



Università degli  
Studi di Pavia

# Laboratorio di Elettronica II

## Esperienza 2

### Introduzione alla simulazione di circuiti elettronici analogici



Università degli  
Studi di Pavia

## *Attività*

---

Utilizzo del simulatore analogico PSpice per verificare il funzionamento di un semplice circuito con amplificatore operazionale



Università degli  
Studi di Pavia

# *Obiettivi di Apprendimento*

---

- Cenni storici e funzionamento di PSpice: architettura del simulatore ed algoritmi di risoluzione delle equazioni che governano un circuito
- Differenze tra simulazioni DC, AC, TRAN
- Disegno dello schema elettrico
- Impostazione delle simulazioni
- Visualizzazione dei risultati



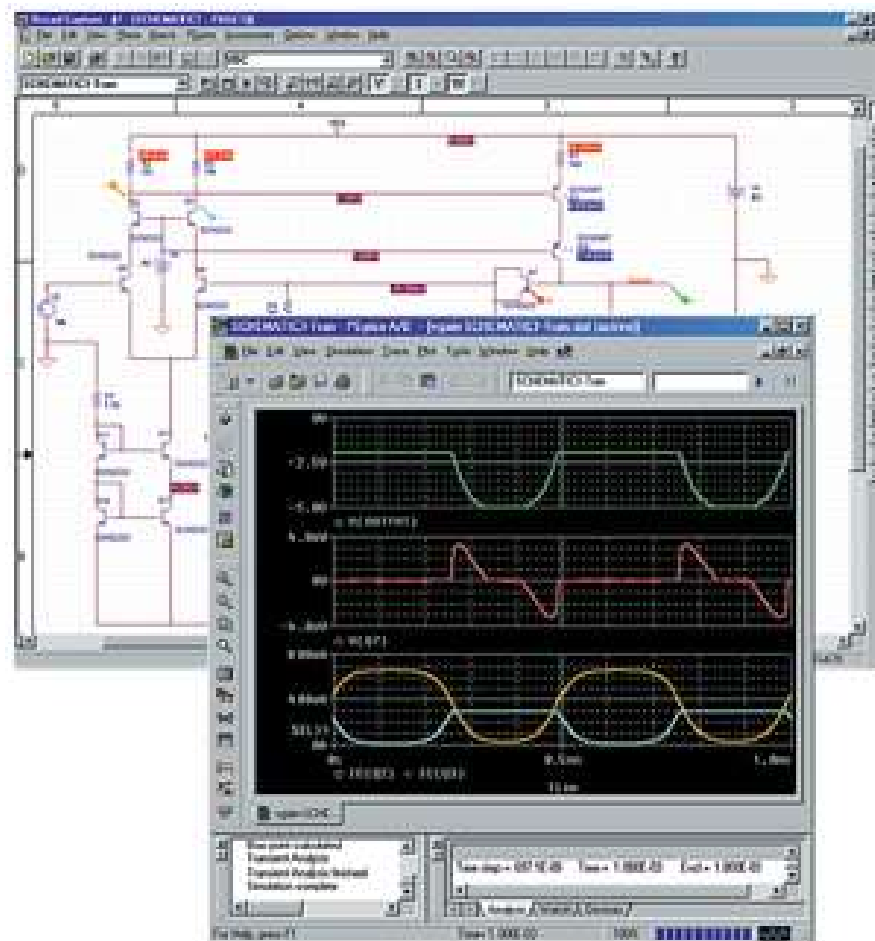
Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazione di Circuiti Elettronici

La simulazione al computer permette di riprodurre e verificare in modo rapido il comportamento di un circuito elettronico di media complessità

I passaggi necessari sono:

- Disegnare lo schema elettrico
- Impostare il tipo di simulazione in base all'analisi che si vuole ottenere (punto di lavoro, risposta in frequenza, transitorio, ...)
- Effettuare la simulazione e visualizzare i risultati





Università degli  
Studi di Pavia

# Vantaggi e limiti della simulazione

La simulazione è uno strumento di progettazione fondamentale e insostituibile:

- La progettazione effettuata, risolvendo manualmente le equazioni caratteristiche di un circuito, comporta necessariamente semplificazioni, portando a risultati approssimati
- Con l'aumento della complessità dei circuiti elettronici, la realizzazione di un prototipo per la verifica sperimentale richiede tempo e costi estremamente elevati. La prototipizzazione va intesa come verifica, non come passo di progettazione
- Situazione ancora più critica nel caso di progettazione e prototipizzazione di circuiti integrati

La simulazione permette di:

- Verificare velocemente il comportamento di un circuito, rimuovendo gran parte delle semplificazioni necessarie per l'analisi manuale e senza la necessità di realizzare un prototipo
- Ottimizzare le prestazioni con *fine tuning* dei parametri dei componenti
- Stimare velocemente l'effetto di variazioni dei componenti, alimentazione, temperatura...



Università degli  
Studi di Pavia

# Vantaggi e limiti della simulazione

La simulazione circuitale è una simulazione e non sostituisce la realtà!

- Lo schema elettrico rappresenta una semplificazione della realtà. Ad esempio, i collegamenti fra componenti introducono elementi parassiti (resistenze, capacità, induttanze)
- I componenti sono descritti da modelli matematici (equazioni che legano correnti e tensioni). Il risultato della simulazione dipende fortemente dal grado di accuratezza dei modelli
- Alcuni effetti sono difficili da prevedere e modellizzare: evoluzione della temperatura, raccolta di rumore e disturbi dall'ambiente e dalle alimentazioni...
- Le equazioni che descrivono il circuito vengono risolte con metodi numerici che possono avere problemi di convergenza ed introdurre artefatti

L'attenzione, l'esperienza e le capacità del progettista sono fondamentali.

La simulazione deve essere intesa come uno strumento utile alla progettazione ma non può sostituire il ruolo del progettista e la verifica sperimentale dei risultati realizzando un prototipo



# Cenni storici

---

Lo sviluppo di software per la simulazione circuitale è iniziato nei laboratori dell'Università di Berkeley (California) tra il 1960 e il 1970

SPice (Simulation Program with Integrated Circuit Enphasis) è stato sviluppato nel 1973 e rappresenta una pietra miliare

Da allora, si sono susseguite tre versioni, delle quali l'ultima, Spice3, risale al 1985

Il codice sorgente di Spice fu inizialmente distribuito gratuitamente, favorendone l'ampia e rapida diffusione

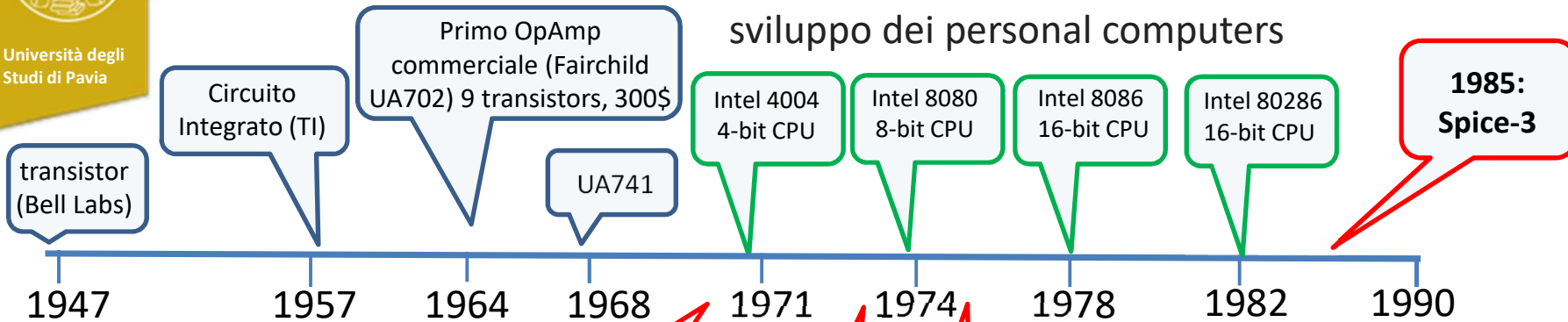
PSpice (Spice per personal computer) è una versione commerciale di Spice, corredato da una front-end grafico per il disegno dei circuiti (*capture*) e di un back-end grafico per la visualizzazione dei risultati. Utilizza gli algoritmi e modelli di dispositivi a semiconduttore utilizzati in Spice2, ma contiene una serie di miglioramenti ed estensioni significative



