



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

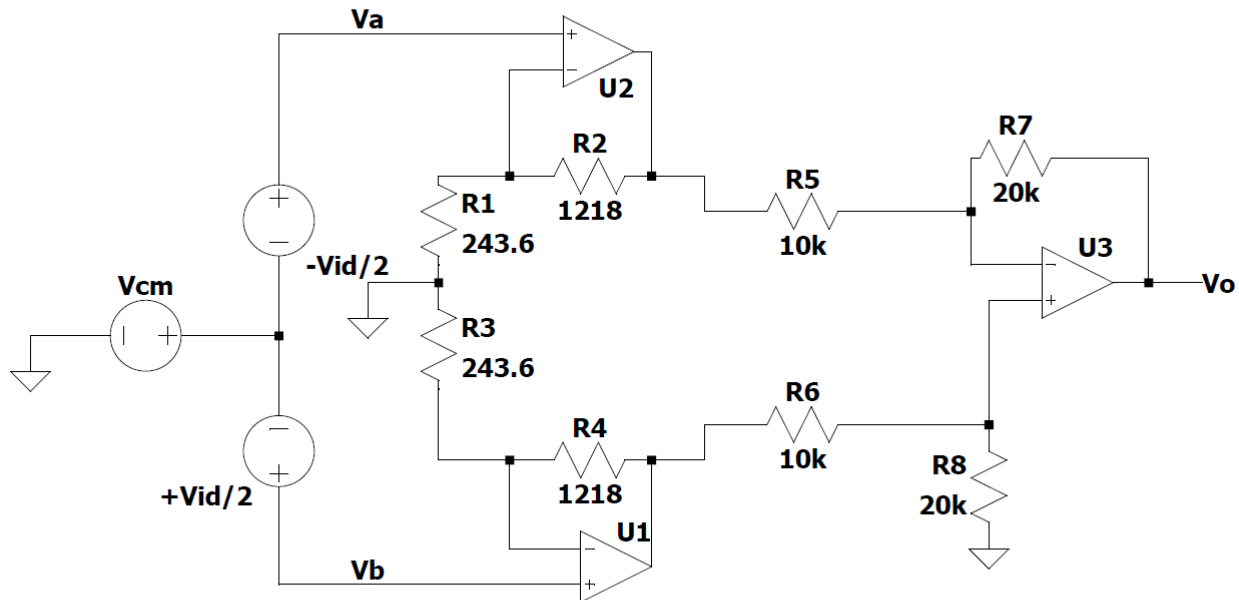
PRIMA RELAZIONE SPICE

Circuiti ad amplificatori operazionali

Fondamenti di Elettronica 21/22

Autore: Christian Marchiori matr. 1218317

Esercizio 1: amplificatori differenziali con operazionale



--- C:\Users\chris\Documents\INGEGNERIA\Elettronica\Progetto1\Spice1_1.asc ---

1.1 Assumere per R2 ed R4 un valore in Ohm pari al proprio numero di matricola diviso per mille (senza cifre decimali). Trovare il valore di R1=R3 corrispondente ad un guadagno in tensione del primo stadio pari a 6

Soluzione:

Assumiamo $R2 = R4 = 1218 \Omega$

Nel primo stadio ci sono due amplificatori non invertenti ideali in parallelo.

$$A_{U2} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \rightarrow V_{O1} = V_A \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

$$A_{U1} = \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) \rightarrow V_{O2} = V_B \left(1 + \frac{R4}{R3}\right)$$

Il guadagno del primo stadio è:

$$A = \frac{V_{O2}}{V_B} = \frac{V_{O1}}{V_A} = \frac{V_B \left(1 + \frac{R4}{R3}\right)}{V_B} = \frac{V_A \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)}{V_A}$$

Per ipotesi $R2=R4$ e $R1=R3$ quindi: $\left(1 + \frac{R4}{R3}\right) = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$

$$A = \frac{V_{O2}}{V_B} = \frac{V_{O1}}{V_A} = \frac{V_B \left(1 + \frac{R4}{R3}\right)}{V_B} = \frac{V_A \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)}{V_A} = \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) = 6$$

$$6 = \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) \rightarrow R3 = R1 = \frac{R4}{5} = \frac{1218}{5} = 243.6 \Omega$$

1.2 Trovare l'espressione del guadagno differenziale e di modo comune del secondo stadio in funzione di R5, R6, R7, R8 (non sostituire alle resistenze il loro valore numerico)

Soluzione:

Considerando V_{O1} e V_{O2} come ingressi del circuito

$$V_0 = A_d V_d + A_{CM} V_{CM} = A_d (V_{O2} - V_{O1}) + A_{CM} \left(\frac{V_{O1} + V_{O2}}{2}\right)$$

$$V_0 - V_X = R7 * i_3 \rightarrow V_0 = V_X + R7 * i_3$$

Sapendo che: $V_X - V_{O1} = R5 * i_3$

$$V_0 = V_X + \frac{R7}{R5} (V_X - V_{O1}) = \left(1 + \frac{R7}{R5}\right) V_X - \frac{R7}{R5} V_{O1}$$

Per il principio di massa virtuale $V_X = V_Y$ e per partitore di tensione $V_Y = V_{O2} \frac{R8}{R6+R8}$

$$V_0 = \left(1 + \frac{R7}{R5}\right) \left(V_{O2} \frac{R8}{R6+R8}\right) - \frac{R7}{R5} V_{O1}$$

Avendo un amplificatore differenziale $V_{O1} = V_{CM} - \frac{V_d}{2}$ e $V_{O2} = V_{CM} + \frac{V_d}{2}$

$$V_0 = \left(\frac{R5+R7}{R5} \frac{R8}{R6+R8}\right) \left(V_{CM} + \frac{V_d}{2}\right) - \frac{R7}{R5} \left(V_{CM} - \frac{V_d}{2}\right)$$

$$V_0 = \left(\frac{R5+R7}{R5} \frac{R8}{R6+R8} - \frac{R7}{R5}\right) V_{CM} + \frac{1}{2} \left(\frac{R5+R7}{R5} \frac{R8}{R6+R8} + \frac{R7}{R5}\right) V_d$$

Quindi i guadagni comune e differenziale sono:

$$A_{CM} = \frac{R5+R7}{R5} \frac{R8}{R6+R8} - \frac{R7}{R5} = 0 [V/V]$$

$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5+R7}{R5} \frac{R8}{R6+R8} + \frac{R7}{R5}\right) = 2 [V/V]$$

1.3 Trovare l'espressione del guadagno differenziale e di modo comune dell'amplificatore complessivo

Soluzione:

Possiamo partire dal punto 1.2 e quindi prendere $V_{O1} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) V_A$ e $V_{O2} = \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) V_B$.

Sapendo che $V_A = V_{CM} - \frac{V_d}{2}$ e $V_B = V_{CM} + \frac{V_d}{2}$ ottengo $V_{O1} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \left(V_{CM} - \frac{V_d}{2}\right)$ e $V_{O2} = \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) \left(V_{CM} + \frac{V_d}{2}\right)$

Sostituendo queste espressioni nell'equazione di V_o del punto 1.2 ottengo

$$A_{CM} = \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} - \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5}$$

$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} + \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right)$$

Alternativamente calcolo il guadagno analizzando il circuito completo:

$$\text{Consideriamo } V_o = A_d V_d + A_{CM} V_{CM} = A_d (V_B - V_A) + A_{CM} \left(\frac{V_A + V_B}{2} \right)$$

$$V_o - V_X = R7 * i_3 \rightarrow V_o = V_X + R7 * i_3$$

$$\text{Sapendo che: } V_X - V_{O1} = R5 * i_3$$

$$V_o = V_X + \frac{R7}{R5} (V_X - V_{O1}) = \left(1 + \frac{R7}{R5} \right) V_X - \frac{R7}{R5} V_{O1}$$

$$\text{Per il principio di massa virtuale } V_X = V_Y \text{ e per partitore di tensione } V_Y = V_{O2} \frac{R8}{R6 + R8}$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R7}{R5} \right) \left(V_{O2} \frac{R8}{R6 + R8} \right) - \frac{R7}{R5} V_{O1}$$

$$\text{Per partitori di tensione } V_A = V_{O1} \frac{R1}{R1 + R2} \text{ e } V_B = V_{O2} \frac{R3}{R3 + R4}$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R7}{R5} \right) \left(V_B \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} \right) - \frac{R7}{R5} V_A \frac{R1 + R2}{R1}$$

$$= \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} \right) V_B - \left(\frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right) V_A$$

$$\text{Sapendo che } V_A = V_{CM} - \frac{V_d}{2} \text{ e } V_B = V_{CM} + \frac{V_d}{2}$$

$$V_o = \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} \right) \left(V_{CM} + \frac{V_d}{2} \right) - \left(\frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right) \left(V_{CM} - \frac{V_d}{2} \right)$$

$$= \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} - \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right) V_{CM}$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} + \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right) V_d$$

Quindi i guadagni comune e differenziale sono:

$$A_{CM} = \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} - \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5}$$

$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} + \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right)$$

1.4 Ripetere il calcolo del guadagno differenziale e di modo comune complessivi dopo aver posto $R7=R8=20 \text{ kohm}$ e $R5=R6=10 \text{ kohm}$

Soluzione:

$$A_{CM} = \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} - \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} = \frac{30k}{10k} \frac{1461.6}{243.6} \frac{20k}{30k} - \frac{20k * 1461.6}{2436k} = 0 [V/V]$$

$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} + \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{30k}{10k} \frac{1461.6}{243.6} \frac{20k}{30k} + \frac{20k * 1461.6}{2436k} \right) = 12 [V/V]$$

1.5 Calcolare il guadagno differenziale e di modo comune complessivi dopo aver posto $R7=22 \text{ kohm}$, $R8=20 \text{ kohm}$ e $R5=R6=10 \text{ kohm}$

Soluzione:

$$A_{CM} = \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} - \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} = \frac{32k}{10k} \frac{1461.6}{243.6} \frac{20k}{30k} - \frac{22k * 1461.6}{2436k} = -\frac{2}{5} [V/V]$$

$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R3 + R4}{R3} \frac{R8}{R6 + R8} + \frac{R7(R1 + R2)}{R1R5} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{32k}{10k} \frac{1461.6}{243.6} \frac{20k}{30k} + \frac{22k * 1461.6}{2436k} \right) = 13 [V/V]$$

1.6 Ricavare l'espressione del guadagno differenziale e di modo comune del circuito modificato come nella figura seguente, mantenendo $R2$ e $R4$ pari al valore definito al punto 1.1. La resistenza connessa tra i morsetti invertenti dei due amplificatori del primo stadio vale $2R1$, dove $R1$ è il valore precedentemente definito al punto 1.1.

Soluzione:

$$V_0 - V_X = R7 * i_3 \rightarrow V_0 = V_X + R7 * i_3$$

Sapendo che: $V_X - V_{O1} = R5 * i_3$

$$V_0 = V_X + \frac{R7}{R5} (V_X - V_{O1}) = \left(1 + \frac{R7}{R5} \right) V_X - \frac{R7}{R5} V_{O1}$$

Per il principio di massa virtuale $V_X = V_Y$ e per partitore di tensione $V_Y = V_{O2} \frac{R8}{R6+R8}$

$$V_0 = \left(1 + \frac{R7}{R5} \right) \left(V_{O2} \frac{R8}{R6 + R8} \right) - \frac{R7}{R5} V_{O1}$$

Sapendo che $V_{O1} - V_A = R2 * i_2$ e $V_A - V_B = 2R1 * i_2$

$$V_{O1} = \left(1 + \frac{R2}{2R1} \right) V_A - \frac{R2}{2R1} V_B$$

Sapendo che $V_B - V_{O2} = R4 * i_2$ e $V_A - V_B = 2R1 * i_2$

$$V_{O2} = \left(1 + \frac{R4}{2R1}\right)V_B - \frac{R4}{2R1}V_A$$

Sostituisco, quindi, V_{O1} e V_{O2}

$$V_0 = \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{2R1 + R4}{2R1} + \frac{R2 * R7}{2R1 * R5}\right)V_B - \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{R4}{2R1} + \frac{R7}{R5} \frac{2R1 + R2}{2R1}\right)V_A$$

Quindi i guadagni comune e differenziale sono:

$$A_{CM} = \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{2R1 + R4}{2R1} + \frac{R2 * R7}{2R1 * R5} - \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{R4}{2R1} - \frac{R7}{R5} \frac{2R1 + R2}{2R1}$$

$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{2R1 + R4}{2R1} + \frac{R2 * R7}{2R1 * R5} + \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{R4}{2R1} + \frac{R7}{R5} \frac{2R1 + R2}{2R1} \right)$$

1.7 Calcolare il guadagno differenziale e di modo comune complessivi dopo aver posto
 $R7=22 \text{ kohm}$, $R8=20 \text{ kohm}$ e $R5=R6=10 \text{ kohm}$

