un segnale non è presente va tolta anche la relativa resistenza collegata all'ingresso non invertente dell'operazionale

**<u>Ipotesi di lavoro</u>**: due soli segnali

- Un segnale sinusoidale di 6V di ampiezza e frequenza di 1 kHz
- Un segnale continuo di +9V

# Amplificatore a differenza




$$V_{out} = \frac{R_f}{R_s}\left(V_{s2} - V_{s1}\right)$$

Si usa soprattutto quando due segnali hanno una componente continua comune e la parte che interessa amplificare è appunto la differenza tra i due segnali

# Amplificatore a differenza - Misura

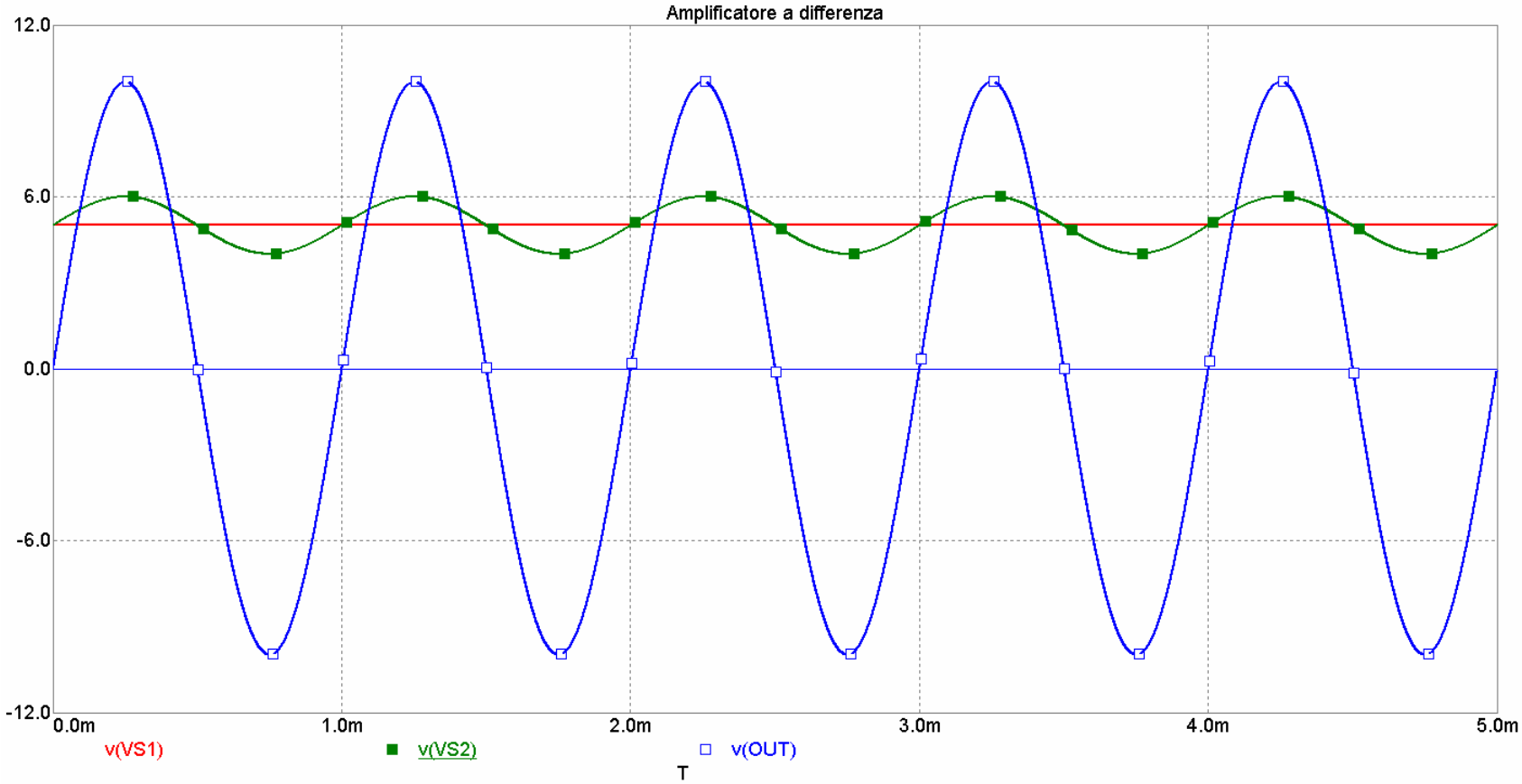
**<u>Ipotesi di lavoro</u>**: si ha un segnale sinusoidale di 1V di ampiezza e con frequenza di 1 kHz sovrapposto ad un segnale continuo di +5V e si desideri amplificare di 10 volte soltanto la parte variabile

- Si applica il segnale dato all'ingresso non invertente così diventa $V_{s2}$
- Si applica un segnale continuo con ampiezza +5V all'ingresso invertente così diventa $V_{s1}$
- Si scelgono le resistenze uguali a due a due in modo che il loro rapporto valga 10 cioè

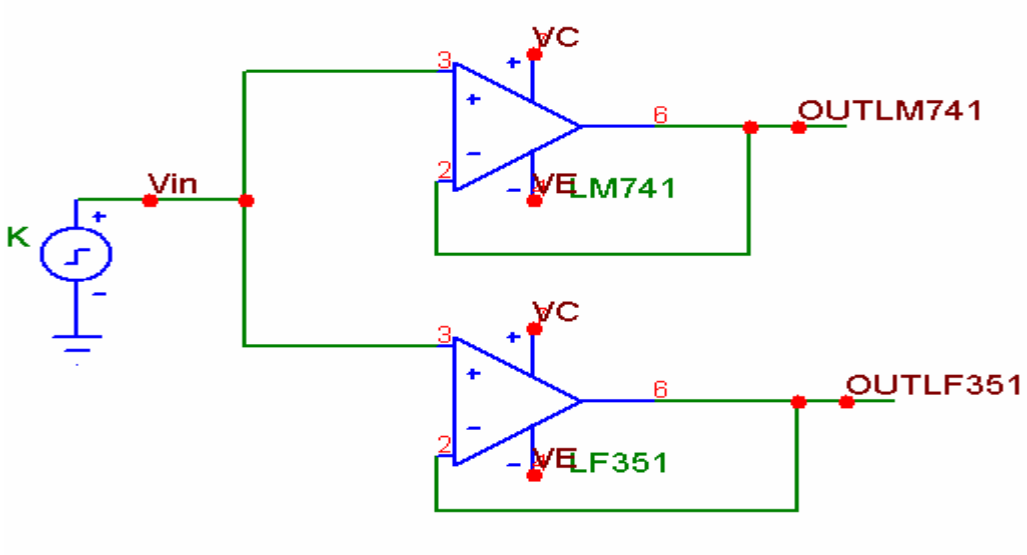
$$R_{s1}=R_{s2}=R_s = 10\ \text{k}\Omega \qquad R_{f1}=R_{f2}=R_f = 100\ \text{k}\Omega$$

- Si sceglie $R_f = 10R_s$

# Amplificatore a differenza



# Slew-rate di un Op.Amp.



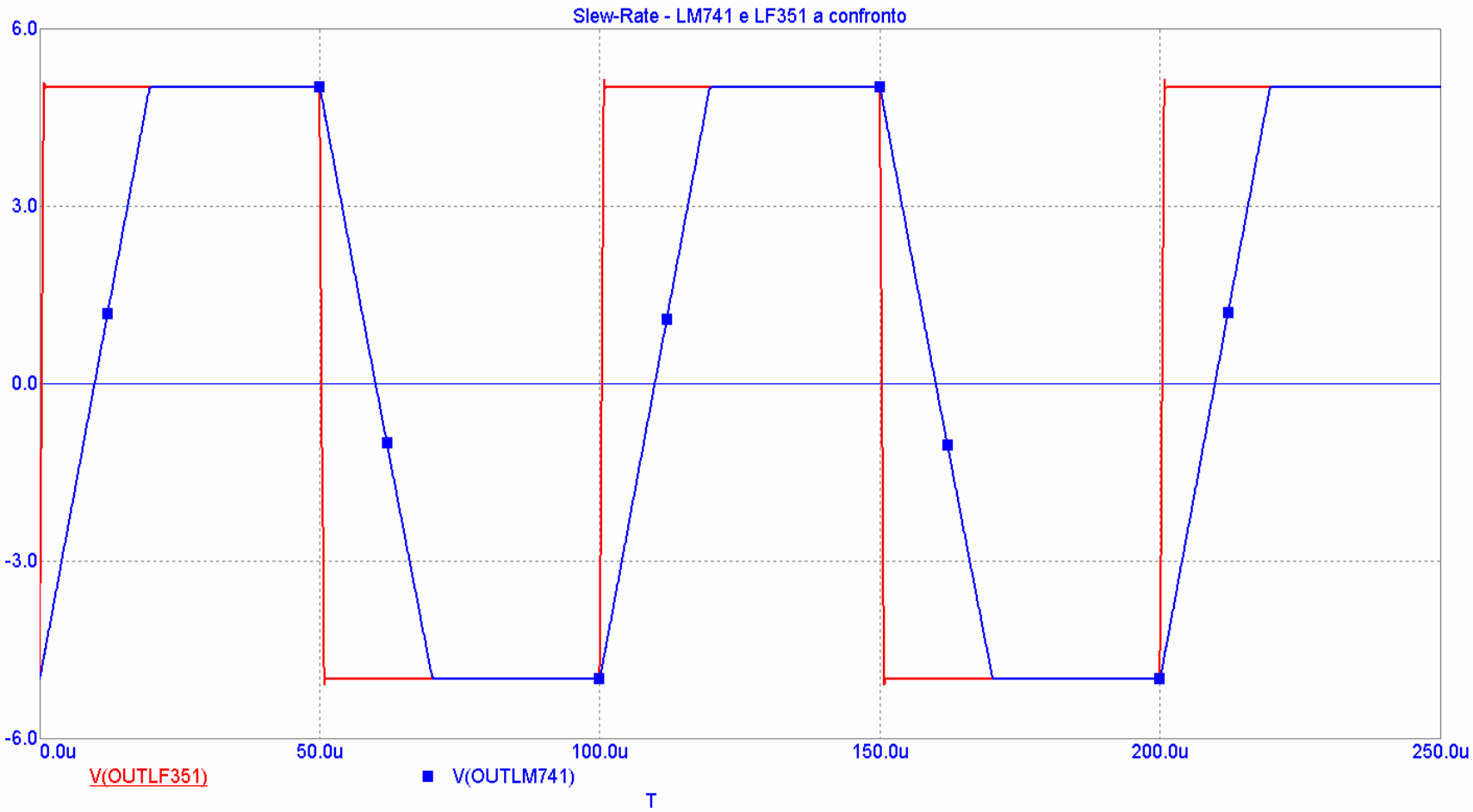

$$SR = \left.\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}\right|_{\max}$$

Lo Slew-rate limita le prestazioni dell'Op.Amp., soprattutto con segnali di tipo impulsivo.

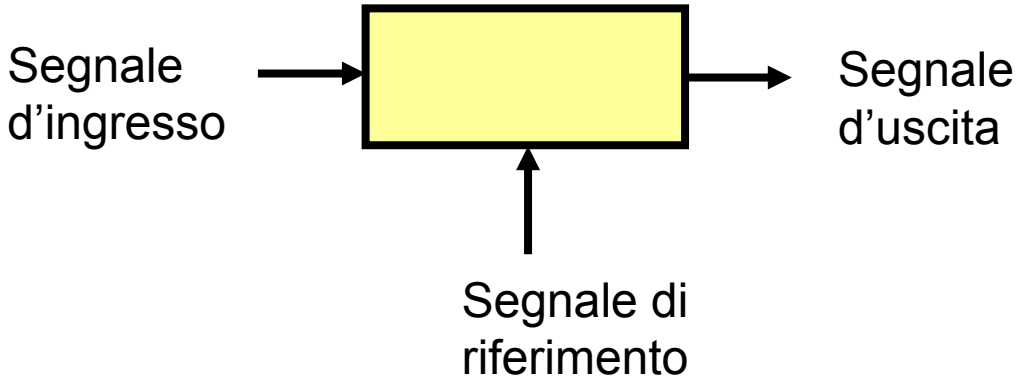
Il confronto può essere fatto con un segnale d'ingresso ad un'onda quadra misurando la pendenza $\Delta V_{out}$ / $\Delta t$ nella zona di transizione.

Di seguito il confronto con un segnale a onda quadra di 10 kHz variabile tra +5V e –5V.