Università degli Studi di Pavia

# Cenni storici

## sviluppo dei personal computers

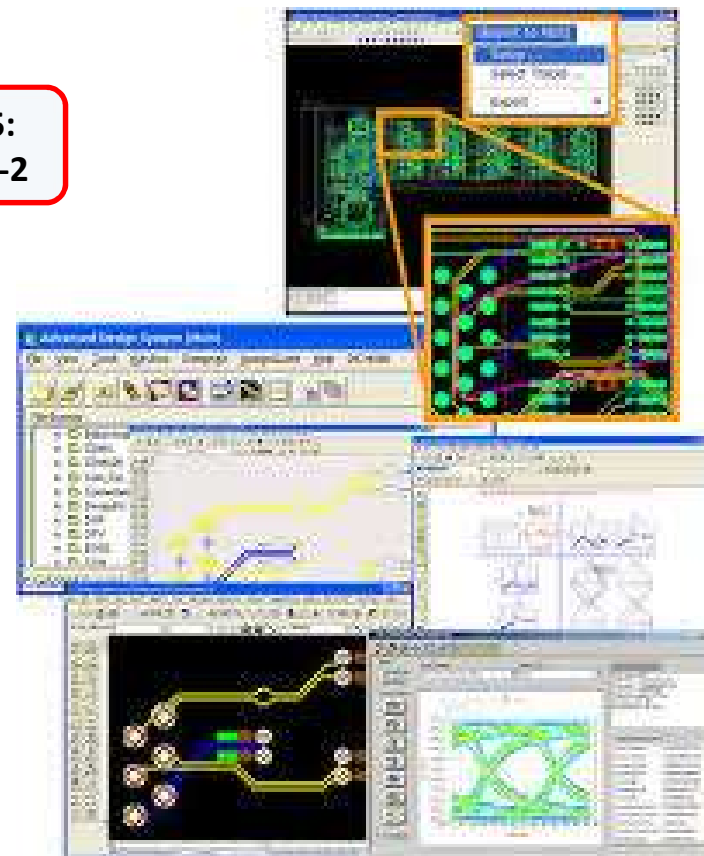


1973: Primi simulatori per reti non-lineari (Univ. Berkeley)

1973: SPice-1

1975: SPice-2

Attualmente disponibili strumenti software estremamente sofisticati, in grado di assistere con simulazioni la progettazione elettronica a tutti i livelli: componenti, circuiti, layout, board, sistema... Ottimizzati per applicazioni specifiche (analog/mixed-signal, RF/microwaves, power conversion...)





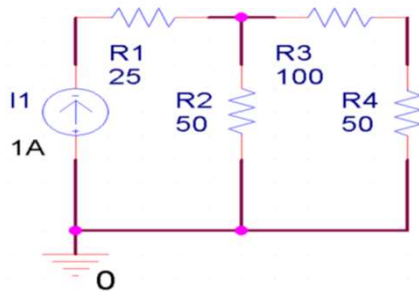


Università degli  
Studi di Pavia

# Funzionamento di Spice

Simulare un circuito elettrico consiste nel risolvere le correnti nei rami e le tensioni ai nodi. **Spice è in grado di formalizzare ed automatizzare la descrizione del circuito e di risolvere le equazioni che lo governano.** Sono necessari diversi passaggi distinti (in buona parte trasparenti all'utente):

## SCHEMA



## NETLIST

```
I1 1 0 dc 1
R1 1 2 25
R2 2 0 50
R3 2 3
100
R4 3 0 50
```

## Impostazioni della simulazione (.DC, .AC, .Tran...)

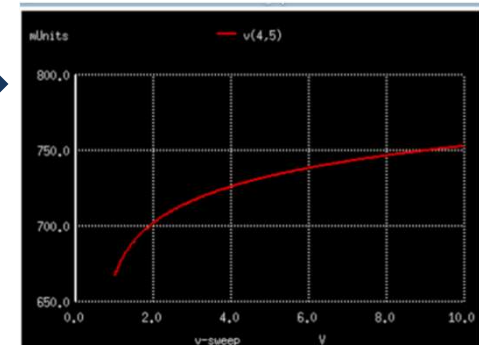


## SPICE CORE

- (1) Composizione del sistema di equazioni nodali*
- (2) Linearizzazione*
- (3) Soluzione iterativa e/o integrazione numerica*

## OUTPUTS

```
--- Operating Point ---
V(a):      10      voltage
V(b):      30      voltage
V(m001):   0       voltage
V(c):      15      voltage
I(R3):     -0.005  device_current
I(R2):      0.015  device_current
I(R1):     -0.02   device_current
I(V1):      0.02   device_current
Ix(u1:I+): -0.04   subckt_current
Ix(u1:I-):  0.04   subckt_current
Ix(u2:V+):  0.005  subckt_current
Ix(u2:V-): -0.005  subckt_current
```





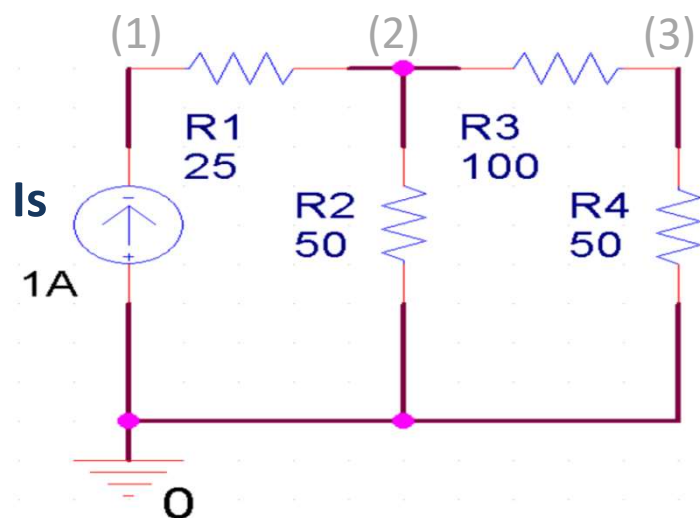
# Netlist

La rappresentazione grafica di un circuito attraverso lo schema elettrico è di immediata comprensione. La *netlist* descrive in modo analogo il circuito attraverso un file di testo. Viene generata in modo automatico partendo dallo schematico. Ogni riga del file è così organizzata:

**«tipo e nome componente» «nodi a cui è connesso» «parametri»**

I nodi vengono numerati/nominati automaticamente se non diversamente specificato

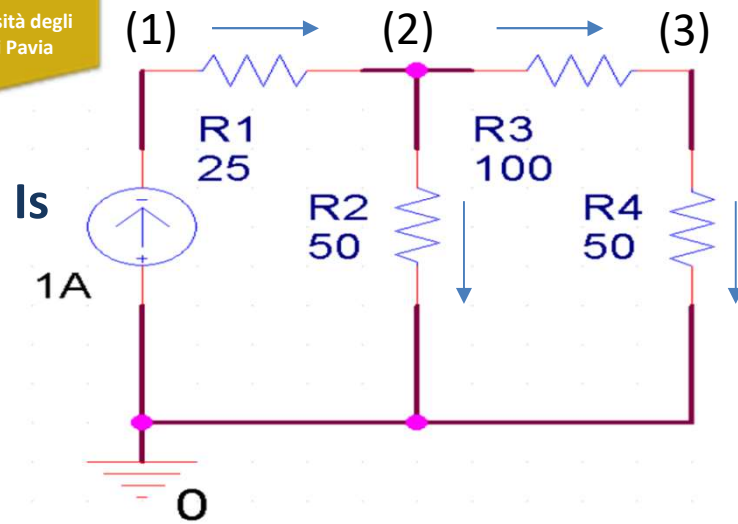
## SCHEMA



## NETLIST

```
Is 1 0 dc 1
R1 1 2 25
R2 2 0 50
R3 2 3
100
R4 3 0 50
```

# Matrice nodale



La legge delle CORRENTI di Kirchhoff applicata ai NODI del circuito porta al seguente sistema di equazioni:

$$\begin{aligned} \text{nodo (1):} & \quad I_1 & = I_S \\ \text{nodo (2):} & \quad I_1 - I_2 - I_3 & = 0 \\ \text{nodo (3):} & \quad I_3 - I_4 & = 0 \end{aligned}$$

