

# LTspice

## Analisi nel dominio della frequenza

[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)  
(versione del 4-4-2016)

### Direttiva .AC

- L'analisi nel dominio della frequenza è attivata mediante la direttiva **.AC** che ha la forma seguente:  
*.AC tipo n-punti fmin fmax*  
dove
  - ◆ *tipo* può essere  
**lin** = variazione lineare  
**oct** = variazione per ottave  
**dec** = variazioni per decenni
  - ◆ *n-punti* indica il numero totale di punti nel caso di variazione lineare oppure il numero di punti per ottava o per decade
  - ◆ *fmin* e *fmax* sono le frequenze minima e massima
- In LTspice è possibile utilizzare anche la forma:  
*.AC list elenco frequenze*

## Direttiva .AC

- Prima di eseguire l'analisi nel dominio della frequenza il programma esegue automaticamente un'analisi del punto di lavoro in continua (.op)
  - ◆ Se nel circuito sono presenti sia generatori sinusoidali sia generatori in continua, l'analisi in continua viene eseguita azzerando i generatori sinusoidali e l'analisi nel dominio della frequenza è eseguita azzerando i generatori in continua
  - ◆ Se sono presenti componenti non lineari, per eseguire l'analisi nel dominio della frequenza il circuito viene linearizzato nell'intorno del punto di lavoro
  - ◆ I risultati dell'analisi sono significativi se l'approssimazione lineare è accettabile (cioè in **regime di piccoli segnali**)

3

## Generatori sinusoidali

- Per assegnare i valori a generatori di tensione o di corrente sinusoidali, occorre
  - ◆ selezionare il pulsante *advanced* nella finestra di dialogo che compare cliccando sul simbolo del componente
  - ◆ inserire i valore dell'ampiezza (in volt o ampere) e della fase (in gradi) nelle caselle *AC Amplitude* e *AC Phase*
  - ◆ si può omettere la fase se il suo valore è zero
- E' possibile assegnare allo stesso generatore sia un valore in continua (utilizzato per l'analisi del punto di lavoro) sia un valore in alternata (usato per l'analisi nel dominio della frequenza)
- Spesso l'analisi nel dominio della viene utilizzata per la determinazione di funzioni di rete
  - ◆ In questo caso normalmente ai generatori si assegna ampiezza unitaria e fase nulla

4

## Funzioni di rete

- Si considera un circuito con un solo ingresso (cioè un solo generatore)
- Per **funzione di rete** si intende il rapporto tra il fasore di una variabile (tensione o corrente) di uscita e il fasore della variabile di ingresso (tensione o corrente del generatore)
- Se le variabili di ingresso e di uscita sono relative alla stessa porta la funzione di rete è detta anche **funzione di immettenza** (impedenza o ammettenza)
- Se le variabili di ingresso e di uscita sono relative a porte diverse la funzione di rete è detta **funzione di trasferimento**

5

## Funzioni di rete

- Ogni funzione di rete, **H**, è una funzione razionale della variabile complessa  $j\omega$ , cioè un rapporto tra polinomi nella variabile  $j\omega$ , del tipo

$$\mathbf{H}(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 (j\omega) + a_0}$$

- Ciò deriva dal fatto che i fasori delle tensioni e delle correnti possono essere calcolati a partire da un sistema di equazioni i cui coefficienti contengono i fattori  $j\omega$  o  $1/j\omega$  (presenti nelle equazioni caratteristiche dei componenti dinamici)
- I coefficienti dei polinomi,  $a_k$  e  $b_k$ , sono sempre reali e dipendono dai parametri dei componenti diversi dai generatori indipendenti

6

## Funzioni di immettenza

- Per un circuito con un solo ingresso il rapporto tra i fasori della tensione e della corrente del generatore è detto **impedenza di ingresso** ( $Z_i$ ) e il suo reciproco è detto **ammettenza di ingresso** ( $Y_i$ )

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \qquad Y_i = \frac{I_i}{V_i}$$

