



## INDICE:

### Filtri RC e CR

#### 1. Analisi nel dominio della frequenza

*1.1. Filtro PASSA BASSO*

*1.2. Filtro PASSA ALTO*

*1.3. Filtro PASSA ALTO + PASSA BASSO*

*1.4. Filtri PASSA BASSO IN CASCATA*

#### 2. Analisi nel dominio del tempo

*2.1. Filtro PASSA ALTO with PULSE*

*2.2. Filtro PASSA BASSO with PULSE*

*2.3. Filtro PASSA BASSO + PASSA ALTO with pulse*

### Circuiti risonanti e antirisonanti: filtri RLC

#### 3. Circuiti risonanti: RLC serie

- 3.1. *RLC nel dominio della frequenza (analisi parametrica)*
  - 3.2. *RLC nel dominio del tempo*
  - 3.3. *RLC analizzato con tre segnali di input nel dominio del tempo*
  - 3.4. *RLC with PULSE (analisi parametrica)*
4. Circuiti antirisonanti: RLC parallelo
- 4.1. *RLC nel dominio della frequenza*

## Amplificatori Operazionali

5. Analisi di circuiti operazionali
- 5.1. *OP\_AMP invertente*
  - 5.2. *OP\_AMP non invertente*
  - 5.3. *OP\_AMP integratore*

## ORCAD

6. SW di simulazione
- 6.1. *Pspice*

## INTRODUZIONE:

In introduzione a questo corso, è stato effettuato un ripasso generale del corso di elettronica affrontato durante l'anno scolastico.

Sono stati analizzati in particolare i filtri, i circuiti risonanti, gli amplificatori operazionali e i transistor.

L'analisi di questi circuiti, è stata effettuata con l'ausilio del simulatore (ORCAD Pspice), con il quale è stato possibile ricostruire i segnali di uscita dei circuiti in esame, affrontando l'analisi sia nel dominio del tempo, sia nel dominio della frequenza

La simulazione in ogni caso è stata preceduta da una veloce spiegazione introduttiva al circuito da analizzare.

## Filtri RC e CR

I filtri sono dei quadripoli che hanno la proprietà di lasciare passare i segnali di determinate frequenze e di eliminare quelli di altre frequenze.

La banda entro cui si ha trasmissione di segnale, viene chiamata *banda passante*, e viene determinata dal progettista.

La transizione dalla banda passante alla banda di frequenza in cui il segnale risulta attenuato, non è immediata ma avviene secondo delle curve ben definite; la pendenza di tali curve, viene anche essa determinata dal progettista.

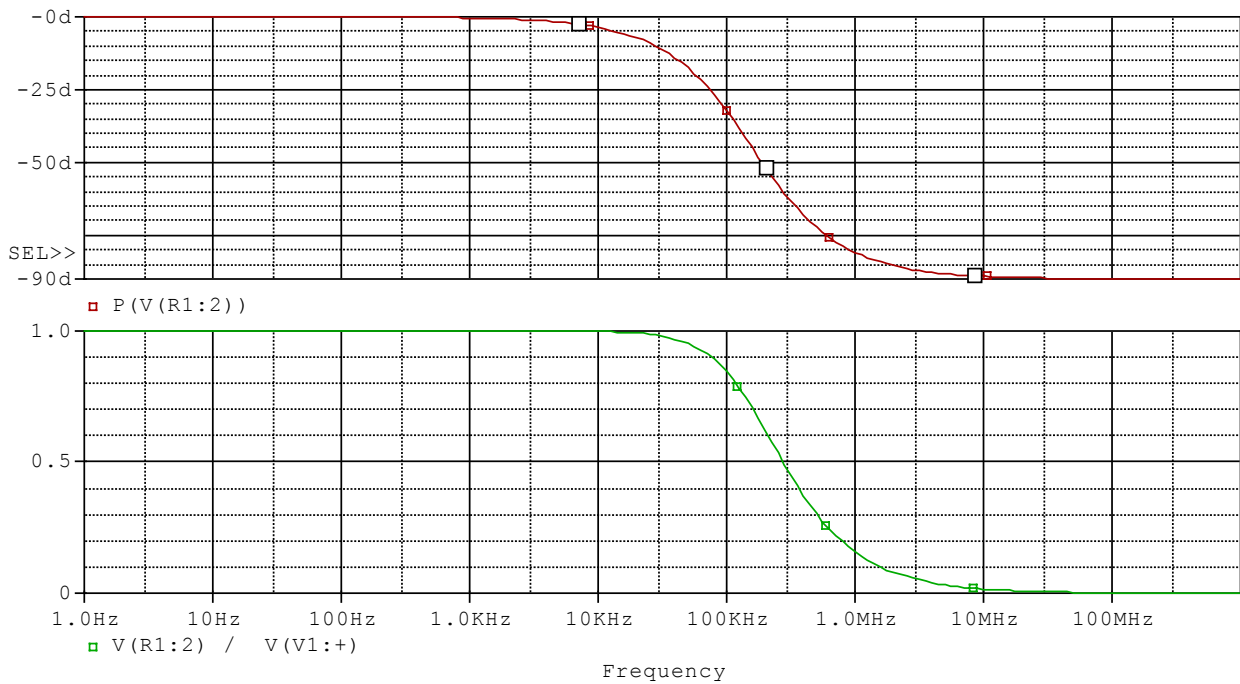
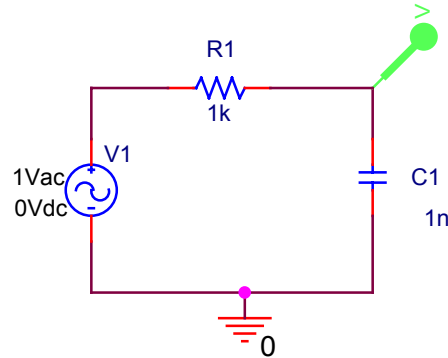
Esistono tre tipologie di filtri, che si differiscono tra di loro per la banda di frequenza che lasciano passare: filtri *passa basso*, filtri *passa banda*, filtri *passa alto*. Questi quadripoli, sono caratterizzati da una frequenza di taglio che determina la banda passante, ovvero la frequenza entro cui la funzione di trasferimento non scende al di sotto del 70,7% del suo valore massimo. ( $|V_{OUT}/V_{IN}| = 1/\sqrt{2} = 0.707$ ); ciò equivale anche a dire che il guadagno entro l'intervallo considerato, non diminuisce di più di 3dB rispetto al valore massimo ( $20 \log 1/\sqrt{2} = -3\text{dB}$ ).

I filtri del primo ordine, ossia con un solo polo, sono inoltre caratterizzati da un'attenuazione di 20dB per decade. Questa pendenza, è data proprio dal fattore di compressione "20" che compare nella formula per il calcolo dell'attenuazione del filtro in "dB".

L'analisi di questi filtri, viene effettuata su scala logaritmica, così da poter apprezzare l'andamento completo della funzione di trasferimento.

# 1 Analisi nel dominio della frequenza

## 1.1



Si e' voluto analizzare l'andamento della funzione di trasferimento di un filtro passa basso. Si nota come vengono lasciate passare solo le frequenze al di sotto della frequenza di taglio, mentre le altre vengono attenuate di 20dB per decade.

E' possibile calcolare la frequenza di taglio utilizzando la seguente formula:

$$f_t = (2\pi RC)^{-1}$$

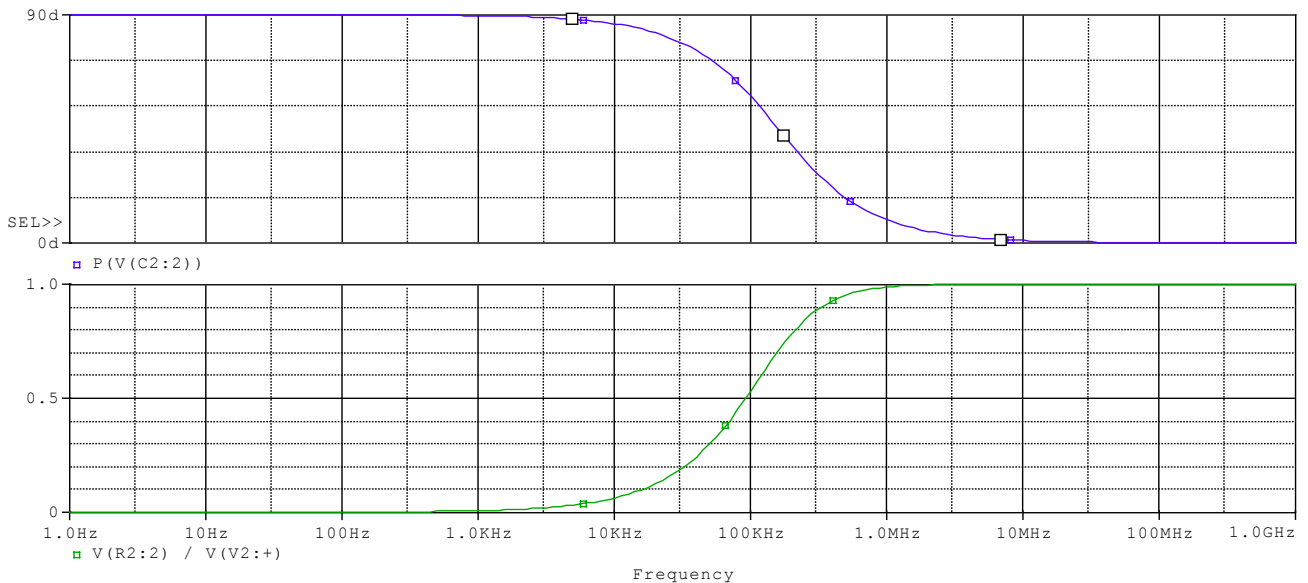
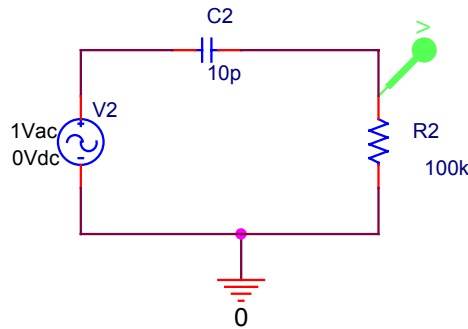
Avendo  $R = 1k\Omega$ , e  $C = 1nF$ , risulta che  $f_t \sim 16kHz$ .

Nel primo grafico, e' possibile osservare la variazione della fase all'aumentare della frequenza, e come a  $f = f_t$   $\phi = -45^\circ$ .

E' possibile calcolare il valore della fase per qualsiasi valore della frequenza tramite questa formula:

$$\phi = -\arctg(\omega RC)$$

## 1.2



Si nota come nei filtri passa alto vengono lasciate passare soltanto le frequenze al di sopra della frequenza di taglio, mentre quelle al di sotto vengono attenuate di 20dB per decade.

La frequenza di taglio può essere calcolata come nei filtri passa basso con la seguente formula:

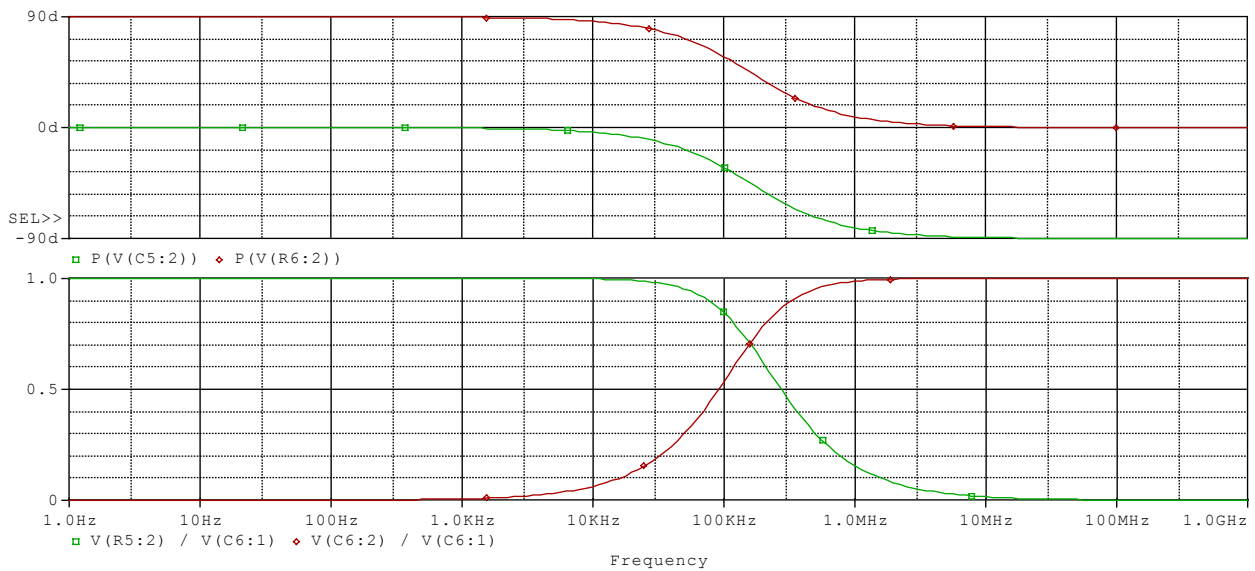
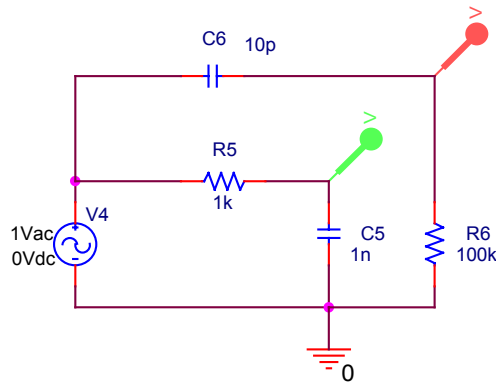
$$f_t = (2\pi RC)^{-1}$$

Quindi, nel nostro caso,  $f_t = 16\text{KHz}$ .

Da notare il differente andamento della fase che varia da  $0^\circ$  a  $+90^\circ$ , e che a  $f = f_t$ ,  $\varphi = +45^\circ$ . Infatti in questo caso la fase vale:

$$\varphi = \arctg(\omega RC).$$

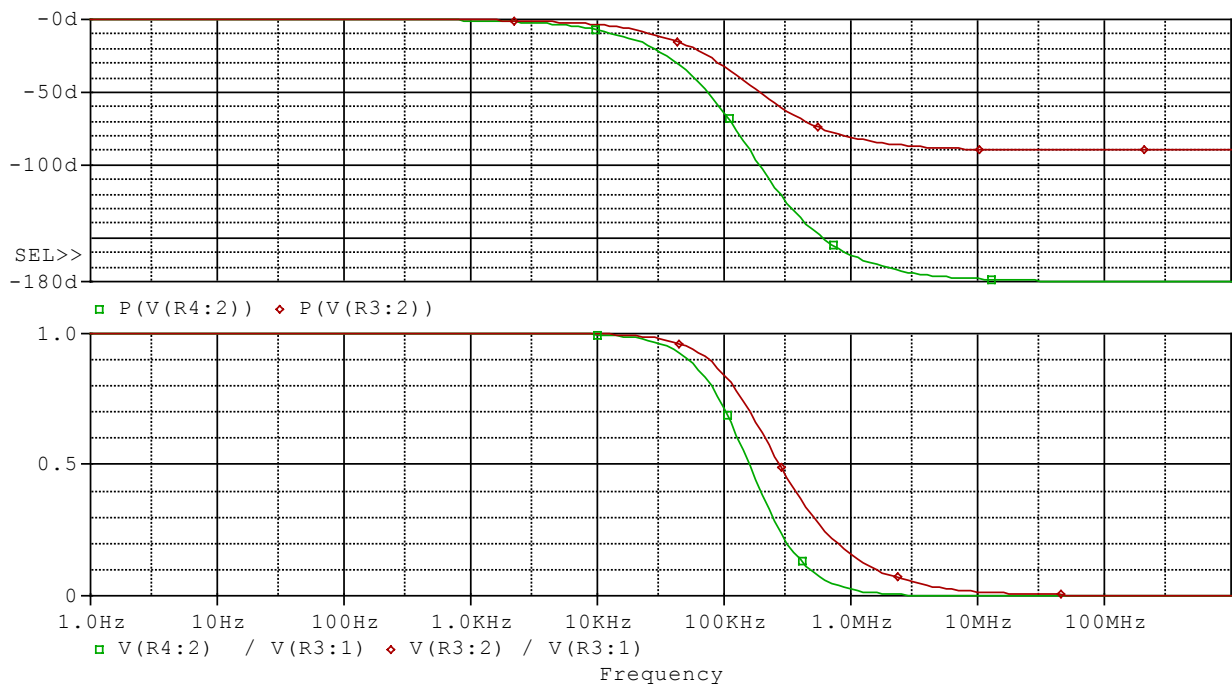
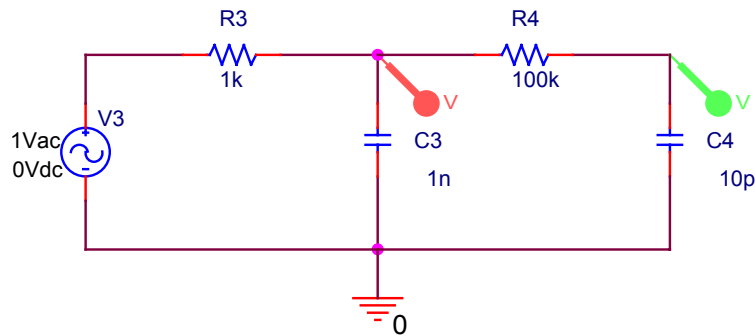
### 1.3



In questa simulazione, sono stati analizzati contemporaneamente un filtro passa alto, e un filtro passa basso.