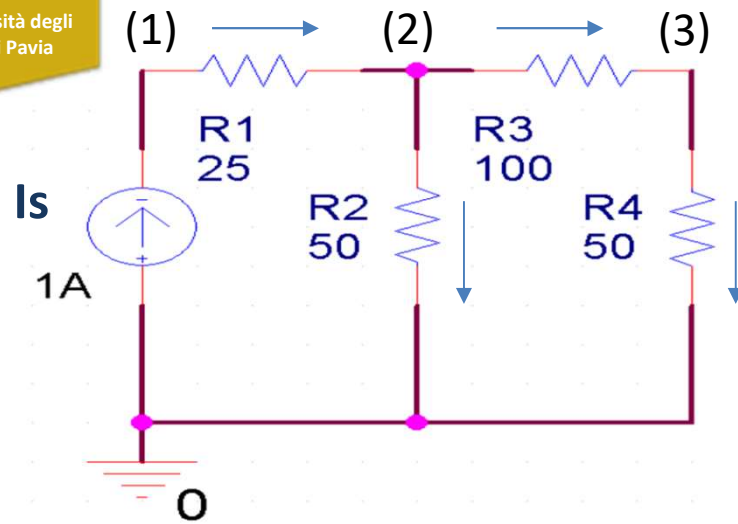
Esprimendo le correnti in funzione delle tensioni e delle conduttanze, e sistemando i termini si ottiene:

$$\begin{aligned} V_1 G_1 & - V_2 G_1 & = I_S \\ -V_1 G_1 & + V_2 (G_1 + G_2 + G_3) - V_3 G_3 & = 0 \\ & - V_2 G_3 & + V_3 (G_3 + G_4) & = 0 \end{aligned}$$

Che in forma matriciale diventa:

$$[Y][V] = [I] \quad [V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} I_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Matrice nodale



$$[Y][V] = [I] \quad [V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} I_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

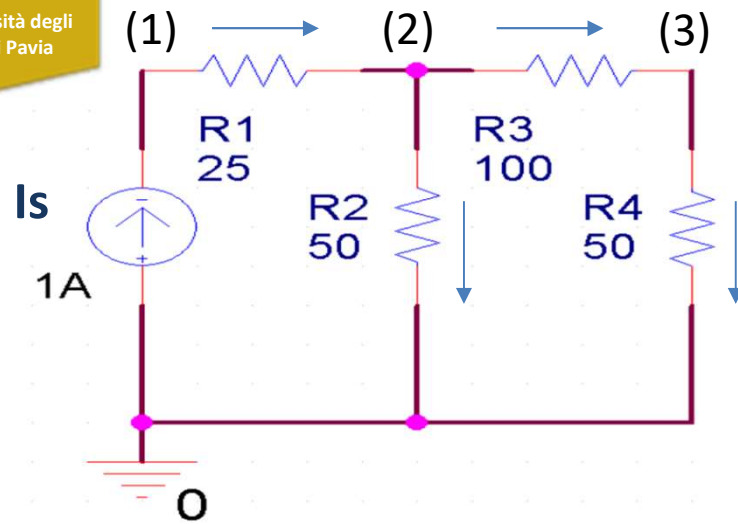
$$[Y] = \begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & (G_1 + G_2 + G_3) & -G_3 \\ 0 & -G_3 & (G_3 + G_4) \end{bmatrix}$$

La soluzione del sistema permette di ricavare le tensioni a tutti i nodi del circuito

La matrice nodale  $[Y]$  può essere ricavata in modo automatizzato dalla *netlist* applicando le seguenti regole:

- Ogni termine diagonale  $y_{ii}$  della matrice è dato dalla somma dei valori di tutte le conduttanze connesse al nodo  $i$
- I termini fuori diagonale  $y_{ij}$  sono la somma, cambiata di segno, di tutte le conduttanze connesse tra i nodi  $i$  e  $j$

# Matrice nodale



$$[Y][V] = [I]$$

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & (G_1 + G_2 + G_3) & -G_3 \\ 0 & -G_3 & (G_3 + G_4) \end{bmatrix}$$

Ogni elemento  $I_i$  del vettore delle correnti di eccitazione  $[I]$  è la somma del valore di tutti i generatori di corrente indipendenti connessi al nodo  $i$ , ciascuno con segno positivo o negativo a seconda se la corrente è entrante o uscente dal nodo

L'inclusione di una sorgente di tensione indipendente in un circuito riduce il numero di tensioni incognite di 1

Se in un circuito con  $n$  nodi sono presenti  $n_s$  sorgenti di tensione, il numero delle incognite è ridotto a  $(n - n_s)$



# Risoluzione del circuito

Nel caso di circuiti lineari e resistivi la soluzione del sistema lineare costruito attraverso la matrice nodale permette di ricavare le tensioni incognite. Le correnti possono poi essere calcolate attraverso le conduttanze dei rami.

**In generale la situazione è molto più complicata.**

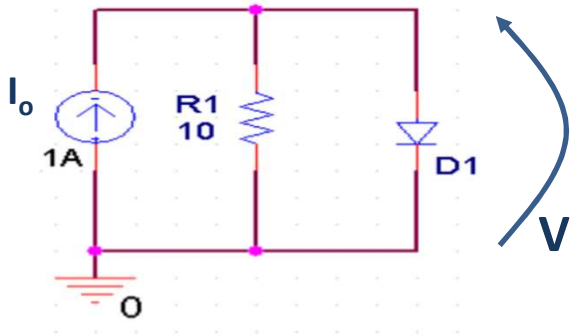
**Possiamo suddividere i circuiti analogici in 4 categorie distinte:**

- 1. Circuiti resistivi lineari: *generatori, resistenze***
- 2. Circuiti dinamici lineari : *generatori, resistenze, condensatori, induttanze***
- 3. Circuiti resistivi non-lineari: *generatori, resistenze, diodi, MOSFETs, BJT...***
- 4. Circuiti dinamici non-lineari: *generatori, resistenze, condensatori, induttanze, diodi, MOSFETs, BJT...***



# Risoluzione di equazioni non-lineari

Per la risoluzione di equazioni non-lineari viene utilizzato il metodo numerico iterativo di Newton-Raphson. Descriviamo il funzionamento facendo riferimento a questo semplice circuito:



Il diodo è descritto dall'equazione:

$$I_D = I_s e^{\frac{V}{V_T}}$$

Il circuito è descritto dall'equazione non-lineare:

$$\frac{V}{R_1} - I_s e^{\frac{V}{V_T}} - I_0 = 0$$

posto  $f(V) = \frac{V}{R_1} - I_s e^{\frac{V}{V_T}} - I_0$

la risoluzione del circuito consiste nell'individuare  $V^*$  tale per cui  $f(V^*)=0$



Università degli  
Studi di Pavia

# Metodo iterativo di Newton-Raphson

La soluzione può essere trovata in modo iterativo, ponendo

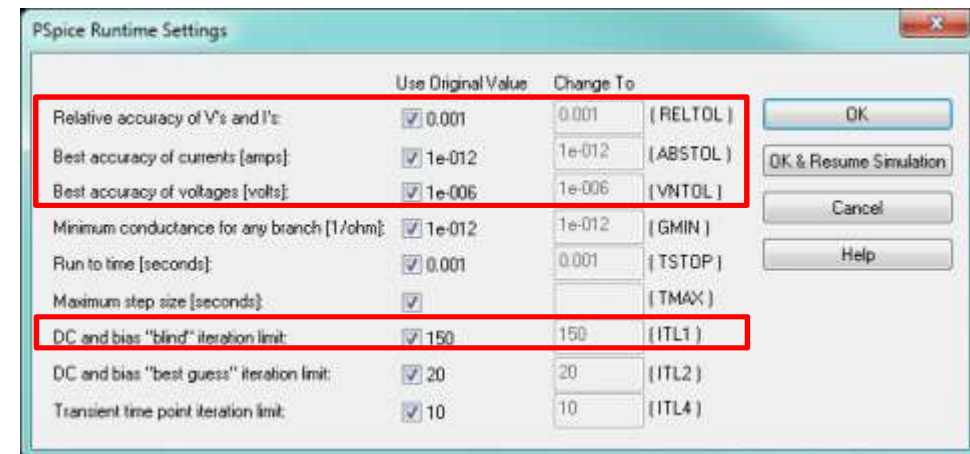
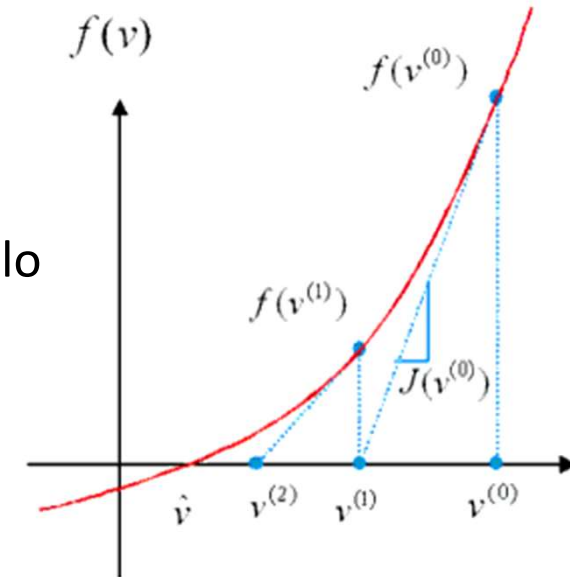
$$V_{k+1} = V_k - \frac{f(V_k)}{f'(V_k)} \quad \text{con} \quad f'(V) = \frac{df}{dV}$$