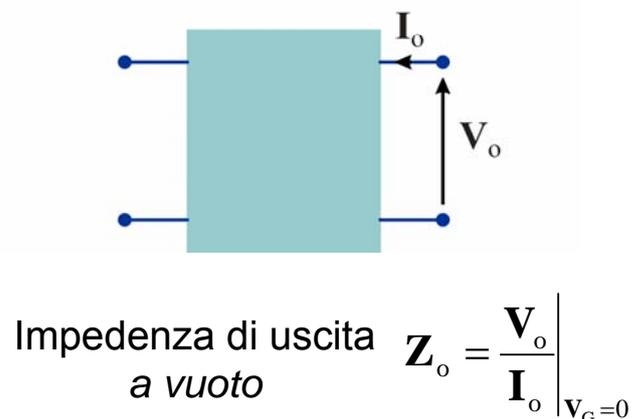
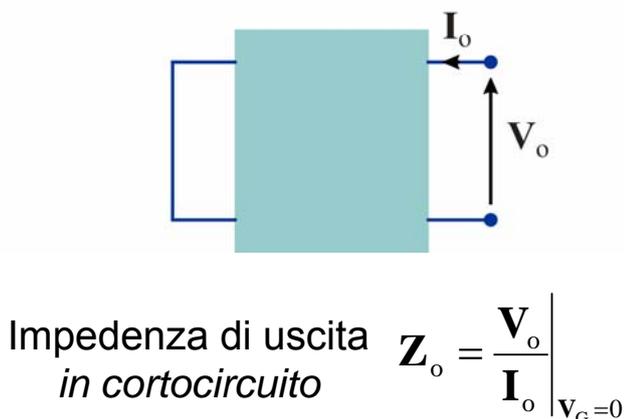
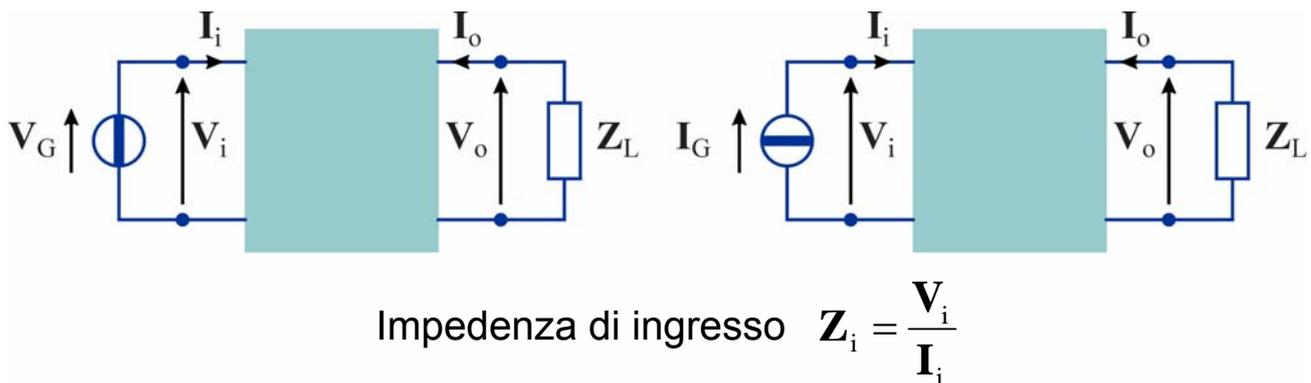
- Nel caso di una rete 2-porte collegata tra un generatore un'impedenza di carico  $Z_o$ , si definiscono anche **impedenza di uscita** ( $Z_o$ ) il rapporto tra i fasori della tensione e della corrente alla porta 2 valutato con il generatore azzerato e **ammettenza di uscita** ( $Y_o$ ) il suo reciproco

$$Z_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{S_i=0} \qquad Y_o = \left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{S_i=0}$$

( $S_i$  indica la grandezza impressa, tensione o corrente, del generatore)

7

## Funzioni di immettenza



8

## Funzioni di trasferimento

- In generale, sia l'ingresso che l'uscita possono essere una tensione ( $V_i, V_o$ ) o una corrente ( $I_i, I_o$ )
- ➔ Quindi si possono definire quattro tipi di funzione di trasferimento