Essendo i due filtri caratterizzati dalla stessa frequenza di taglio, le due funzioni di trasferimento si intersecano proprio ad  $f = f_t$ . Questo punto di incrocio, viene chiamato punto di corner.

## 1.4



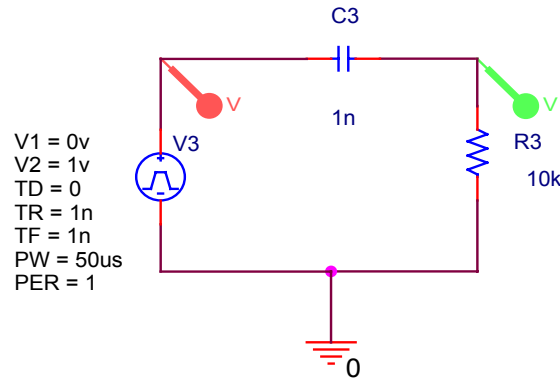
In questo caso, di due filtri RC posti in cascata si ottiene una attenuazione doppia rispetto ai precedenti casi, paria a 40dB per decade, in quanto il fattore di compressione di uscita, equivale alla somma di quello del primo filtro, con quello del secondo.

Si noti il valore della resistenza R4 molto maggiore di R3 per evitare che i due filtri possano influenzarsi tra di loro.

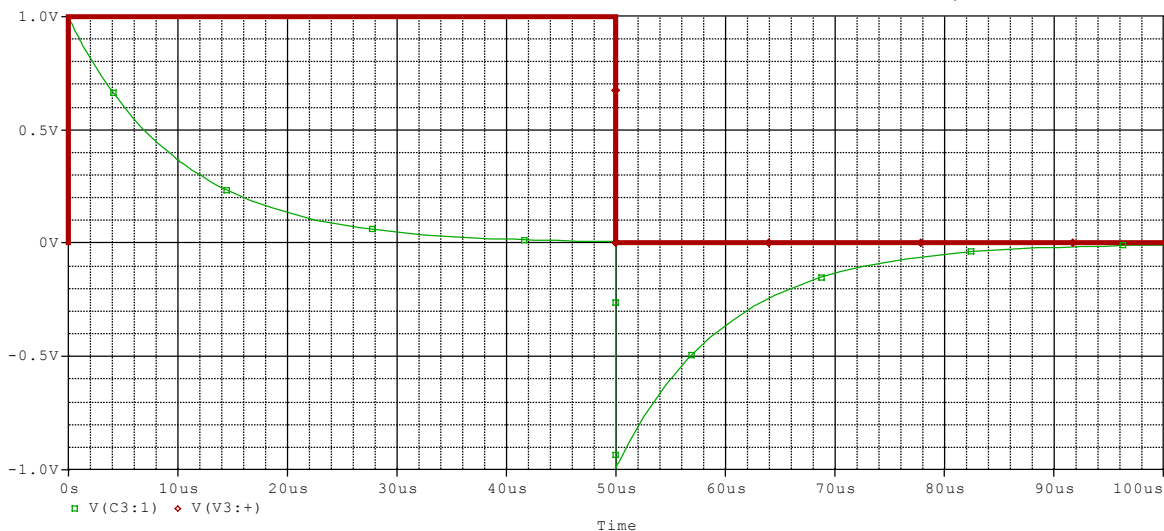
Si osservi i diversi andamenti della fase: il segnale in uscita al secondo filtro, risulta sfasato di  $-180^\circ$ , in quanto il segnale subisce un primo sfasamento di  $90^\circ$  in ritardo all'uscita del primo stadio, per poi subire un'ulteriore sfasamento di  $90^\circ$  sempre in ritardo all'uscita dal secondo filtro. Infine, quindi, il segnale risulta sfasato di ben  $180^\circ$ .

## 2 Analisi nel dominio del tempo

### 2.1



Si puo` vedere in grossetto la tensione di ingresso applicata, e in verde la tensione ai capi della resistenza.



In questo grafico, e` possibile osservare l` andamento della tensione sulla resistenza, in funzione del tempo.

Si puo` vedere come  $t = 0s$  la tensione sulla resistenza e` uguale a  $V_{PULSE}$ , in quanto la tensione sul condensatore e`  $V_C = 0V$ , mentre a  $t = 50\mu s$  (tempo di carica del circuito:  $\tau \geq 5RC = 50\mu s$ ), la tensione sulla resistenza si porta a zero. Questo, accade perche` a  $t = 50\mu s$  la tensione sul condensatore raggiunge il valore di  $V_{PULSE}$ , e quindi tutta la tensione del generatore cade tutta sul condensatore stesso.

Si puo` vedere, invece, come per  $t > 50\mu s$  la tensione su R3 diventi negativa. Questo accade perche` termina l` impulso del generatore e la corrente scorre nel verso opposto in quanto il condensatore tende a scaricarsi sulla resistenza: la tensione su R3 assume un valore massimo negativo (la tensione sul condensatore che ha raggiunto la



tensione del generatore), per poi tendere di nuovo a zero man mano che il condensatore si scarica.

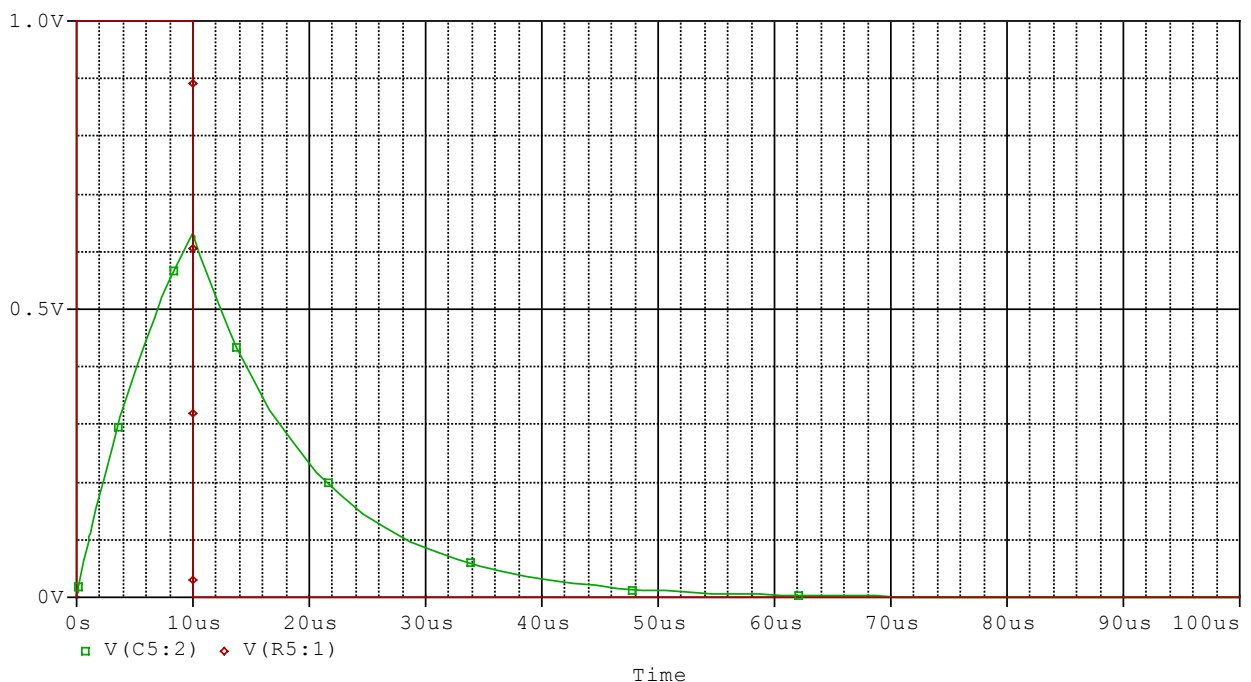
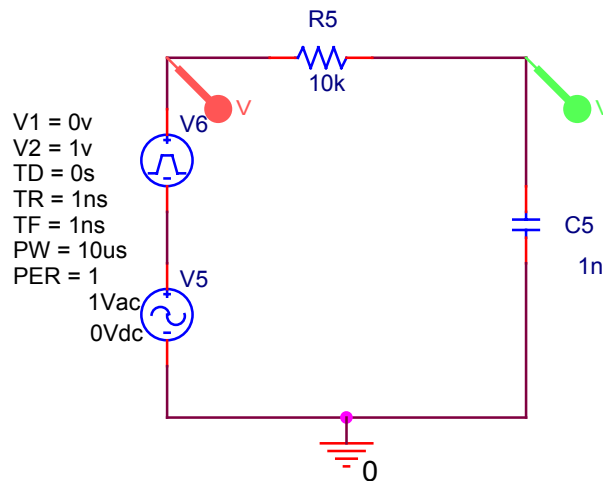
Analisi analitica dell'andamento della tensione d'uscita in funzione del tempo:

$$\text{per } 0 < t < 50\mu\text{s: } v_u = V_3 - v_c = V_3 - V_3(1 - e^{-t/RC}) = V_3 e^{-t/RC}$$

$$\text{per } t > 50\mu\text{s: } v_u = -v_c = -V_3 e^{-t/RC}$$

Si osservi anche dal grafico, come la curva di carica e quella di scarica del condensatore siano uguali ed opposte.

