



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



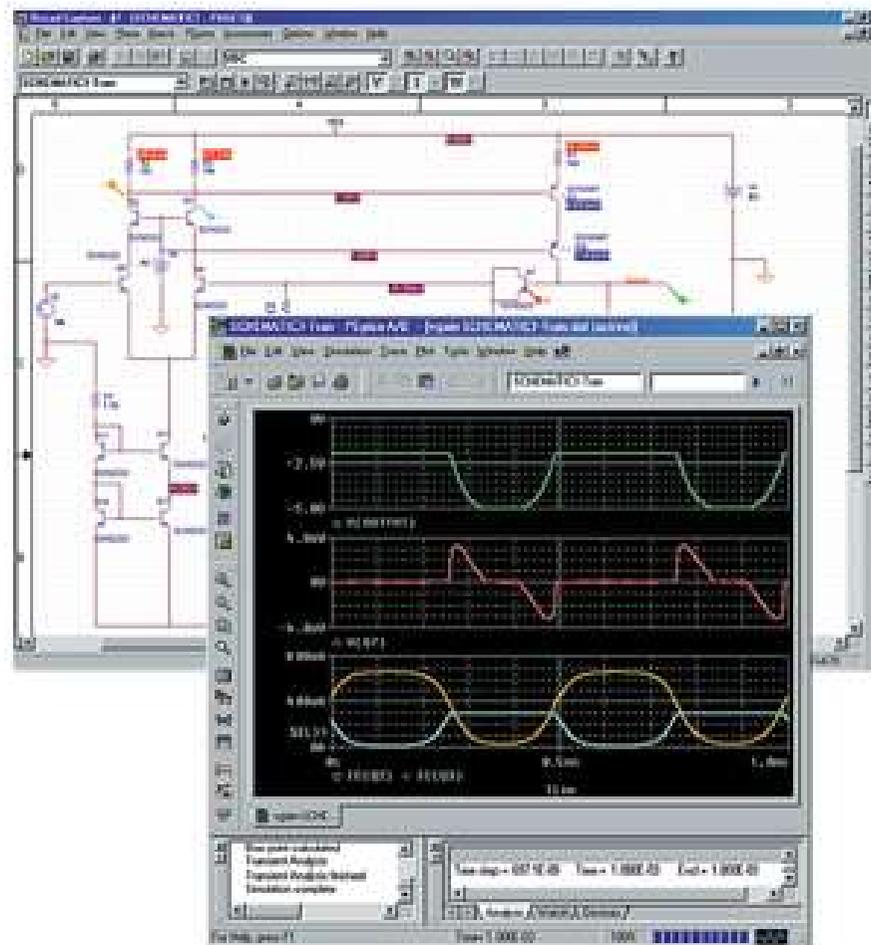
Università degli
Studi di Pavia

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

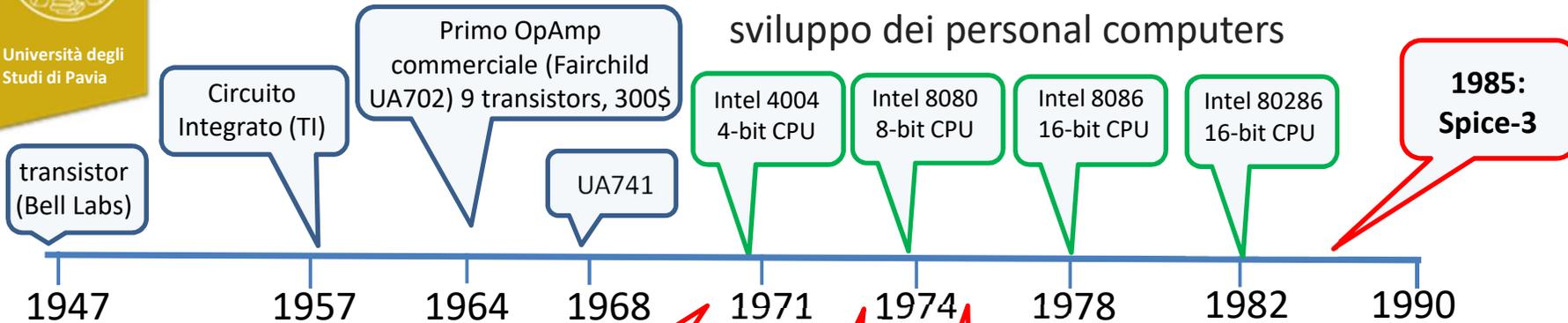
PSpice (Spice per personal computer) è una versione commerciale di Spice, corredato da una front-end grafico per il disegno dei circuiti (*capture*) e di un back-end grafico per la visualizzazione dei risultati. Utilizza gli algoritmi e modelli di dispositivi a semiconduttore utilizzati in Spice2, ma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



Università degli Studi di Pavia

Cenni storici

sviluppo dei personal computers



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...)

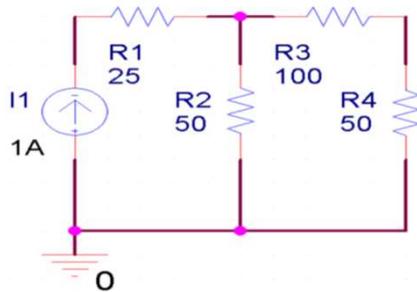




Funzionamento di Spice

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...)