Soluzione:

$$A_{CM} = \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{2R1 + R4}{2R1} + \frac{R2 * R7}{2R1 * R5} - \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{R4}{2R1} - \frac{R7}{R5} \frac{2R1 + R2}{2R1}$$

$$= \frac{32k \ 20k \ 1705.2}{10k \ 30k \ 487.2} + 5.5 - \frac{32k \ 20k \ 1218}{10k \ 30k \ 487.2} - 7.7 = \frac{112}{15} + \frac{11}{2} - \frac{16}{3} - \frac{77}{10}$$

$$= -\frac{1}{15} [V/V]$$

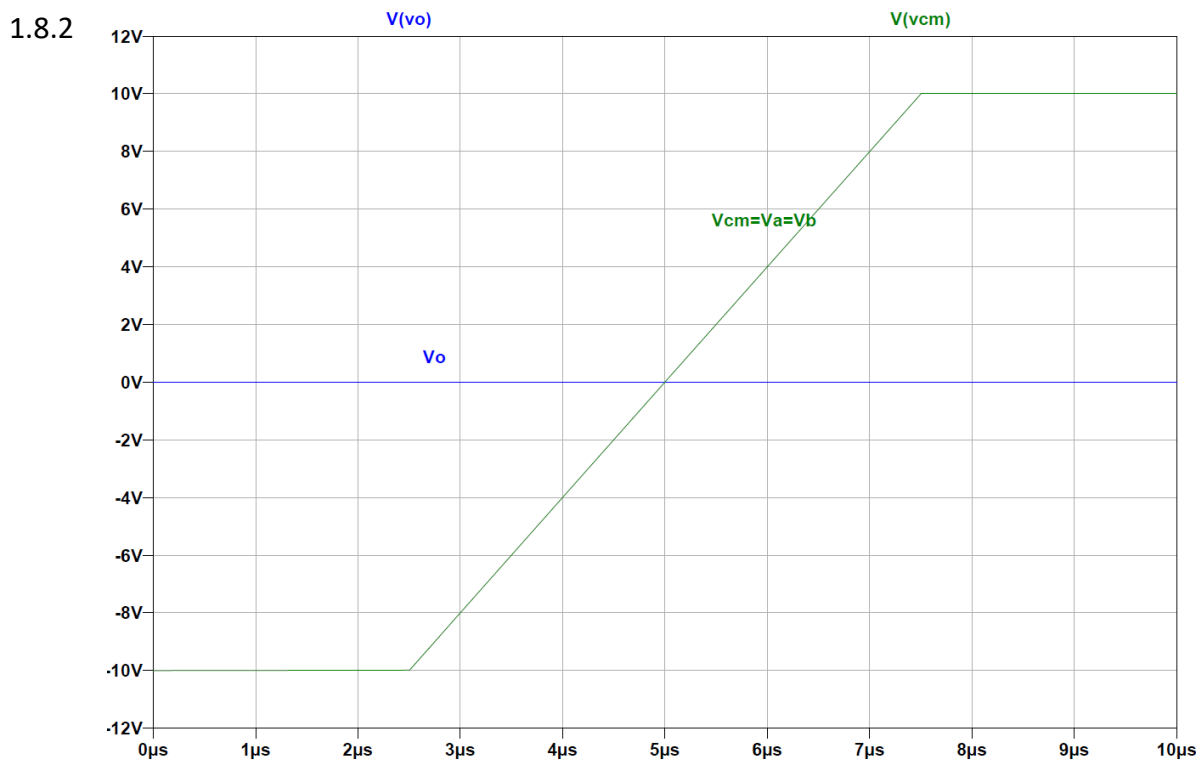
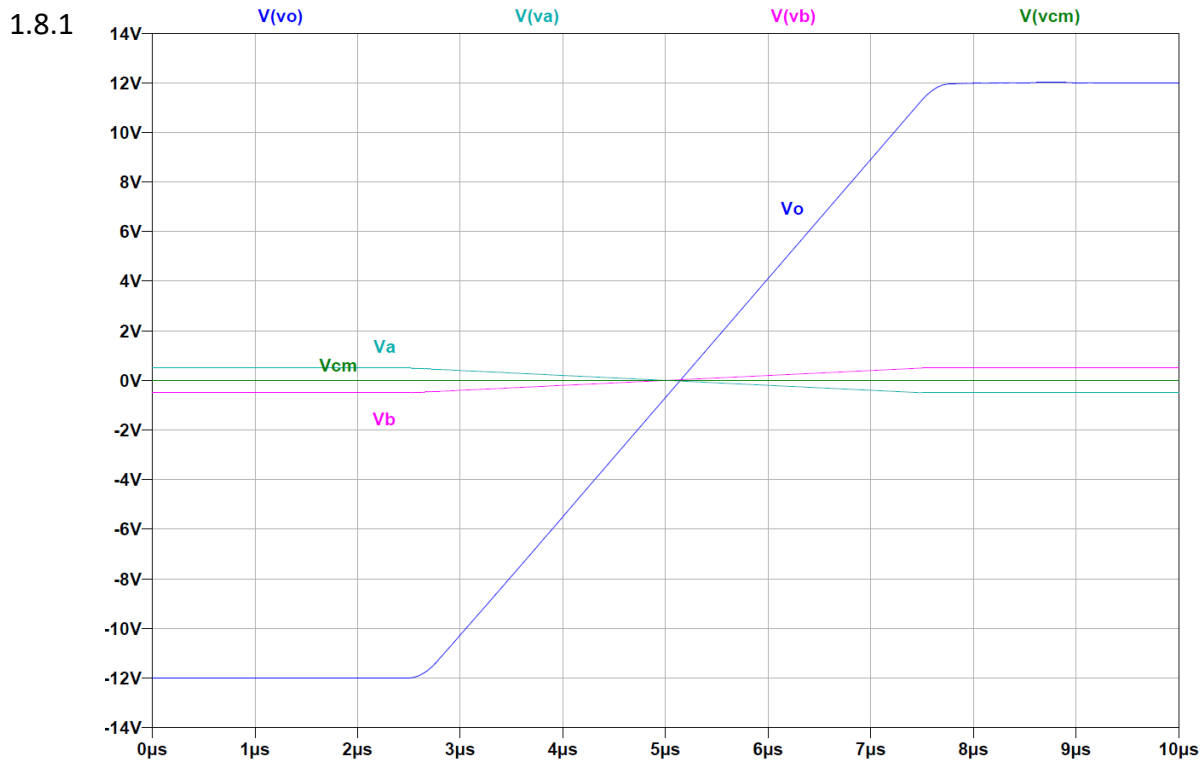
$$A_d = \frac{1}{2} \left(\frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{2R1 + R4}{2R1} + \frac{R2 * R7}{2R1 * R5} + \frac{R5 + R7}{R5} \frac{R8}{R6 + R8} \frac{R4}{2R1} + \frac{R7}{R5} \frac{2R1 + R2}{2R1} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{32k \ 20k \ 1705.2}{10k \ 30k \ 487.2} + 5.5 + \frac{32k \ 20k \ 1218}{10k \ 30k \ 487.2} + 7.7 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{112}{15} + \frac{11}{2} + \frac{16}{3} + \frac{77}{10} \right)$$

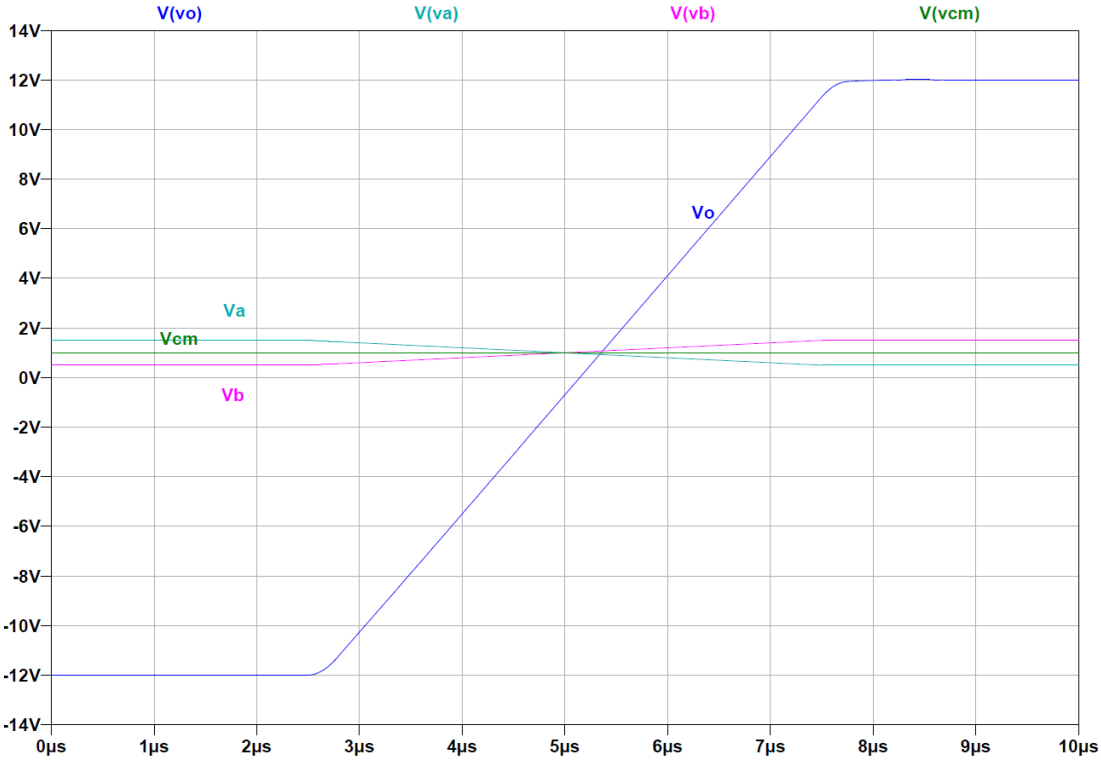
$$= 13 [V/V]$$

1.8 Prendendo come riferimento i circuiti definiti ai punti precedenti 1.5 e 1.7, simulare la tensione di uscita nei due amplificatori e riportare in un grafico la tensione di uscita in funzione della tensione di ingresso nei seguenti casi:

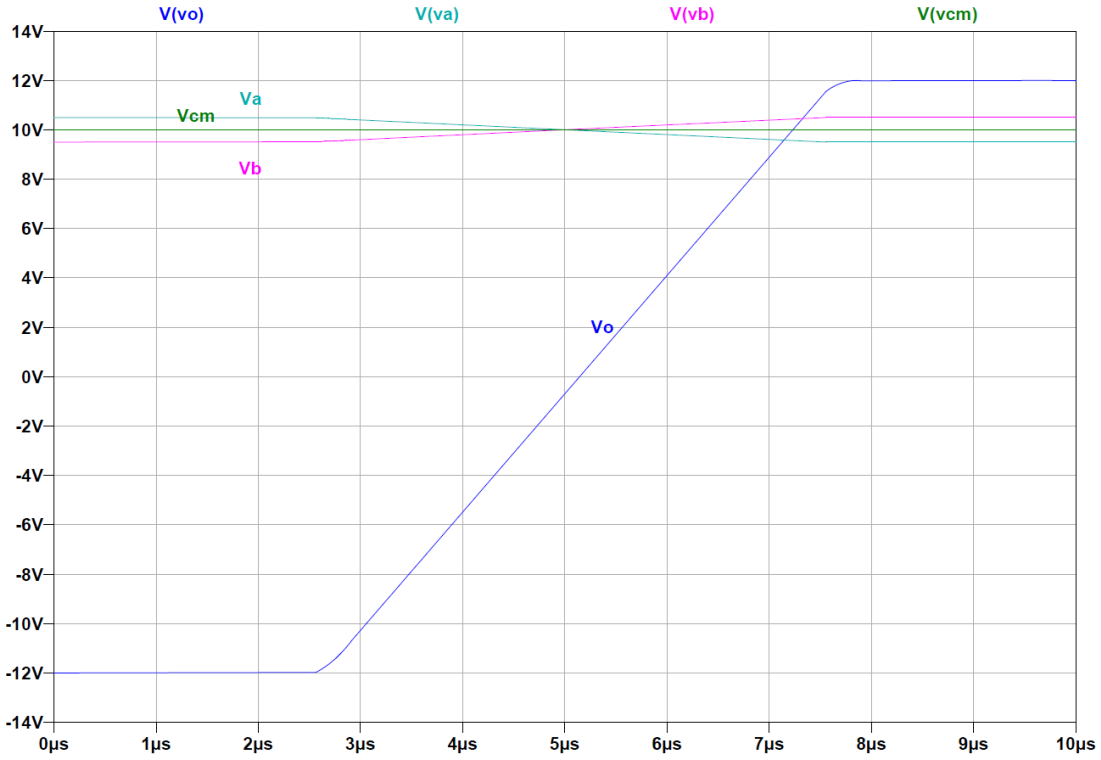
Di seguito i grafici in funzione del tempo con inizio e fine variazione della tensione in ingresso rispettivamente a $2.5\mu\text{s}$ e $7.5\mu\text{s}$