- ◆ **Guadagno di tensione**

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

- ◆ **Guadagno di corrente**

$$A_I = \frac{I_o}{I_i}$$

- ◆ **Impedenza di trasferimento**

$$Z_T = \frac{V_o}{I_i}$$

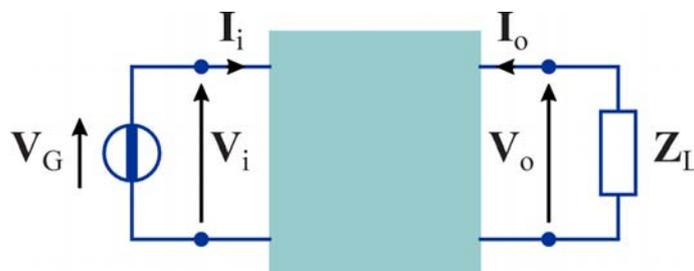
- ◆ **Ammettenza di trasferimento**

$$Y_T = \frac{I_o}{V_i}$$

9

## Guadagno di potenza

- Per un due porte collegato tra un generatore e un'impedenza di carico, si definisce **guadagno di potenza** il rapporto tra la potenza attiva ceduta al carico e la potenza attiva fornita dal generatore



$$A_P = \frac{P_L}{P_G} = -\frac{\operatorname{Re}[V_o I_o^*]}{\operatorname{Re}[V_i I_i^*]}$$

10

## Espressione dei guadagni in decibel

- Il **decibel** (dB) è una unità logaritmica convenzionale utilizzata per esprimere il rapporto tra due potenze (es. guadagno di potenza)

$$A_{\text{pdB}} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} A_p$$

- Nel caso di rapporti tra due tensioni o due correnti (es. guadagno di tensione o di corrente) si possono esprimere i valori in dB considerando le potenze che le tensioni o le correnti svilupperebbero se applicate a resistenze di uguale valore

$$A_{\text{vdB}} = 10 \log_{10} \frac{V_2^2 / R}{V_1^2 / R} = 20 \log_{10} \frac{|V_2|}{|V_1|} = 20 \log_{10} |A_v|$$

$$A_{\text{idB}} = 10 \log_{10} \frac{RI_2^2}{RI_1^2} = 20 \log_{10} \frac{|I_2|}{|I_1|} = 20 \log_{10} |A_i|$$

- ➔ *Per i rapporti tra potenze il coefficiente moltiplicativo è 10, per i rapporti tra tensioni o correnti è 20*

11

## Note

- I valori in decibel sono sempre quantità adimensionali dato che derivano da rapporti tra grandezze omogenee
  - ➔ quindi non si utilizzano valori in decibel per le impedenze o le ammettenze di ingresso o di trasferimento
- I valori in decibel dei guadagni forniscono solo le informazioni relative alle ampiezze (le informazioni sulle fasi devono essere indicate a parte)
  - ◆ un valore positivo del guadagno in dB indica che si ha amplificazione
  - ◆ un valore negativo del guadagno in dB indica che il segnale in uscita è attenuato

12

## Valori in dB di quantità non adimensionali

- E' possibile esprimere i valori in dB anche di quantità non adimensionali considerando il rapporto con un opportuno valore di riferimento
  - ◆ In questi casi si deve specificare l'unità di misura

- Esempi

- ◆ dBV (dB Volt) = valore in dB del rapporto tra una tensione e la tensione di riferimento di 1 V

$$V_{\text{dBV}} = 20 \log_{10}(V)$$

- ◆ dBm (dB milliwatt) = valore in dB del rapporto tra una potenza e la potenza di riferimento di 1 mW

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}}) = 10 \log_{10}(P_{\text{W}}) + 30$$

$$P_{\text{mW}} = 10^{\frac{P_{\text{dBm}}}{10}}$$

13

## Visualizzazione dei risultati di un'analisi in frequenza

- In LTspice sono disponibili tre modalità per visualizzare grandezze complesse
  - ◆ **Diagrammi di Bode:** vengono visualizzati il modulo e la fase
    - per il modulo sono disponibili tre opzioni
      - valori in dB
      - valori in scala lineare
      - valori in scala logaritmica
  - ◆ **Diagrammi cartesiani:** vengono visualizzate la parte reale e la parte immaginaria
  - ◆ **Diagrammi di Nyquist:** viene riportata la parte reale sull'asse delle ascisse e la parte immaginaria sull'asse delle ordinate