Le iterazioni partono da una condizione iniziale e il calcolo converge quando  $V_{k+1}$  è sufficientemente vicino a  $V^k$

In PSpice, si raggiunge convergenza entro un numero massimo prefissato di iterazioni (*iteration limit*) se le due condizioni seguenti sono verificate:

$$|V_{k+1} - V_k| < \text{VLIMIT} = \text{RELTOL} \cdot V_k + \text{VNTOL}$$

$$|I_{k+1} - I_k| < \text{ILIMIT} = \text{RELTOL} \cdot I_k + \text{ABSTOL}$$







# Analisi transitoria

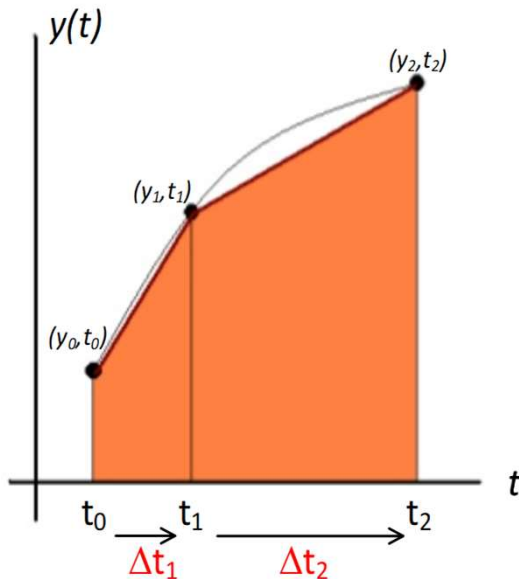
Se nel circuito sono presenti condensatori ed induttanze, le relazioni dinamiche tra tensioni e correnti sono:

$$i_C(t) = \frac{d}{dt}Q(t)$$

$$v_L(t) = \frac{d}{dt}\Phi(t)$$

Il circuito è governato da equazioni differenziali (non-lineari se presenti anche diodi, bjt...)

La soluzione (integrazione) delle equazioni differenziali avviene per via numerica con il **metodo dei trapezi**:

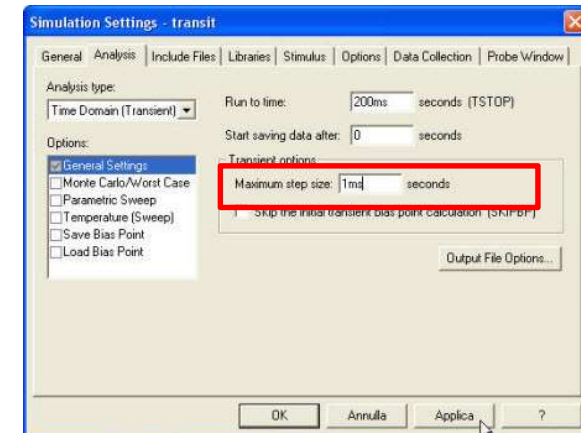


L'integrale da  $t_0$  a  $t_2$  è

$$I \approx (t_1 - t_0) \frac{(y_1 + y_0)}{2} + (t_2 - t_1) \frac{(y_2 + y_1)}{2}$$

Il passo di integrazione ( $\Delta t$ ) viene scelto automaticamente in modo adattativo

***E' possibile forzare il passo massimo per avere miglior accuratezza dei risultati***

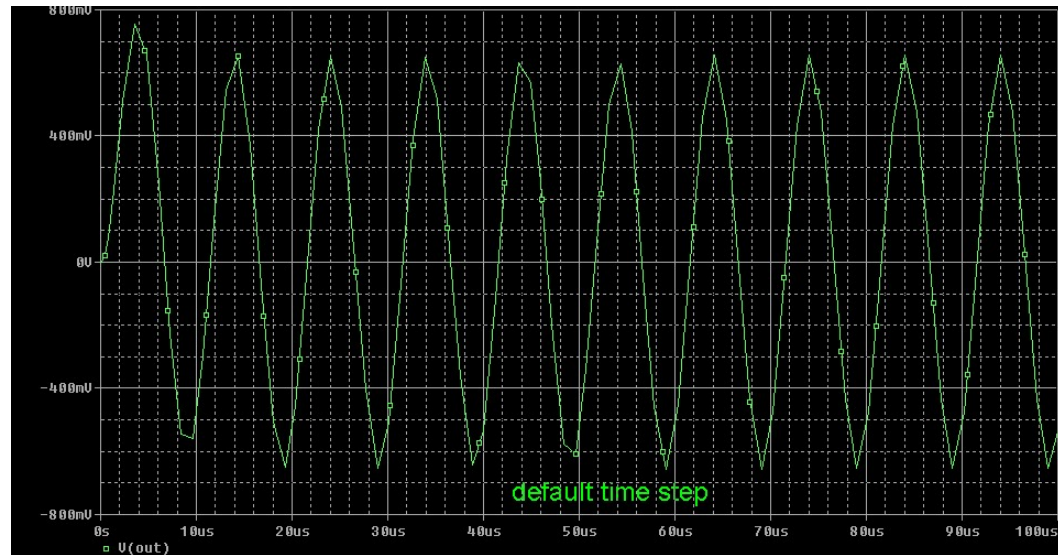




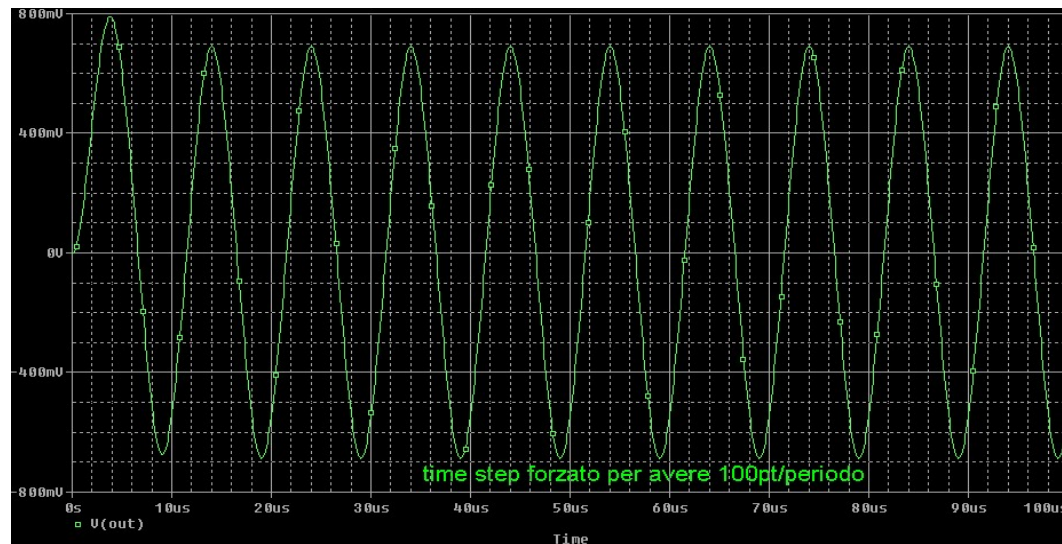
Università degli  
Studi di Pavia

# Effetto del *time-step* su segnale sinusoidale

*Time Step* automatico:



*Time Step* forzato ad  
 $1/100$  del periodo:





Università degli  
Studi di Pavia

# Selezione della simulazione

---

Prima di avviare la simulazione è necessario specificare quale/i analisi si deve effettuare.