1.8.3

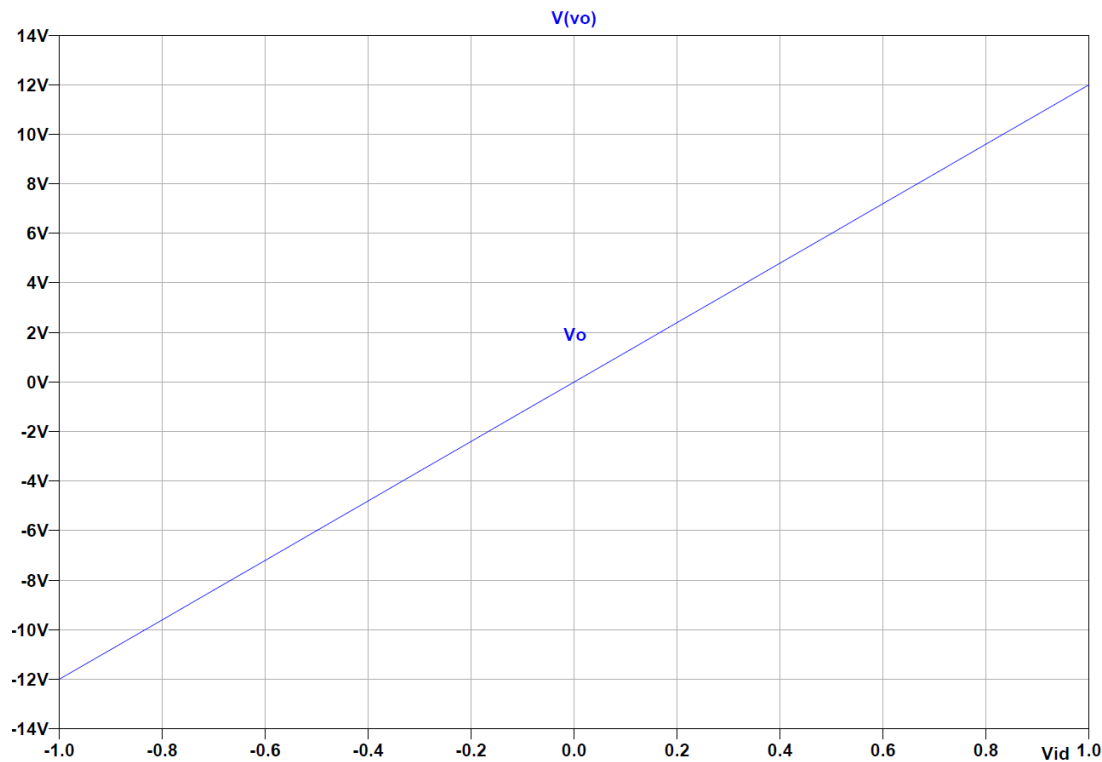


1.8.4

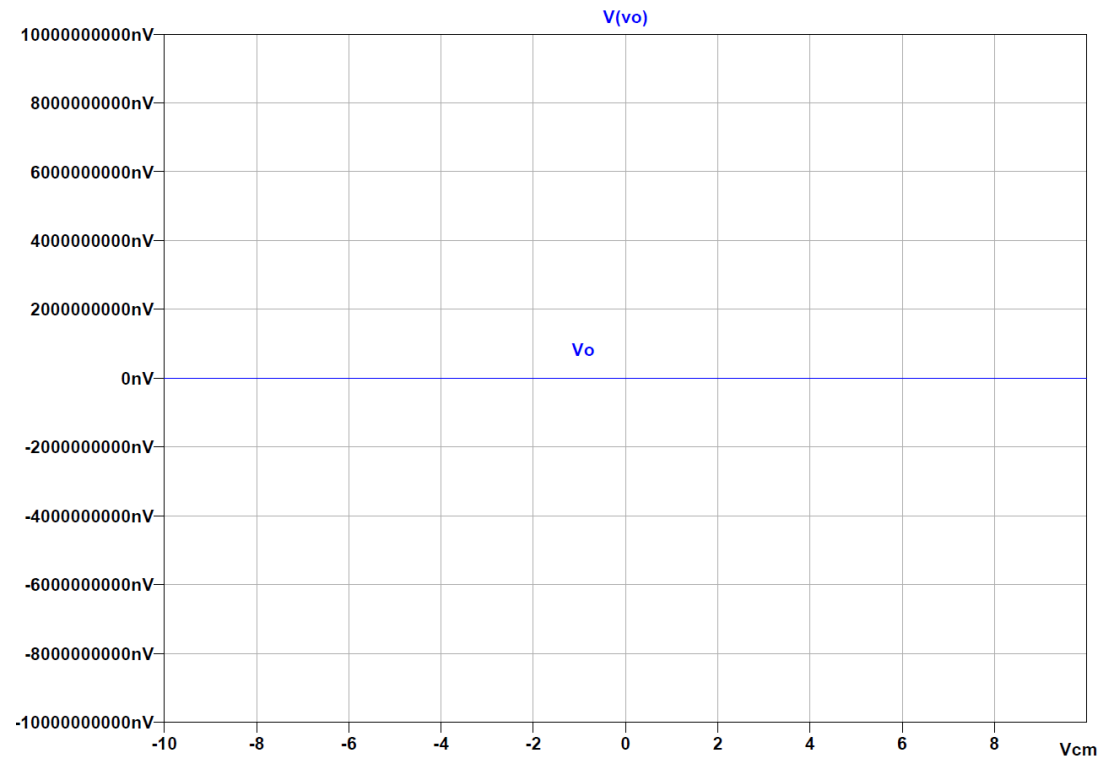


Di seguito i grafici in funzione della tensione in ingresso V_{id} o V_{cm}

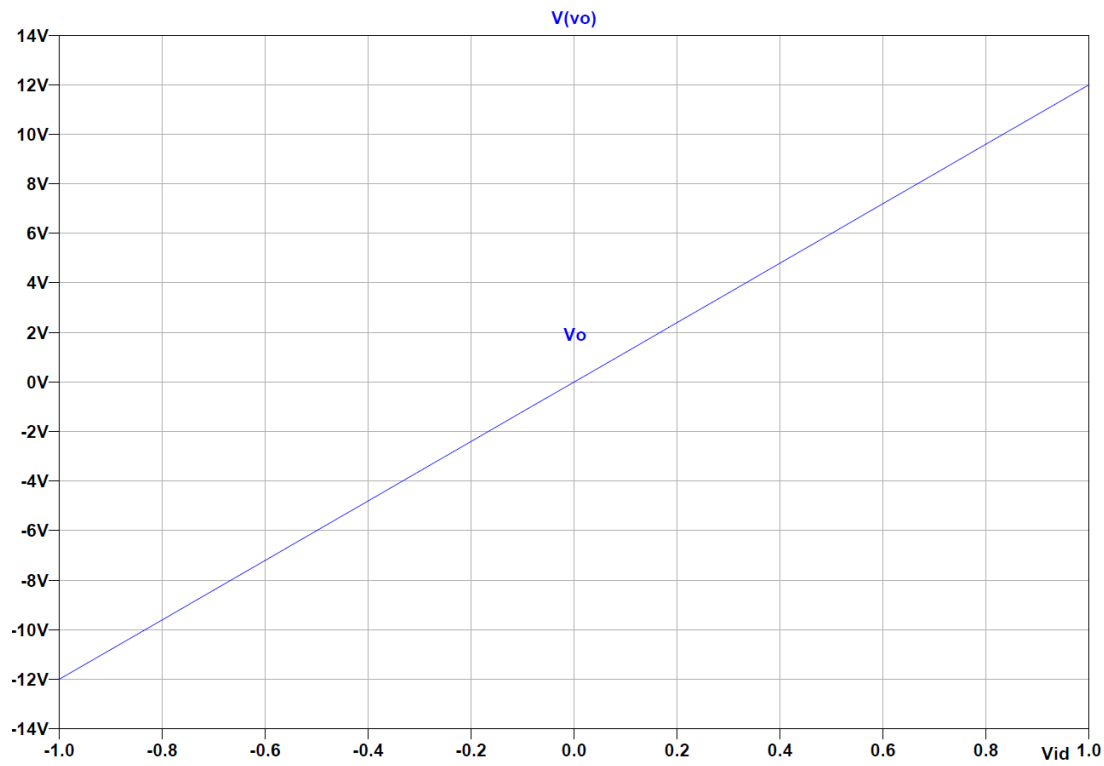
1.8.1



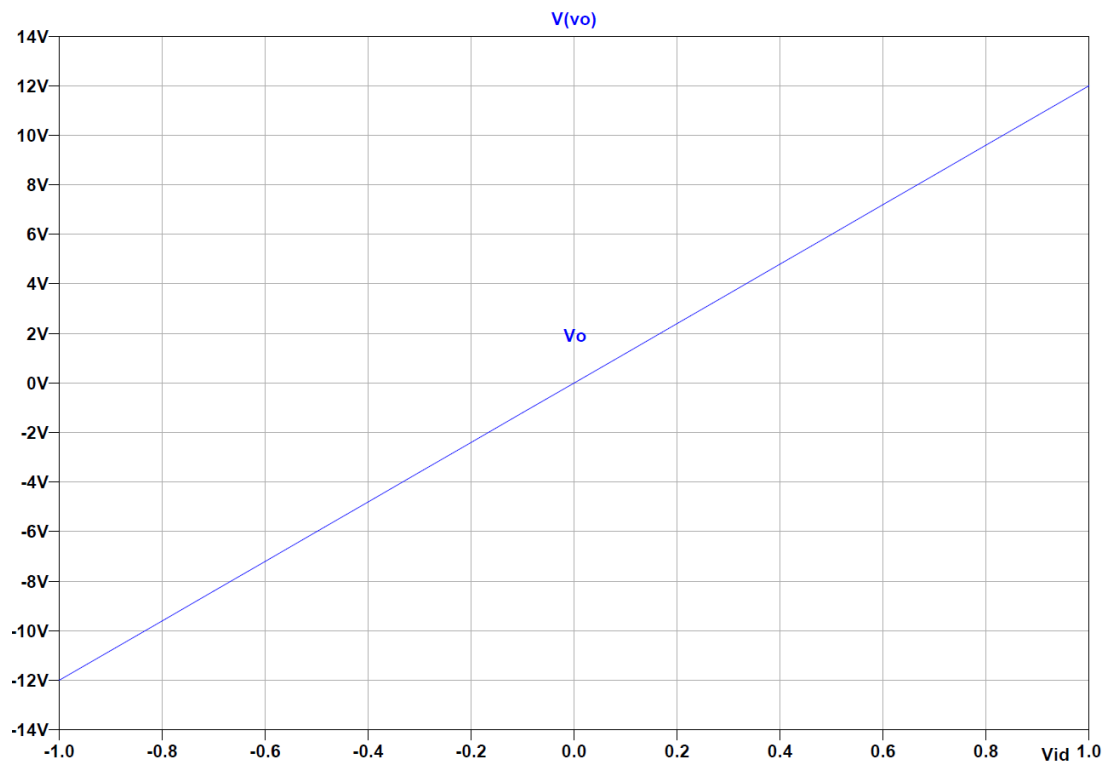
1.8.2



1.8.3



1.8.4



Netlist dell'esercizio 1:

* Schematico iniziale

```
XU1 N006 Vb N005 opamp Aol=100K GBW=10Meg
XU3 N003 N004 Vo opamp Aol=100K GBW=10Meg
R1 N002 0 243.6
R2 N001 N002 1218
R3 0 N006 243.6
R4 N005 N006 1218
R5 N003 N001 10000
R6 N004 N005 10000
R7 Vo N003 20000
R8 0 N004 20000
V$+Vid/2 Vb Vcm
V$-Vid/2 Va Vcm
Vcm Vcm 0
XU2 N002 Va N001 opamp Aol=100K GBW=10Meg
.lib opamp.sub
.backanno
.end
```

* Punto 1.8.1 in funzione del tempo

```
XU1 N006 Vb N005 opamp Aol=100K GBW=10Meg
XU3 N003 N004 Vo opamp Aol=100K GBW=10Meg
R1 N002 0 243.6
R2 N001 N002 1218
R3 0 N006 243.6
R4 N005 N006 1218
R5 N003 N001 10000
R6 N004 N005 10000
R7 Vo N003 20000
R8 0 N004 20000
V$+Vid/2 Vb Vcm PULSE(-0.5 +0.5 2.5u 5u 5u 5u 17.5u
1)
V$-Vid/2 Va Vcm PULSE(+0.5 -0.5 2.5u 5u 5u 5u 17.5u
1)
* Per i punti 1.8.3,1.8.4 basta sostituire il
valore di Vcm con 1 e 10
Vcm Vcm 0 0
XU2 N002 Va N001 opamp Aol=100K GBW=10Meg
.lib opamp.sub
.tran 10u
.backanno
.end
```

* Punto 1.8.1 in funzione della tensione in ingresso

```
XU1 N006 Vb N005 opamp Aol=100K GBW=10Meg
XU3 N003 N004 Vo opamp Aol=100K GBW=10Meg
R1 N002 0 243.6
R2 N001 N002 1218
R3 0 N006 243.6
R4 N005 N006 1218
R5 N003 N001 10000
R6 N004 N005 10000
R7 Vo N003 20000
R8 0 N004 20000
V$+Vid/2 Vb Vcm {Vid/2}
V$-Vid/2 Va Vcm {-Vid/2}
* Per i punti 1.8.3,1.8.4 basta
sostituire il valore di Vcm con 1 e 10
Vcm Vcm 0 0
XU2 N002 Va N001 opamp Aol=100K GBW=10Meg
.step param Vid -1 1 0.1
.op
.lib opamp.sub
.backanno
.end
```