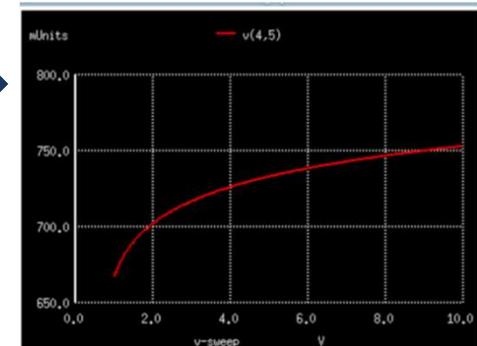


SPICE CORE

- (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
```





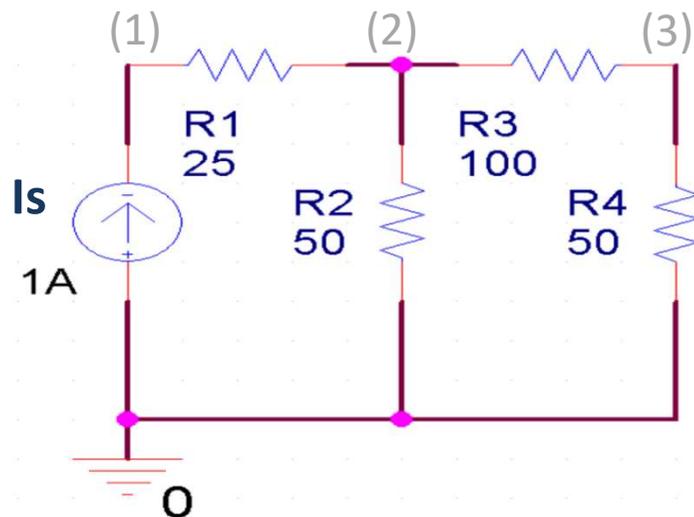
Netlist

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

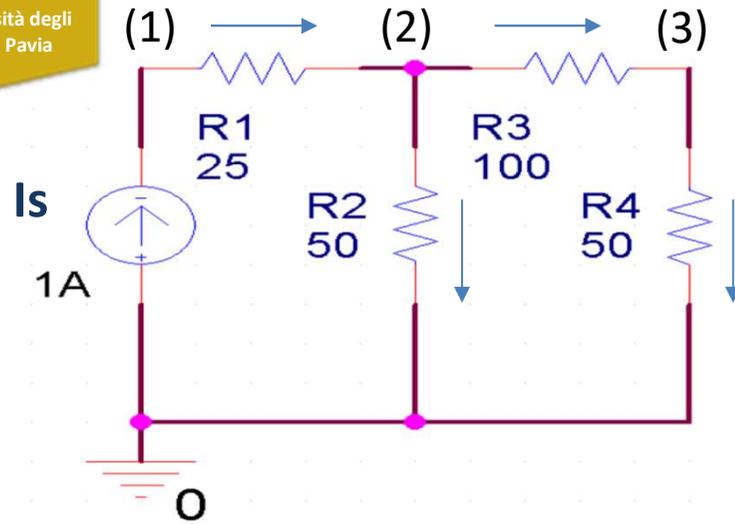


NETLIST

```
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:

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

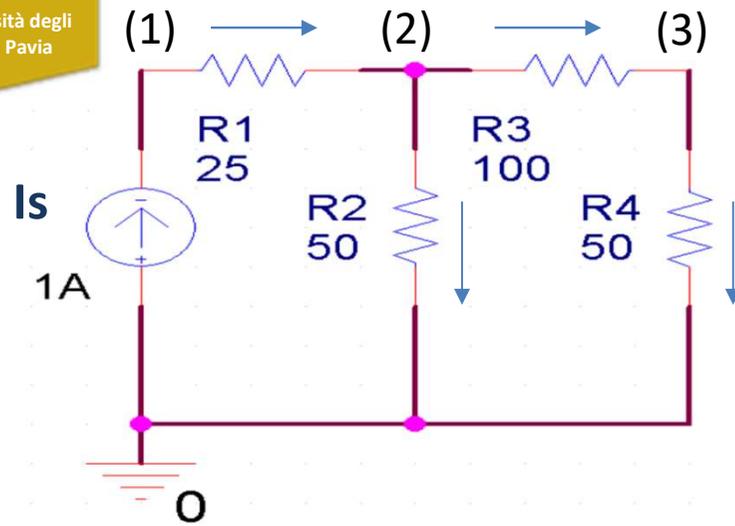
Esprimendo le correnti in funzione delle tensioni e delle conduttanze, e sistemando i termini si ottiene:

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

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



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

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

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

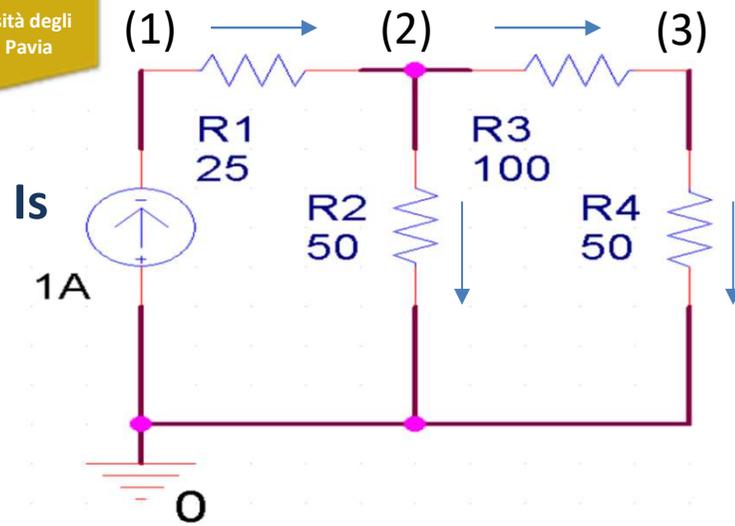
$$[Y] = \begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & (G_1 + G_2 + G_3) & -G_3 \\ 0 & -G_3 & (G_3 + G_4) \end{bmatrix}$$

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 é 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.

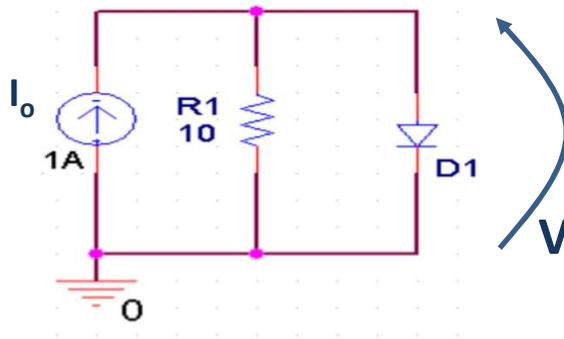
Possiamo suddividere i circuiti analogici in 4 categorie distinte:

- 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

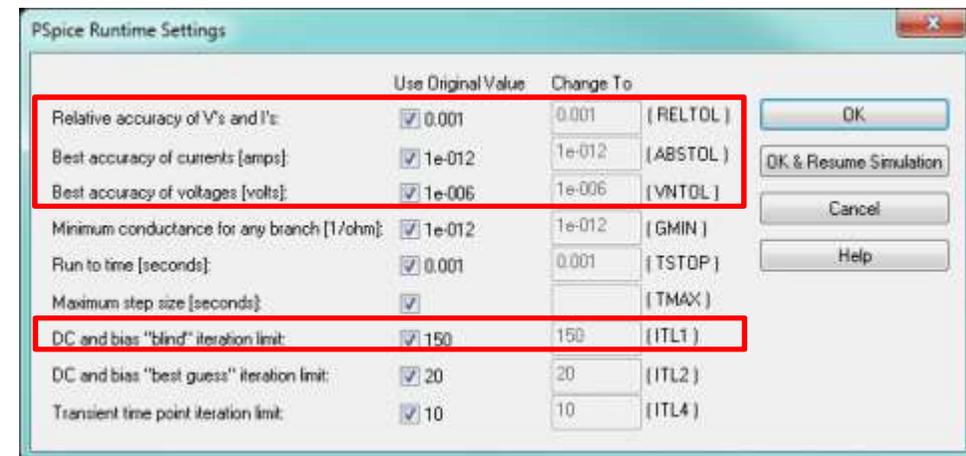
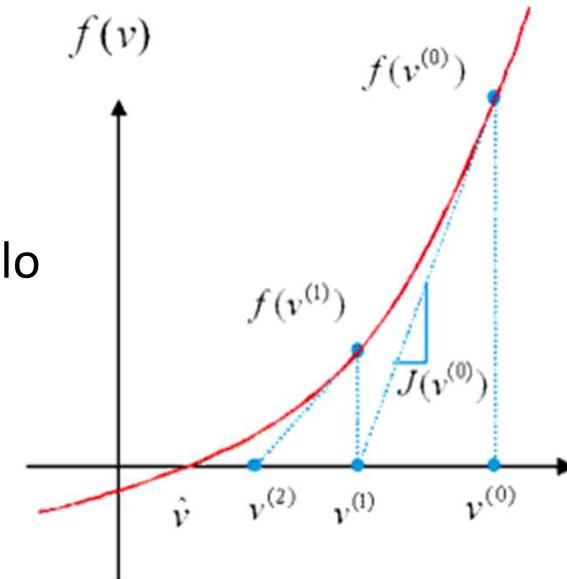
$$V_{k+1} = V_k - \frac{f(V_k)}{f'(V_k)} \quad \text{con} \quad f'(V) = \frac{df}{dV}$$

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:

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

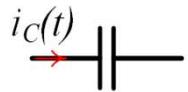
$$|I_{k+1} - I_k| < \text{ILIMIT} = \text{RELTOL} \cdot I_k + \text{ABSTOL}$$



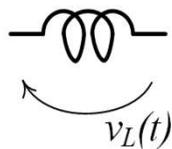


Analisi transitoria

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



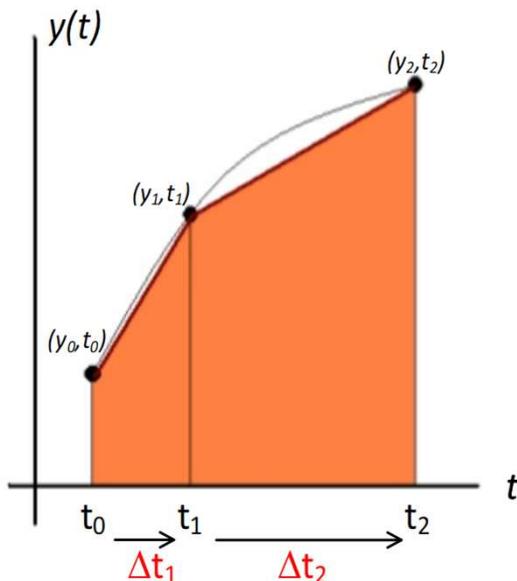
$$i_C(t) = \frac{d}{dt}Q(t)$$



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

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**:

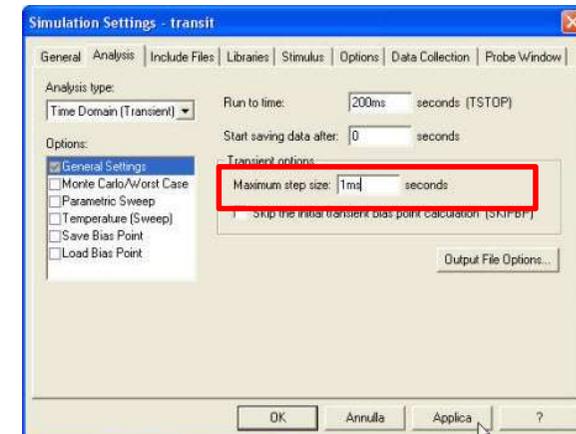


L'integrale da t_0 a t_2 è

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

Il passo di integrazione (Δt) viene scelto automaticamente in modo adattativo

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

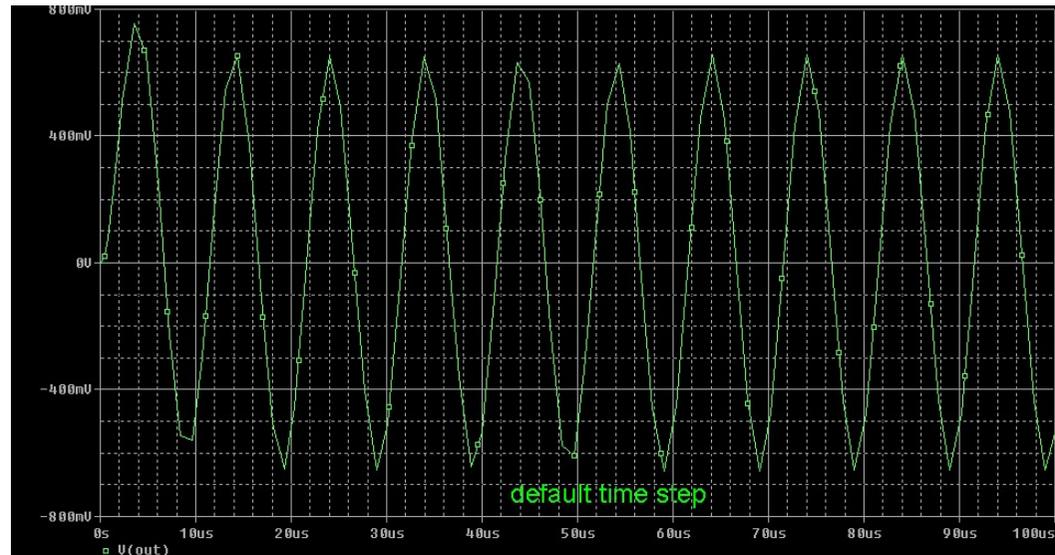




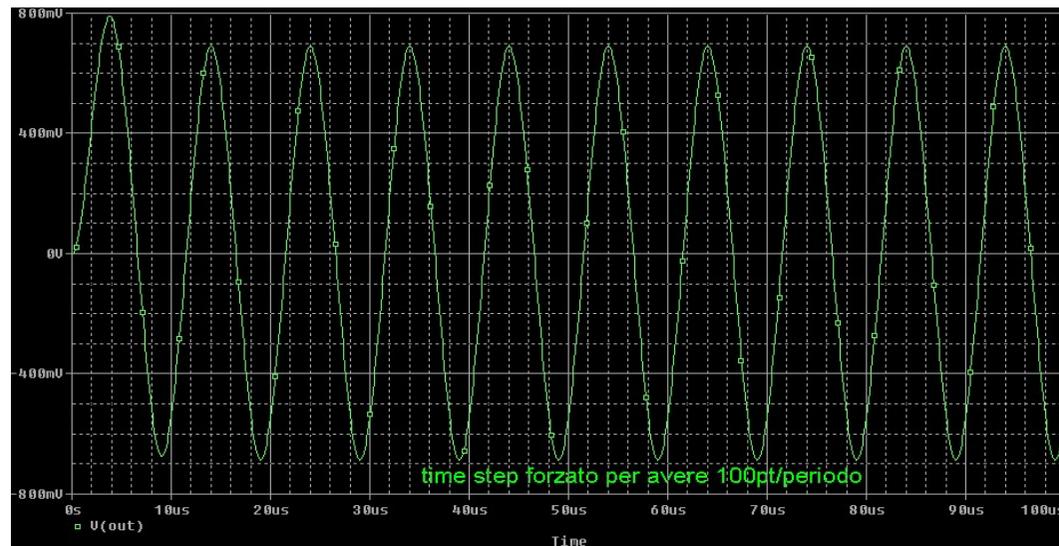
Università degli
Studi di Pavia

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:

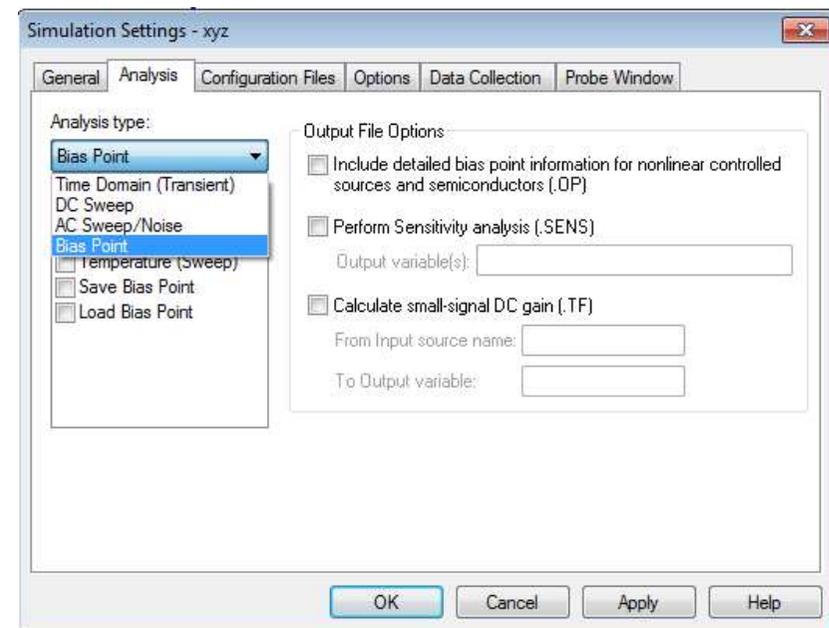
- tutti i condensatori presenti nel circuito sono sostituiti con circuiti aperti
- tutte le induttanze presenti nel circuito sono sostituite con corto-circuito

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

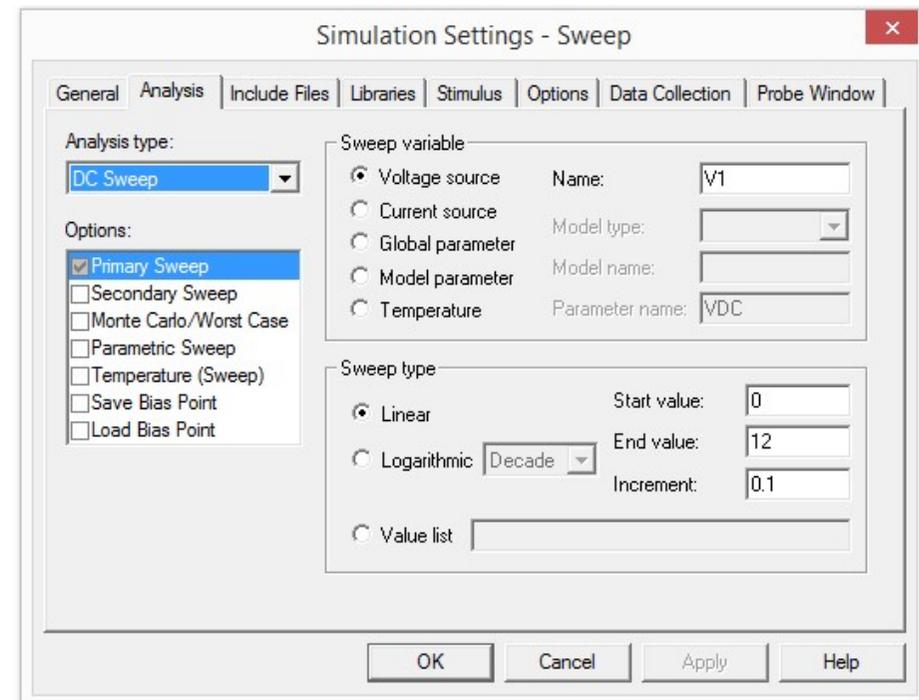
In questa simulazione viene analizzato il circuito in condizioni statiche:

- 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

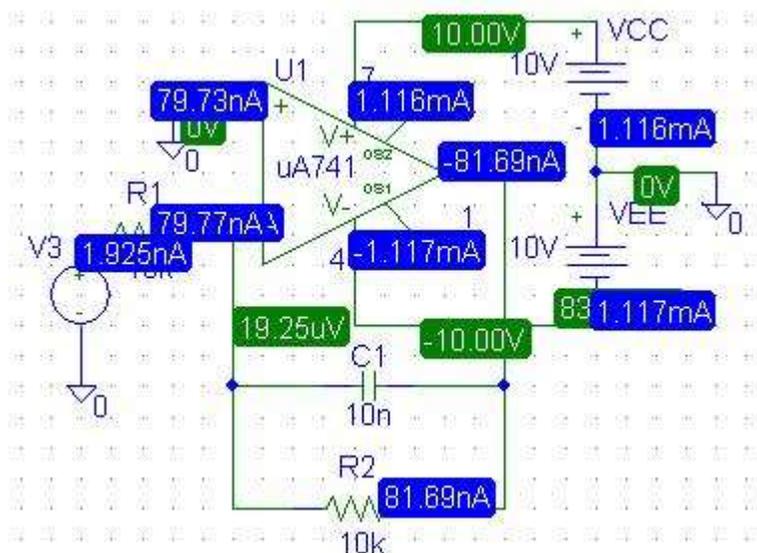
Ad esempio tracciare le curve I-V di un transistor o la caratteristica in-out di un amplificatore