# Slew-rate di un Op.Amp.

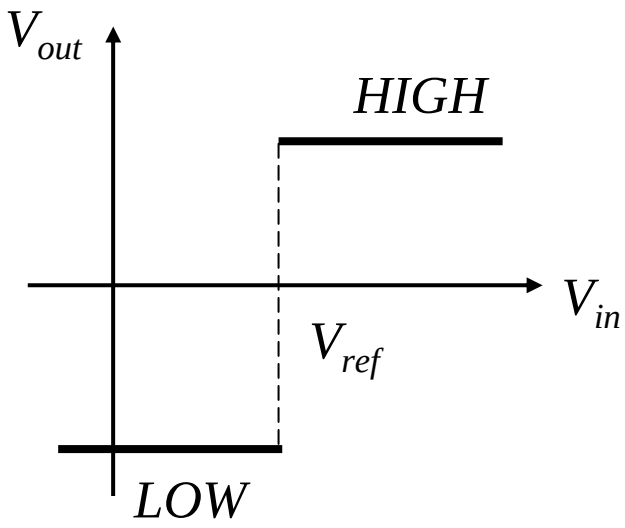


# Comparatore

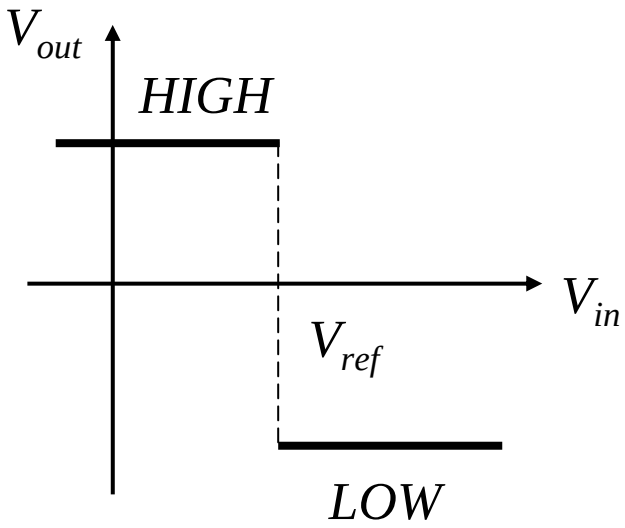



Il segnale d'uscita indica se il valore del segnale d'ingresso è maggiore o minore del segnale di riferimento.
I due ingressi sono normalmente indicati con "+" e "–" ; se il segnale d'ingresso è applicato sull'ingresso "+" il comparatore si dice NON INVERTENTE, se è applicato sull'ingresso "–" il comparatore è detto INVERTENTE
Di solito il segnale di riferimento è costante.
Il segnale d'uscita è tipicamente un segnale digitale ovvero ha due soli valori, HIGH o LOW.
Il comparatore può essere considerato il più semplice convertitore A/D che esista, un convertitore a 1 bit.