Sono disponibili diverse alternative, ma le principali sono:

(1) Simulazione **DC**: Bias Point o DC sweep

(2) Simulazione **AC**: AC sweep

(3) Simulazione **Transient**

E' importante comprendere bene il significato e le differenze tra le opzioni elencate



Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazione DC Bias Point

In questa simulazione viene analizzato il circuito in condizioni statiche:

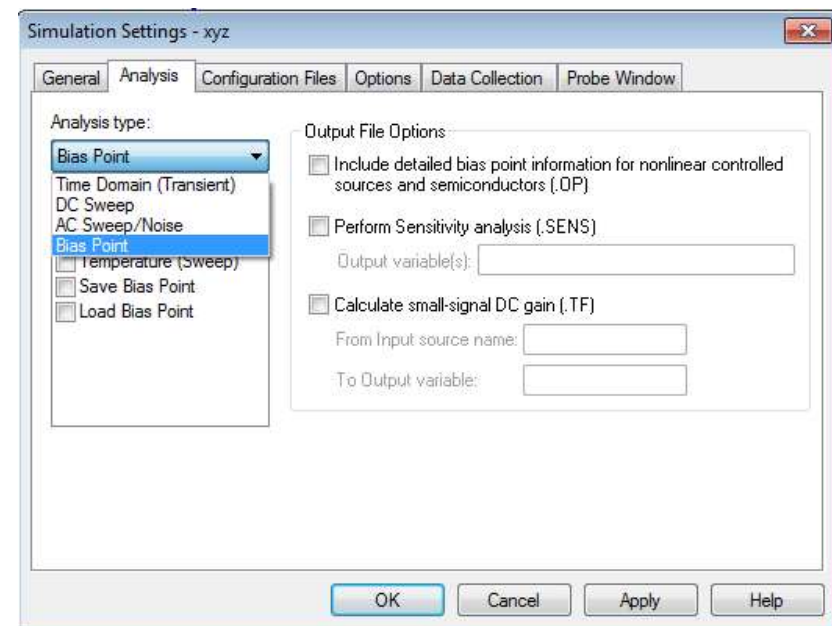
- tutti i condensatori presenti nel circuito sono sostituiti con circuiti aperti
- tutte le induttanze presenti nel circuito sono sostituite con corto-circuito

In presenza di componenti non-lineari, la soluzione viene ricavata in modo iterativo con il metodo di Newton Raphson

I risultati della simulazione **DC Bias Point**

sono le tensioni DC a tutti i nodi e le correnti DC nei rami

La simulazione è utile per ottenere il punto di lavoro (bias point) dei componenti del circuito





Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazione DCsweep

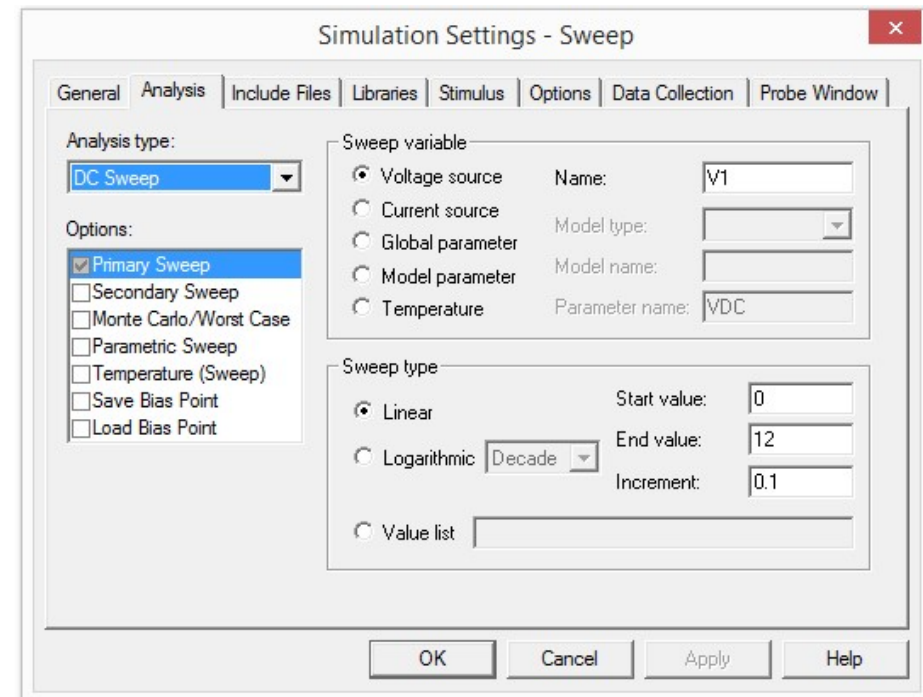
In questa simulazione viene analizzato il circuito in condizioni statiche:

- tutti i condensatori presenti nel circuito sono sostituiti con circuiti aperti
- tutte le induttanze presenti nel circuito sono sostituite con corto-circuito

In presenza di componenti non-lineari, la soluzione viene ricavata in modo iterativo con il metodo di Newton Raphson

La simulazione **DC sweep** permette di tracciare curve statiche al variare di una tensione, una corrente, la temperatura o qualche parametro circuitale

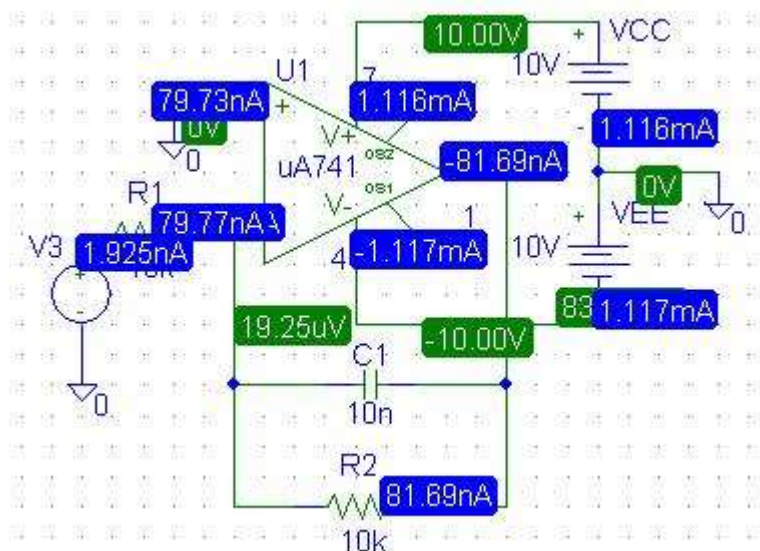
Ad esempio tracciare le curve I-V di un transistor o la caratteristica in-out di un amplificatore



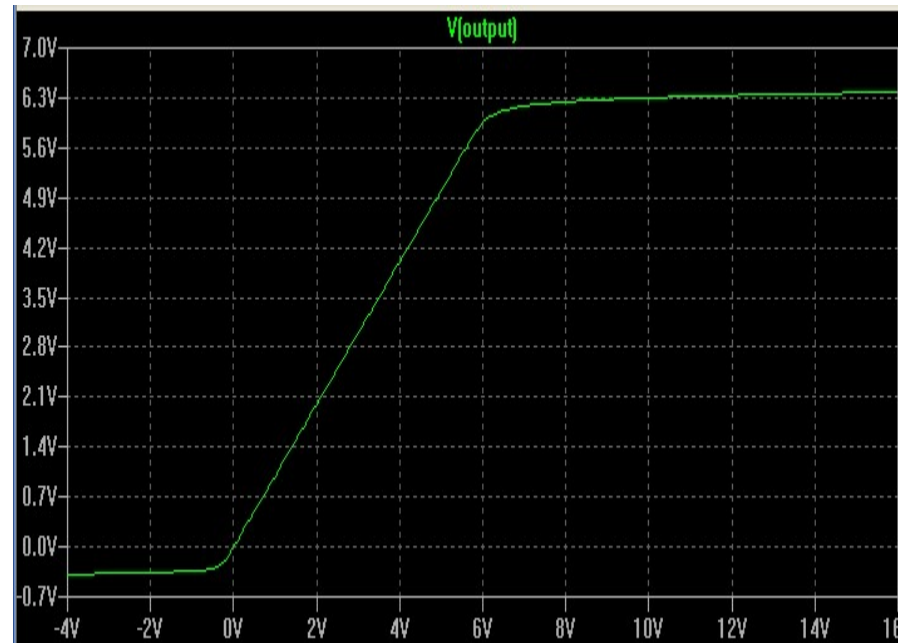


# Risultati della simulazione DC

*DC bias point*



*DC sweep*



La simulazione DC bias point permette di visualizzare sullo schema elettrico tensioni e correnti DC, sul punto di lavoro (assenza di segnale)

La simulazione DC sweep permette di visualizzare tensioni e correnti statiche in funzione di un parametro scelto come variabile (tensione, corrente, parametri di un componente, temperatura)