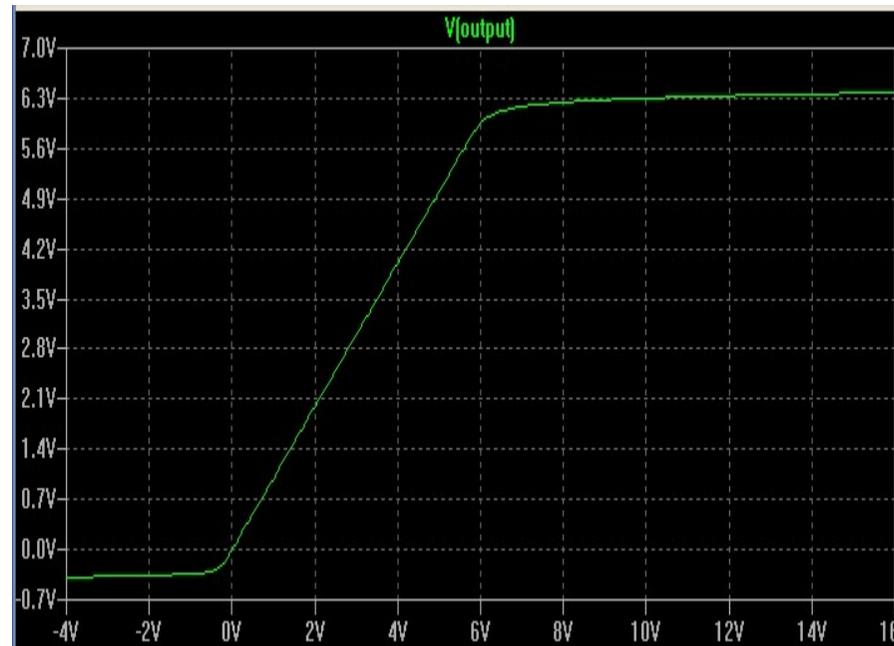


Risultati della simulazione DC

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)



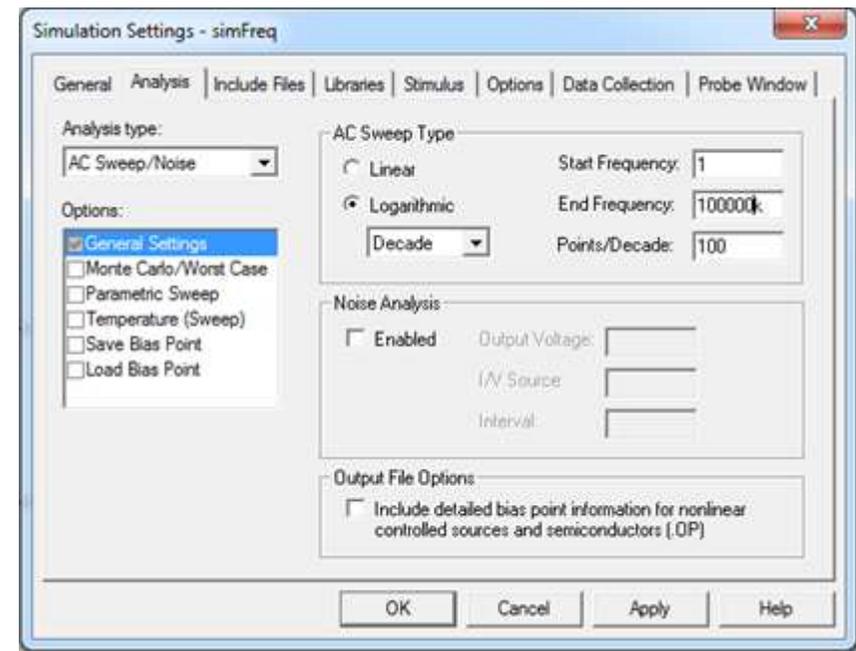
Università degli
Studi di Pavia

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

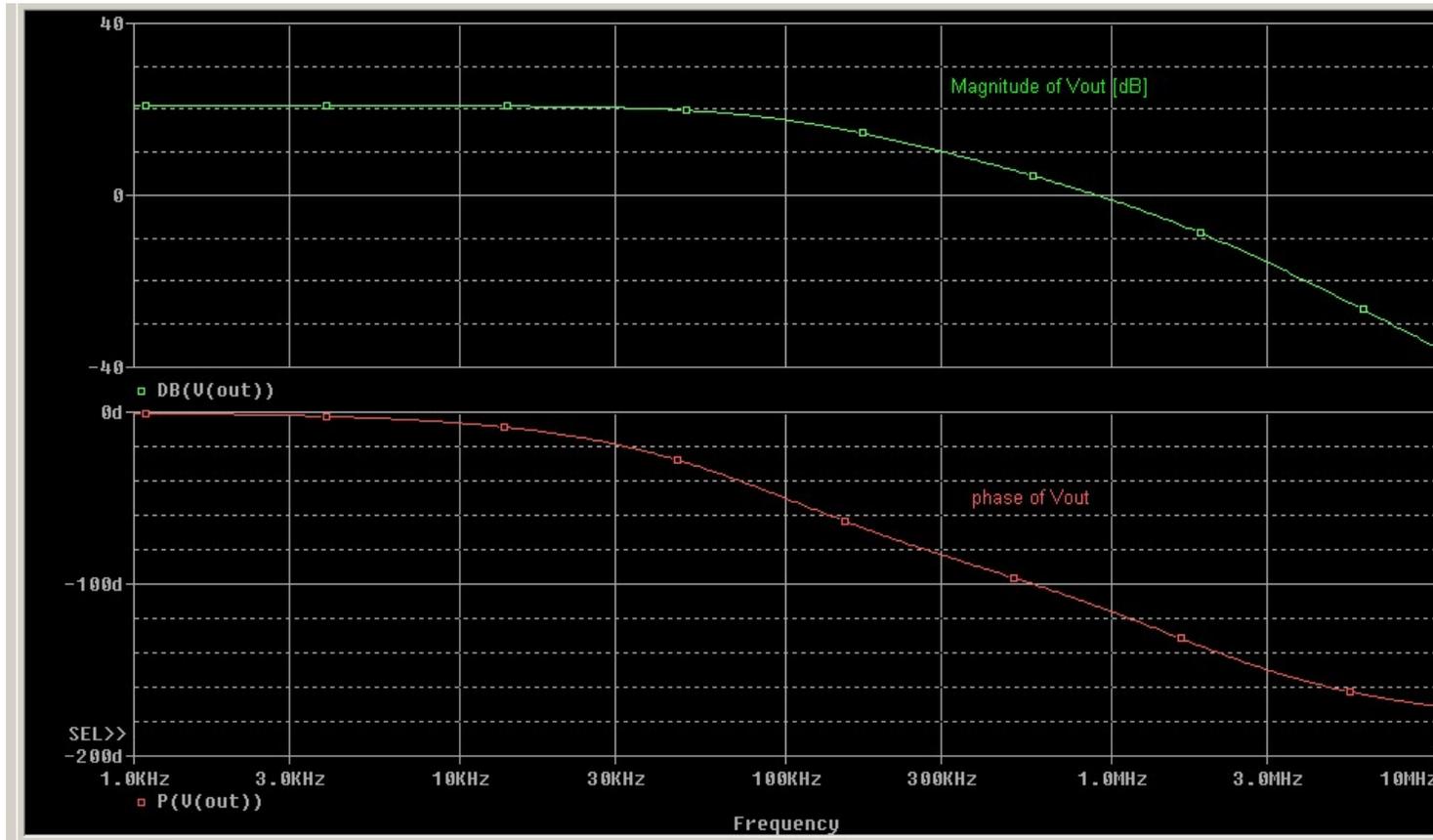
La simulazione **AC sweep** è una simulazione lineare. Moltiplicando per 1000 il/i segnale/i di eccitazione l'uscita viene moltiplicata per 1000!!! **La simulazione AC non tiene quindi in conto nessun effetto di compressione /saturazione /distorsione**