## 2.2



Con questa simulazione, è stato possibile osservare l'andamento di una curva di carica di un condensatore.

La funzione rappresentata in verde, infatti, mostra l'andamento della tensione sul condensatore nel tempo.

Come si può osservare, il condensatore, non si carica completamente. Questo è dovuto al fatto che il tempo (PW) per il quale il segnale "Vpulse" è stato attivo, non è sufficiente ad effettuare la completa carica del condensatore.

Il tempo necessario per effettuare completamente la carica della capacità, è pari ad almeno  $5\tau$ .

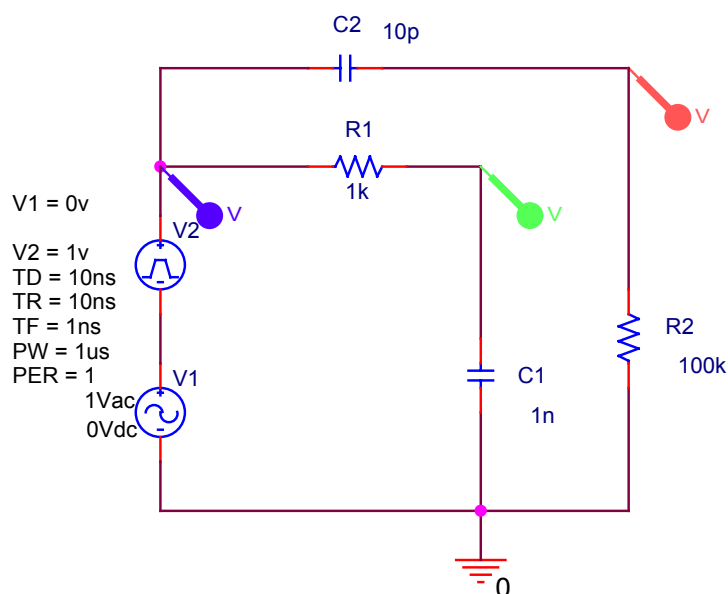
Essendo  $\tau$  la costante di tempo del circuito, uguale a  $RC$ , risulta facile calcolare il tempo necessario al condensatore per caricarsi:

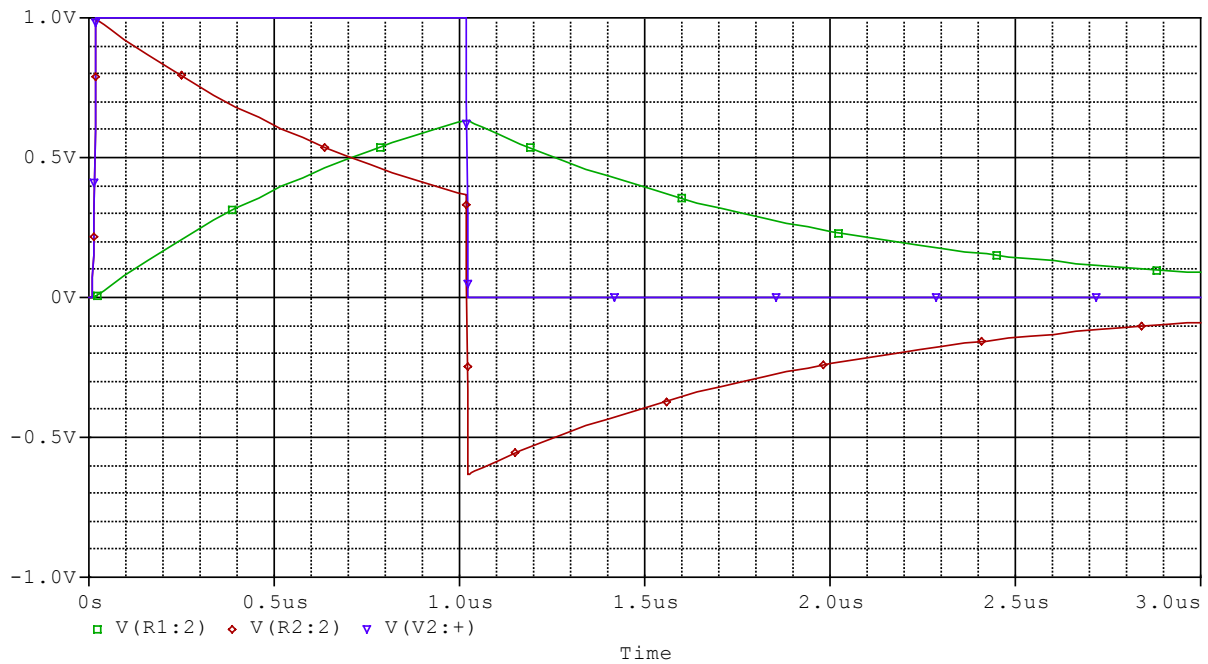
$$T > 5RC = 5 \cdot (10^4) \cdot (10^{-9}) = 500\mu s$$

Risulta evidente la differenza tra il tempo impostato ( $PW = 10\mu s$ ) e il tempo necessario ( $T > 500\mu s$ ).

Se avessimo voluto quindi visualizzare l'andamento della tensione sul condensatore fino alla sua completa carica, avremmo dovuto impostare un "PW" relativo al generatore  $V_{PULSE}$  pari a  $500\mu s$ .

## 2.3





Qui vengono analizzati contemporaneamente i due circuiti precedenti.  
Valgono le osservazioni precedentemente fatte.

## Circuiti risonanti e antirisonanti: filtri RLC

Sono dei filtri composti da tre elementi: un induttore, una capacità e un componente resistivo.

Sono dei filtri molto selettivi, in quanto ci permettono di selezionare determinate frequenze del segnale presente in ingresso.

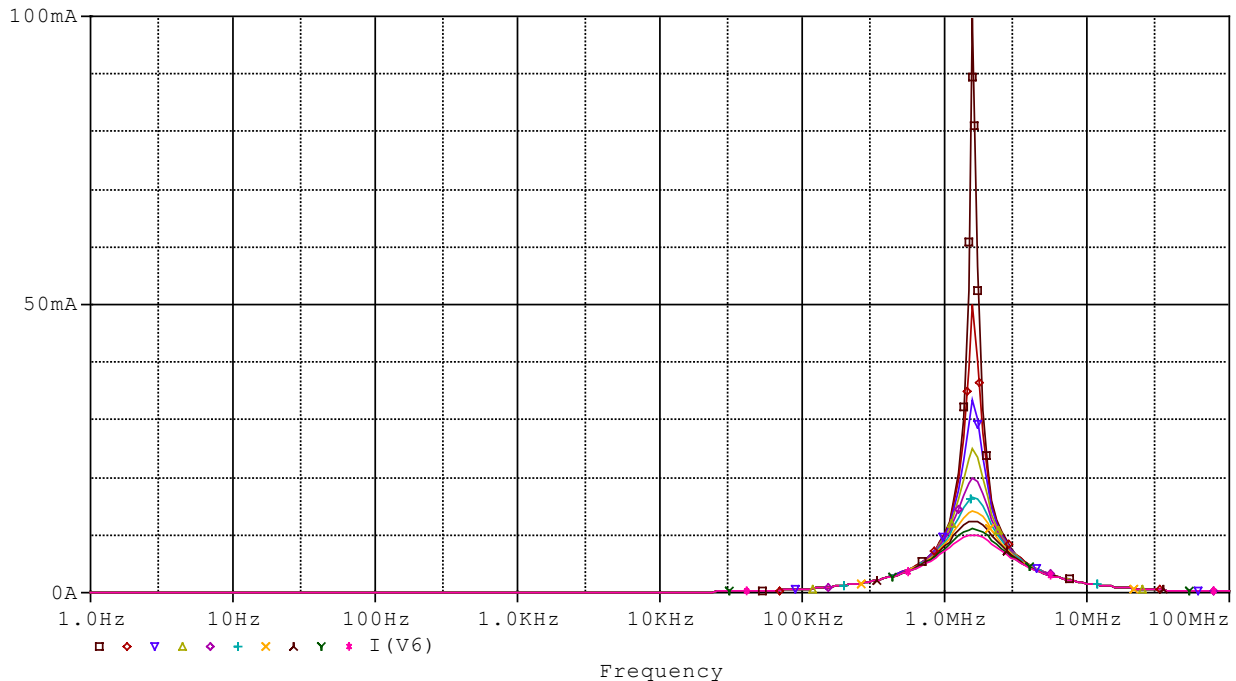
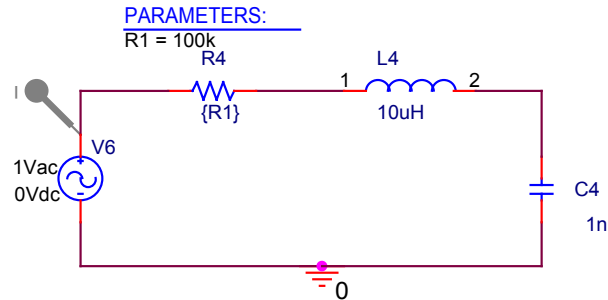
Esistono due tipi di circuiti RLC: RLC serie (circuiti risonanti), e RLC parallelo (circuiti antirisonanti).