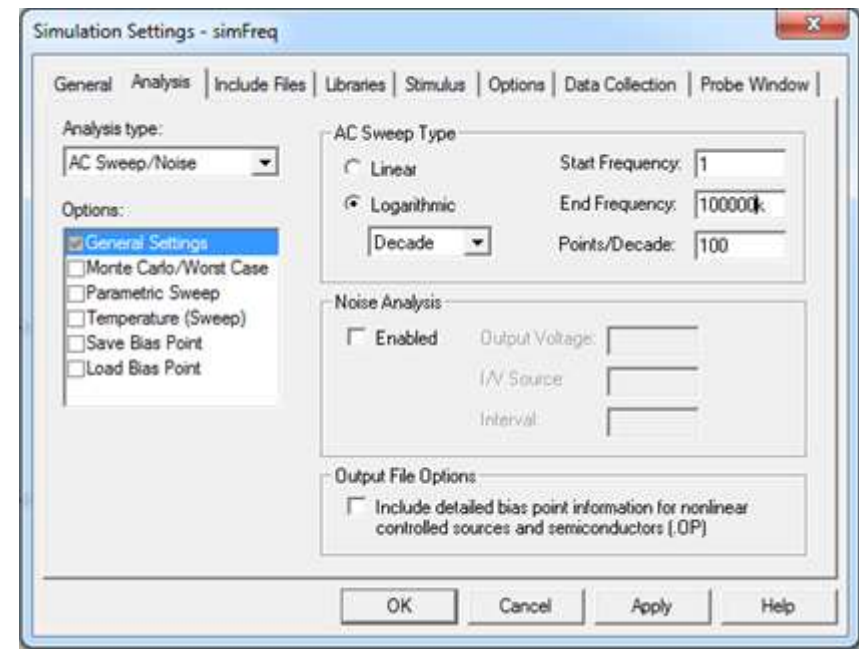
Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazione AC

In questa simulazione viene analizzato il circuito *in condizioni di piccolo segnale* al variare della frequenza di eccitazione. Viene automaticamente eseguita una simulazione DC, al fine di determinare il punto di lavoro e modellizzare tutti i componenti non lineari con un modello valido per piccolo segnale

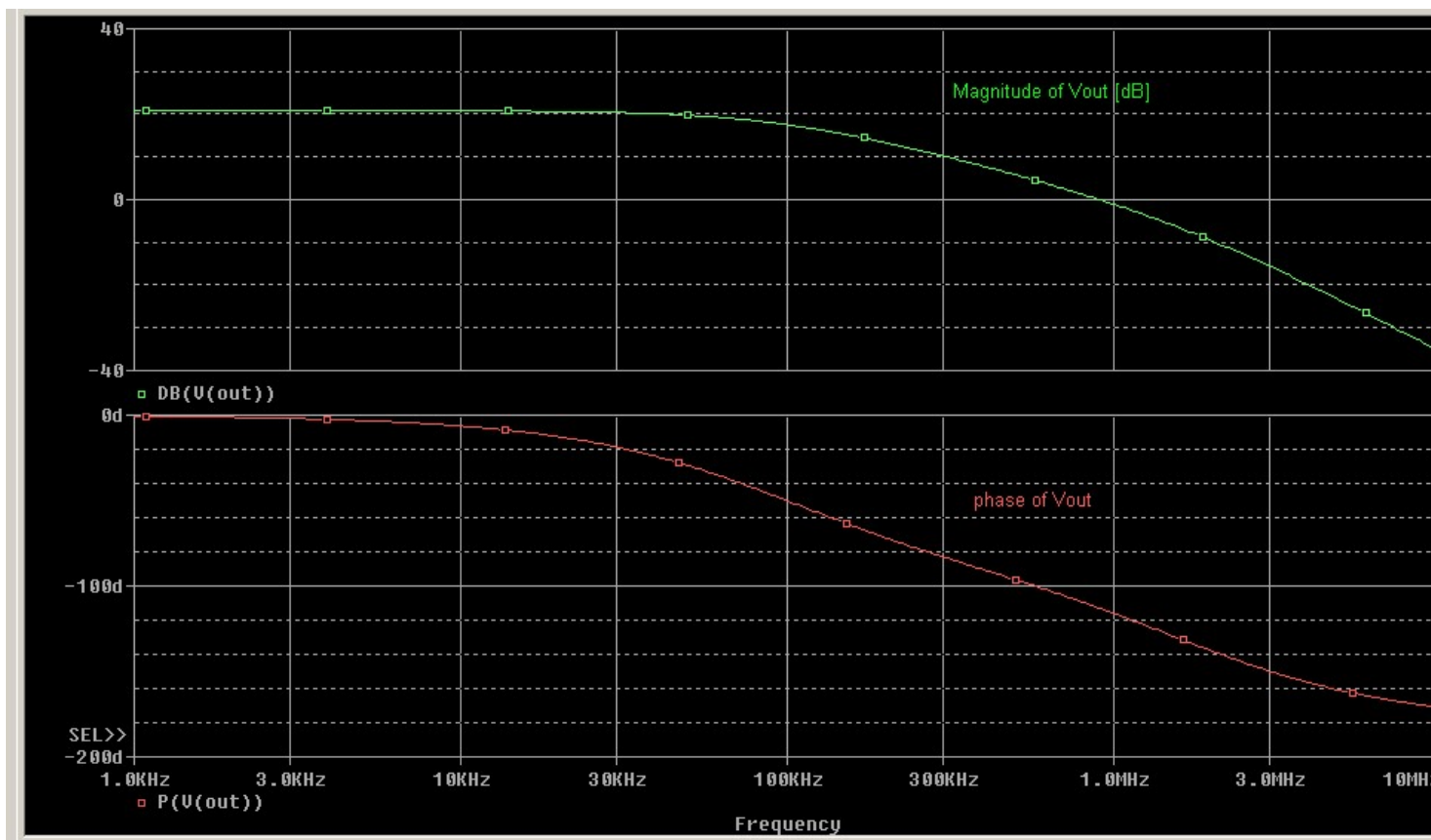
La simulazione **AC sweep** è una simulazione lineare. Moltiplicando per 1000 il/i segnale/i di eccitazione l'uscita viene moltiplicata per 1000!!! **La simulazione AC non tiene quindi in conto nessun effetto di compressione /saturazione /distorsione**

I risultati della simulazione AC sono grafici che rappresentano tensioni, correnti o funzioni di trasferimento in modulo e fase





# Risultati della simulazione AC



La simulazione AC permette di visualizzare l'andamento in frequenza di tensioni ai nodi e correnti nei rami con diagrammi di bode (magnitude & phase)



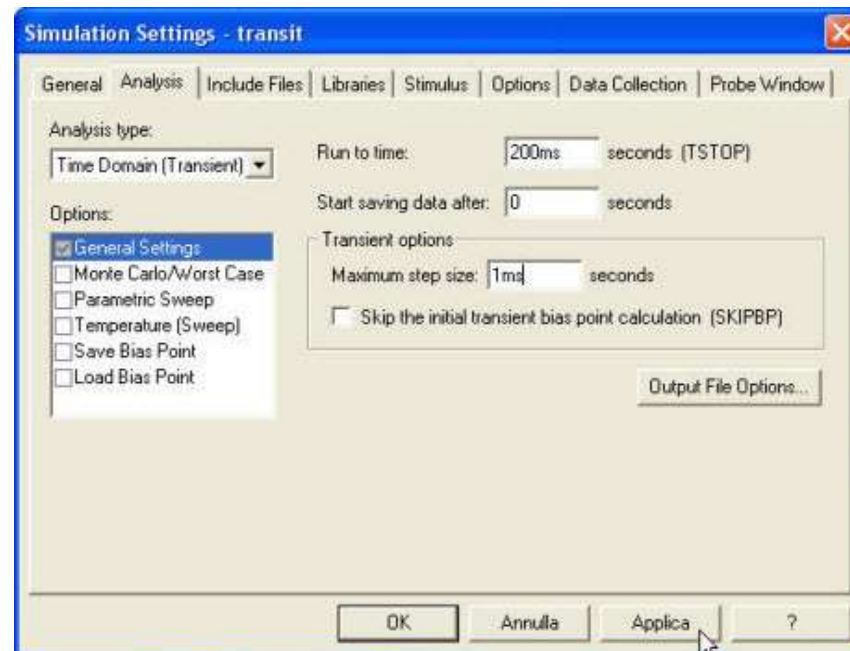


Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazione Transient

In questa simulazione viene analizzato il circuito in condizioni dinamiche nel dominio del tempo. Tutti gli effetti non lineari vengono considerati. I risultati sono gli andamenti temporali di tensioni e correnti.