# Caratteristica $V_{in}$-$V_{out}$ di un comparatore

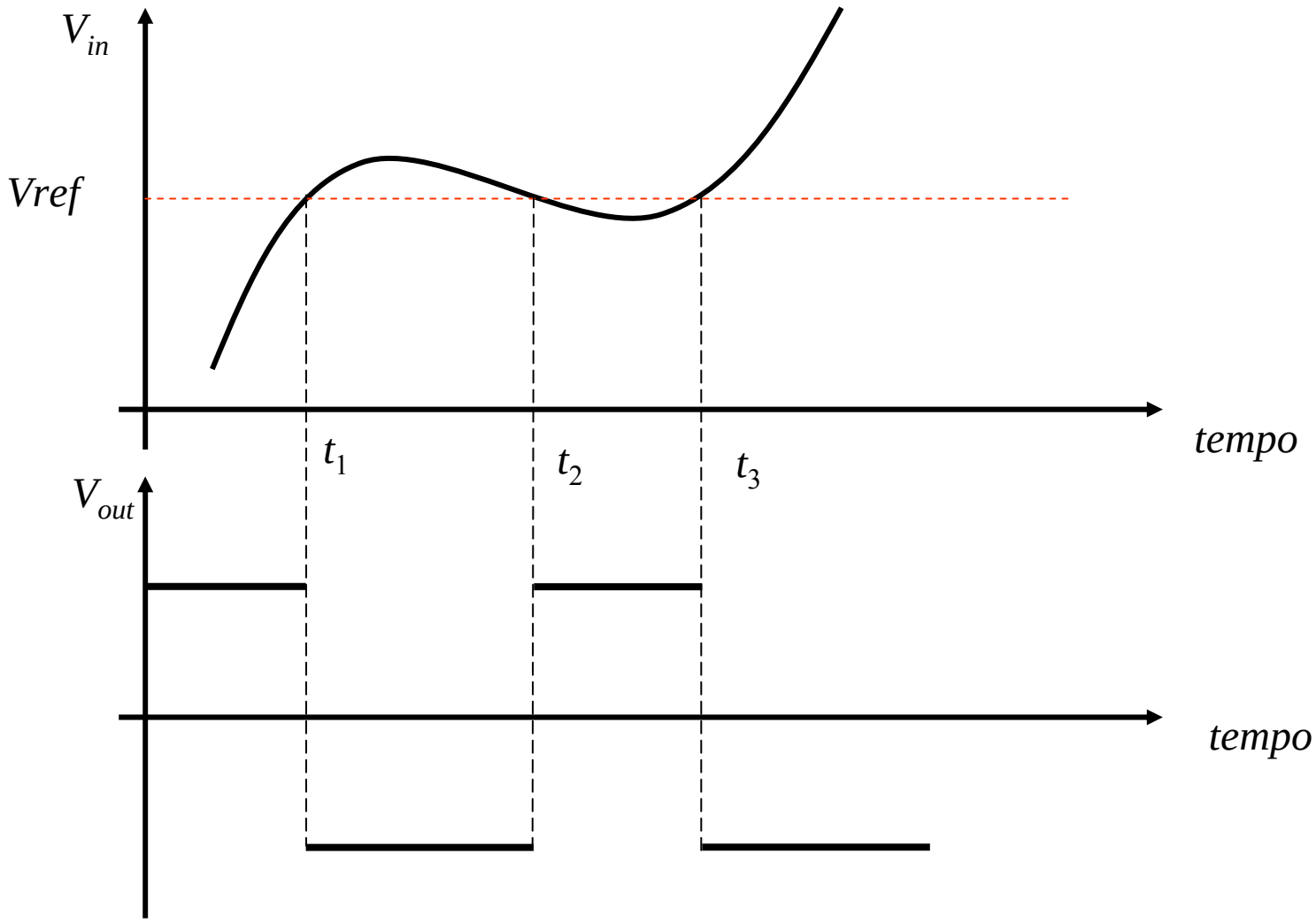



Comparatore
NON INVERTENTE

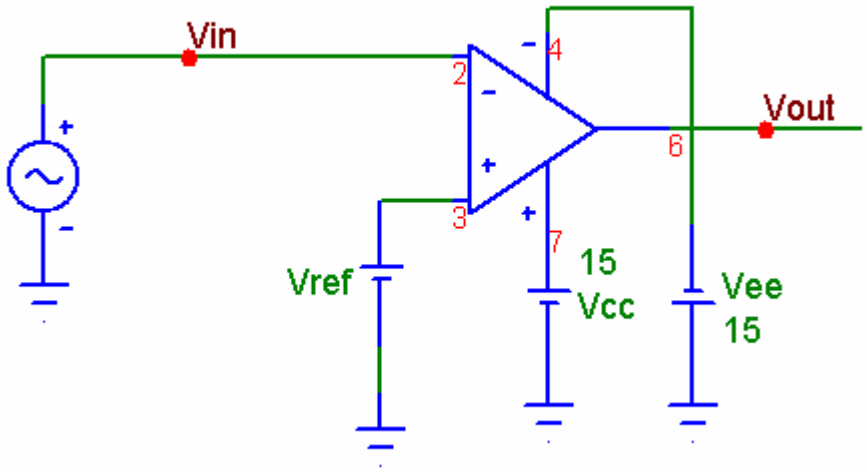



Comparatore
INVERTENTE

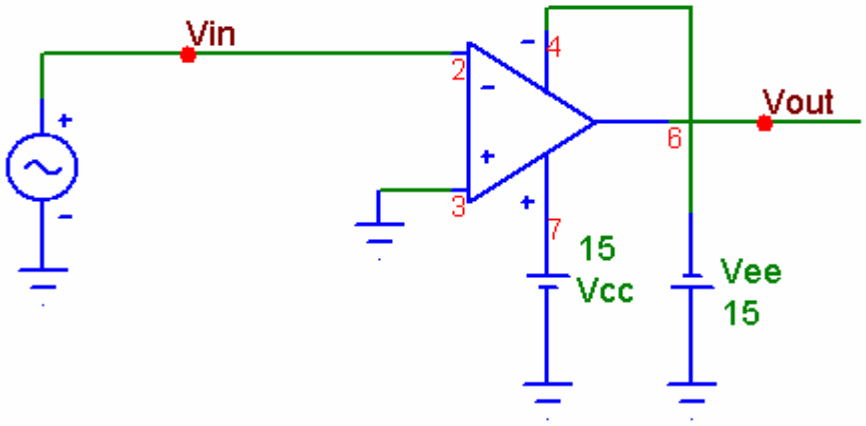
# Comparatore invertente



# Comparatore invertente

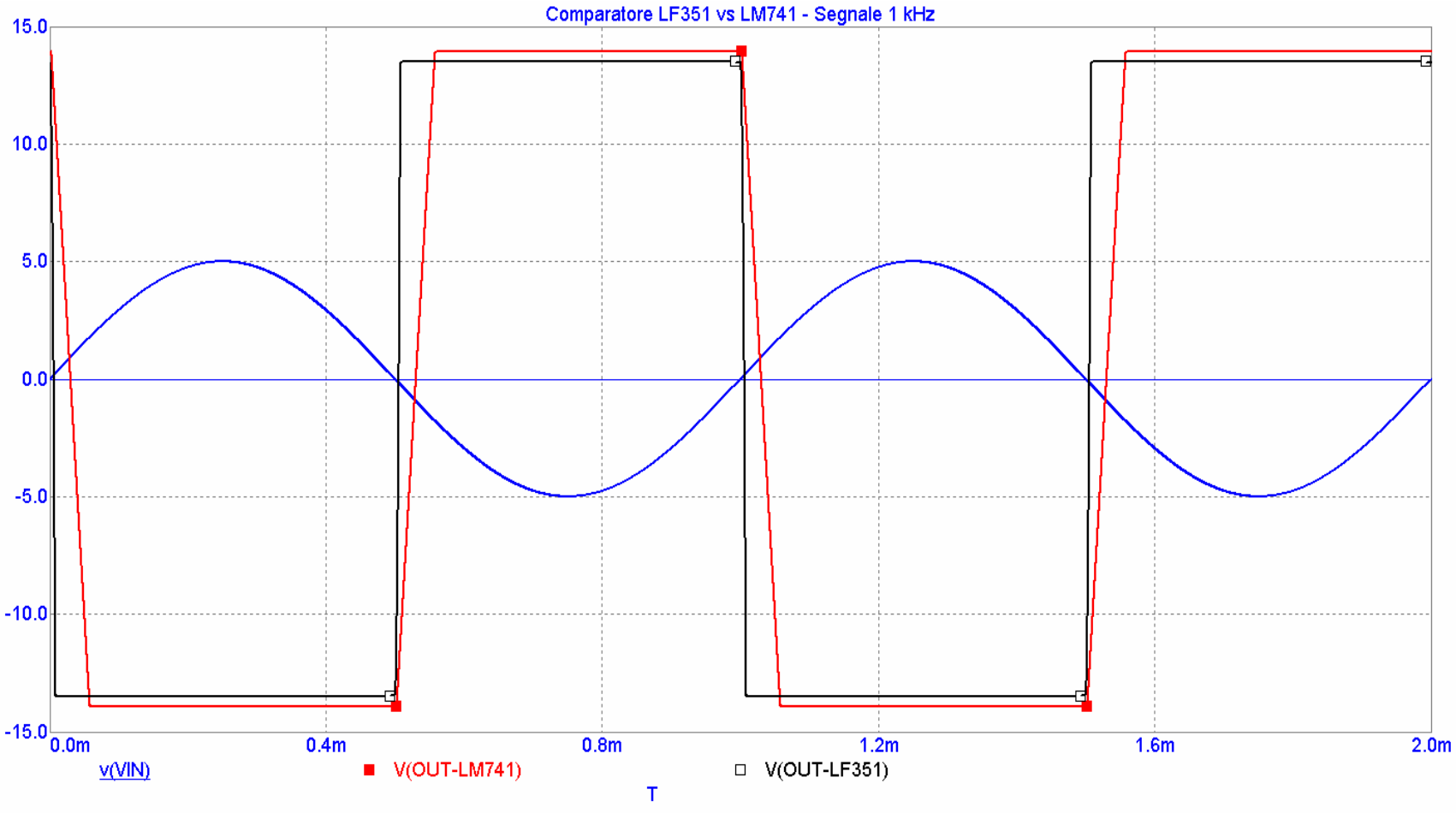



Comparatore di livello



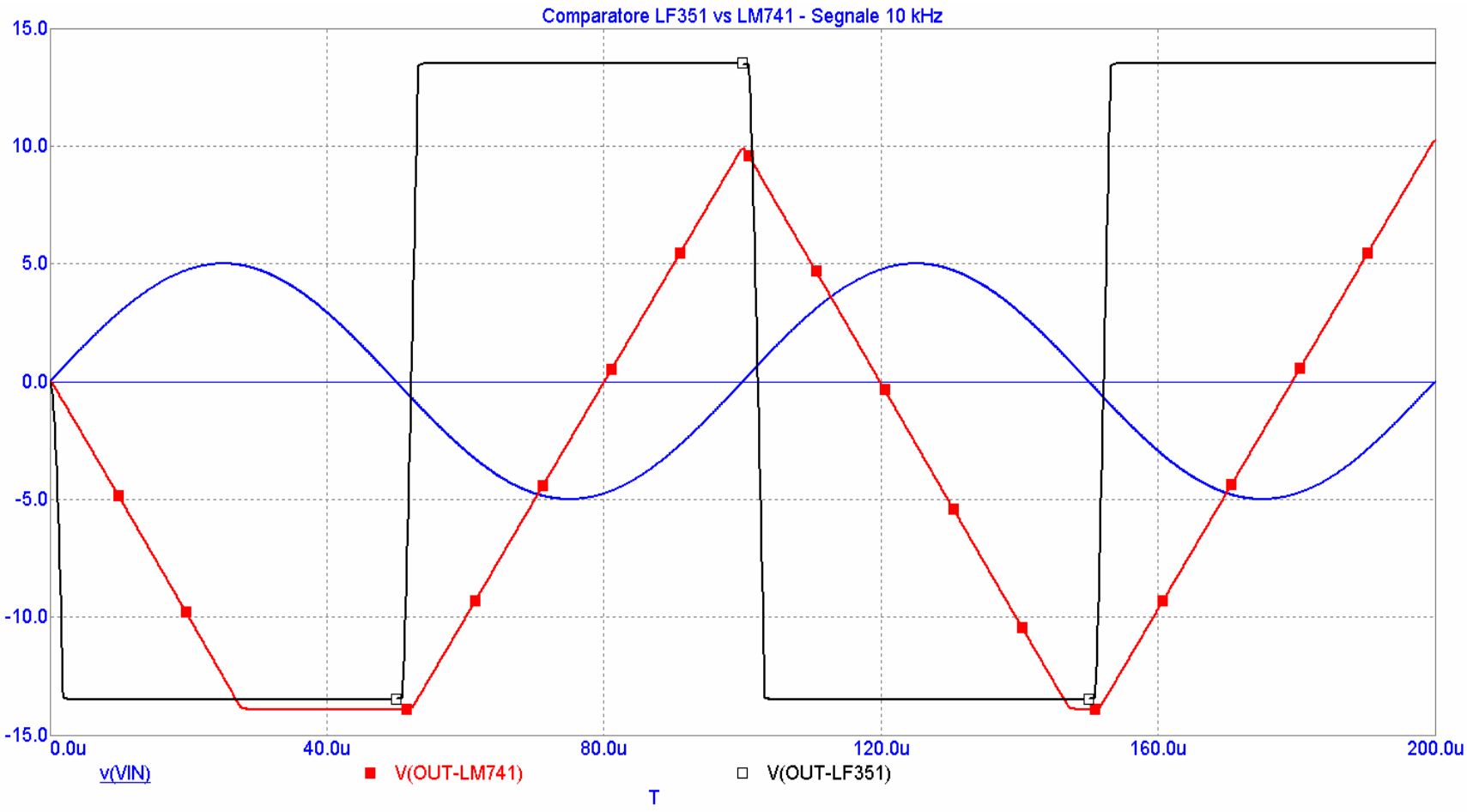

Rivelatore di zero

# Comparatore invertente
# LF351 vs LM741



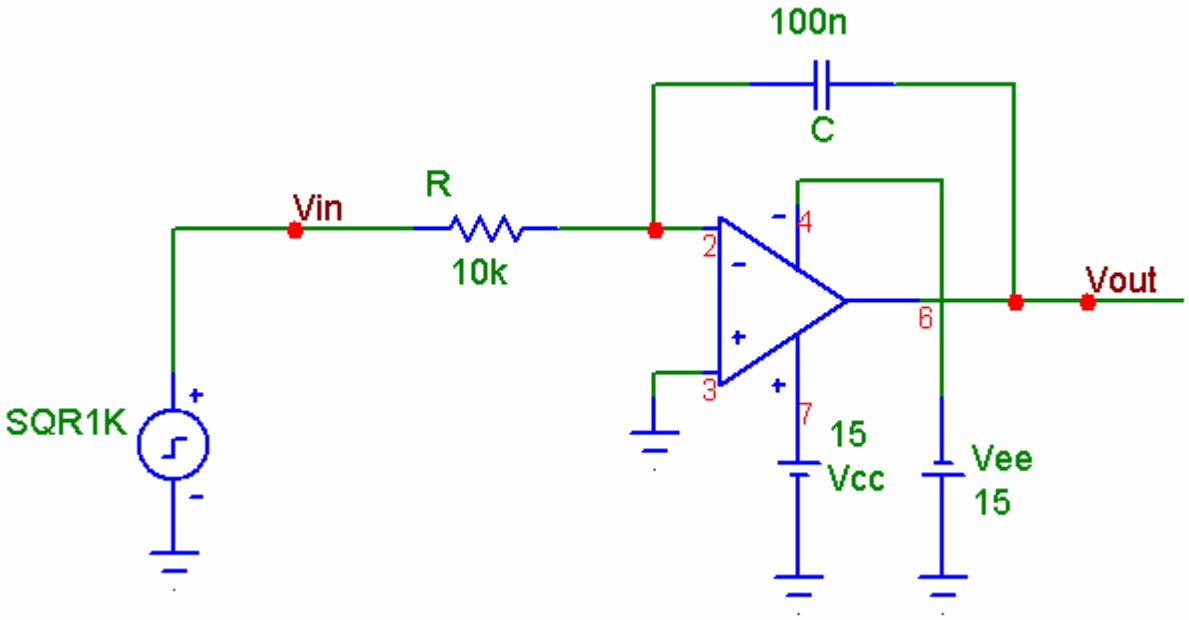

***Segnale applicato : Onda sinusoidale a 1kHz***

# Comparatore invertente
# LF351 vs LM741




***Segnale applicato : Onda sinusoidale a 10 kHz***

# Integratore invertente (ideale)

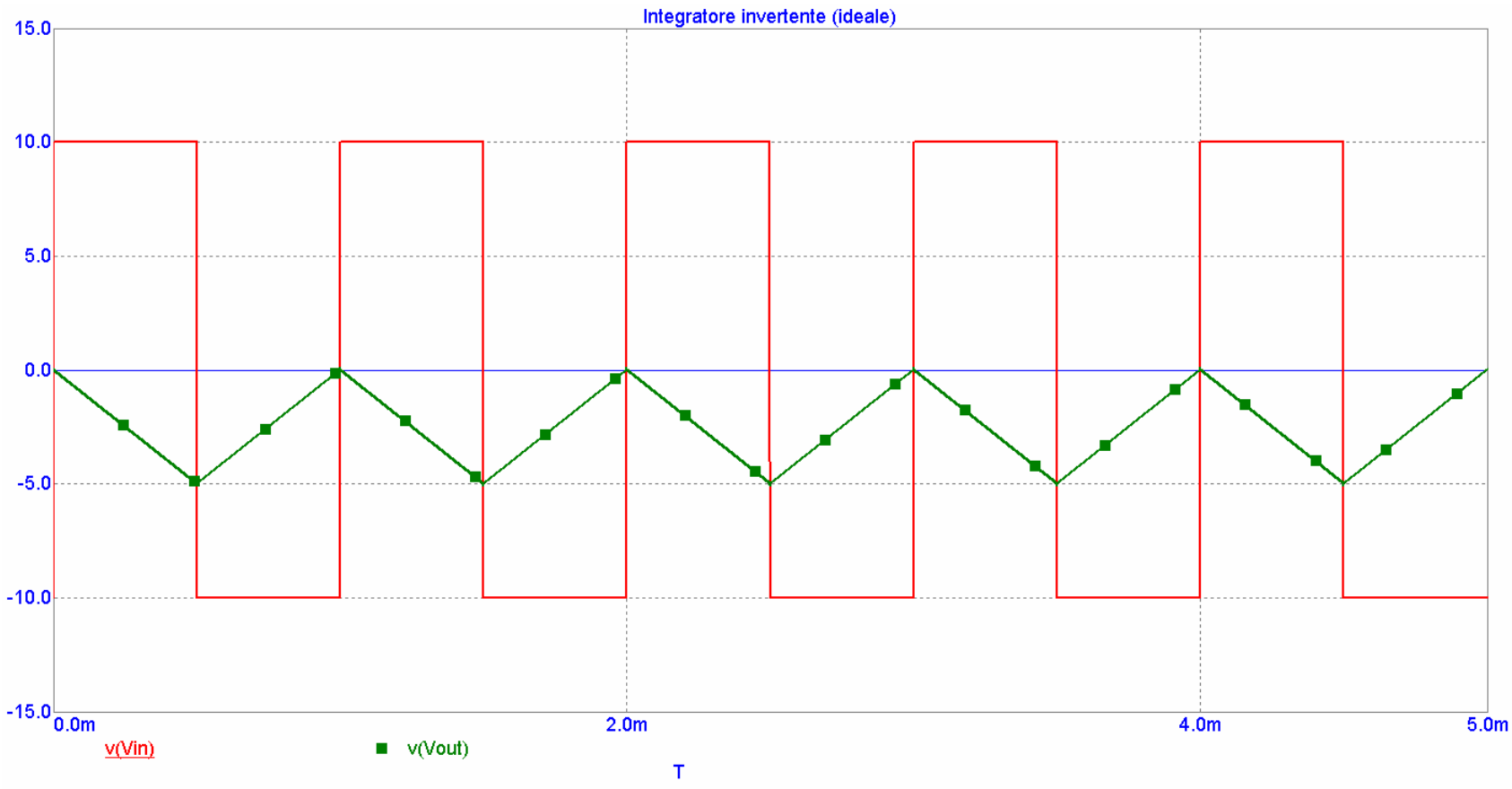



***Segnale applicato***

- Onda quadra bipolare
- Ampiezza ±10 V
- Periodo 1 ms

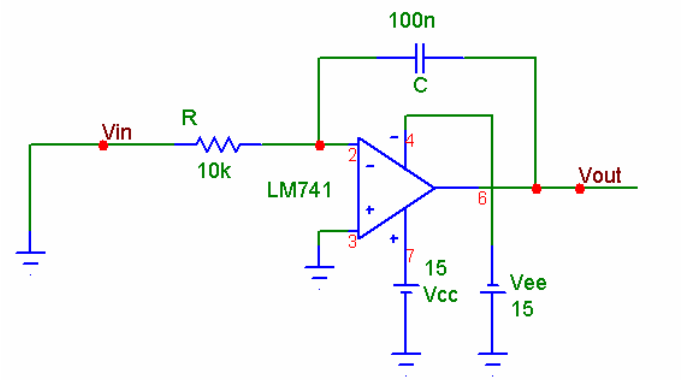
$$V_{out} = -\frac{1}{RC}\int V_{in}(t)dt$$