La differenza tra i due, sta nel fatto che alla frequenza di risonanza, hanno un comportamento opposto:

- per  $f = f_r$ , i circuiti risonanti l'impedenza è minima.
- per  $f = f_r$ , i circuiti antirisonanti l'impedenza è massima.

### 3 Circuiti risonanti: RLC serie

#### 3.1



Analizziamo ora un circuito risonante.

E' possibile vedere come l'andamento della corrente, sia caratterizzato da una forma a campana, tanto più stretta quanto più piccolo è il valore di R4.

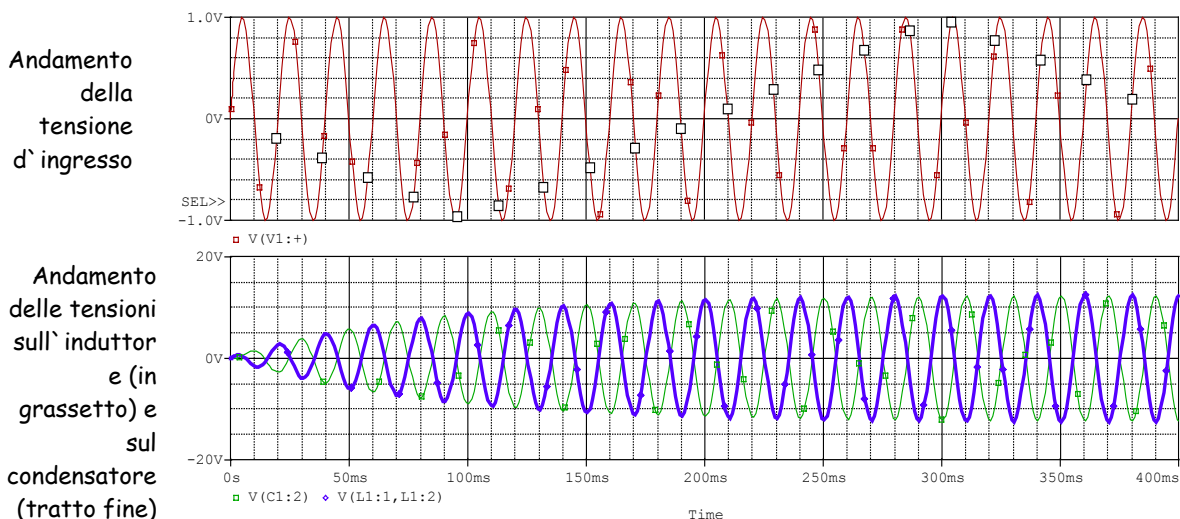
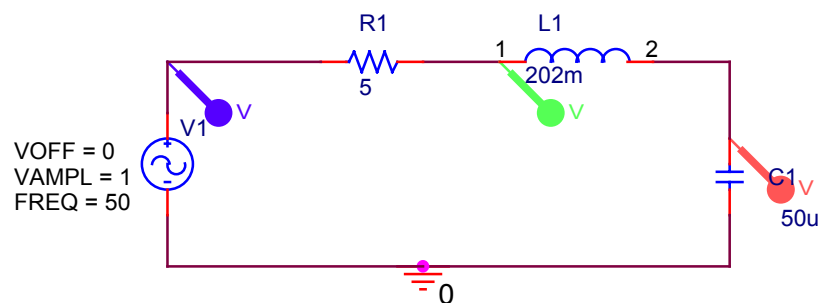
Questo andamento, è dovuto al fatto che a  $f = f_r$  (frequenza di risonanza), la reattanza capacitiva, e la reattanza induttiva si compensano tra di loro. In questa condizione l'unica impedenza vista dal generatore, e' soltanto il carico resistivo.

E' possibile calcolare la frequenza di risonanza tramite la seguente formula:

$$f_r = (2\pi \cdot \sqrt{LC})^{-1}$$

Il comportamento del circuito risonante può essere spiegato dal fatto che alle alte frequenze predomina la reattanza induttiva e quindi la corrente è piccola ed è in ritardo di 90° rispetto alla tensione applicata; alle basse frequenze predomina la reattanza capacitiva e quindi la corrente è piccola ed è in anticipo di 90° rispetto alla tensione applicata. Alla frequenza di risonanza, invece la corrente è massima, e vale: "V<sub>i</sub>/R".

### 3.2



Si può osservare l'andamento nel tempo delle tensioni sul condensatore e sull'induttanza.

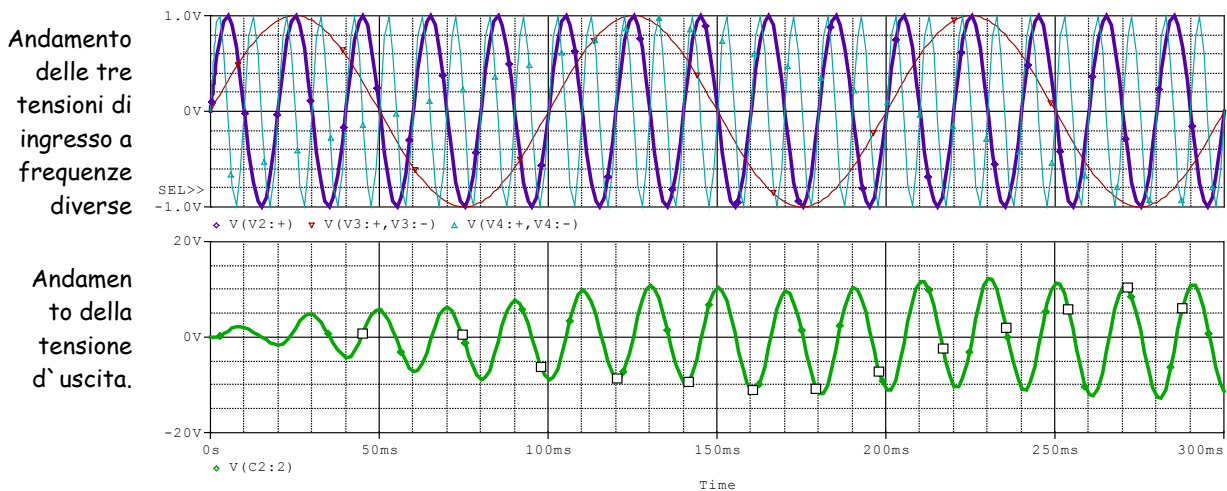
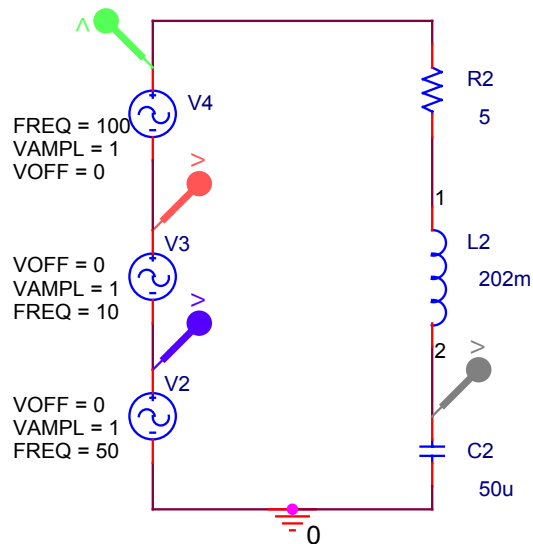
Si vede subito come le due tensioni siano sfasate tra loro di 180°, in quanto la tensione sul condensatore è di 90° in ritardo, mentre la tensione sull'induttanza è di 90° in anticipo.