14

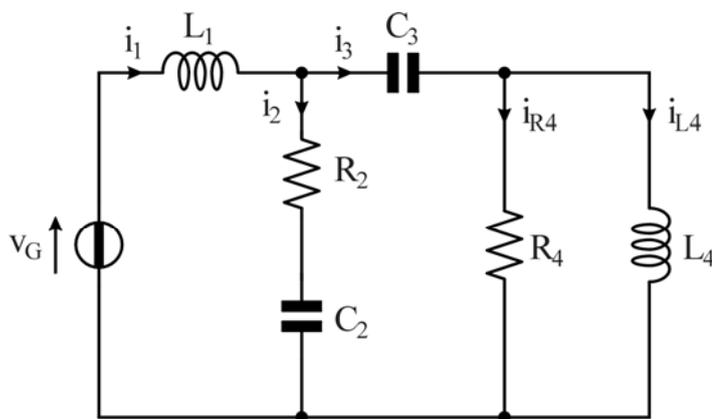
## Visualizzazione dei risultati di un'analisi in frequenza

- Nei diagrammi di Bode la rappresentazione della fase è controllata mediante la casella “*Unravel Branch Wrap*”
  - ♦ se la casella non è attivata la fase è rappresentata nell'intervallo tra  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ , quindi in alcuni casi il grafico può risultare discontinuo
  - ♦ se la casella è attivata i valori non sono limitati all'intervallo tra  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$
- Nell'analisi in frequenza non è possibile visualizzare direttamente le potenze come nelle analisi in continua o nel dominio del tempo
- E' comunque possibile ottenere i grafici delle potenze scrivendone le espressioni
  - ♦ Per i numeri complessi sono disponibili le funzioni
    - $\text{Re}(x)$ ,  $\text{Im}(x)$ : parte reale e immaginaria di  $x$
    - $\text{Mag}(x)$ ,  $\text{Ph}(x)$ : modulo e fase di  $x$
    - $\text{conj}(x)$ : coniugato di  $x$

15

## Analisi di un circuito in regime sinusoidale

Circuito utilizzato come esempio



$$L_1 = 20 \text{ mH}$$

$$R_2 = 20 \ \Omega \quad C_2 = 25 \ \mu\text{F}$$

$$C_3 = 25 \ \mu\text{F}$$

$$R_4 = 100 \ \Omega \quad L_4 = 50 \text{ mH}$$

$$v_G(t) = 120\sqrt{2} \cos(\omega t + 3\pi/4) \text{ V}$$

$$\omega = 1000 \text{ rad/s}$$

*Determinare i fasori delle correnti e delle tensioni dei componenti, le potenze attive e reattive assorbite dalle impedenze, la potenza attiva a reattiva erogata dal generatore*