# Integratore invertente (ideale)

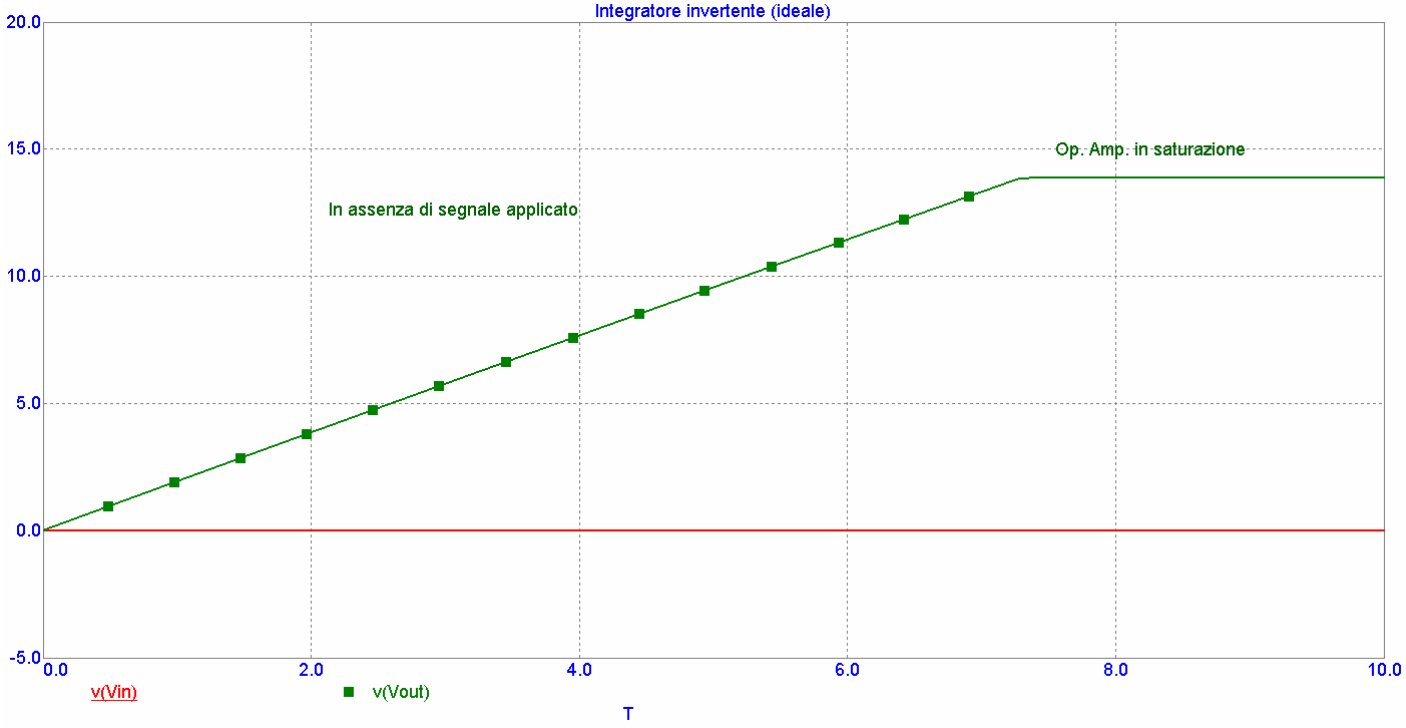



In realtà non funziona
Sensibile ai disturbi in bassa frequenza

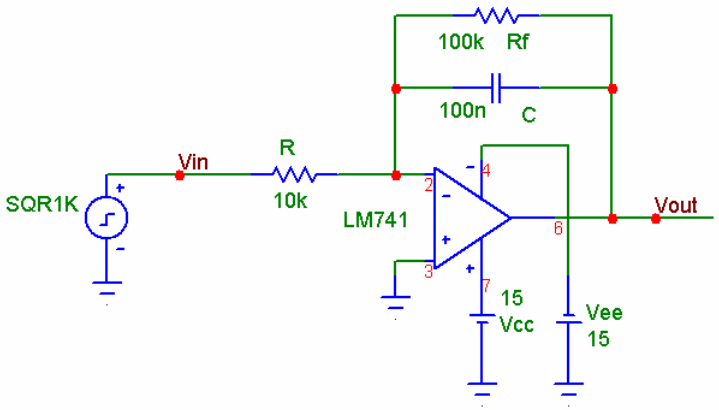
# Integratore invertente (ideale)



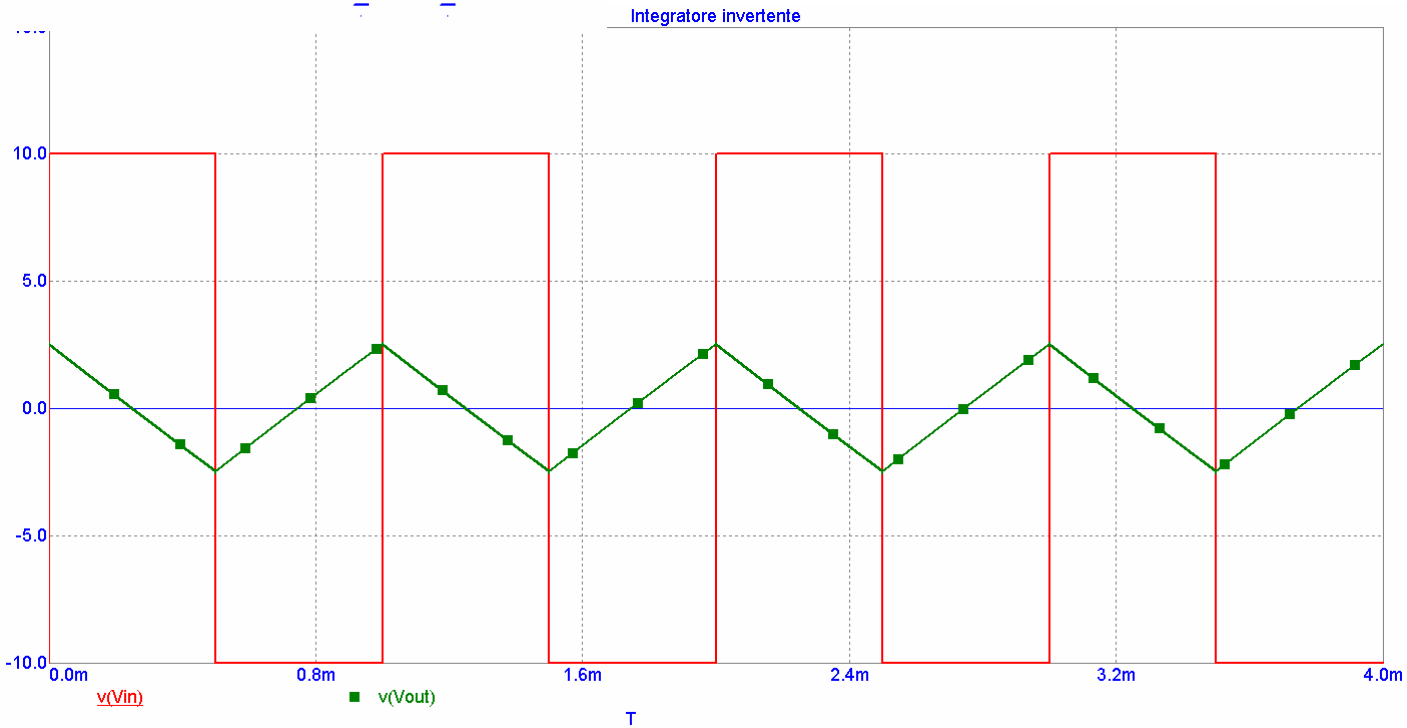

La tensione di offset dell'Op.Amp. porta inevitabilmente l'Op.Amp. in saturazione



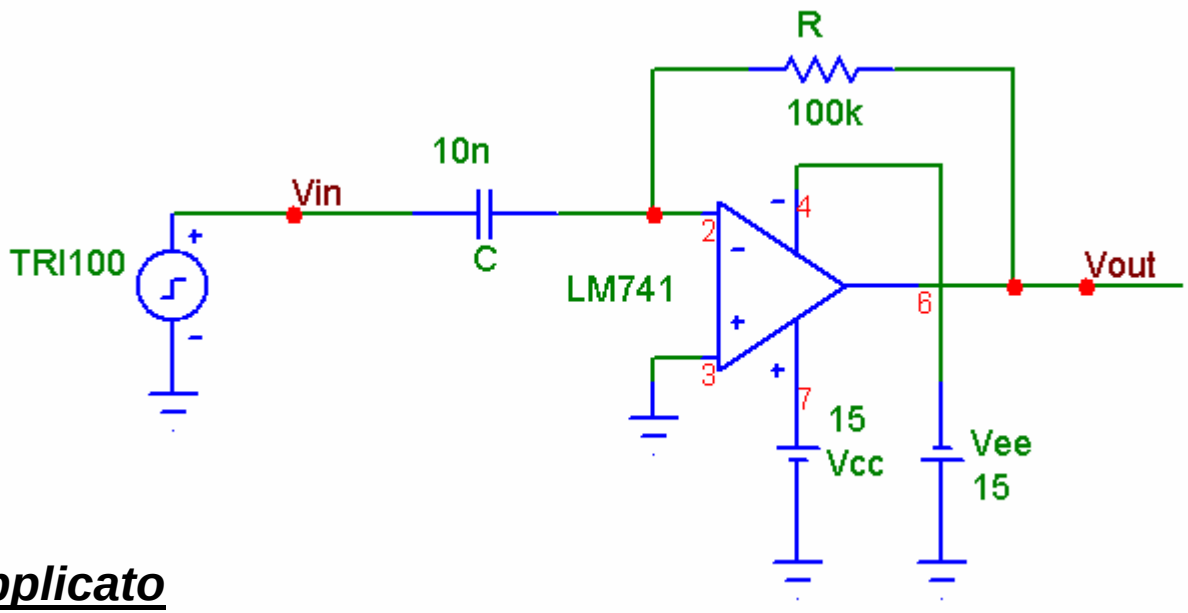
# Pseudointegratore invertente (integratore reale)