Alla frequenza di risonanza, le tensioni  $V_L$  e  $V_C$  (tensione sull'induttore e sul condensatore) sono apprezzabilmente superiori a  $V_1$ , infatti:

$$|V_{Lr}| = |V_{Cr}| = Q |V_1|$$

il parametro "Q", è detto coefficiente di sovratensione. I valori di  $V_{Lr}$  e  $V_{Cr}$  molto maggiori della tensione di ingresso  $V_1$  sono possibili in quanto  $V_{Lr}$  e  $V_{Cr}$  sono sfasati di  $180^\circ$  tra di loro ed hanno la stessa ampiezza: la loro somma pertanto, è nulla. Il transitorio iniziale, è dovuto alla carica del condensatore e dell' induttore.

### 3.3



Si noti come il segnale di uscita abbia la stessa frequenza del generatore V2 con frequenza di risonanza

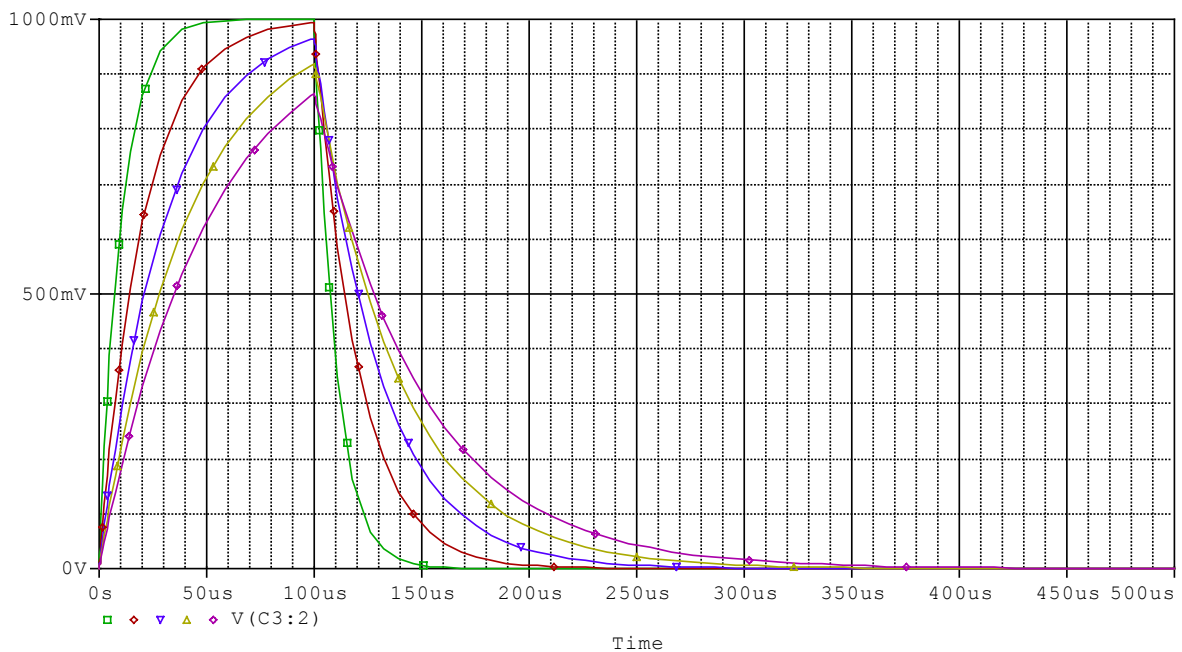
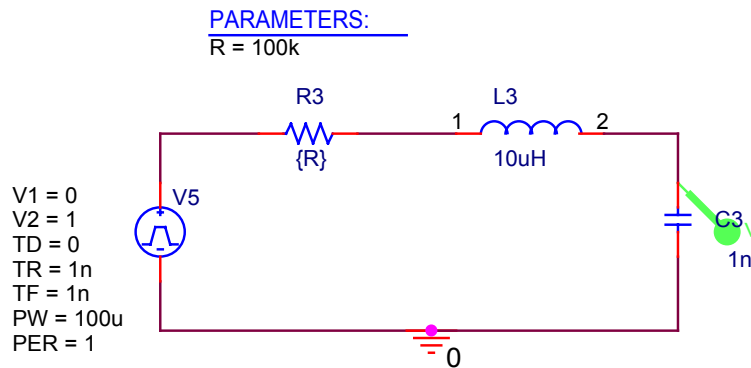
In questa simulazione, si sono voluti verificare i concetti espressi sui circuiti risonanti.

Si è realizzato un circuito inserendo in serie tre generatori di tensione sinusoidali a frequenze diverse tra di loro.

Si è calcolata la frequenza di risonanza del circuito, e abbiamo impostato questo valore come frequenza di lavoro del generatore  $V_2$ .

Si può ora osservare come la tensione di uscita del circuito, abbia la stessa frequenza del generatore  $V_2$ , ossia la frequenza di risonanza: questo significa che le altre tensioni a frequenze diverse da quella di risonanza sono state fortemente attenuate.

### 3.4



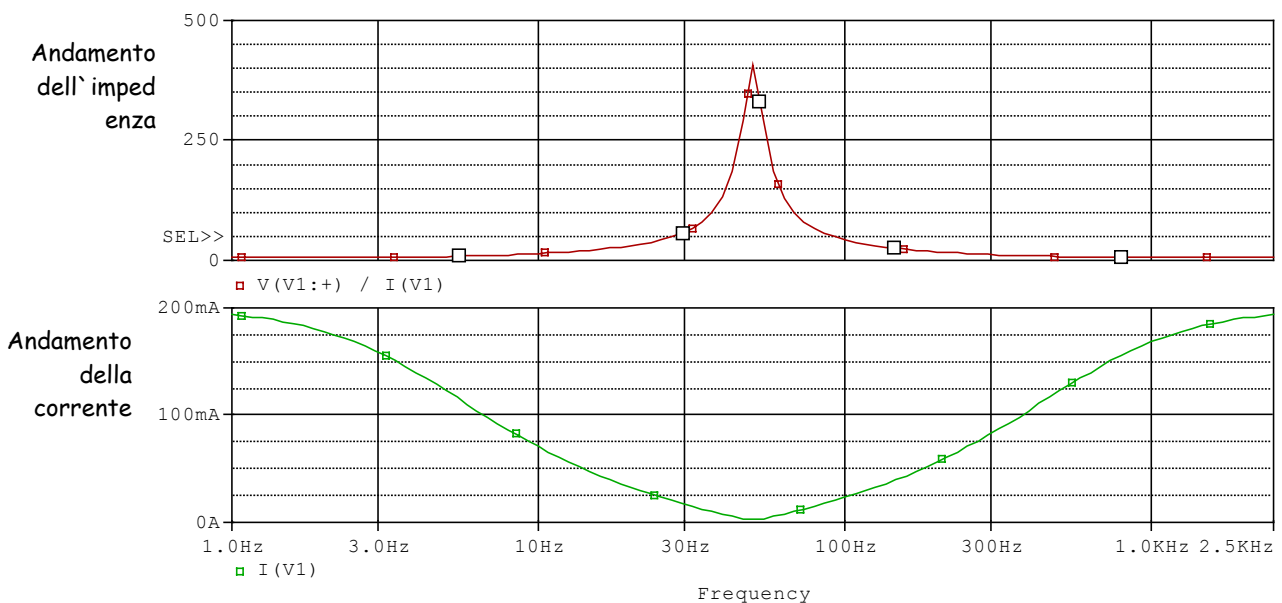
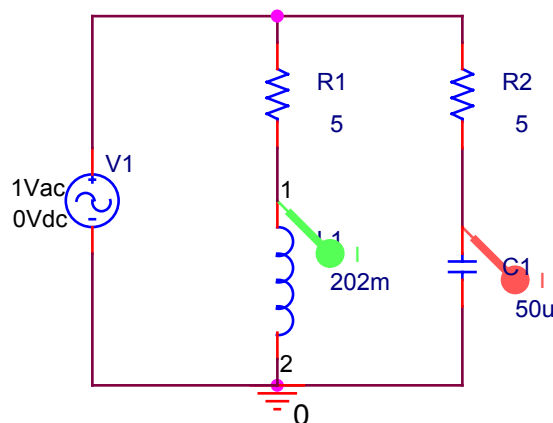
A regime impulsivo, il circuito risonante può essere paragonato ad un più semplice circuito RC, in quanto in regime continuo la reattanza induttiva ha valore zero.