16

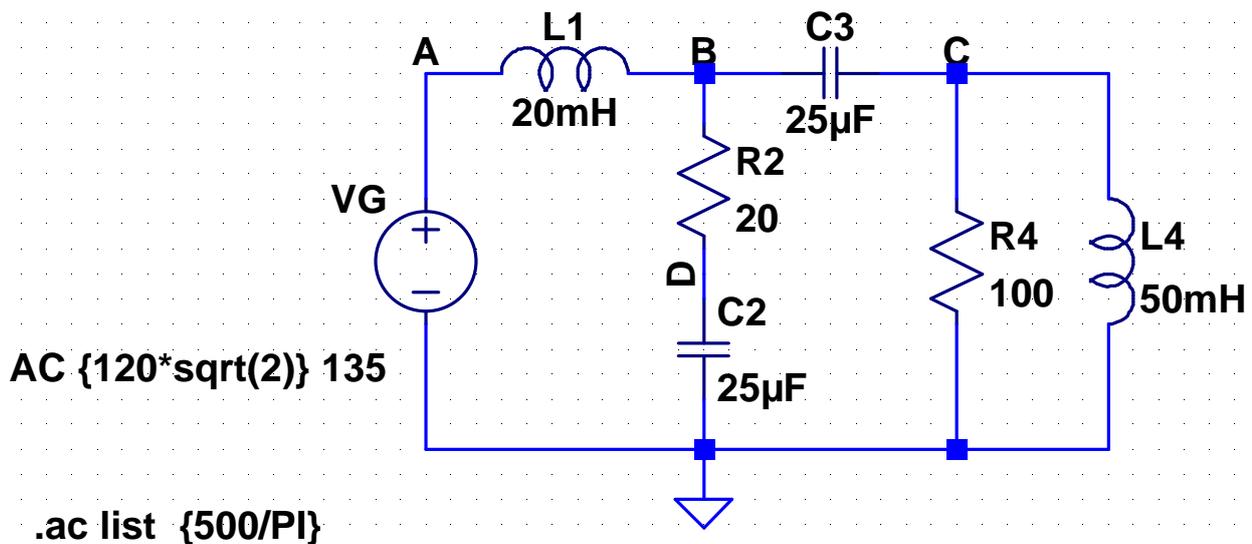
# Soluzioni

$I_1 = 8j$ A	$ I_1  = 8$ A	$\arg(I_1) = 90^\circ$
$I_2 = -2+2j$ A	$ I_2  = 2.828$ A	$\arg(I_2) = 135^\circ$
$I_3 = 2+6j$ A	$ I_3  = 6.325$ A	$\arg(I_3) = 71.57^\circ$
$I_{R4} = -2+2j$ A	$ I_{R4}  = 2.828$ A	$\arg(I_{R4}) = 135^\circ$
$I_{L4} = 4+4j$ A	$ I_{L4}  = 5.657$ A	$\arg(I_{L4}) = 45^\circ$
$V_1 = -160$ V	$ V_1  = 160$ V	$\arg(V_1) = 180^\circ$
$V_2 = 40+120j$ V	$ V_2  = 126.49$ V	$\arg(V_2) = 71.57^\circ$
$V_{R2} = -40+40j$ V	$ V_{R2}  = 56.57$ V	$\arg(V_{R2}) = 135^\circ$
$V_{C2} = 80+80j$ V	$ V_{C2}  = 113.14$ V	$\arg(V_{C2}) = 45^\circ$
$V_3 = 240-80j$ V	$ V_3  = 252.98$ V	$\arg(V_3) = -18.44^\circ$
$V_4 = -200+200j$ V	$ V_4  = 282.84$ V	$\arg(V_4) = 135^\circ$
$P_1 = 0$ W	$Q_1 = 640$ VAR	
$P_2 = 80$ W	$Q_2 = -160$ VAR	
$P_3 = 0$ W	$Q_3 = -800$ VAR	
$P_4 = 400$ W	$Q_4 = 800$ VAR	
$P_G = 480$ W	$Q_G = 480$ VAR	

17

## 1-AC-1.asc

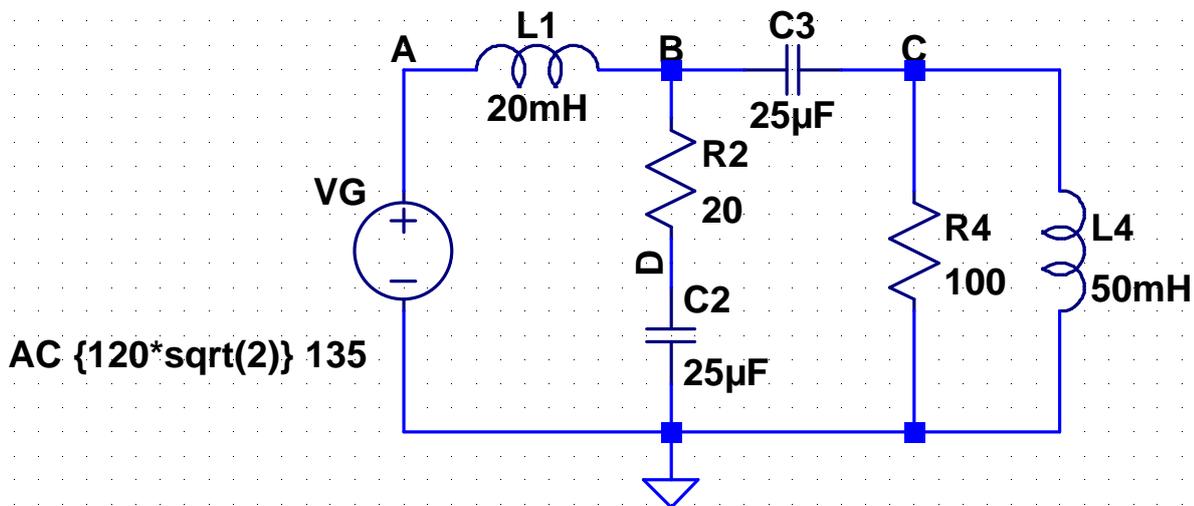
### Analisi di un circuito in regime sinusoidale