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)

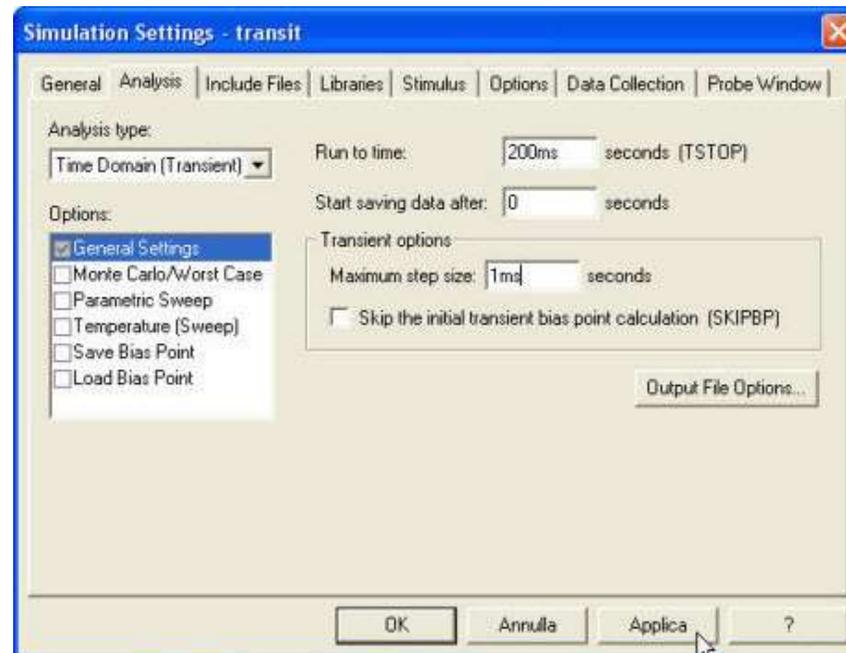


Università degli
Studi di Pavia

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.

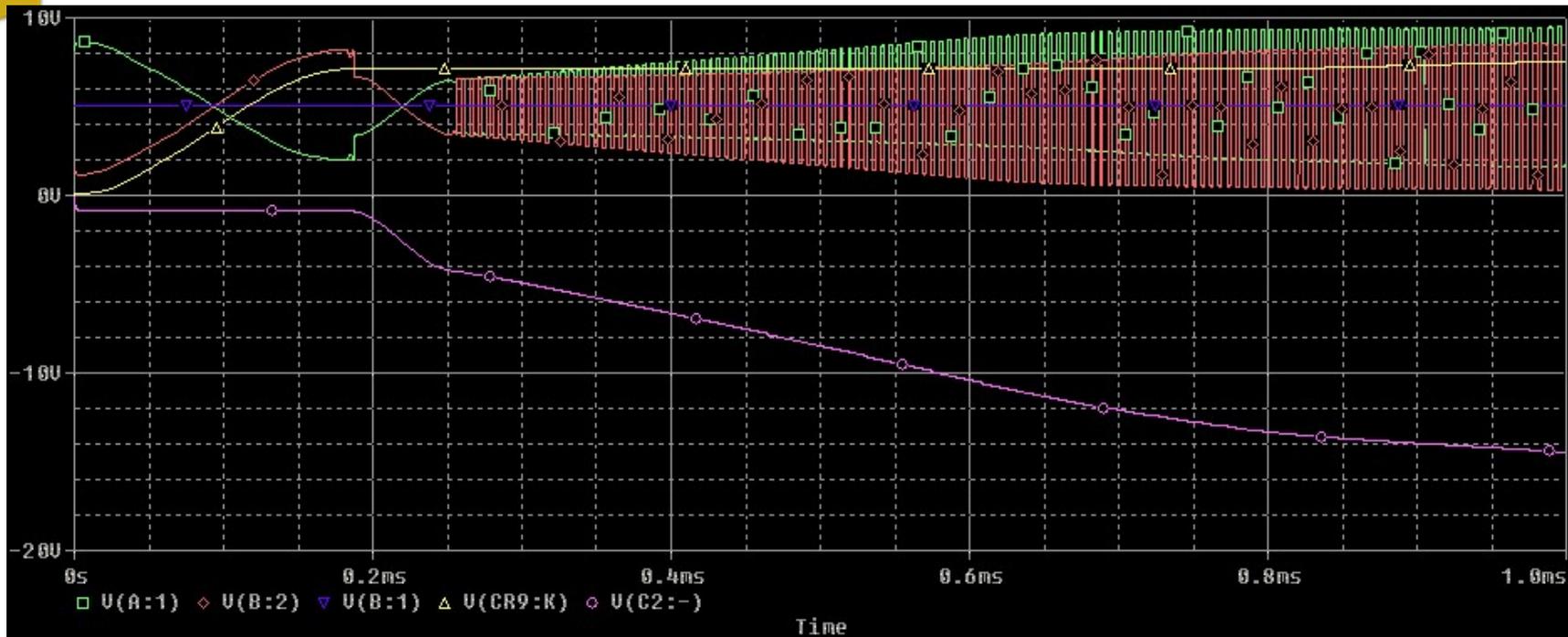
La simulazione Transient è la più complicata ed onerosa in termini di risorse computazionali. Vengono risolte le equazioni differenziali non-lineari che governano il circuito iterando in modo annidato il metodo di Newton-Raphson e l'integrazione numerica con il metodo dei trapezi