Si inserisce la resistenza $R_f$



# Derivatore invertente (ideale)

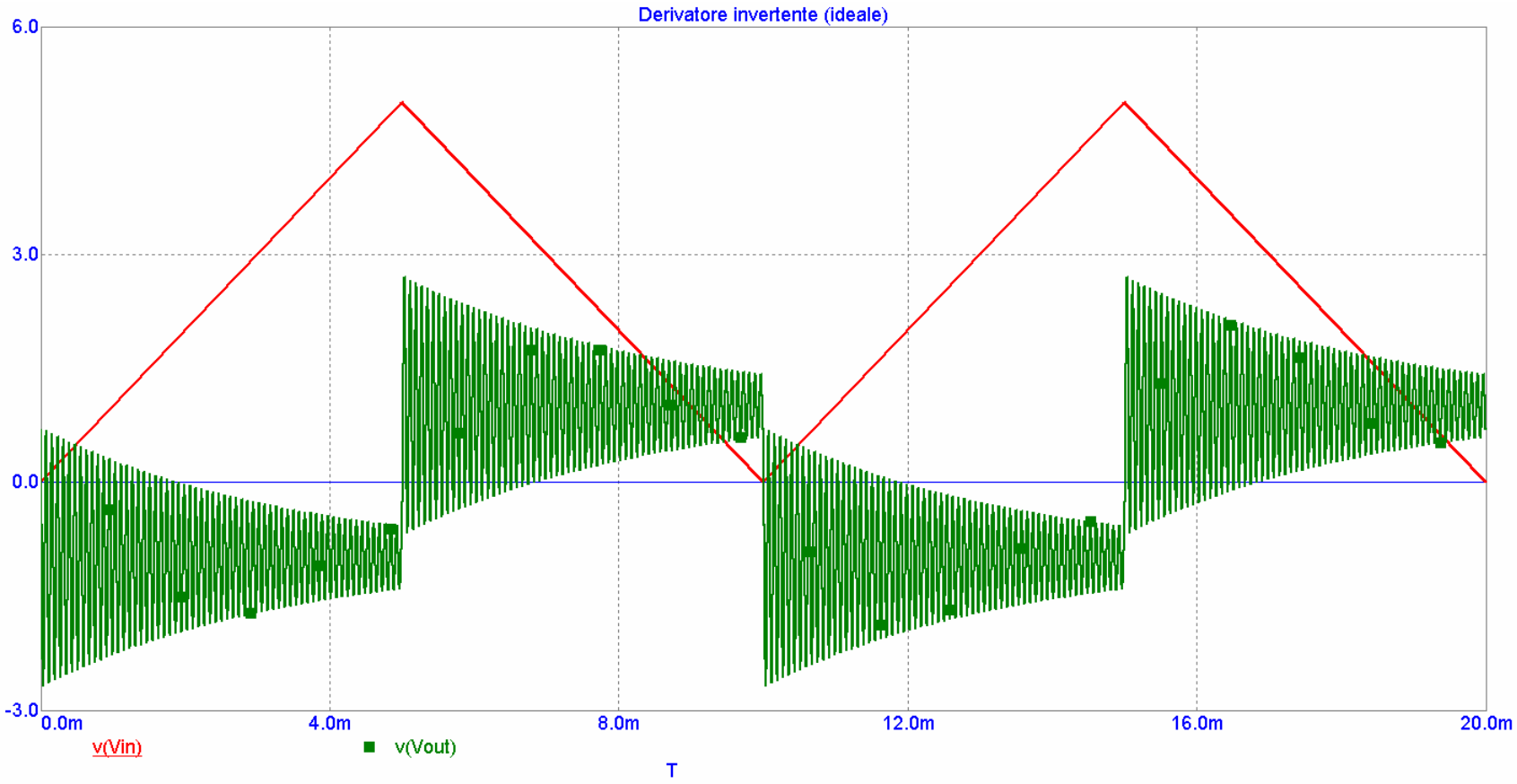



***<u>Segnale applicato</u>***

- Onda triangolare unipolare positiva
- Ampiezza 5 V
- Periodo 10 ms

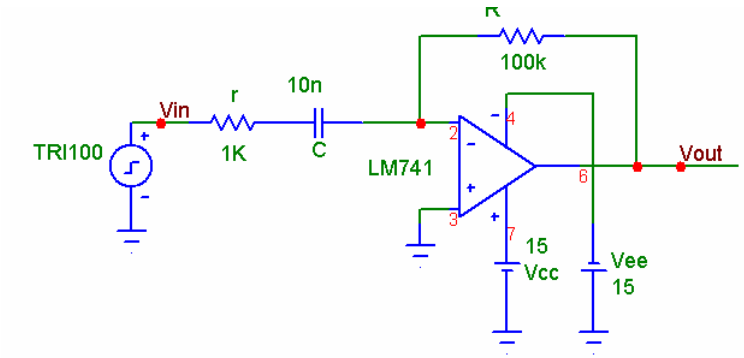
$$V_{out} = -RC\frac{dV_{in}(t)}{dt}$$

# Derivatore invertente (ideale)

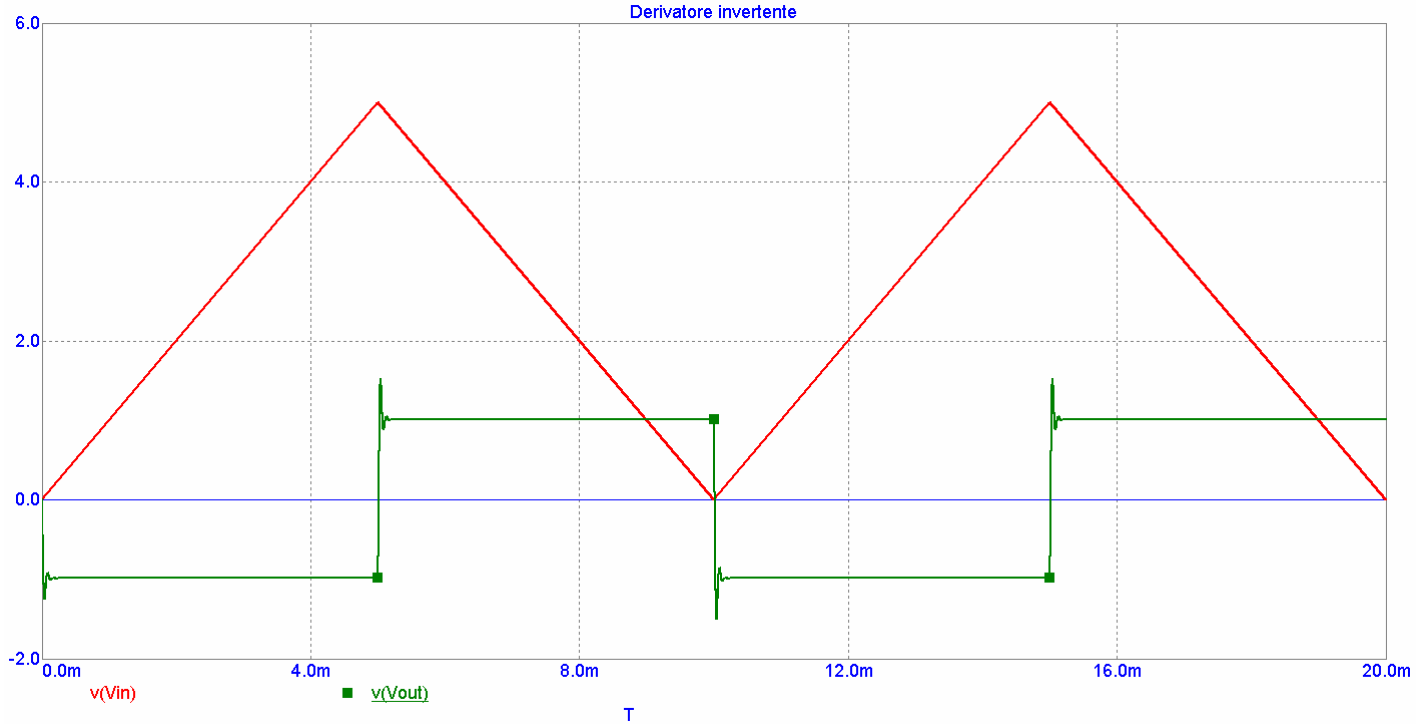



In realtà non funziona
Sensibilissimo ai disturbi in alta frequenza

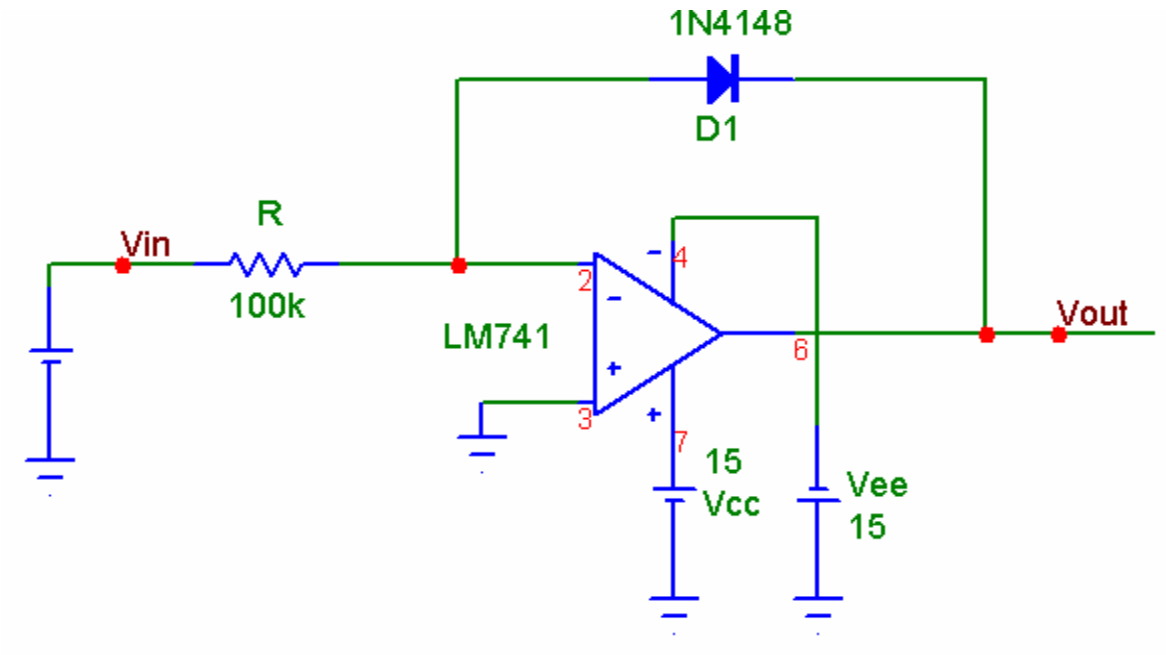
# Pseudoderivatore invertente (derivatore reale)




Si inserisce la resistenza “*r*”



# Amplificatore logaritmico

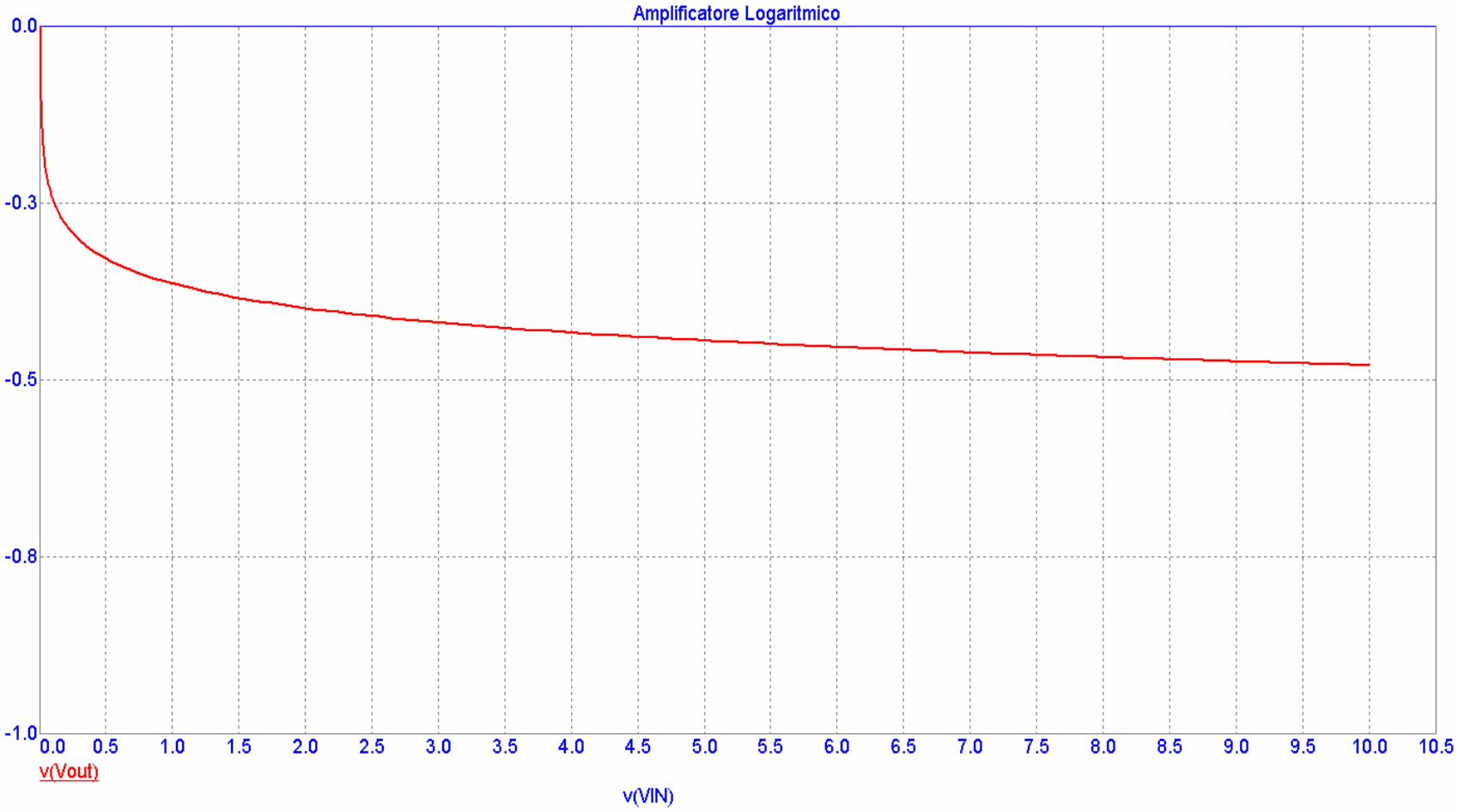



$$I_D = I_0\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

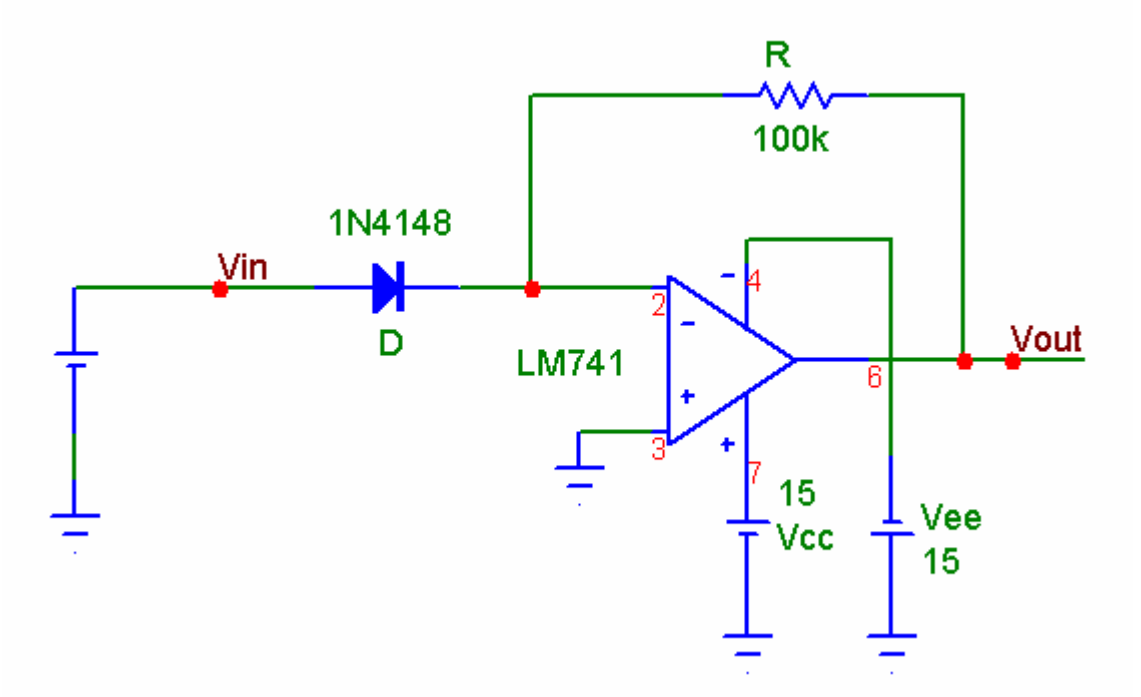
$$V_{out} = -\eta V_T \ln\left(\frac{V_{in}}{RI_0} + 1\right)$$

Con il diodo posizionato in questo verso l'amplificatore funziona solo per segnali d'ingresso positivi