Se si assegna una sola frequenza viene visualizzata una tabella contenente i fasori (in modulo e fase) delle tensioni di nodo e delle correnti dei componenti

18

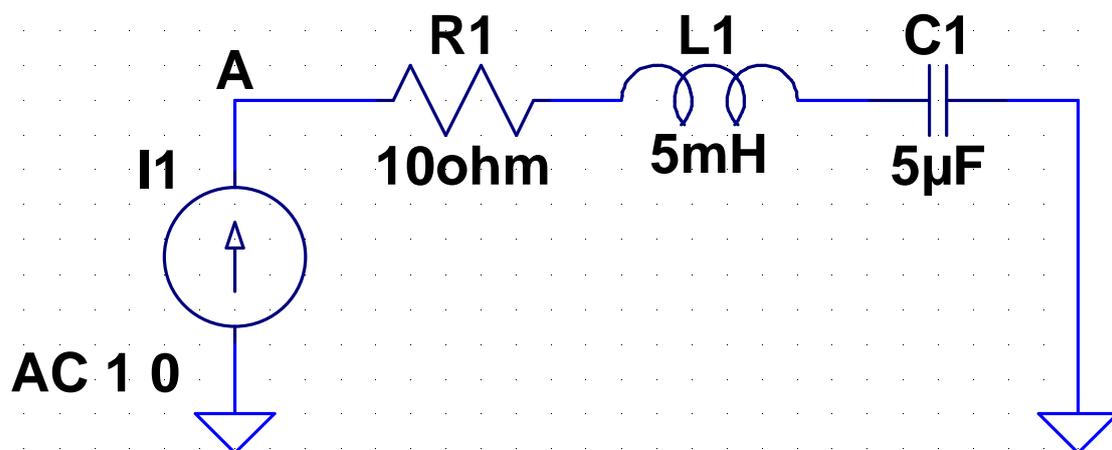
## Analisi di un circuito in regime sinusoidale



```
.ac list {500/PI} {500/PI+1e-9}
```

Per usare il waveform viewer occorre assegnare più frequenze.  
Se interessa simulare il circuito ad una sola frequenza si possono indicare due valori praticamente coincidenti.