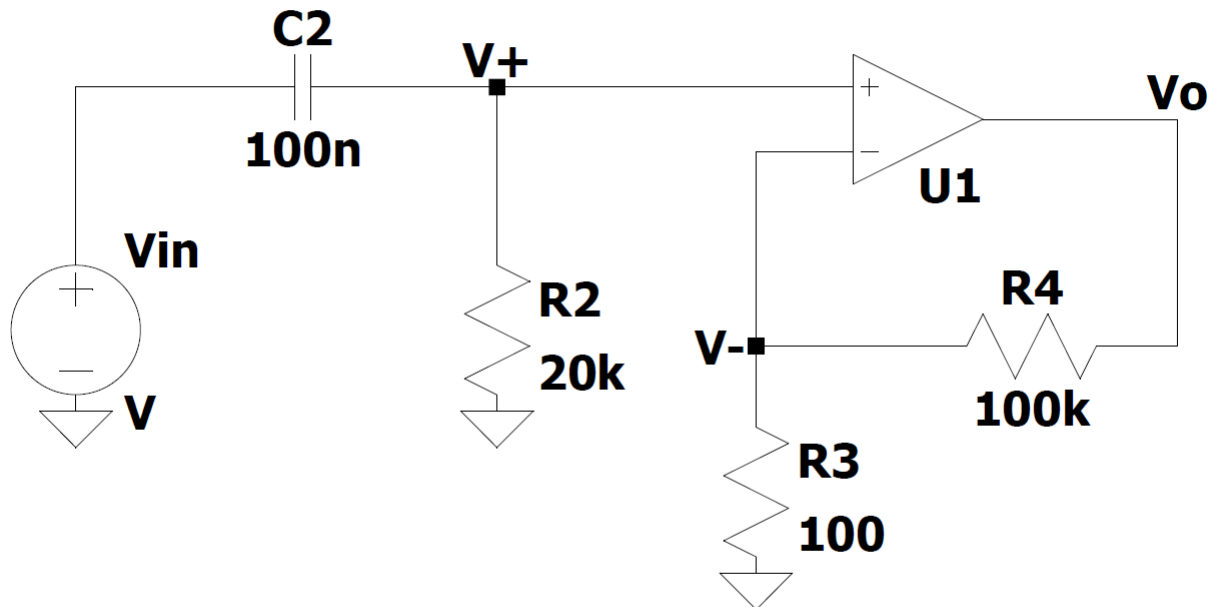
* Punto 1.8.2 in funzione del tempo

```
XU1 N006 Vb N005 opamp Aol=100K GBW=10Meg
XU3 N003 N004 Vo opamp Aol=100K GBW=10Meg
R1 N002 0 243.6
R2 N001 N002 1218
R3 0 N006 243.6
R4 N005 N006 1218
R5 N003 N001 10000
R6 N004 N005 10000
R7 Vo N003 20000
R8 0 N004 20000
V$+Vid/2 Vb Vcm 0
V$-Vid/2 Va Vcm 0
Vcm Vcm 0 PULSE(-10 +10 2.5u 5u 5u 5u 17.5u 1)
XU2 N002 Va N001 opamp Aol=100K GBW=10Meg
.lib opamp.sub
.tran 10u
.backanno
.end
```

* Punto 1.8.2 in funzione della tensione in ingresso

```
XU1 N006 Vb N005 opamp Aol=100K GBW=10Meg
XU3 N003 N004 Vo opamp Aol=100K GBW=10Meg
R1 N002 0 243.6
R2 N001 N002 1218
R3 0 N006 243.6
R4 N005 N006 1218
R5 N003 N001 10000
R6 N004 N005 10000
R7 Vo N003 20000
R8 0 N004 20000
V$+Vid/2 Vb Vcm 0
V$-Vid/2 Va Vcm 0
Vcm Vcm 0 {X}
XU2 N002 Va N001 opamp Aol=100K GBW=10Meg
.lib opamp.sub
.op
.step param X -10 10 0.1
.backanno
.end
```

Esercizio 2: amplificatore in banda audio



2.1 Calcolare la frequenza di taglio inferiore e superiore del circuito, e tracciare il diagramma di Bode asintotico del guadagno

Soluzione:

Prendendo V_+ come tensione di ingresso possiamo considerare il circuito come un amplificatore non invertente standard con retroazione.

Calcoliamo quindi V_+ applicando il partitore di tensione:

$$V_+ = \frac{R2}{R2 + Z2} V_{in}$$

Essendo la corrente del condensatore definita come $i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}$ applico la trasformata di Laplace

$$i_c(s) = C * s * v_c(s)$$

Quindi

$$Z2 = \frac{v_c(s)}{i_c(s)} = \frac{1}{s * C2}$$

V_+ diventa

$$V_+ = \frac{R2}{\left(R2 + \frac{1}{s * C2}\right)} V_{in} = \frac{1}{1 + \frac{1}{R2 * s * C2}} V_{in} = \frac{R2 * s * C2}{1 + R2 * s * C2} V_{in}$$

Definiamo $\omega = \frac{1}{R2 * C2}$

$$V_+ = \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} V_{in}$$

Definiamo:

- $\beta = \text{fattore di retroazione} = \frac{R3}{R3 + R4}$
- $A_{ol} = \text{guadagno ad anello aperto} = \frac{V_o}{V_+ - V_-} = 10^5$
- $Af = \text{guadagno ad anello chiuso con retroazione} = \frac{V_o}{V_{in}}$

Sapendo che

$$V_- = \frac{R3}{R3 + R4} V_o = \beta V_o$$

$$V_o = A(V_+ - V_-) = A(V_+ - \beta V_o)$$

$$V_o = \frac{A * V_+}{1 + \beta A}$$

$$Af(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)}$$

Consideriamo ora la risposta

$$Af(s) = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)}$$

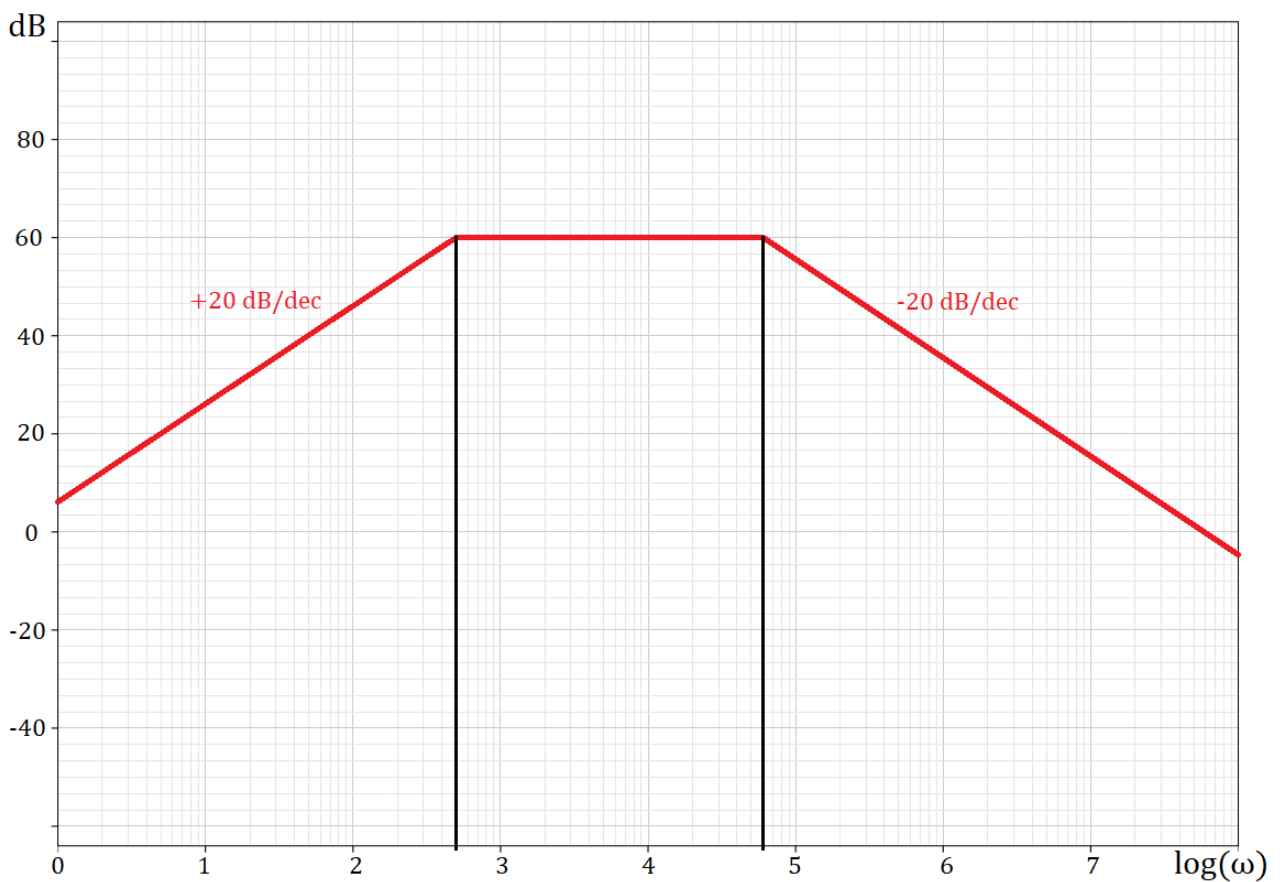
Sapendo che la risposta di un amplificatore senza feedback è $A(s) = \frac{A_{ol}}{1 + \frac{s}{\omega h}}$

$$\begin{aligned} Af(s) &= \frac{\frac{A_{ol}}{1 + \frac{s}{\omega h}}}{1 + \beta \left(\frac{A_{ol}}{1 + \frac{s}{\omega h}}\right)} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} = \frac{A_{ol}}{1 + \frac{s}{\omega h} + \beta A_{ol}} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} \\ &= \frac{\frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}}}{\left(\frac{1 + \beta A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}}\right) + \frac{s}{\omega h(1 + \beta A_{ol})}} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} = \frac{\frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}}}{1 + \frac{s}{\omega h(1 + \beta A_{ol})}} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} \\ &= \frac{\frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}}}{1 + \frac{s}{\omega f}} \frac{\left(\frac{s}{\omega}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} = \frac{Af}{1 + \frac{s}{\omega f}} \end{aligned}$$

Con $\omega_f = \omega_h(1 + \beta A)$

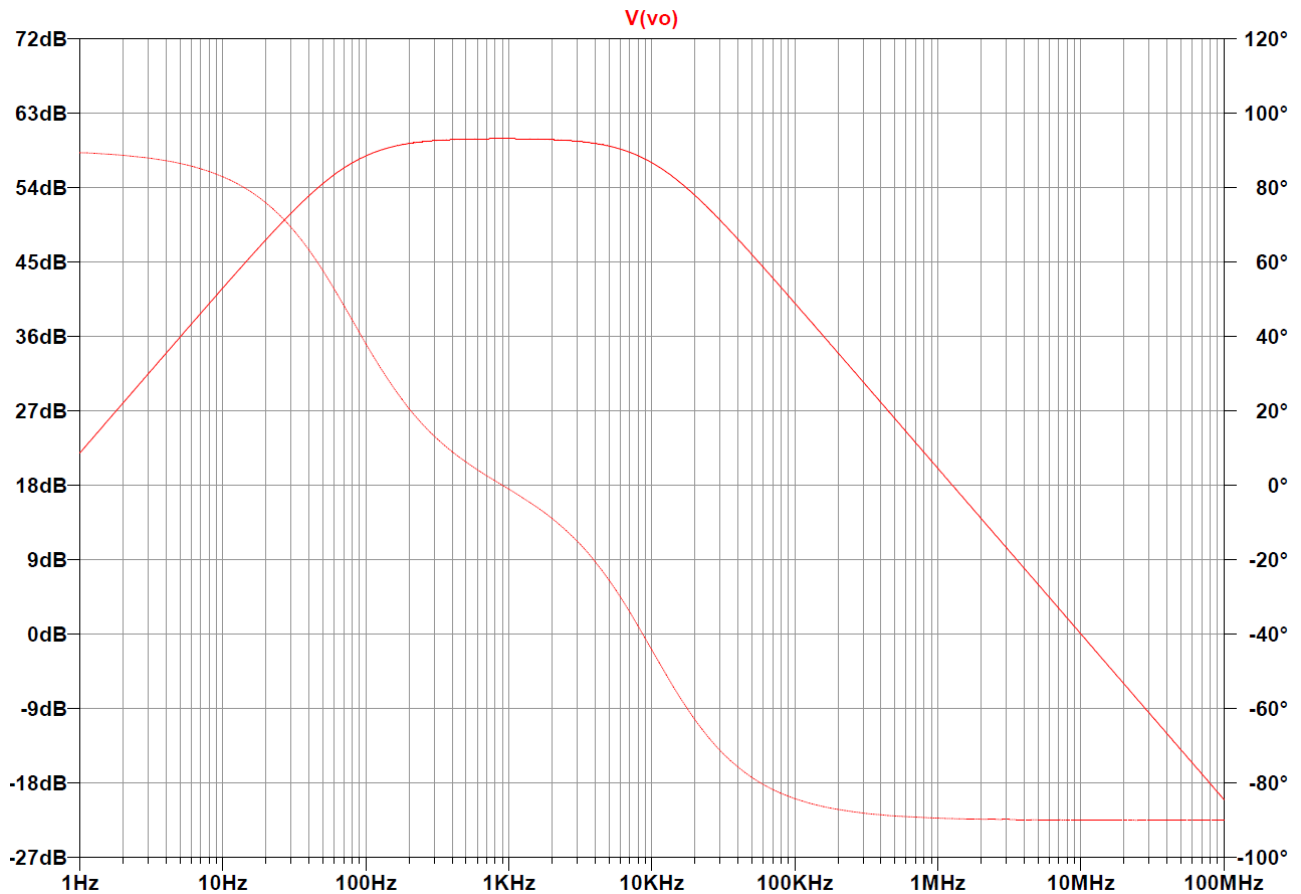
- $\omega = \text{pulsazione di taglio inferiore} = \frac{1}{R_2 * C_2} = 500 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- $\omega_h = \text{pulsazione di taglio del senza feedback} = \frac{GBW}{A} * 2\pi = \frac{10^7}{10^5} * 2\pi = 628.32 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- $\omega_f = \text{pulsazione di taglio superiore} = \omega_h(1 + \beta A) = 63397 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- $f_i = \text{frequenza di taglio inferiore} = \frac{\omega}{2\pi} = 80 \text{ Hz}$
- $f_f = \text{frequenza di taglio superiore} = \frac{\omega_f}{2\pi} = 10090 \text{ Hz}$

Il diagramma di Bode diventa il seguente:



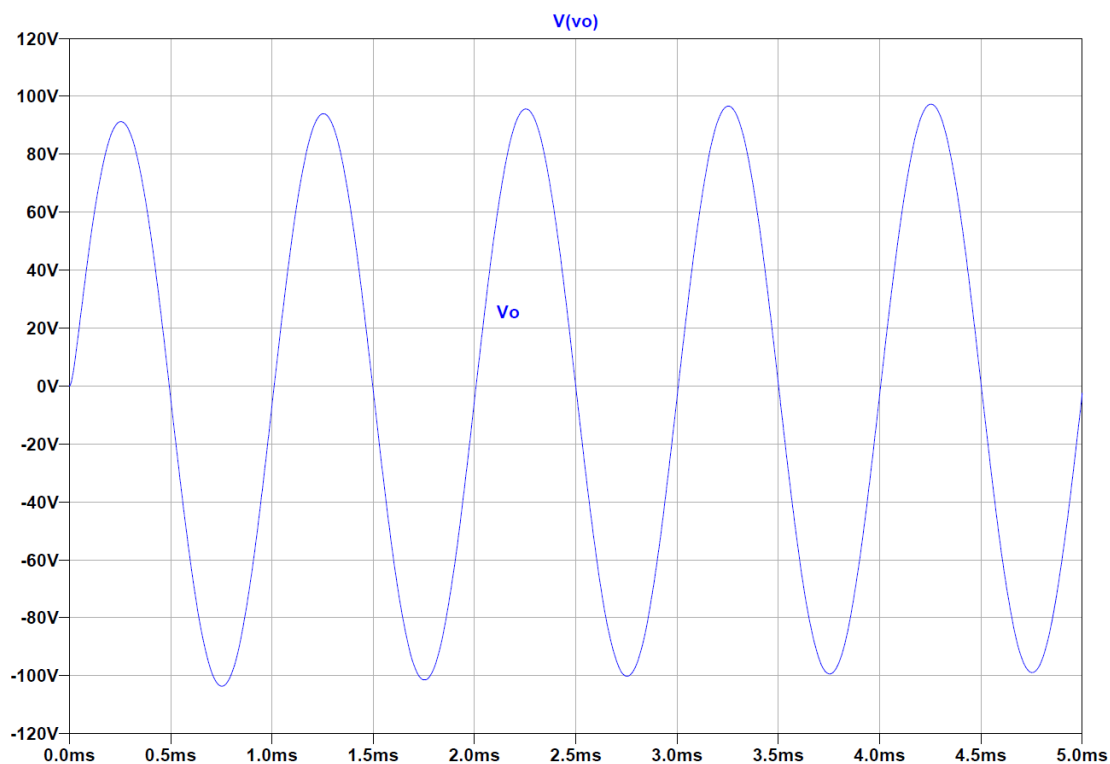
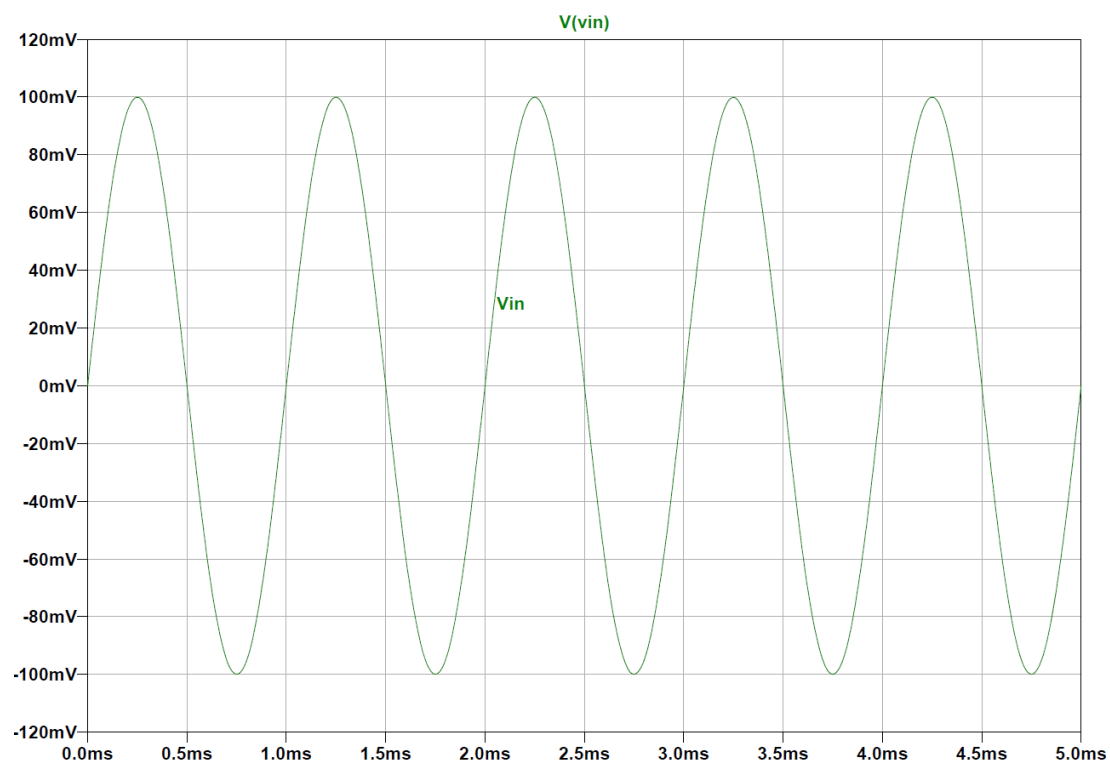
2.2 Simulare il diagramma di Bode con LTSPICE. Per la simulazione, utilizzare il modello standard della libreria di LTSpice, inserendo il comando “.lib opamp.sub”, scegliendo il modello “opamp” della directory “Opamps” come amplificatore operazionale. Selezionate l’amplificatore con il tasto destro e modificate i parametri del modello come indicato dal problema

Soluzione:



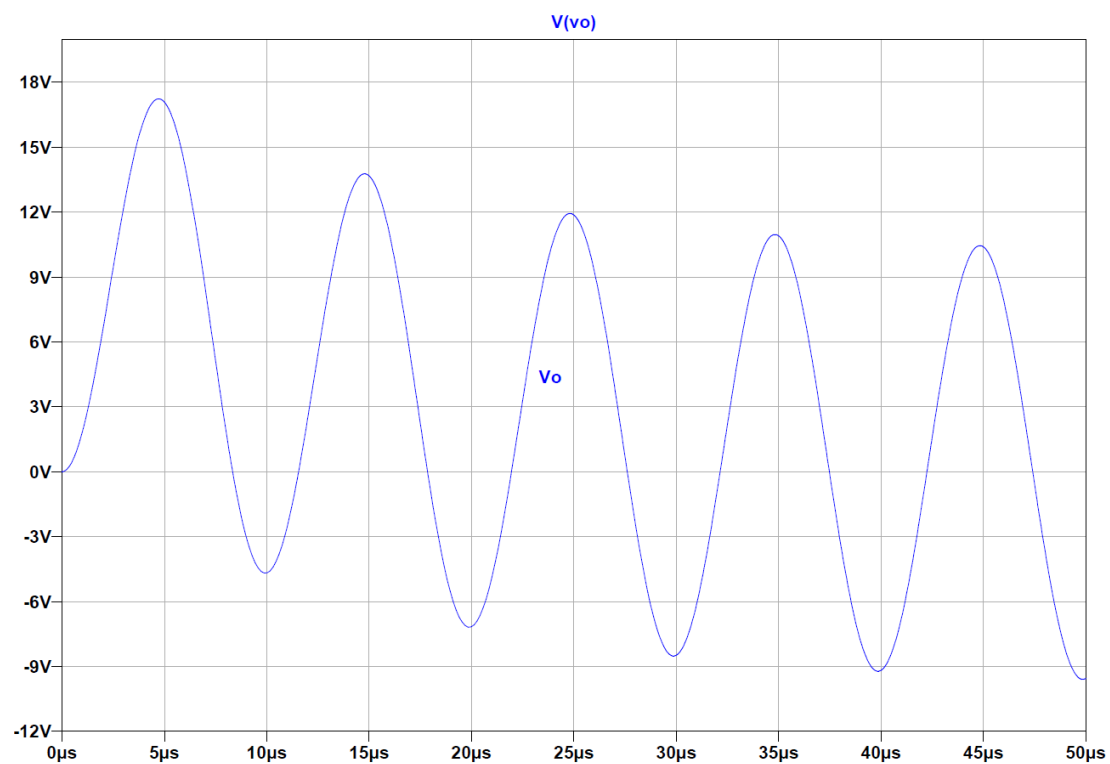
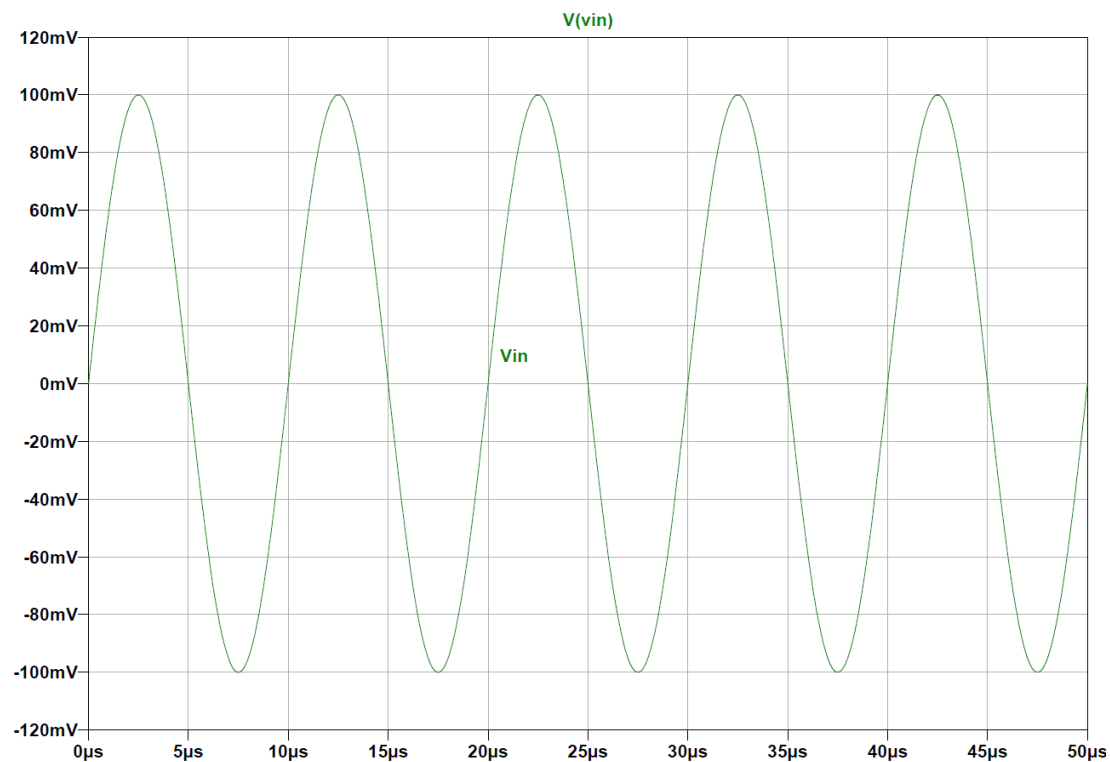
2.3 Applicare un segnale sinusoidale tramite un generatore V_{in} , di ampiezza 100 mV e frequenza 1 kHz. Graficare su due piani xy separati, ma con la stessa scala temporale, 5 periodi della forma d'onda di V_{in} e di V_{out}

Soluzione:



2.4 Applicare un segnale sinusoidale tramite un generatore V_{in} , di ampiezza 100 mV e frequenza 100 kHz. Graficare su due piani xy separati, ma con la stessa scala temporale, 5 periodi della forma d'onda di V_{in} e di V_{out}

Soluzione:



2.5 Commentare i risultati ottenuti ai punti precedenti

Soluzione:

Confrontando i grafici delle tensioni in ingresso e quelle di uscita si osserva immediatamente un aumento di voltaggio conferito dall'amplificatore operazionale.

- Nel caso di ingresso sinusoidale con frequenza di 1kHz abbiamo un amplificazione massima considerato che 1kHz è compreso tra la frequenza inferiore di 80Hz e quella superiore di 10090Hz. Osservando il diagramma di Bode al punto 2.2 si può notare che tra quelle frequenze c'è una guadagno a centro banda massimo.

$$\text{Guadagno a centro banda} = \frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}} = 991.08$$

$$\text{Guadagno a centro banda } |_{dB} = 20 * \log_{10}(991.08) = 60_{dB}$$

Possiamo verificare che nei grafici del punto 2.3 abbiamo una tensione in ingresso massima di 100mV che se amplifichiamo di 991.08 otteniamo $0.1 * 991.08 = 99.108 V$. Nel grafico della tensione in uscita riscontriamo che dopo 4.5ms, quando la sinusoide si è stabilizzata, il picco è a circa 100V.

- Nel caso di ingresso sinusoidale con frequenza 100k, invece, il guadagno non è più massimo. Il diagramma di Bode al punto 2.2 mostra che intorno a 100kHz il guadagno sta scendendo progressivamente.

Sapendo che $\omega_k = 100kHz * 2 * \pi = 630000 \frac{rad}{s}$ sostituiamo s con $j * \omega_k$

$$\begin{aligned} Af(s) &= \frac{\frac{A_{ol}}{1 + \beta A_{ol}} \left(\frac{s}{\omega}\right)}{1 + \frac{s}{\omega f} \left(1 + \frac{s}{\omega}\right)} = \frac{991.08 \left(\frac{j * \omega_k}{\omega}\right)}{1 + \frac{j * \omega_k}{\omega f} \left(1 + \frac{j * \omega_k}{\omega}\right)} = \frac{991.08}{1 + j * 9.94} \frac{j * 1260}{(1 + j * 1260)} \\ &= 10 - j * 100 \end{aligned}$$

Il modulo di questo valore è $|Af(j * \omega_k)| = \sqrt{10^2 + 100^2} = 100.5$

Trasformiamo in $Af(s)|_{dB} = 20 * \log_{10}(100.5) = 40_{dB}$

Possiamo verificare che nei grafici del punto 2.4 abbiamo una tensione in ingresso massima di 100mV che se amplifichiamo di 100.5 otteniamo $0.1 * 100.5 = 10.05 V$.