# Amplificatore logaritmico



# Amplificatore esponenziale

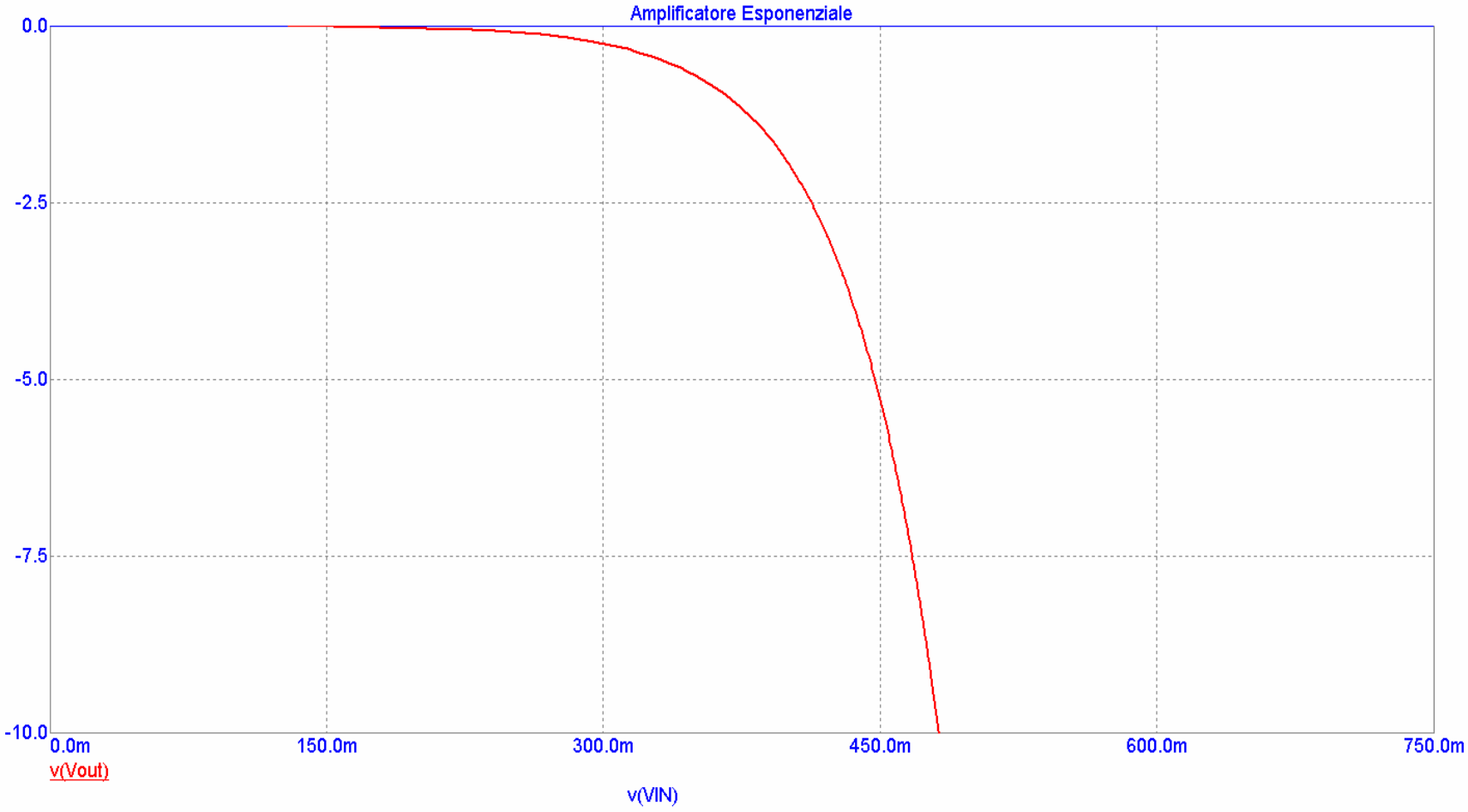



$$I_D = I_0\left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

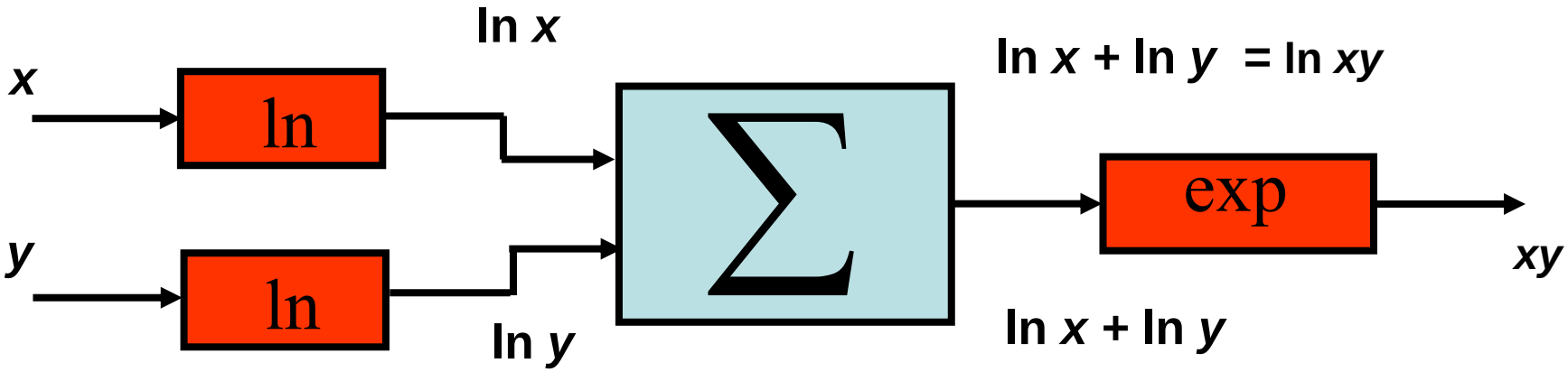
$$V_{out} = -RI_0\left(e^{\frac{V_{in}}{\eta V_T}} - 1\right)$$

Con il diodo posizionato in questo verso l'amplificatore funziona solo per segnali d'ingresso positivi

# Amplificatore esponenziale

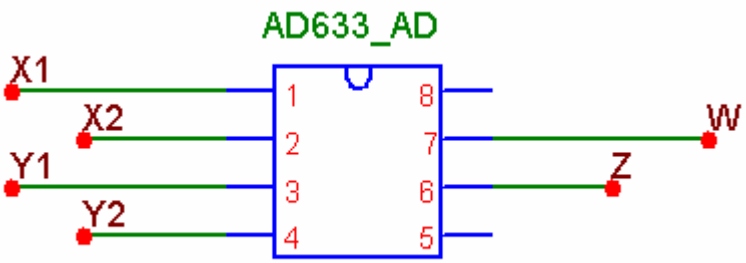


# Moltiplicatore




Schema a blocchi funzionali

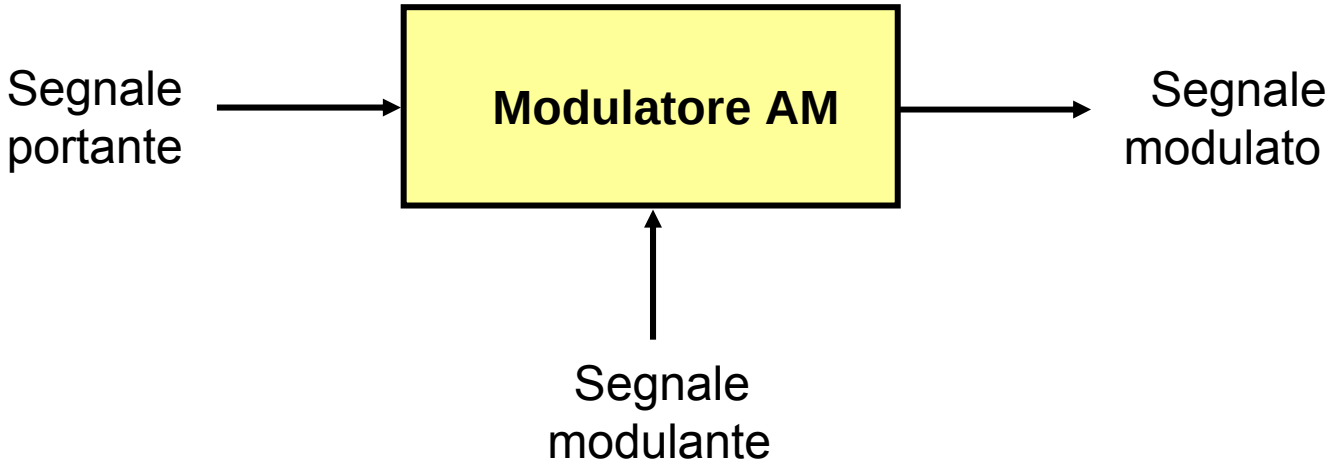
# Moltiplicatore commerciale AD633




- X1 e X2 sono una coppia di ingressi differenziali
- Y1 e Y2 sono una coppia di ingressi differenziali
- Z è un ingresso singolo
- W è l'uscita

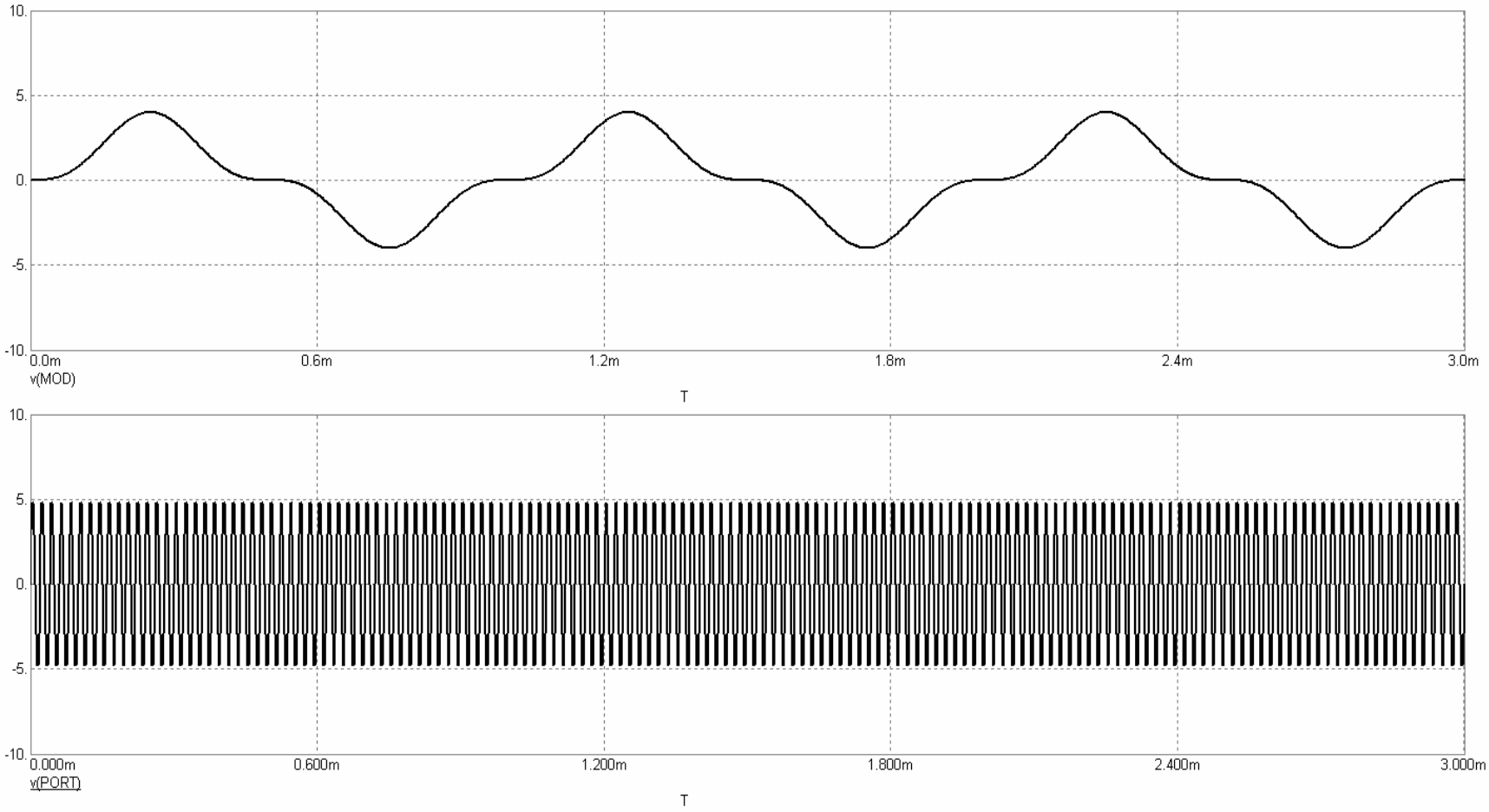
$$W = \frac{(X1 - X2)(Y1 - Y2)}{10} + Z$$