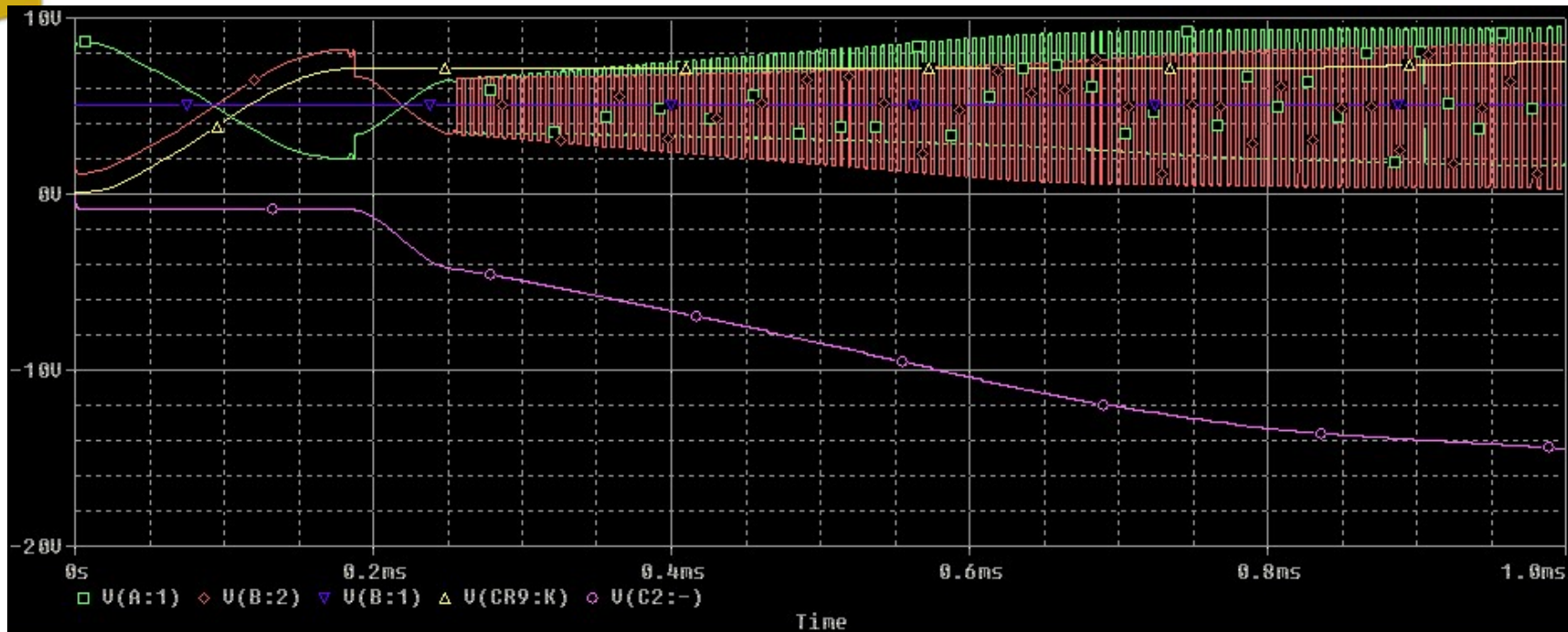
La simulazione Transient è la più complicata ed onerosa in termini di risorse computazionali. Vengono risolte le equazioni differenziali non-lineari che governano il circuito iterando in modo annidato il metodo di Newton-Raphson e l'integrazione numerica con il metodo dei trapezi





Università degli  
Studi di Pavia

# Risultato della simulazione Transient



La simulazione Transient permette di visualizzare l'andamento nel tempo di tensioni ai nodi e correnti nei rami

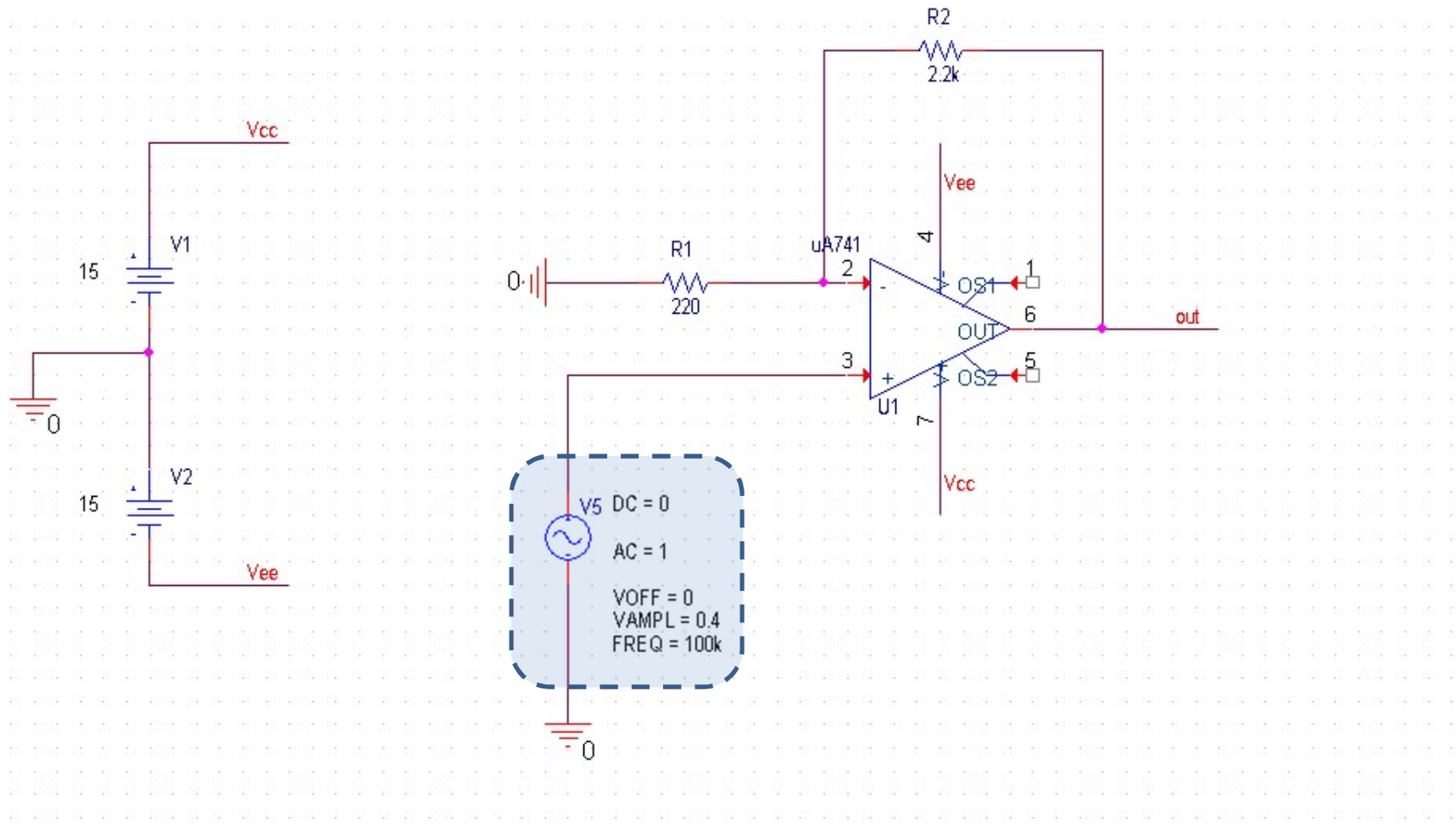


## *Esperienza guidata da Silvia Roncelli:*

- *Disegno dello schema di un amplificatore con Op-Amp*
- *Simulazione DC bias point*
- *Simulazione AC sweep*
- *Simulazione Transient*