## Impedenza di un bipolo RLC serie

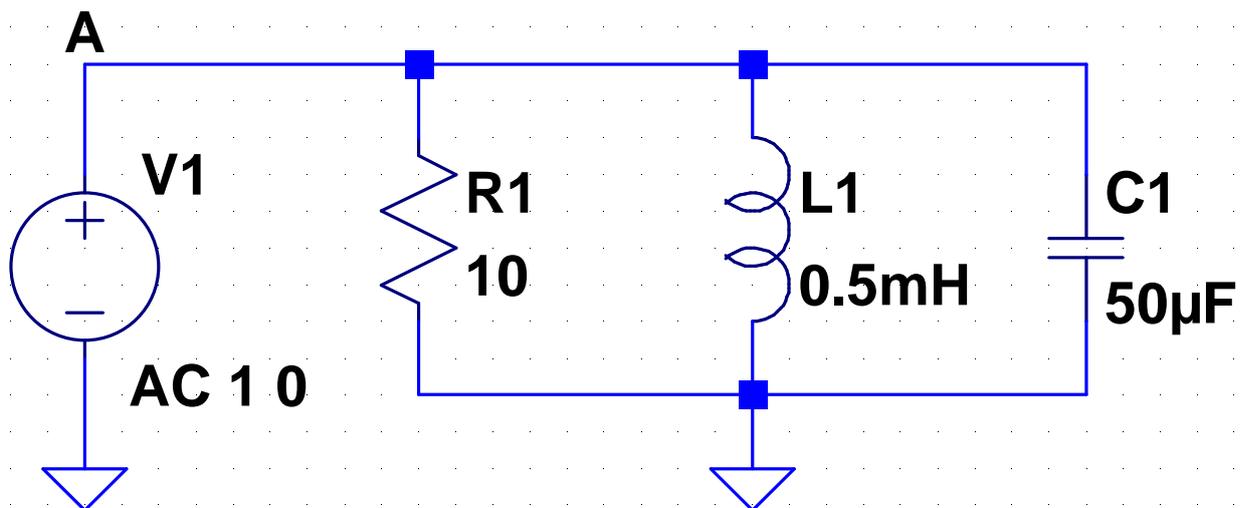


```
.ac lin 500 500Hz 2kHz
```

V(A) coincide (numericamente) con l'impedenza del bipolo.

## 4-RLC-parallelo.asc

### Ammettenza di un bipolo RLC parallelo



**.ac lin 500 500Hz 2kHz**

**-I(V1) coincide (numericamente) con l'impedenza del bipolo**

**Assegnare il valore 0 alla resistenza serie dell'induttore  
(il cui valore predefinito è 1 milliohm)**

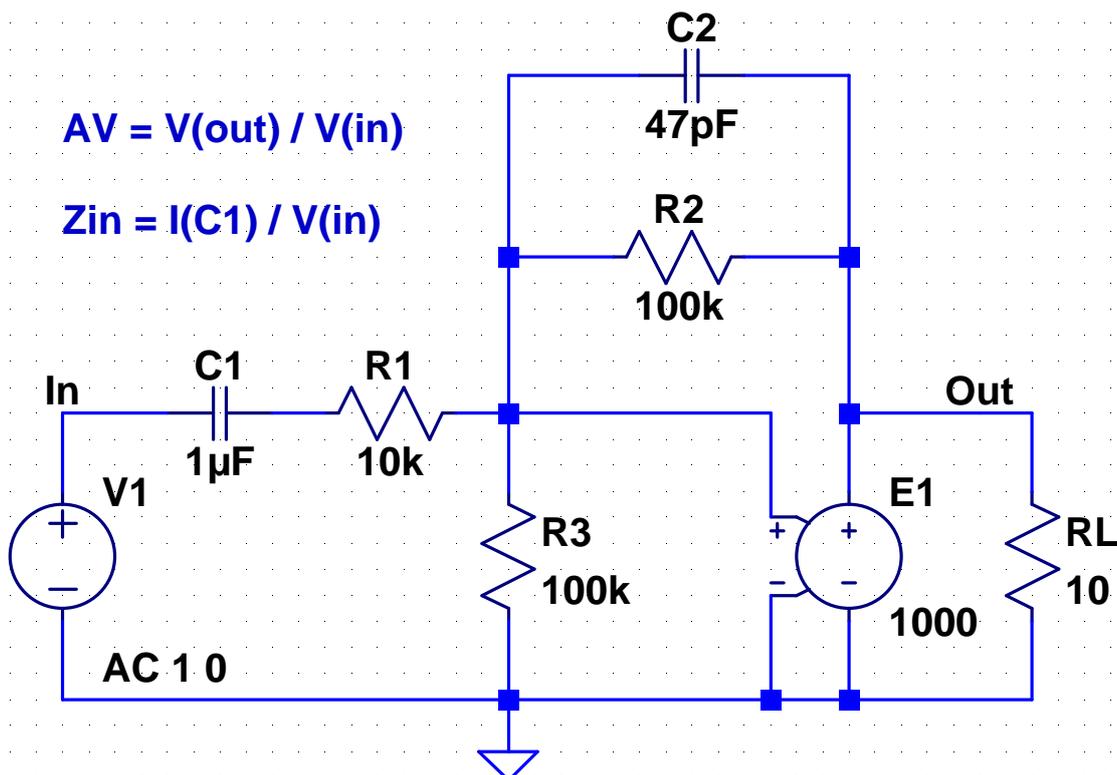
21

## 5-AV-Zin.asc

### Calcolo del guadagno di tensione e dell'impedenza di ingresso

$$AV = V(\text{out}) / V(\text{in})$$

$$Z_{in} = I(C1) / V(\text{in})$$



**.ac dec 100 1Hz 1MegHz**

22