Nel grafico della tensione in uscita riscontriamo che dopo 45µs, quando la sinusoide si è stabilizzata, il picco è a circa 10V.

In questi grafici si può notare inoltre che l'uscita non ha media nulla. Nel primo caso l'onda sinusoidale viene traslata esponenzialmente verso un guadagno più alto invece nel secondo caso verso un guadagno più basso.

Questo effetto è causato, nel primo caso, dalla presenza del condensatore che ha un comportamento esponenziale nell'intervallo di carica.

Nel secondo caso, invece, l'effetto è probabilmente causato dall'alta frequenza della tensione in ingresso. Se si osserva il diagramma di Bode al punto 2.2 è possibile notare che la fase alla frequenza di 100kHz è a circa -90° . Questo significa che l'uscita sarà sfasata di -90° rispetto all'ingresso. A tempo 0 μ s, quindi, V_o parte con tensione minima a 0V, di conseguenza la curva è inizialmente traslata verso tensioni maggiori e con il tempo si stabilizza.

2.6 Modificare il circuito in modo che il guadagno sia compreso in una fascia di ± 3 dB tra 10Hz e 25kHz

Soluzione:

Per avere un guadagno compreso in una fascia di ± 3 dB devo avere un guadagno circa costante.

In questo caso il guadagno rimane circa costante tra le due frequenze di taglio che sono 80hz e 10090hz.

Di conseguenza basta spostare la frequenza di taglio inferiore a 10hz e quella superiore a 25khz.

Spostiamo la frequenza di taglio inferiore:

$$10 = \frac{\omega}{2\pi} \rightarrow \omega = 20\pi$$

$$\frac{1}{C2 * R2} = 20\pi$$

Posso modificare $R2 = \frac{1}{C2 * 20\pi}$ oppure modificare $C2 = \frac{1}{R2 * 20\pi}$

Spostiamo la frequenza di taglio superiore:

$$25k = \frac{\omega f}{2\pi} \rightarrow \omega f = 50k\pi = \omega h(1 + \beta A)$$

$$\omega h = \frac{50k\pi}{1 + \beta A}$$

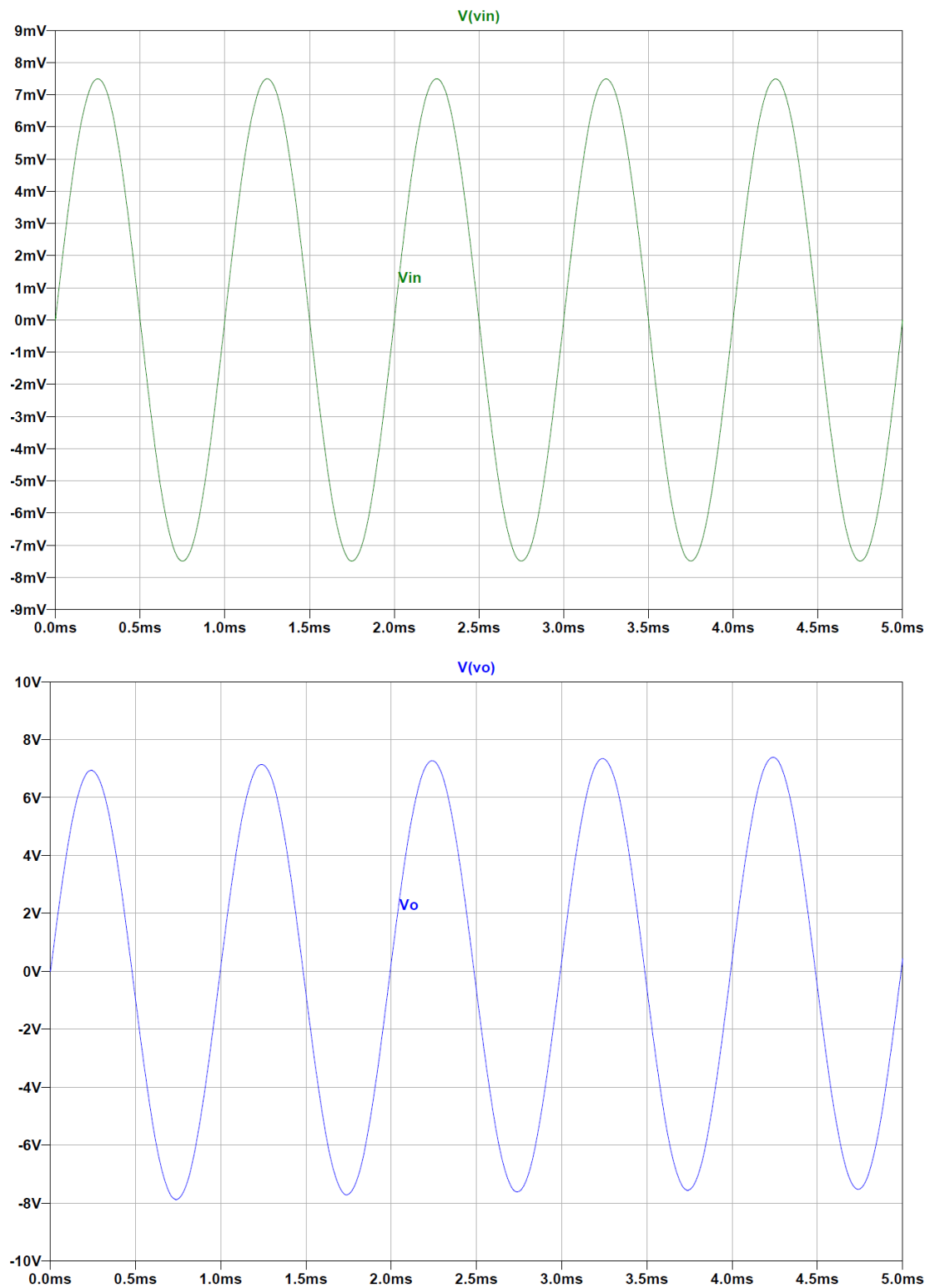
$$\beta = \frac{50k - \omega h}{\omega h * A} = 7.86 * 10^{-4}$$

Posso modificare $R3 = \frac{\beta * R4}{1 - \beta}$ oppure $R4 = \frac{(1 - \beta) * R3}{\beta}$

2.7.1 Sostituire l'amplificatore operazionale con il modello commerciale LT1028; applicare l'alimentazione duale con $V_{CC} = +10V$ e $V_{EE} = -10V$, ripetere il punto 2.3. Ridurre l'ampiezza del segnale di ingresso in modo da evitare fenomeni di clipping.

Soluzione:

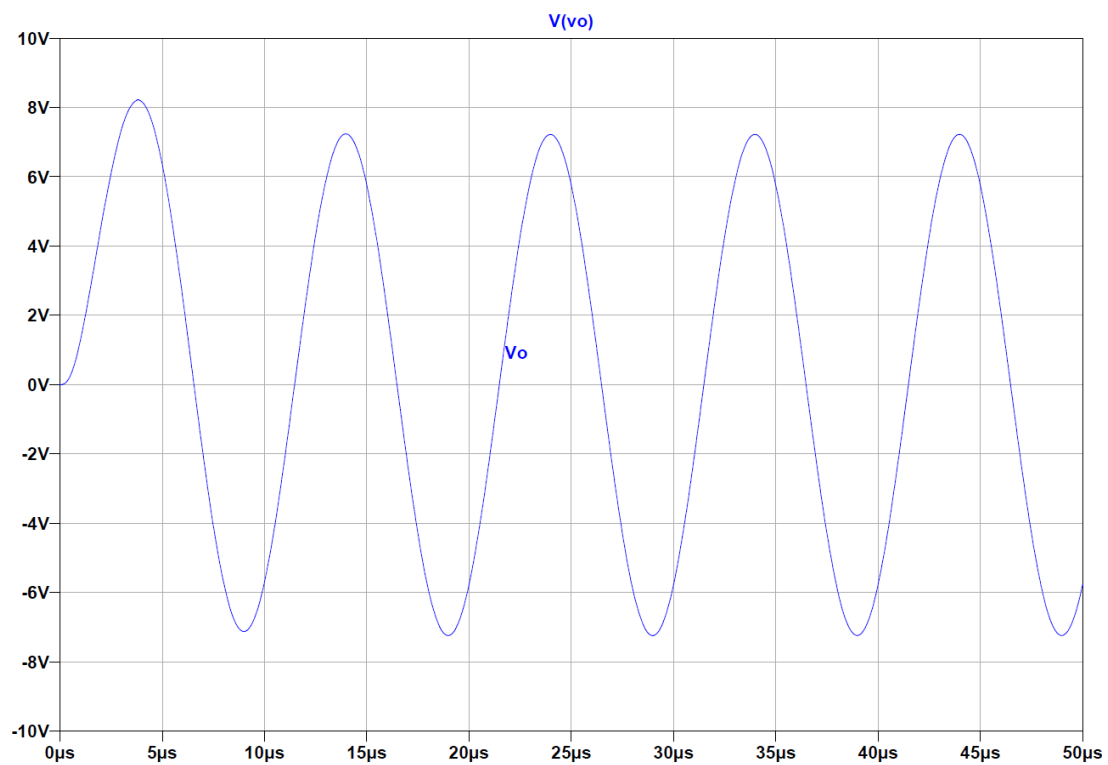
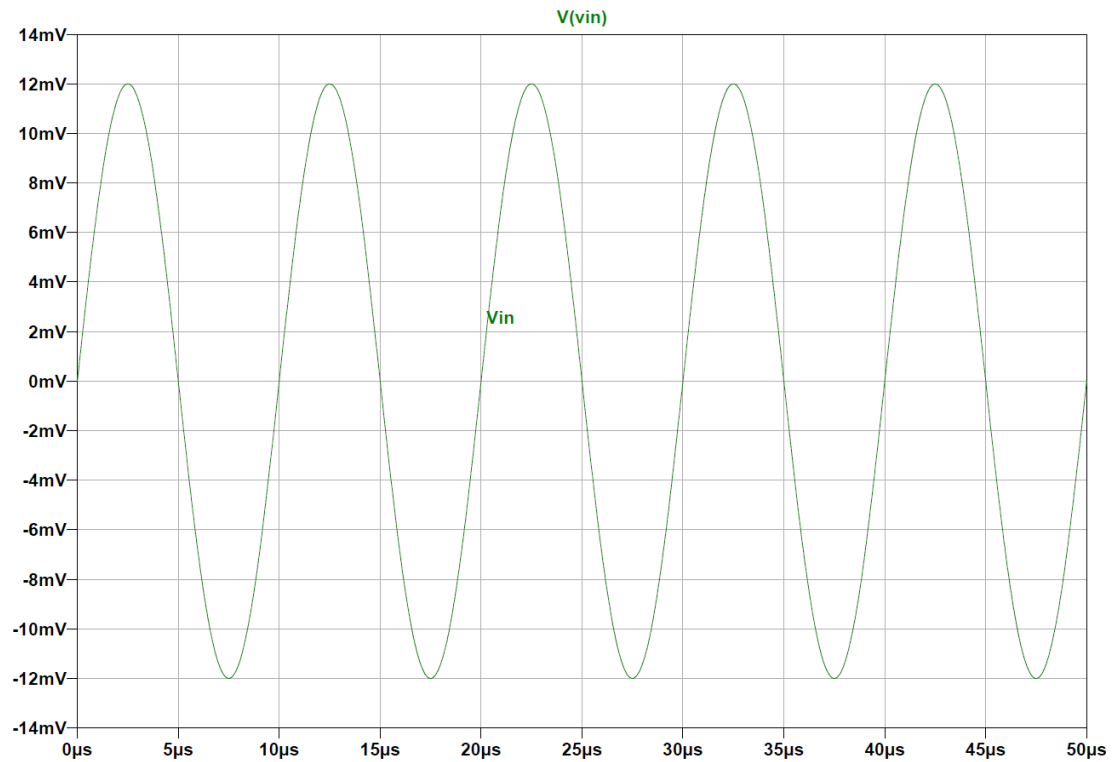
Applicando in ingresso al massimo un segnale con ampiezza di 7.5mV possiamo evitare fenomeni di clipping.



2.7.2 Ripetere anche per il punto 2.4

Soluzione:

Applicando in ingresso al massimo un segnale con ampiezza di 12mV possiamo evitare fenomeni di clipping.