# Modulazione AM

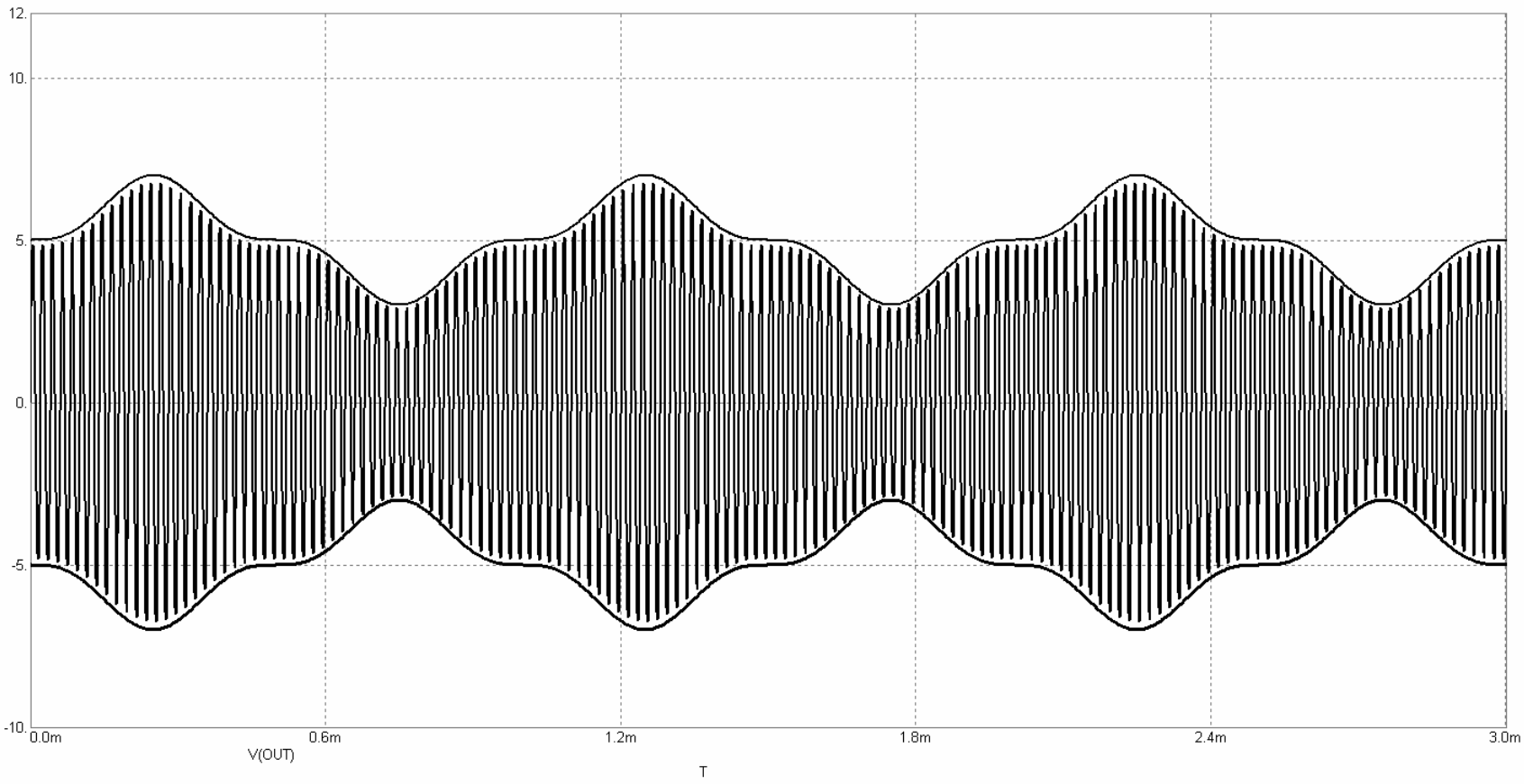



Segnale portante : forma sinusoidale
Segnale modulante : forma qualsiasi
Segnale modulato : l'inviluppo della portante ha forma del segnale modulante

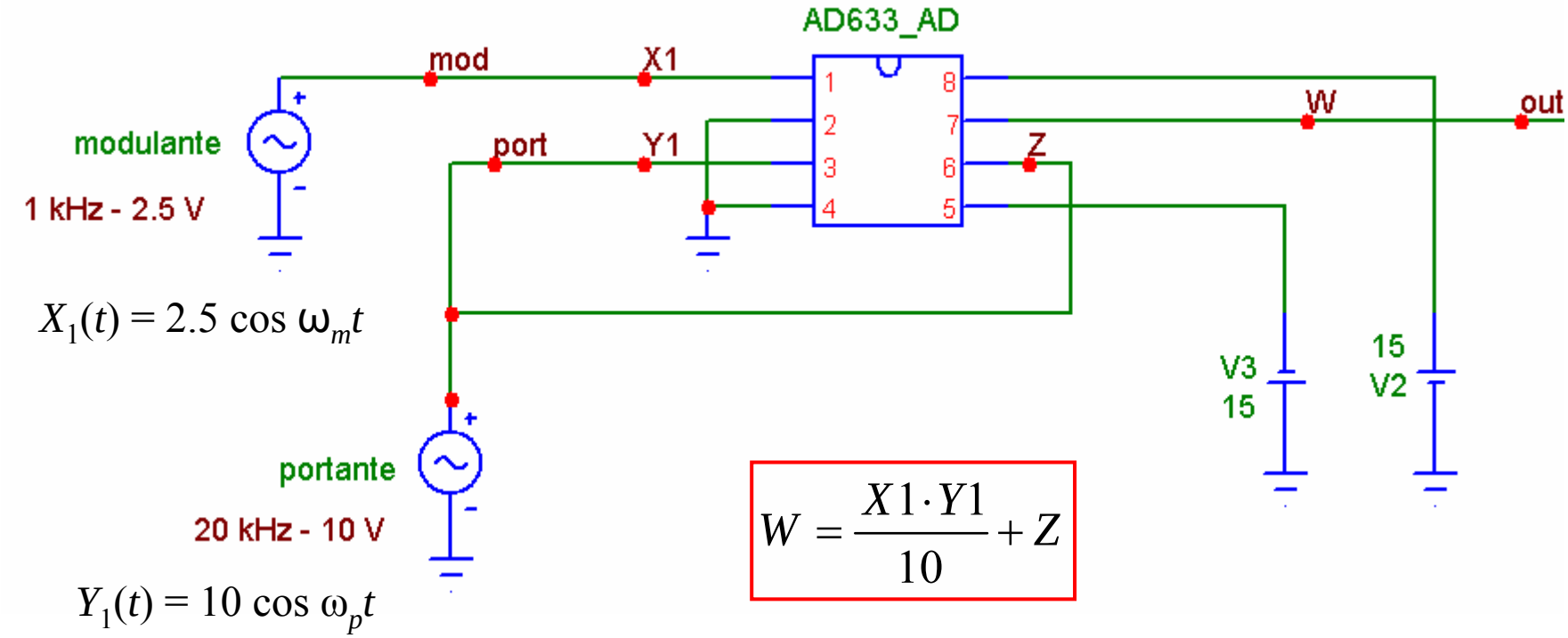
# Segnale portante e segnale modulante



# Segnale modulato AM



# Modulazione AM con moltiplicatore




$X_1(t) = 2.5 \cos \omega_m t$

$Y_1(t) = 10 \cos \omega_p t$

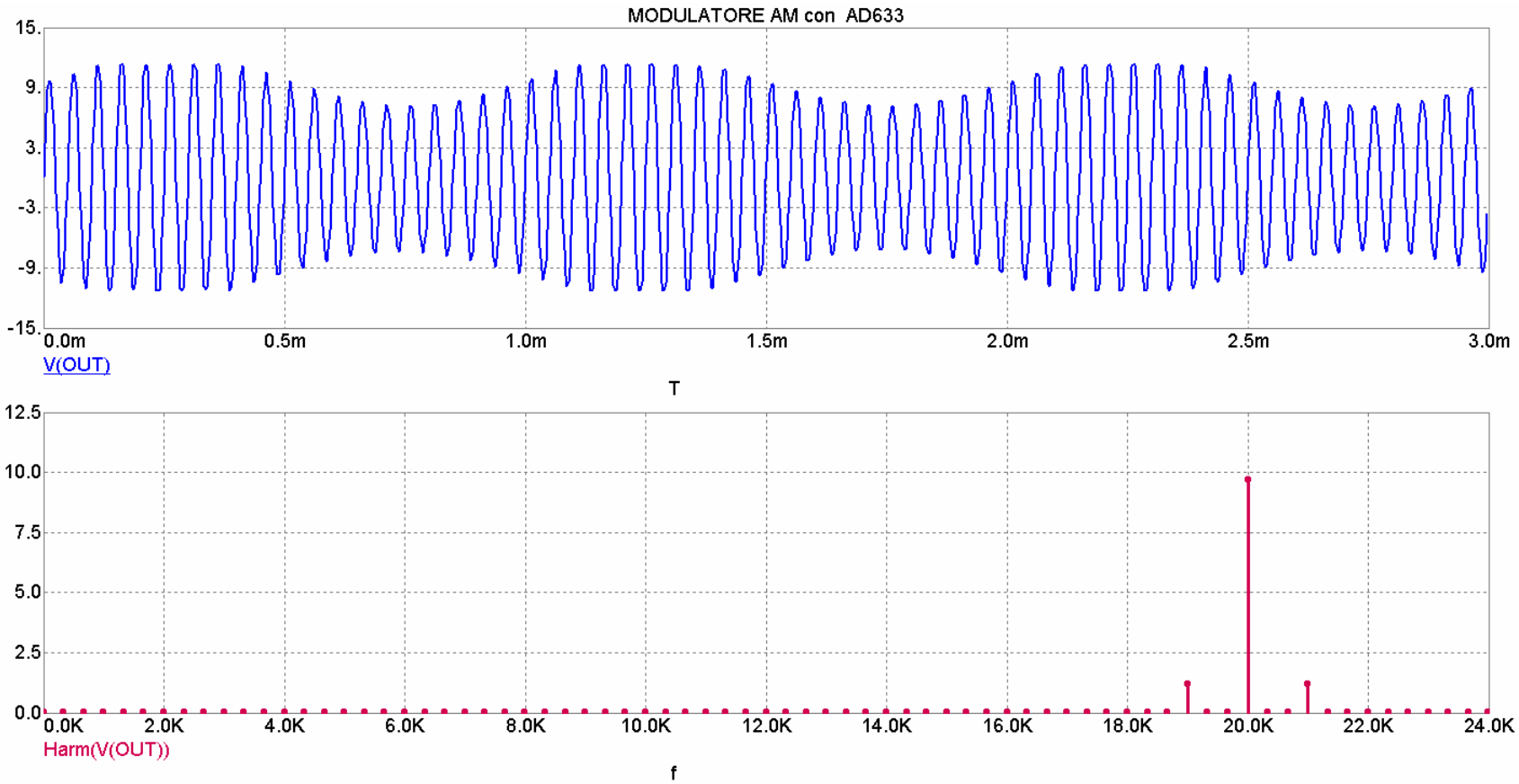
$$W = \frac{X1 \cdot Y1}{10} + Z$$

$W1(t) = 2.5 \cos \omega_m t \cos \omega_p t + 10 \cos \omega_p t$ dalla formula del dispositivo

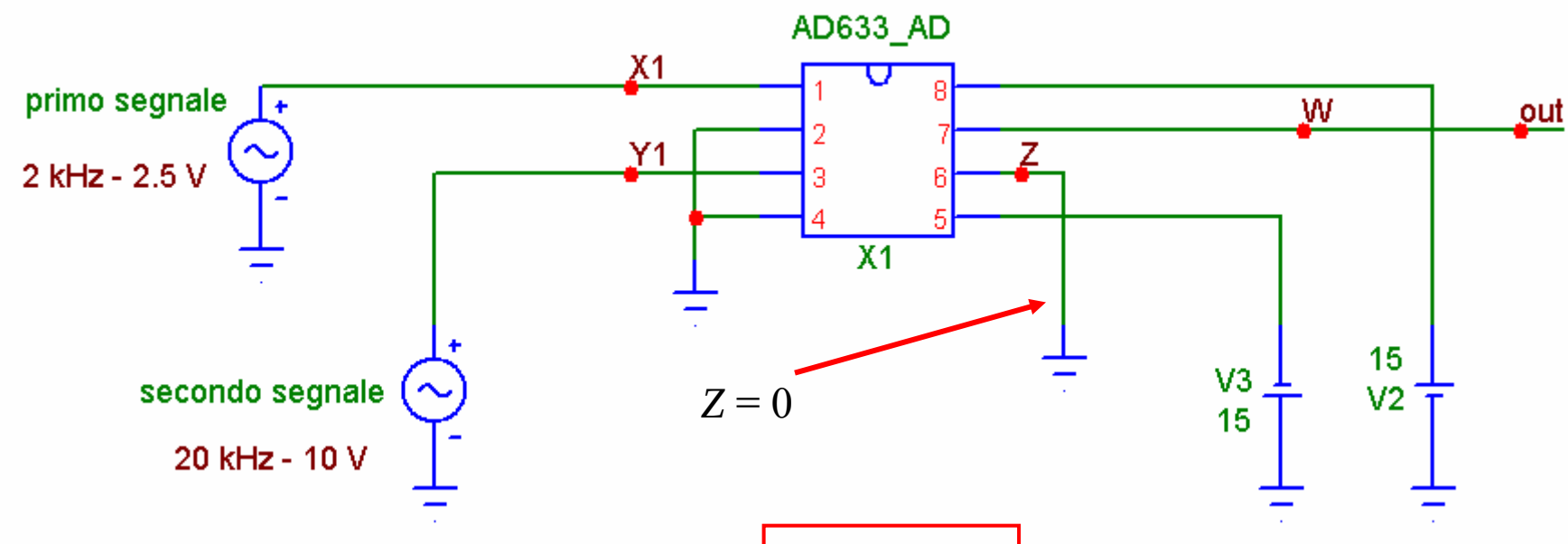
$W2\ (t) = 10 \cos \omega_p t\ \ (1 + 0.25 \cos \omega_m t\ )$ forma tipica di segnale modulato AM