Con questa analisi parametrica, osserviamo l'andamento della tensione di carica e scarica del condensatore per valori diversi della resistenza  $R_3$ .

Si nota come al diminuire della costante di tempo del circuito ( $5RC$ ), il valore della tensione sul condensatore assume valori sempre più vicini a  $V_2$  di  $V_{PULSE}$ . Questo perché  $\tau$  si avvicina al valore PW (Pulse Width: larghezza d'impulso) del generatore, così da permettere la completa carica della capacità.

## 4 Circuiti antirisonanti: RLC parallelo

### 4.1





In questo circuito antirisonante, è stato messo in evidenza l'andamento della corrente e dell'impedenza, in maniera tale da mettere in contrasto il differente comportamento di questo circuito rispetto ai circuiti risonanti.

L'analisi viene effettuata come per il circuito risonante serie, analizzando il comportamento dei componenti reattivi al variare della frequenza.

Abbiamo che alle alte frequenze la reattanza induttiva è alta, e la reattanza capacitiva è circa zero: la corrente in questo caso è alta e vale " $V_i/R_2$ ".

Alle basse frequenze, invece, la reattanza capacitiva è alta, e la reattanza induttiva è circa zero: la corrente anche in questo caso è alta e vale " $V_i/R_1$ ".

La frequenza di risonanza, viene calcolata come per il circuito RLC serie:

$$f_r = (2\pi \cdot \sqrt{LC})^{-1}$$

A questa frequenza, l'impedenza complessiva è massima, e la corrente risulta essere bassa: da qui il nome antirisonante.

## **Amplificatori Operazionali**

### **5 Analisi di circuiti operazionali**

In questa parte verranno analizzati alcuni circuiti con amplificatori operazionali.

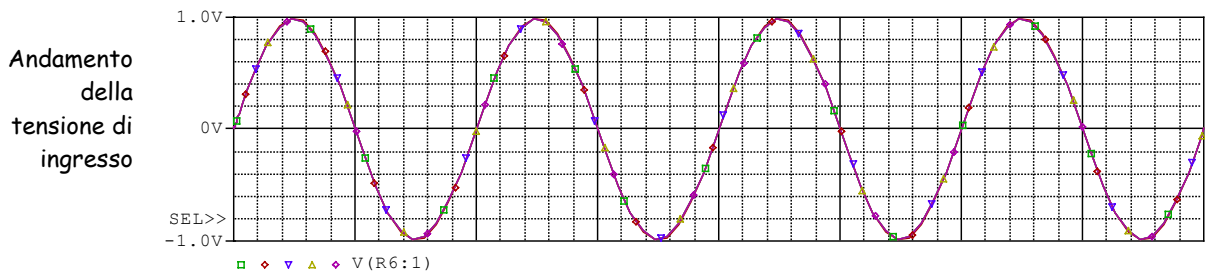
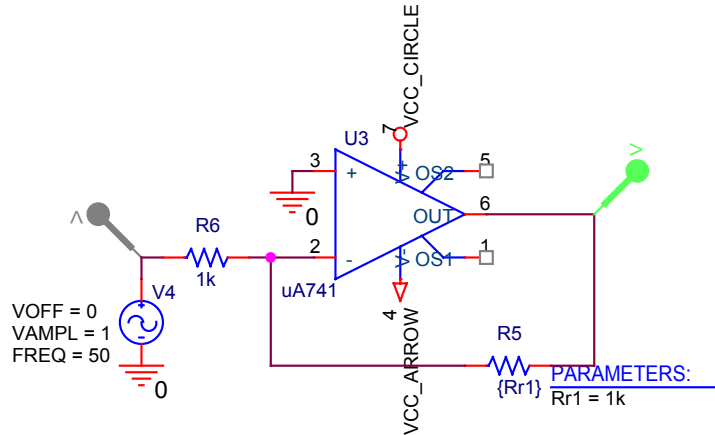
Questi integrati, sono degli amplificatori a transistor che presentano un'amplificazione molto elevata, una resistenza d'ingresso anche essa molto elevata, un'ampia larghezza di banda, ecc...

Verrà introdotto per l'analisi di questi circuiti, il concetto di feedback negativo: parte del segnale di uscita amplificato, viene riportato in ingresso tramite una resistenza al morsetto "V<sub>-</sub>".

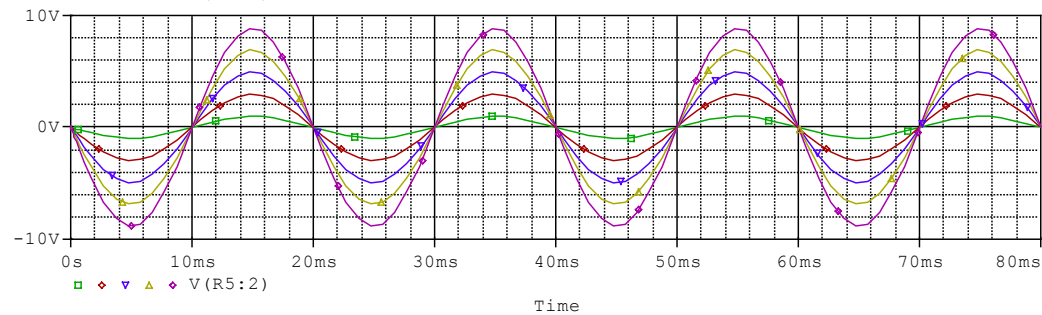
Questa configurazione risulta a noi molto utile, in quanto potremo variare l'amplificazione semplicemente variando il valore della resistenza di reazione.

Concetto molto importante per analizzare i circuiti con amplificatore operazionale, è il fatto che la tensione differenziale tra i due morsetti  $V^+ - V^-$  è uguale a zero, e che i due ingressi non assorbono corrente.

## 5.1



Andamento (in controfase) delle tensioni di uscita per diversi valori dell'amplificazione e (analisi parametrica)