Netlist esercizio 2:

* Schematico iniziale

```
XU1 V- V+ Vo opamp Aol=100K
GBW=10Meg
C2 V+ Vin 100n
Vin Vin 0 V
R2 V+ 0 20k
R3 V- 0 100
R4 Vo V- 100k
.lib opamp.sub
.backanno
.end
```

* Punto 2.2

```
XU1 V- V+ Vo opamp Aol=100K
GBW=10Meg
C2 V+ Vin 100n
Vin Vin 0 AC 1
R2 V+ 0 20k
R3 V- 0 100
R4 Vo V- 100k
.ac dec 20 1 100MEG
.lib opamp.sub
.backanno
.end
```

* Punto 2.3

```
XU1 V- V+ Vo opamp Aol=100K
GBW=10Meg
C2 V+ Vin 100n
Vin Vin 0 SINE(0 100m 1k)
R2 V+ 0 20k
R3 V- 0 100
R4 Vo V- 100k
.lib opamp.sub
.tran 5m
.backanno
.end
```

* Punto 2.4

```
XU1 V- V+ Vo opamp Aol=100K
GBW=10Meg
C2 V+ Vin 100n
Vin Vin 0 SINE(0 100m 100k)
R2 V+ 0 20k
R3 V- 0 100
R4 Vo V- 100k
.lib opamp.sub
.tran 50u
.backanno
.end
```

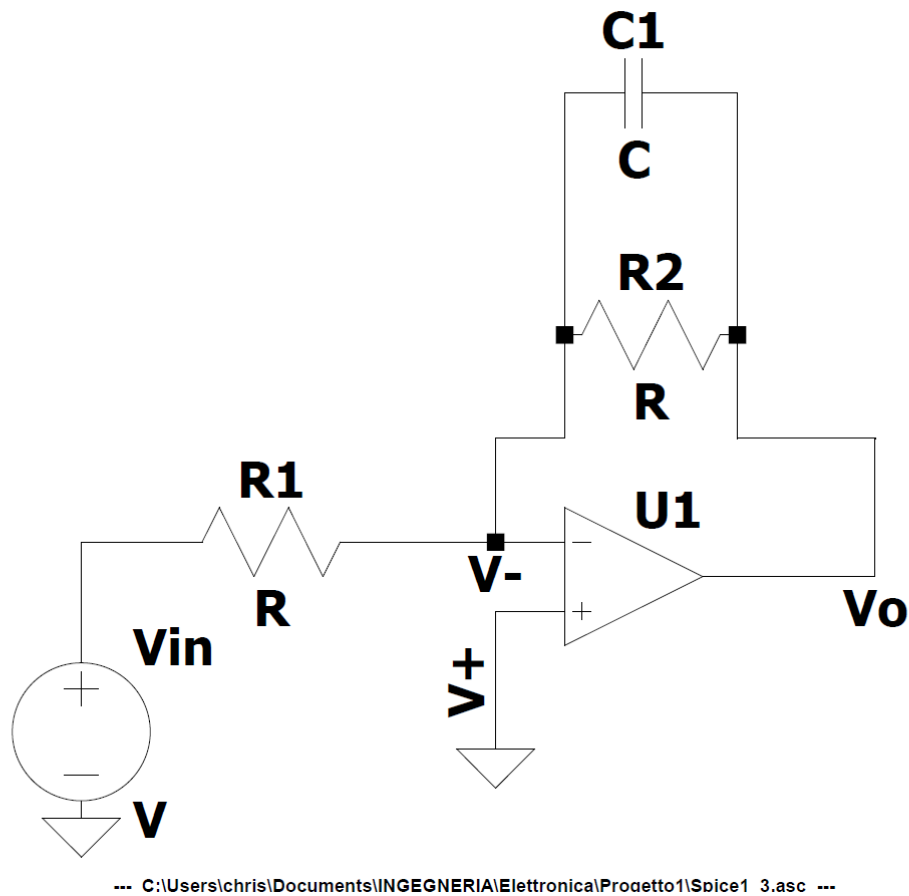
* Punto 2.7.1

```
C2 V+ Vin 100n
Vin Vin 0 SINE(0 7.5m 1k)
R2 V+ 0 20k
R3 V- 0 100
R4 Vo V- 100k
XU2 V+ V- N002 N001 Vo LT1028
Vcc N001 0 -10
Vee N002 0 10
.tran 5m
.lib opamp.sub
.lib LTC.lib
.backanno
.end
```

* Punto 2.7.2

```
C2 V+ Vin 100n
Vin Vin 0 SINE(0 12m 100k)
R2 V+ 0 20k
R3 V- 0 100
R4 Vo V- 100k
XU2 V+ V- N002 N001 Vo LT1028
Vcc N001 0 -10
Vee N002 0 10
.tran 50u
.lib opamp.sub
.lib LTC.lib
.backanno
.end
```

Esercizio 3: filtro passa alto con guadagno



3.1 Scrivere l'espressione della funzione di trasferimento $V_o(s)/V_{in}(s)$ del circuito

Soluzione:

Possiamo considerare il feedback come un condensatore e un resistore in parallelo, quindi:

$$Z = \left(\frac{1}{R2} + \frac{1}{\left(\frac{1}{s * C2} \right)} \right)^{-1} = \frac{R2}{1 + R2 * s * C2}$$

Il circuito diventa, quindi, un semplice amplificatore invertente. Il guadagno di un amplificatore invertente è:

$$A = -\frac{Z}{R1}$$

Quindi:

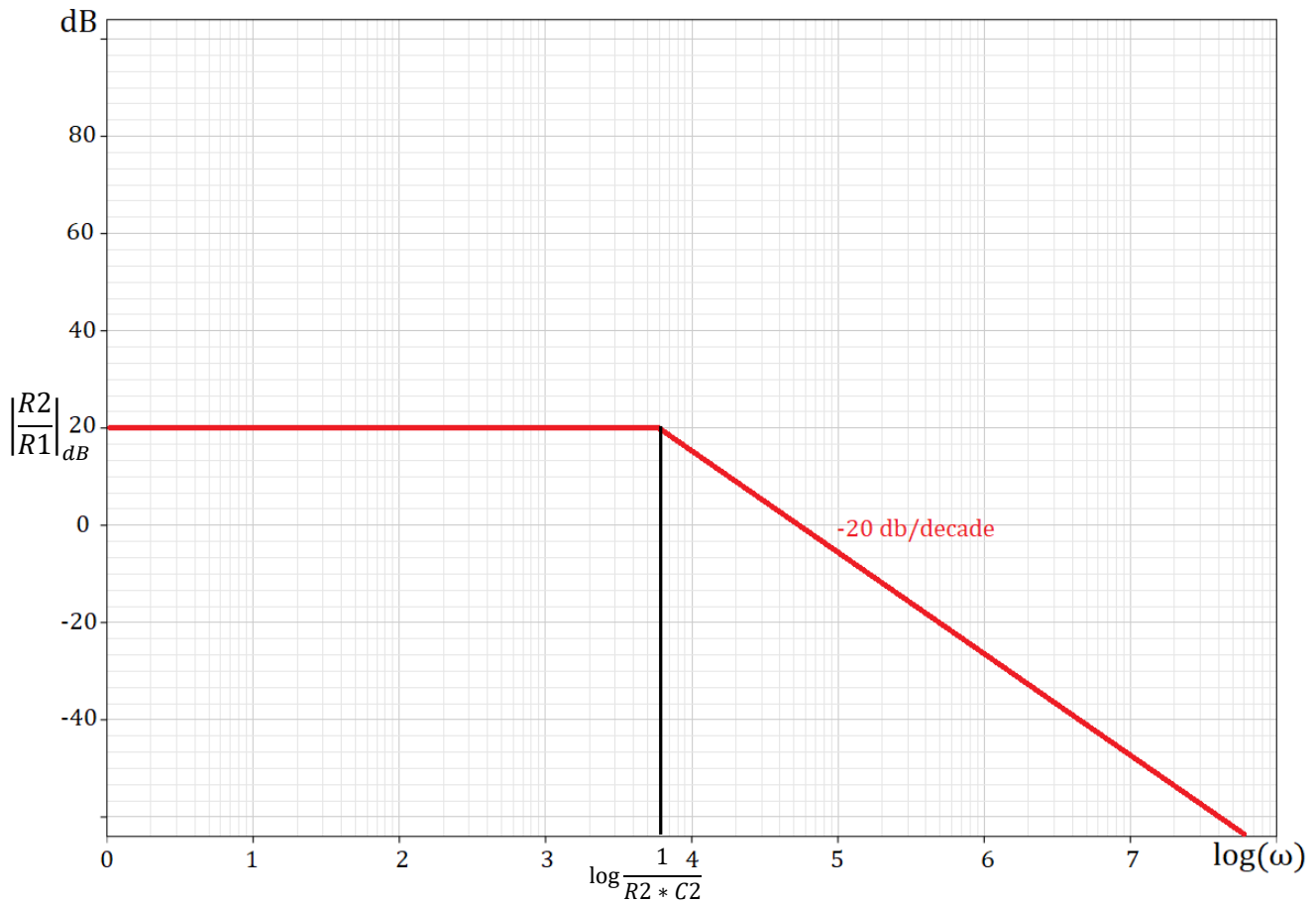
$$W(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{Z}{R1} = -\frac{R2}{R1} \frac{1}{1 + R2 * s * C2} = A_o \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega}}$$

$$\text{Con } \omega = \frac{1}{R2 * C2}$$

3.2 Scrivere l'espressione del guadagno a centro banda e della frequenza di taglio e disegnare il diagramma di Bode asintotico del guadagno

Soluzione:

- $f = \text{frequenza di taglio} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2}$
- $A_o = \text{guadagno in centro banda} = -\frac{R2}{R1}$



3.3 Porre R1 pari al proprio numero di matricola diviso 100. Dimensionare R2 e C2 in modo da ottenere una frequenza di taglio di 1 kHz con un guadagno in continua di 20 dB.

Soluzione:

Assumiamo $R1 = 12183.17 \, \Omega$

$$|A_o| = \frac{R2}{R1} = 10 \rightarrow R2 = 10 * R1 = 121831.7 \, \Omega$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2} = 1000 \, Hz \rightarrow C2 = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot 1000} = 1.31 * 10^{-9} \, Fa$$

3.4 Quanto vale la resistenza di ingresso?

Soluzione:

Sapendo che la resistenza di ingresso è data da $R_{in} = \frac{V_{in}}{i_{in}} = \frac{V_{in}}{i_{R1}} = \frac{V_{in}}{i_Z}$

Assumendo che la corrente va da V_{in} verso V_O

$$V_{in} = R1 * i_{R1} \rightarrow i_{R1} = \frac{V_{in}}{R1}$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{\left(\frac{V_{in}}{R1}\right)} = R1$$

3.5 A quale frequenza il guadagno dell'amplificatore diventa unitario?

Soluzione:

$$W(s) = \left| A_o \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega}} \right| = 1$$

Sostituendo s con $j * \omega_1$

$$\left| 1 + \frac{s}{\omega} \right| = |A_o| \rightarrow \left| \frac{\omega + s}{\omega} \right| = 10 \rightarrow \frac{\sqrt{\omega^2 + \omega_1^2}}{\omega} = 10$$

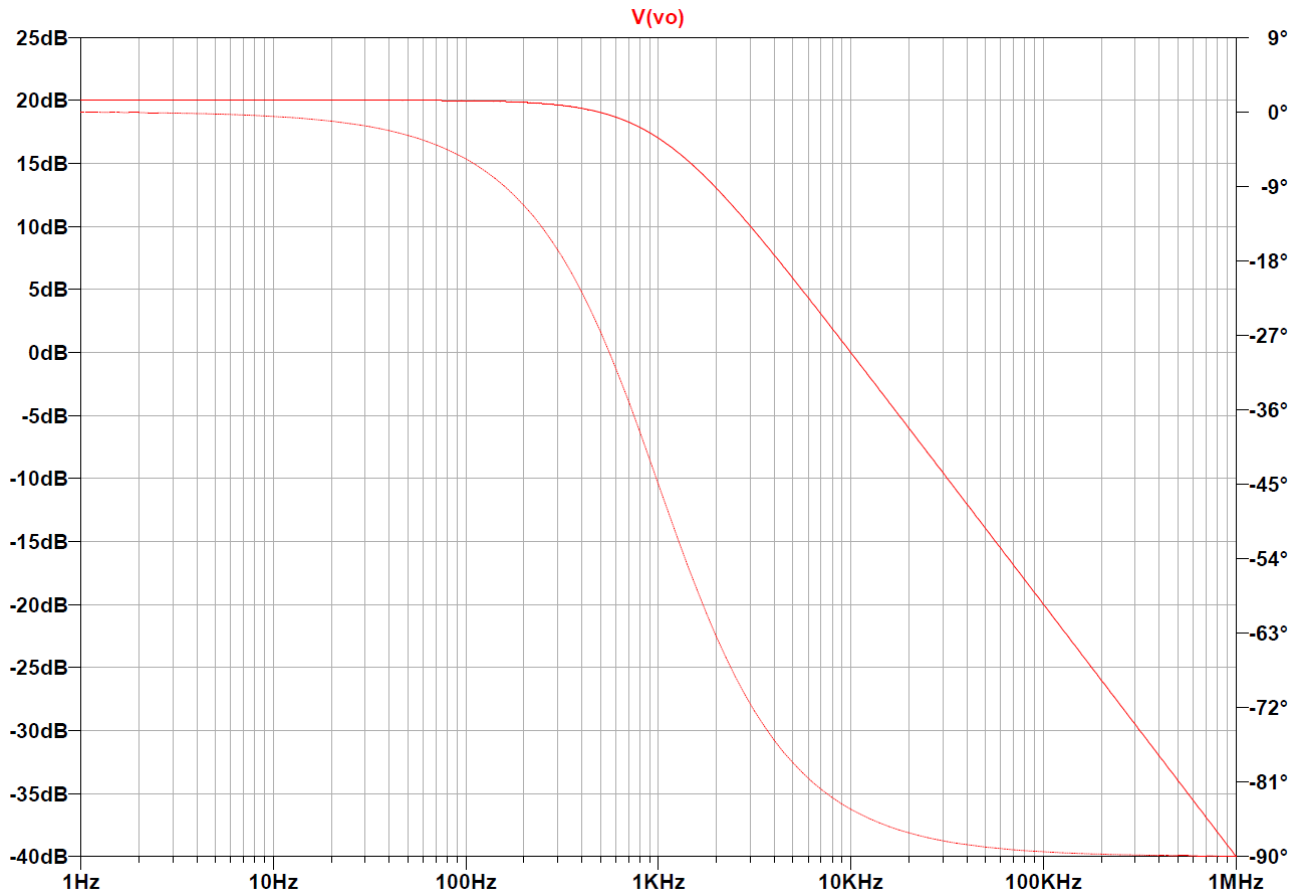
$$\omega^2 + \omega_1^2 = (10\omega)^2 \rightarrow \omega_1^2 = 100\omega^2 - \omega^2 = 99\omega^2$$