$W3(t) = 10 \cos \omega_p t + \ 1.25 \cos (\omega_p + \omega_m)\ t + 1.25 \cos (\omega_p - \omega_m)\ t$ formula che evidenzia le componenti spettrali

# Modulazione AM come moltiplicazione



# Moltiplicazione di due segnali




$$W = \frac{X1 \cdot Y1}{10}$$

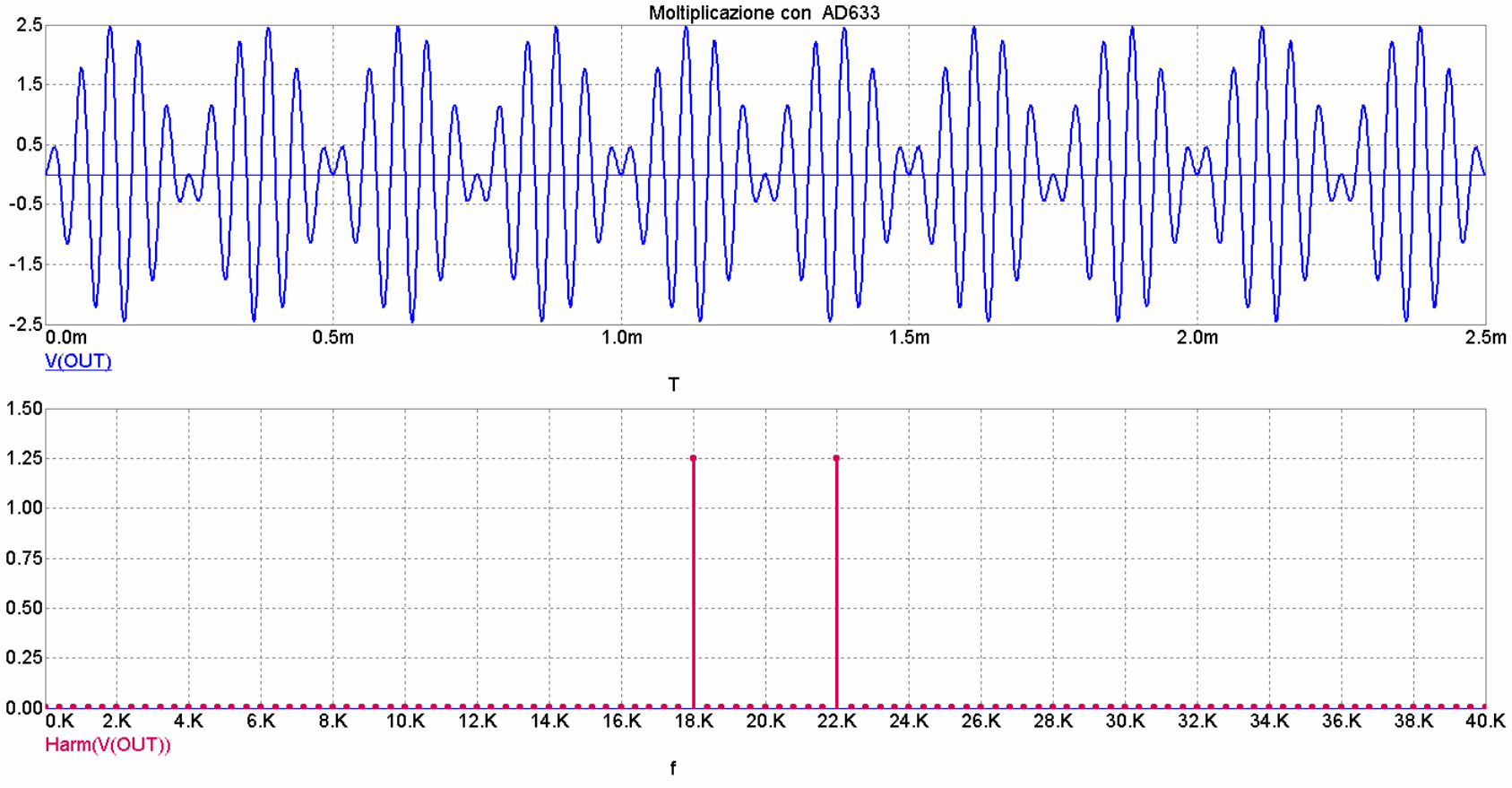
$X_1(t) = 2.5 \cos \omega_m t$

$Y_1(t) = 10 \cos \omega_p t$

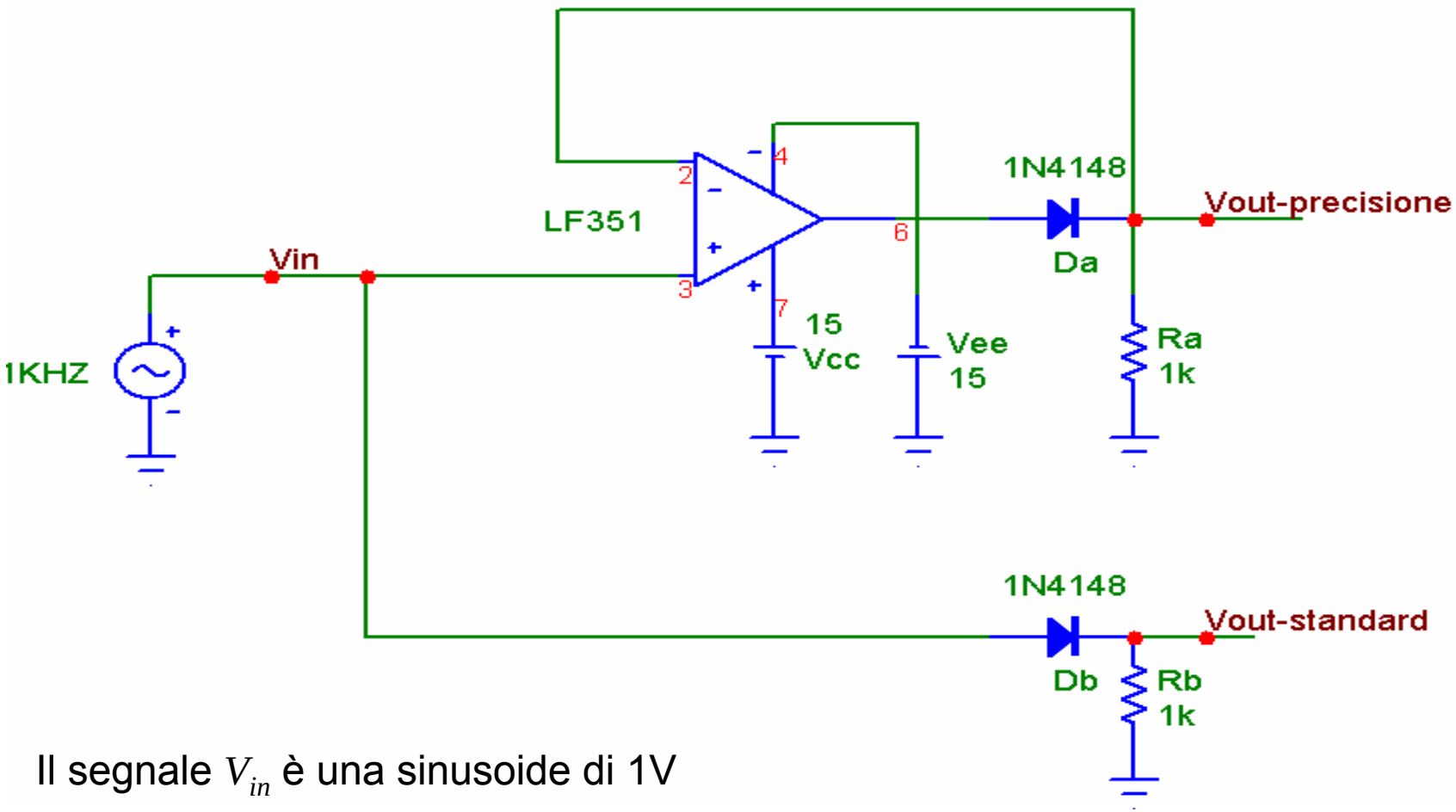
$W1(t) = 2.5 \cos \omega_m t \cos \omega_p t$ dalla formula del dispositivo

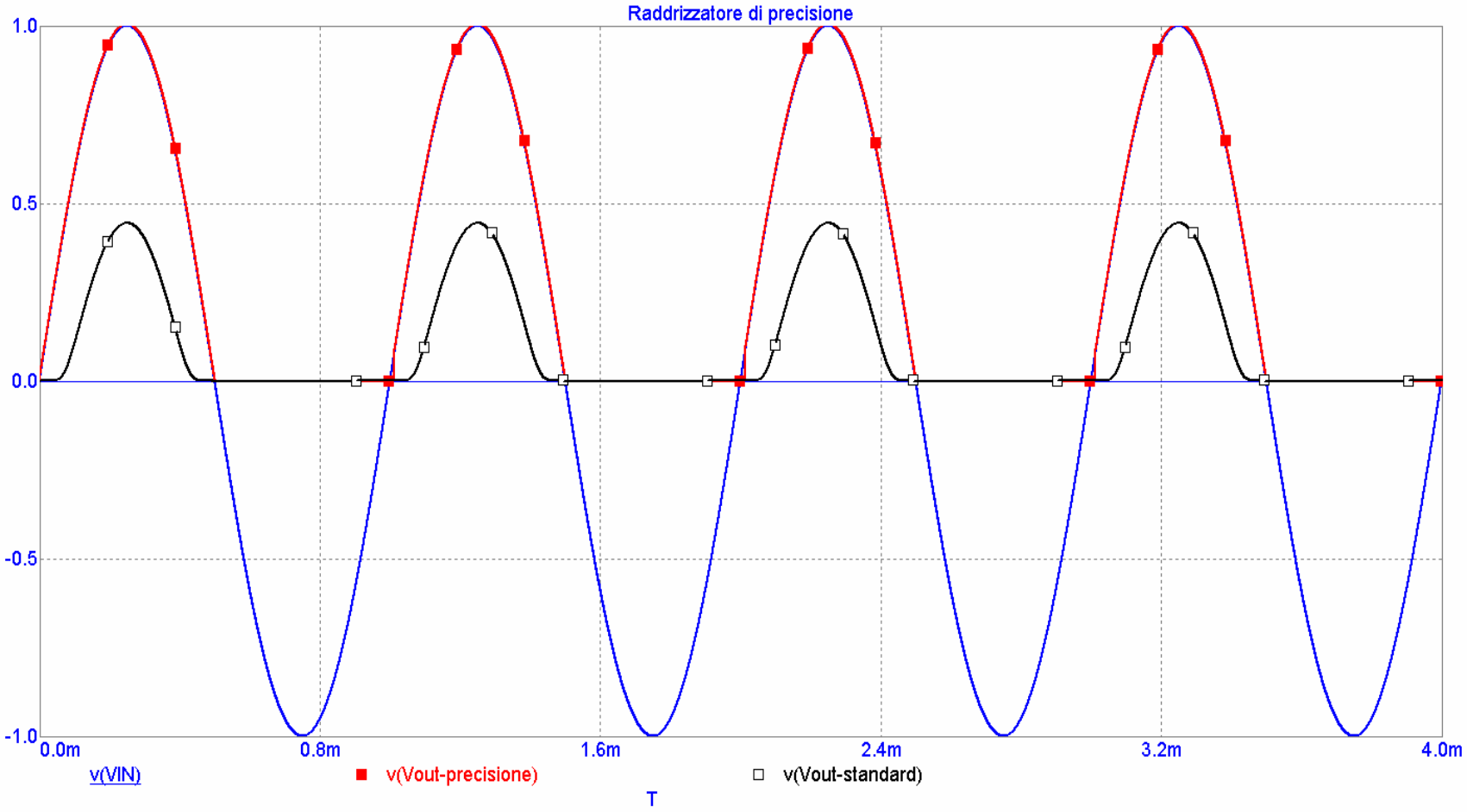
$W2(t) = 1.25 \cos (\omega_p + \omega_m)\, t + 1.25 \cos (\omega_p - \omega_m)\, t$ formula che evidenzia le componenti spettrali

# Moltiplicazione di due segnali



# Diodo di precisione




Il segnale $V_{in}$ è una sinusoide di 1V di ampiezza e frequenza di 1 kHz

# Diodo di precisione