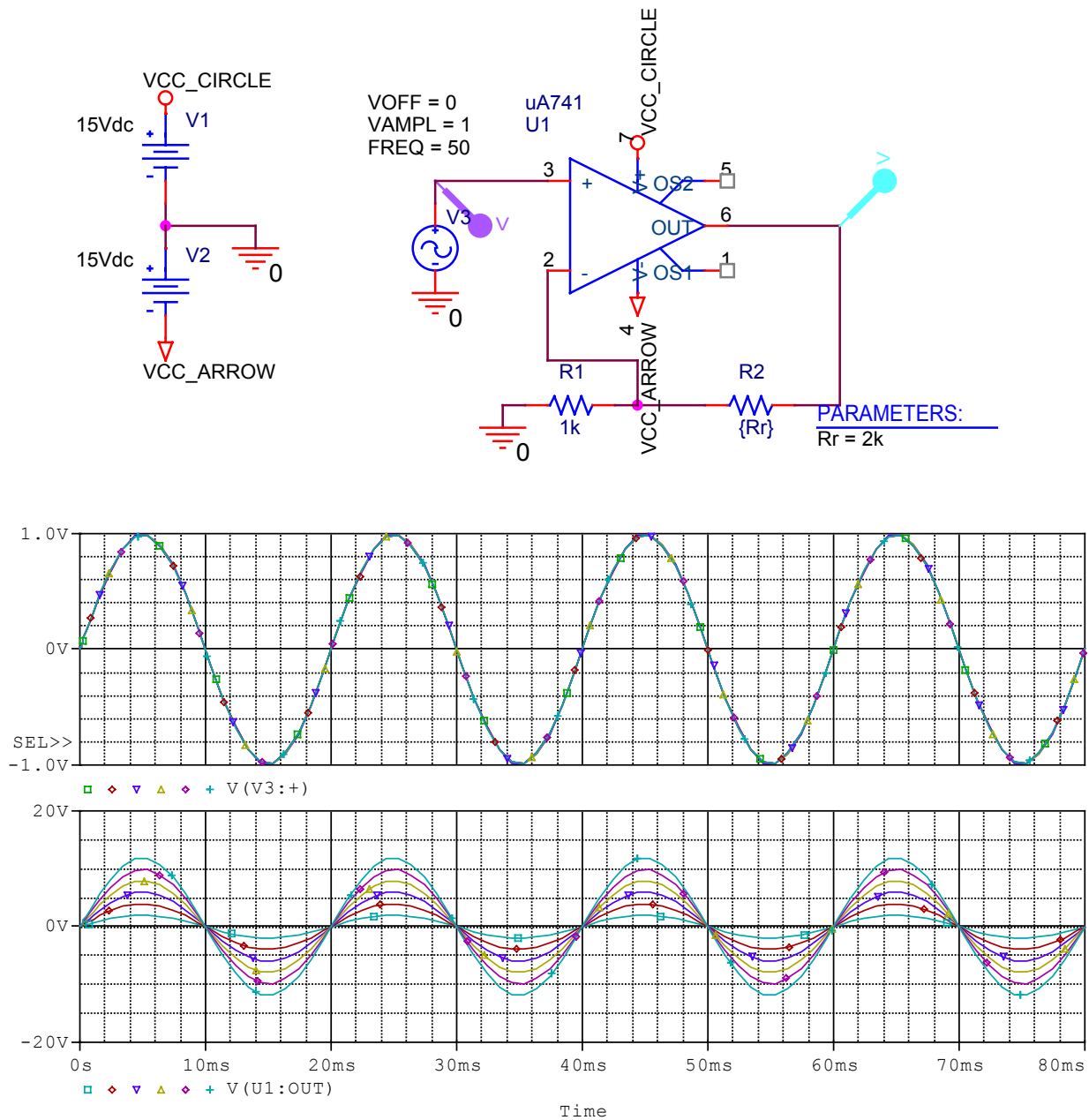


In questo caso, viene analizzato un amplificatore operazionale in configurazione invertente.

Possiamo determinare la tensione di uscita, applicando semplicemente il secondo teorema di Kirchhoff.  $\Rightarrow V_U = -(R_R/R_I) V_i$ .

Osservando il grafico, risulta evidente come il segnale di uscita sia sfasato di  $180^\circ$  rispetto all'ingresso.

## 5.2



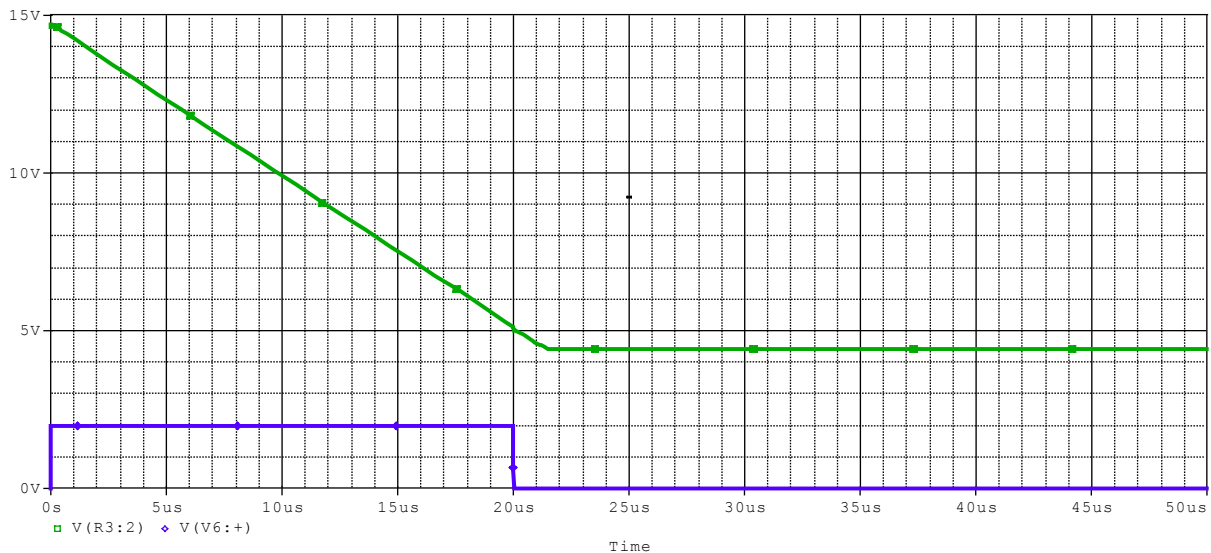
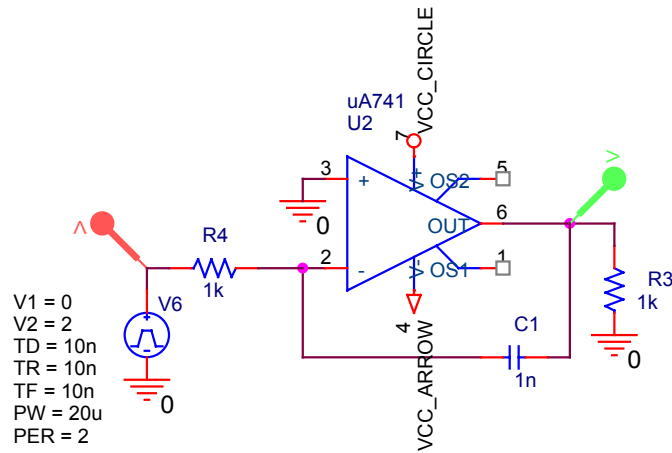
Nella configurazione non invertente, si può osservare la corrispondenza tra le fasi del segnale di ingresso, e di quello di uscita.

In questo circuito, la determinazione del segnale di uscita, risulta:

$$A = V_U/V_I = \frac{(R_I + R_R) I}{R_I I} = \frac{R_I + R_R}{R_I} = 1 + \frac{R_R}{R_I}$$

$$\Rightarrow V_U = A V_i$$

### 5.3



Si può notare il segnale a gradino posto in ingresso al circuito, ed il relativo integrale che si ha in uscita.

Il circuito integratore, è caratterizzato dal fatto che la resistenza di reazione viene sostituita da una capacità.

$$\Rightarrow R_R = (j\omega C)^{-1}$$

Questo cambiamento, comporta un diverso comportamento del circuito in frequenza: il circuito, esegue un integrale della tensione di ingresso.

$$V_U = (RC)^{-1} \int v_i dt$$

Abbiamo quindi che la tensione di uscita è l'integrale della tensione di ingresso, moltiplicato per un fattore  $(RC)^{-1}$ .

## ORCAD

### 6 SW di simulazione

#### 6.1

Il software di simulazione Pspice, ci ha permesso di effettuare accurate analisi per studiare il comportamento dei circuiti analizzati.

Sono state possibili effettuare simulazioni nel dominio della frequenza e nel dominio del tempo.

E' stata introdotta poi l'analisi parametrica, grazie alla quale è stato possibile analizzare il comportamento dei circuiti al variare di alcuni parametri indicati da noi.

#### Analisi nel dominio del tempo

Con questa analisi, sono stati osservati i comportamenti dei vari circuiti nel tempo.

In particolare, sono stati possibile visualizzare i transienti dei circuiti RC, CR e RLC.

Questa modalità, viene impostata dal SW Capture CIS, che ci ha permesso in particolar modo la realizzazione dei circuiti.

#### Analisi nel dominio della frequenza

Con questa analisi è stato possibile visualizzare il comportamento dei circuiti al variare della frequenza. Questa analisi ci ha consentito in particolare di osservare l'andamento delle impedenze e delle correnti e di calcolare le funzioni di trasferimento nei circuiti risonanti e antirisonanti.

Questa modalità di analisi, viene anche essa impostata sul SW Capture CIS.

E' possibile determinare il range di analisi, è in particolare la risoluzione (il numero di punti per decade necessari per tracciare il grafico della funzione).

#### Analisi parametrica

L'analisi parametrica, ci permette di eseguire delle simulazioni nel tempo e nella frequenza al variare di alcuni parametri da noi impostati.

E' possibile ad esempio, eseguire un'analisi parametrica di un circuito risonante al variare della resistenza, e quindi vedere su un grafico, l'andamento della corrente per diversi valori del parametro "R".

Le operazioni necessarie ad impostare l'analisi parametrica, vengono eseguite dal SW Capture CIS.

Per eseguire questo tipo di analisi, e' necessario per prima cosa, rinominare il valore del componente del quale si vuole variare il valore durante la simulazione, impostando il nome tra parentesi graffe: es. {R} .

A questo punto verra' inserito nel circuito, il componente "PARAM" presente nella libreria "SPECIAL" di Pspice. Questo componente, ci permettera' di definire il parametro che noi vogliamo fa variare.

Bisogna ora sulle proprieta' del componente PARAM inserire una nuova colonna, impostando il nome del parametro senza le parentesi graffe, ed il suo valore di default qualora non si ritenga piu' necessaria l'analisi parametrica.

Fatto cio' , basta spuntare sulla finestra < Pspice → Edit Simulation Profile > l'opzione "Parametric Sweep". Impostiamo ora il tipo di variabile (nel caso della resistenza impostiamo *Global parameter*), ed il suo nome senza parentesi graffe. E' possibile a questo punto impostare i valori di start, di end e l'incremento relativi al parametro.