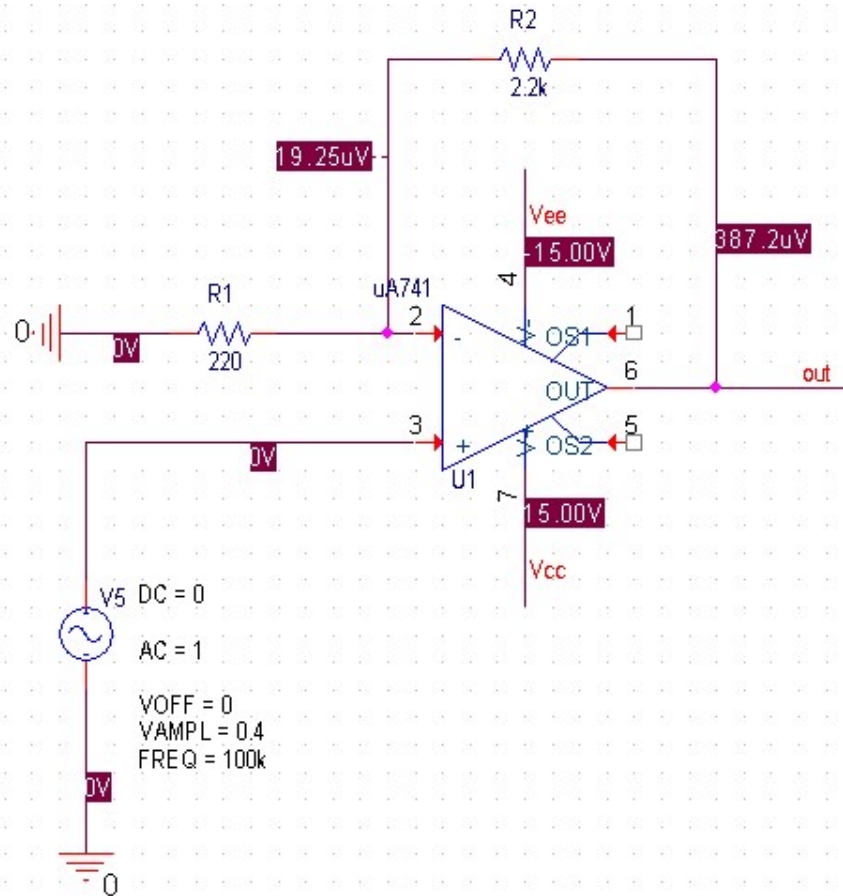
# Schema



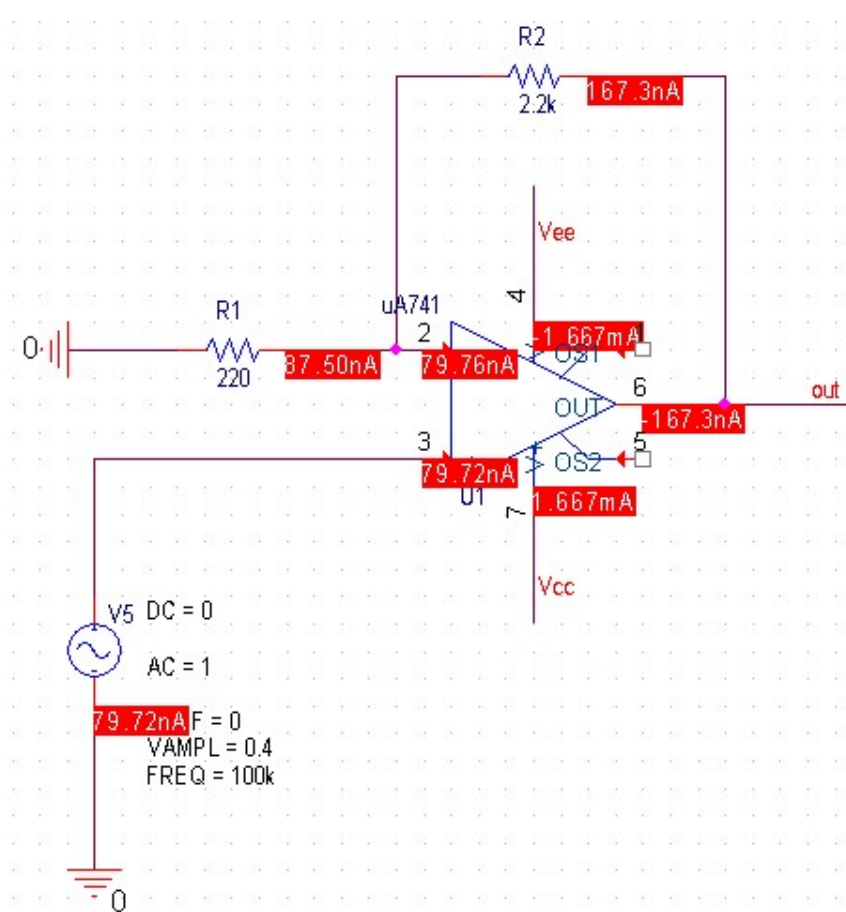


# Risultato della simulazione DC bias point

## tensioni



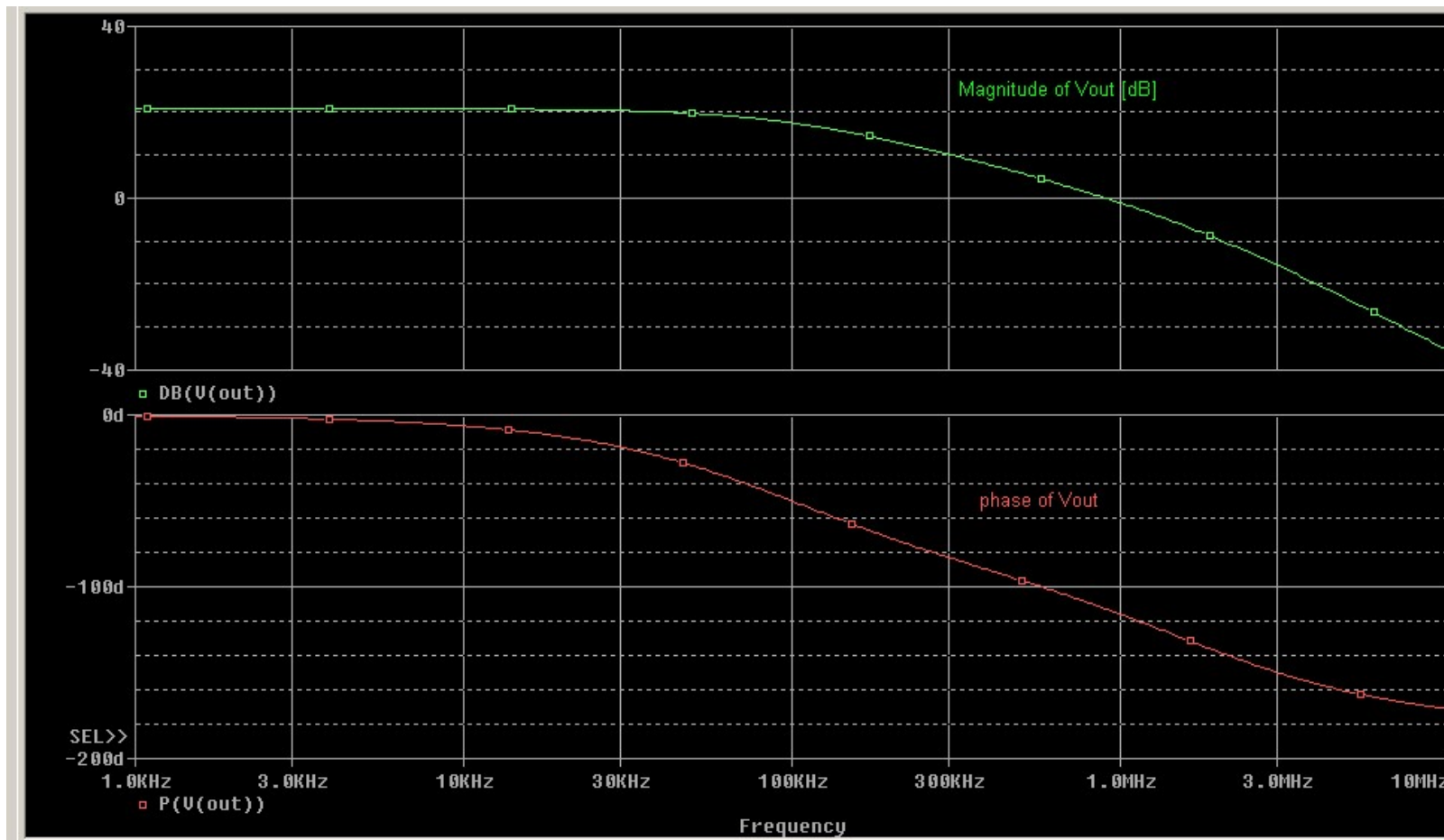
## correnti





Università degli  
Studi di Pavia

# Risultato della simulazione AC sweep







Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazioni Transient