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

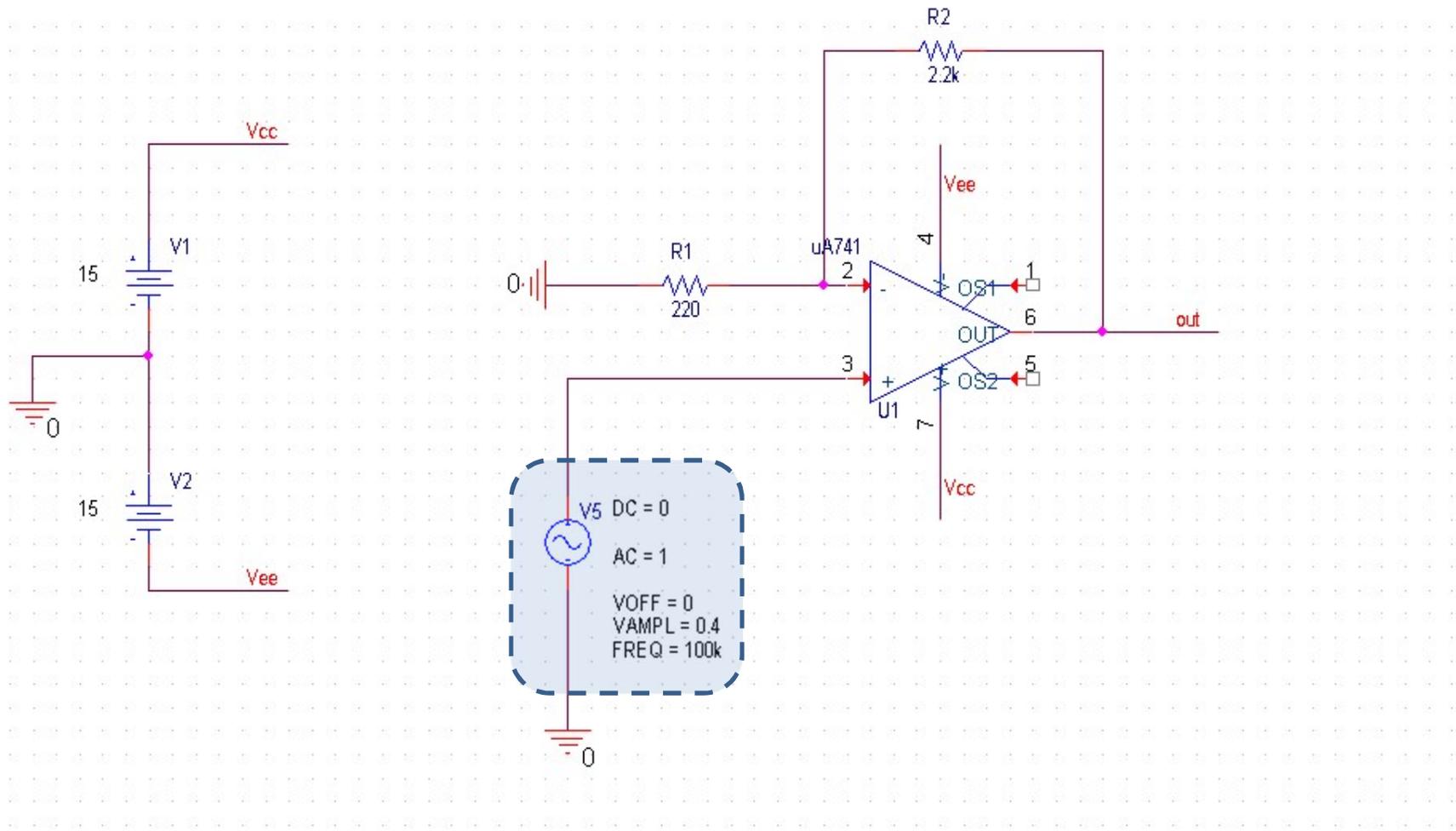


Esperienza guidata da Silvia Roncelli:

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



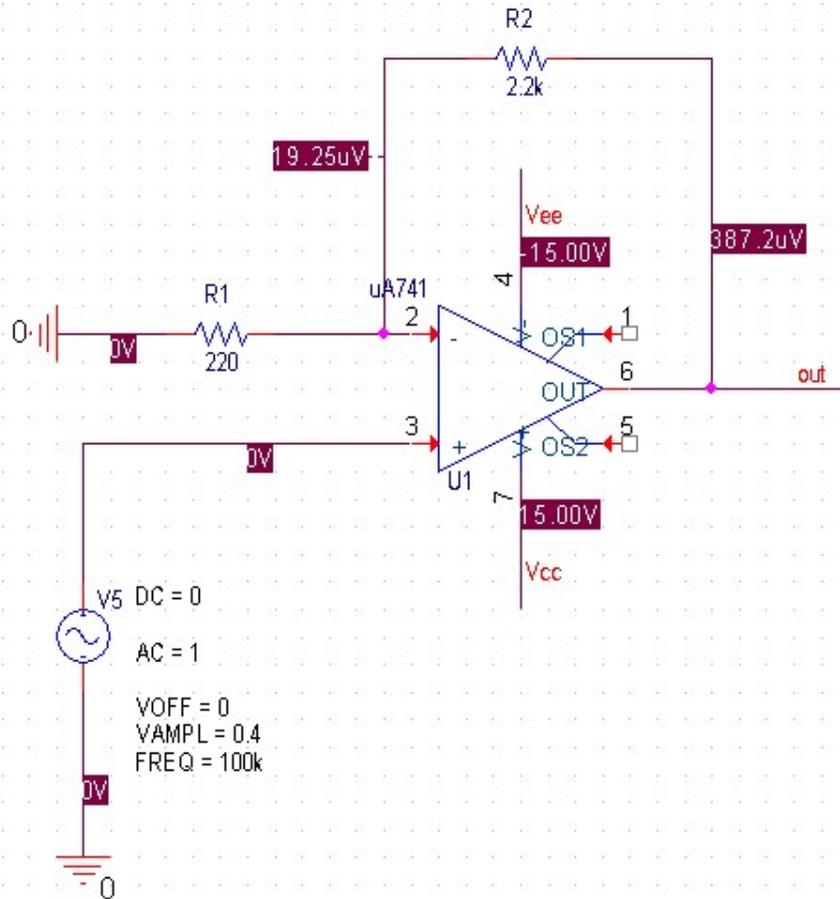
Schema



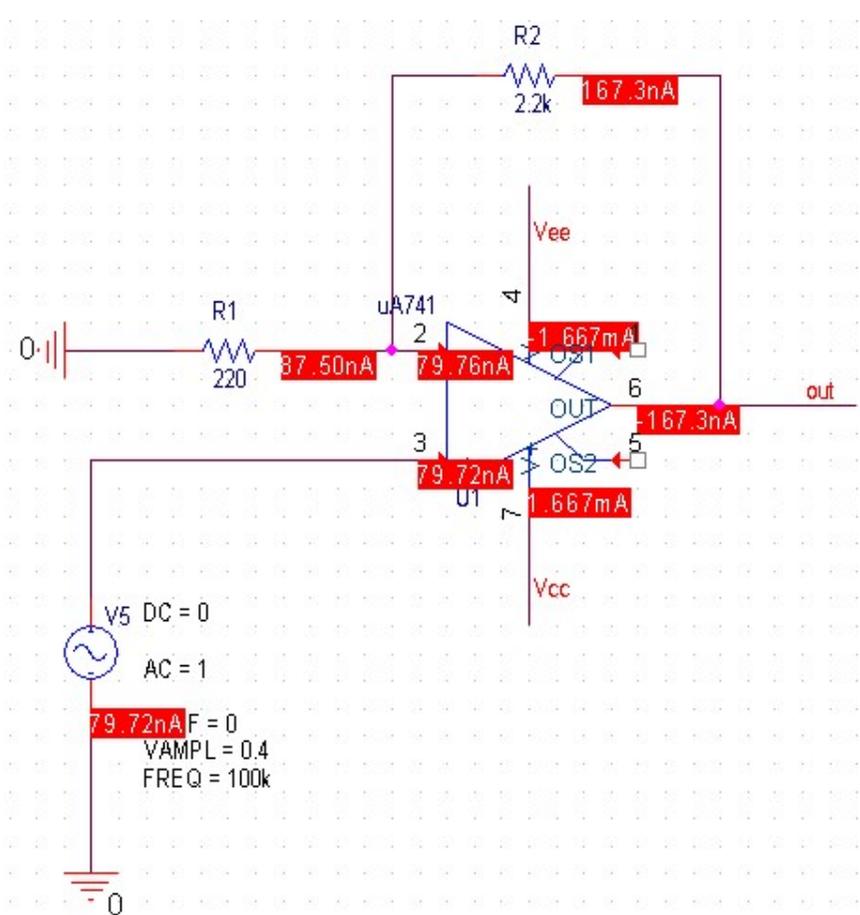


Risultato della simulazione DC bias point

tensioni



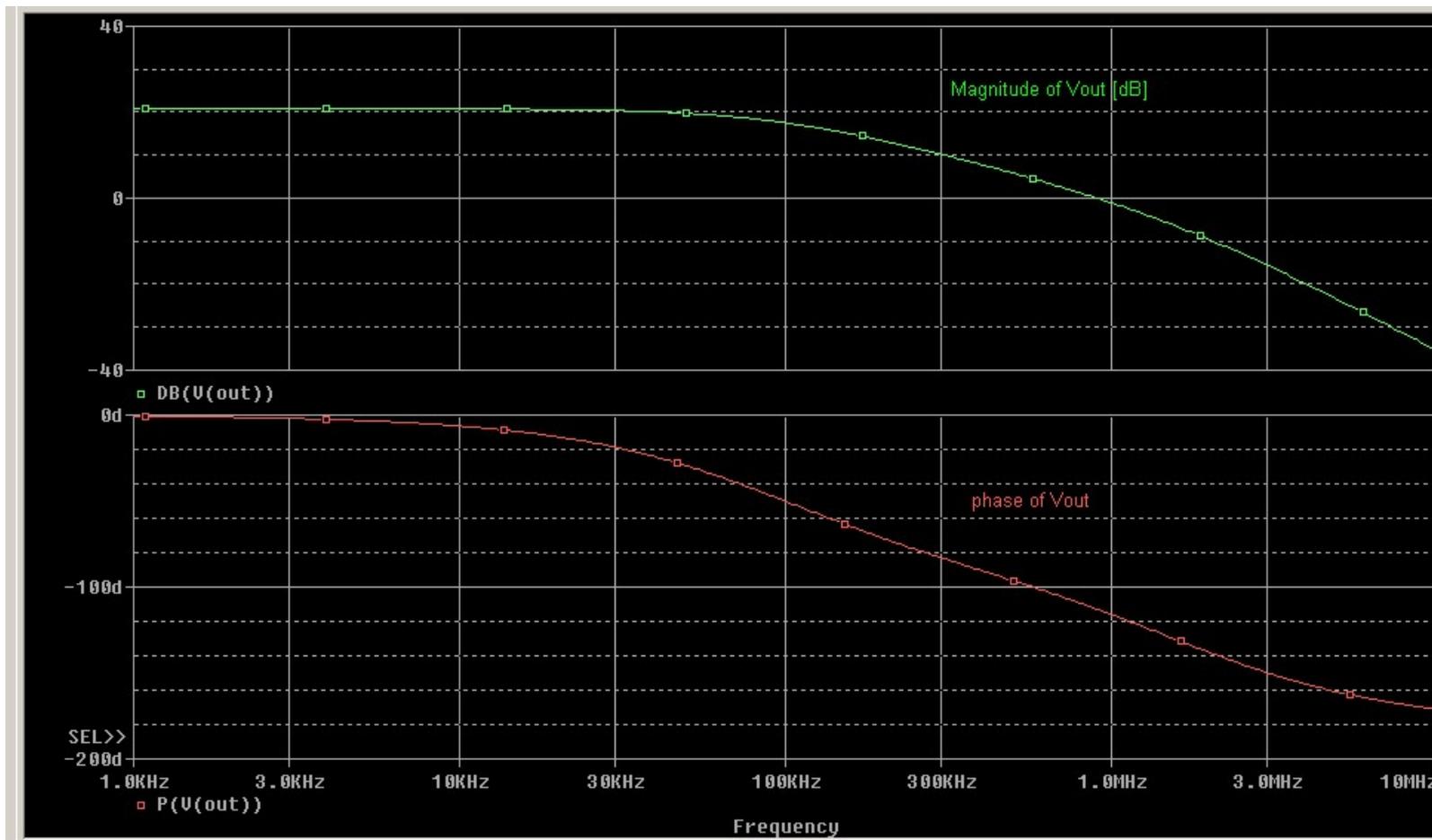
correnti





Università degli
Studi di Pavia

Risultato della simulazione AC sweep





Università degli
Studi di Pavia

Simulazioni Transient