$$\omega_1 = \sqrt{99\omega^2} = \sqrt{99}\omega = \frac{\sqrt{99}}{R2 * C2} = 2000 * \pi * \sqrt{99}$$

$$f_1 = \frac{2000 * \pi * \sqrt{99}}{2\pi} = 1000 * \sqrt{99} = 9950Hz$$

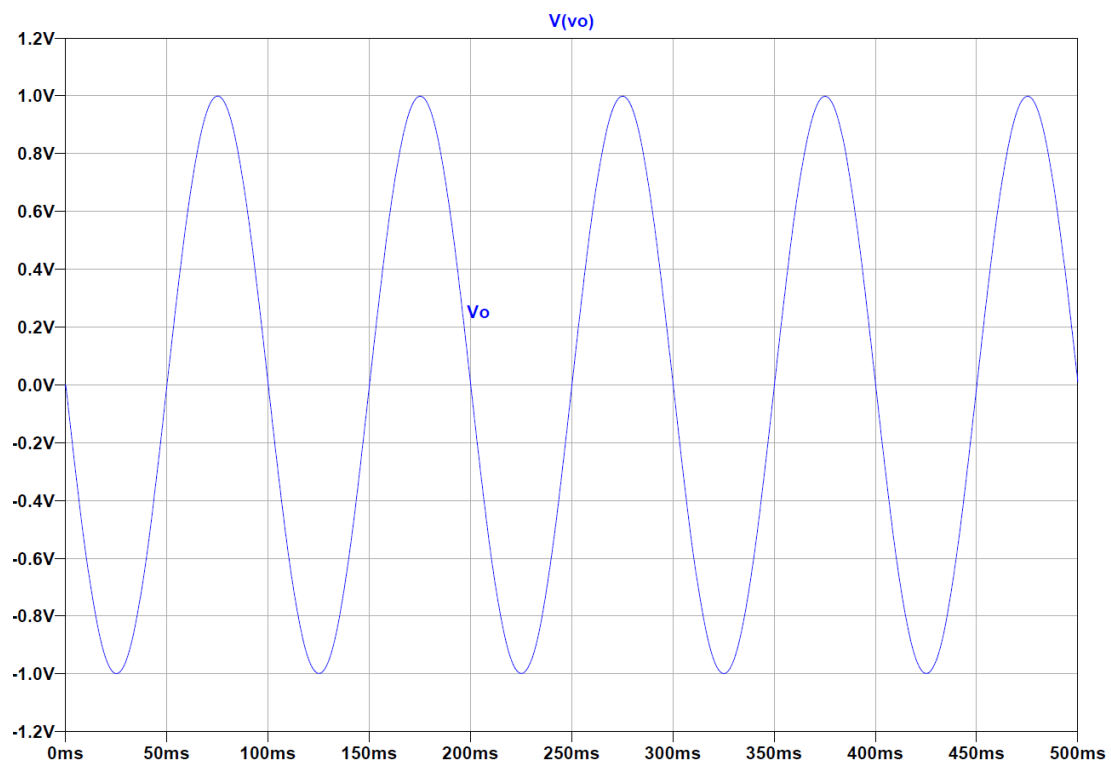
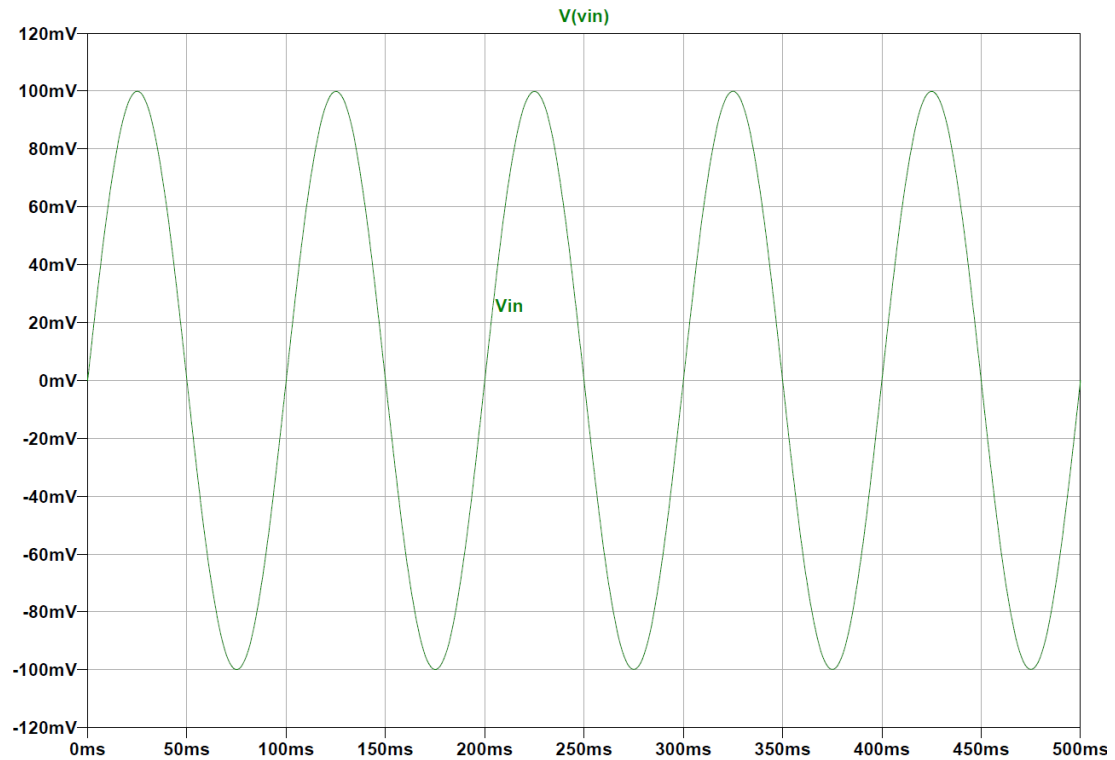
3.6 Simulare con SPICE il diagramma di Bode del circuito definito al punto 3.3. Per la simulazione sostituire l'amplificatore operazionale con un generatore di tensione comandato in tensione.

Soluzione:



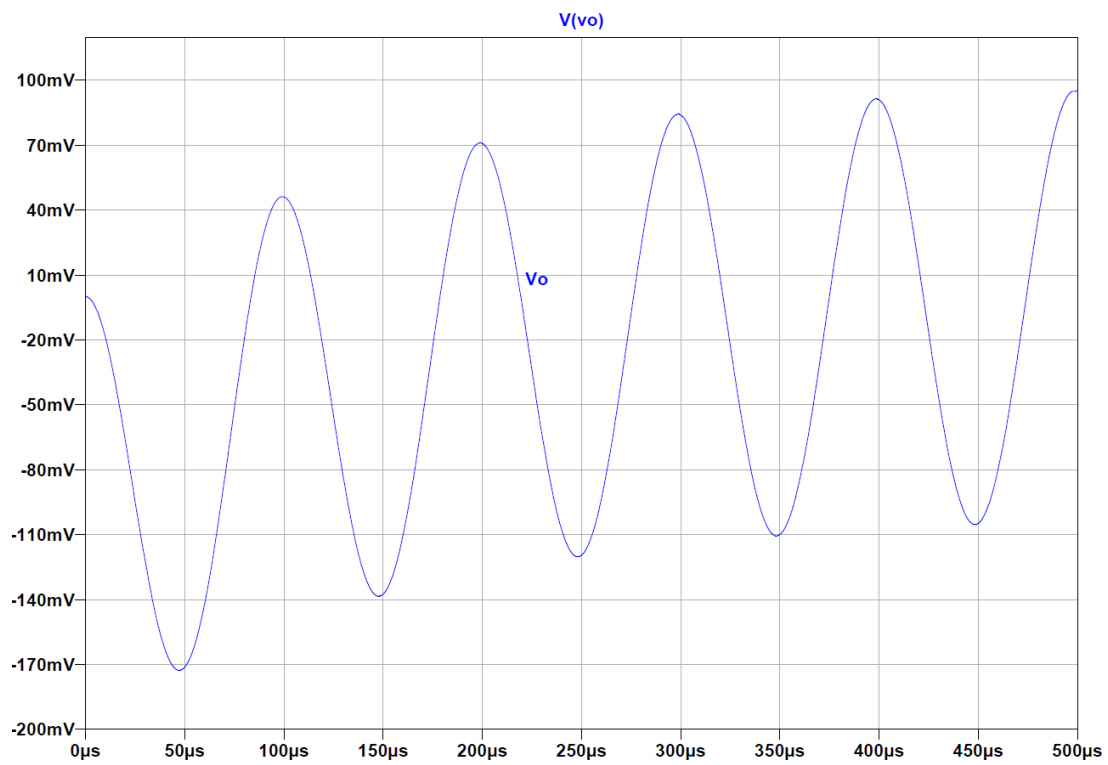
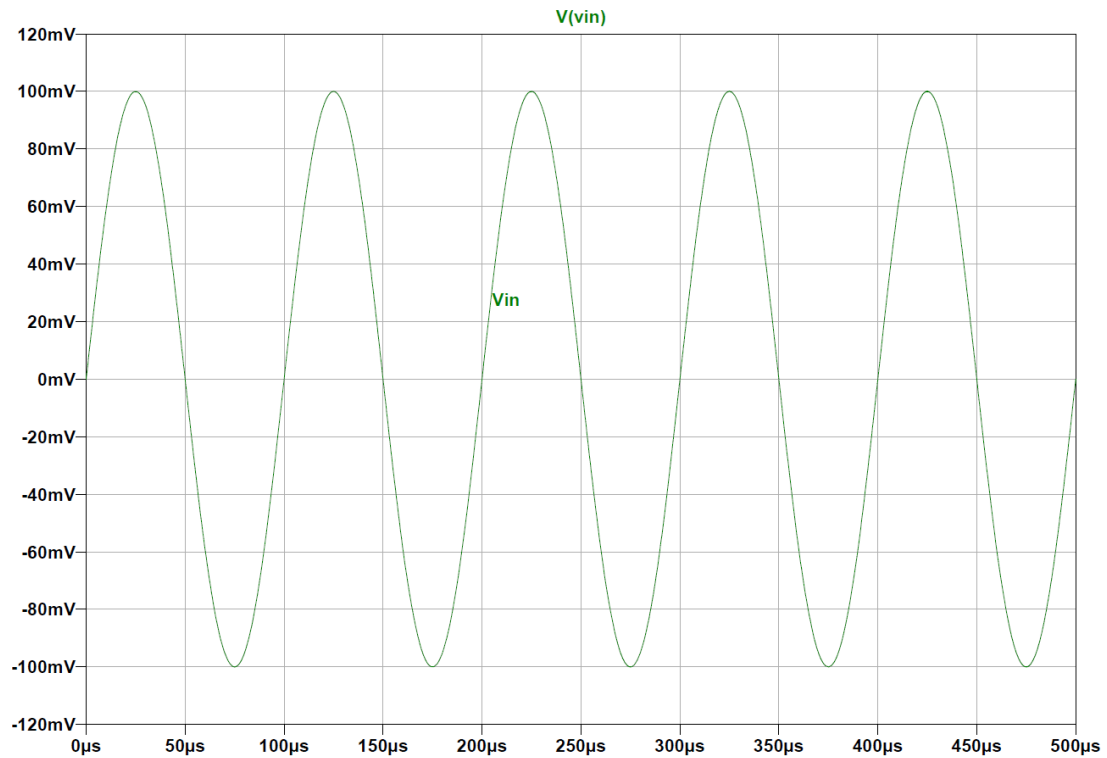
3.7.1 Applicare un segnale sinusoidale all'ingresso, con ampiezza 100 mV, e frequenza pari a 10Hz. Graficare, su due piani xy separati, ma con la stessa scala temporale, 5 periodi della forma d'onda di V_{in} e di V_{out} .

Soluzione:



3.7.2 Applicare un segnale sinusoidale all'ingresso, con ampiezza 100 mV, e frequenza pari a 10kHz. Graficare, su due piani xy separati, ma con la stessa scala temporale, 5 periodi della forma d'onda di V_{in} e di V_{out} .

Soluzione:



Netlist esercizio 3:

*** Schematico iniziale**

```
R1 V- Vin
R2 Vo V-
C1 Vo V-
Vin Vin 0
XU1 V- 0 Vo opamp Aol=100K
GBW=10Meg
.lib opamp.sub
.backanno
.end
```

*** Punto 3.6**

```
R1 V- Vin 12183.17
R2 Vo V- 121831.7
C1 Vo V- 1.306350836n
Vin Vin 0 AC 1
E1 Vo 0 0 V- 10e8
.ac dec 20 1 1MEG
.backanno
.end
```

*** Punto 3.7.1**

```
R1 V- Vin 12183.17
R2 Vo V- 121831.7
C1 Vo V- 1.306350836n
Vin Vin 0 SINE(0 100m 10)
E1 Vo 0 0 V- 10e8
.tran 500m
.backanno
.end
```

*** Punto 3.7.2**

```
R1 V- Vin 12183.17
R2 Vo V- 121831.7
C1 Vo V- 1.306350836n
Vin Vin 0 SINE(0 100m 10k)
E1 Vo 0 0 V- 10e8
.tran 500u
.backanno
.end
```