



### Guida all'uso del Simulatore Spice

Nel caso non foste venuti al primo laboratorio, scaricate pSPICE da :

<ftp://ftp.elet.polimi.it/outgoing/Chiara.Guazzoni/lezioni/laboratorio1/91pspstu.exe>

Installatelo sul vostro PC.

Caricare in Spice lo schematico e le altre librerie di interesse scaricabili da

<https://sampietro.faculty.polimi.it/didattica/ElAnscaricabile.html>

Andando in “*Analysis-Library and Include files*” dovete indirizzare correttamente le librerie in base a dove le avete messe nel vostro PC. Per fare ciò : *Delete* (di tutti gli indirizzi per caso presenti), *Browse* (per accedere alla vostra cartella), Identificare il file **.lib** e caricarlo con *Add library* (il 4° della lista).

E' utile sapere che:

Nella libreria *breakout.slb* sono presenti dei dispositivi ideali (*MbreakP*= MOSFET p-channel, *MbreakN*= MOSFET n-channel, *Rbreak*=resistenza, *Cbreak*=capacità) mentre nella libreria *source.slb* sono presenti i generatori di tensione (VDC, VSIN...). Cliccare sui generatori di segnale e accertarsi che *Voff* = 0, *Vampl* = 0, *Freq* = 0, *Phase* = 0.

Per inserire il modello del transistore bisogna selezionarlo con il mouse e dal menu *Edit* scegliere *Model* e, successivamente, *Edit Instance Model (Text)*. Aggiornare quindi la finestra che definisce il modello del nMOSFET nel modo seguente:

```
.model Mbreakn NMOS(  
VTO = 0.75  
KP = 120e-6  
LAMBDA = 0)  
*$
```

VTO= tensione di soglia, KP= $\mu C_{ox}$ , LAMBDA= inverso della tensione di Early.

In zona satura il simulatore utilizza la seguente espressione della corrente di drain :

$$I_D = \frac{1}{2} KP \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TO})^2 (1 + V_{SD} / V_A) \quad (Eq.1)$$

Per inserire i parametri geometrici del transistore fare un doppio click con il mouse sul componente (oppure dal menu *Edit* selezionare *Attributes*) e aggiornare i campi L e W (*Nota*: il simbolo per il micron è la u).

Per far girare la simulazione della sola polarizzazione, dal menu *Analysis* selezionare *Set-up* e successivamente spuntare *Bias Point Detail*, poi *close*. Da *Analysis*, selezionare *Simulate*.

Per vedere il valore della transconduttanza, da *Analysis*, selezionare *Examine output* e cercare GM

## Parte 2: Comportamento su piccolo segnale DIFFERENZIALE (LAMBDA = 0)

Verificare che i valori delle tensioni ai nodi utilizzando il simulatore SPICE siano uguali ai valori calcolati teoricamente.

### *Calcolo teorico:*

Calcolare carta&penna il guadagno lineare (di piccolo segnale) :

guadagno single-ended, cioè il guadagno verso la singola uscita:

$$G_d = V_{out2}/(V_{in1}-V_{in2}) =$$

guadagno differenziale, cioè il guadagno verso la differenza tra le due uscite:

$$G_{diff} = (V_{out1}-V_{out2})/ (V_{in1}-V_{in2}) =$$

### *Simulazione Spice:*

Effettuare l'analisi in transitorio e calcolare i due guadagni lineari (di piccolo segnale) applicando un **segnale differenziale**  $V_{diff}=(V_{in1}-V_{in2})$  sinusoidale alla frequenza di 1kHz e **ampio 1mV**

Per effettuare la simulazione:

- si usi il generatore VSIN (per inserirlo nello schematico andare nel menu *Draw\_Get New Part*).
- fare doppio clic sul simbolo e inserire i parametri di ampiezza (*vamp*), offset (*voff* = 0) e frequenza (*freq*). **Consiglio: per applicare il segnale differenziale sfasare di 180° un generatore rispetto all'altro agendo sul parametro PHASE di uno dei due** ( $V_{in1}=0.5mV$ ,  $V_{in2}=0.5mV$  sfasato di 180)
- Dal menu *Analisis Setup* selezionare il box accanto a *Transient* e fare clic sul tasto *Transient*. Nella maschera che appare impostare *Final Time*, che rappresenta l'intervallo temporale oggetto della simulazione, a 5ms e *step ceiling*, che rappresenta il massimo passo temporale di simulazione, a 0.1μs. nella sezione *Fourier Analysis* della stessa mascherina impostare le variabili dei punti di uscita di cui si vuole avere lo sviluppo di Fourier.
- Oltre che misurare all'oscilloscopio l'ampiezza della sinusoide in uscita, potete calcolare il guadagno lineare del circuito dal menu *Analysis* nella tabella di "Examine output" guardando l'ampiezza della prima armonica che vi sarete fatti calcolare nella Analisi di Fourier

guadagno single-ended fornito dal simulatore:

$$G = V_{out2}/(V_{in1}-V_{in2}) =$$

guadagno differenziale fornito dal simulatore:

$$G = (V_{out1}-V_{out2})/ (V_{in1}-V_{in2}) =$$

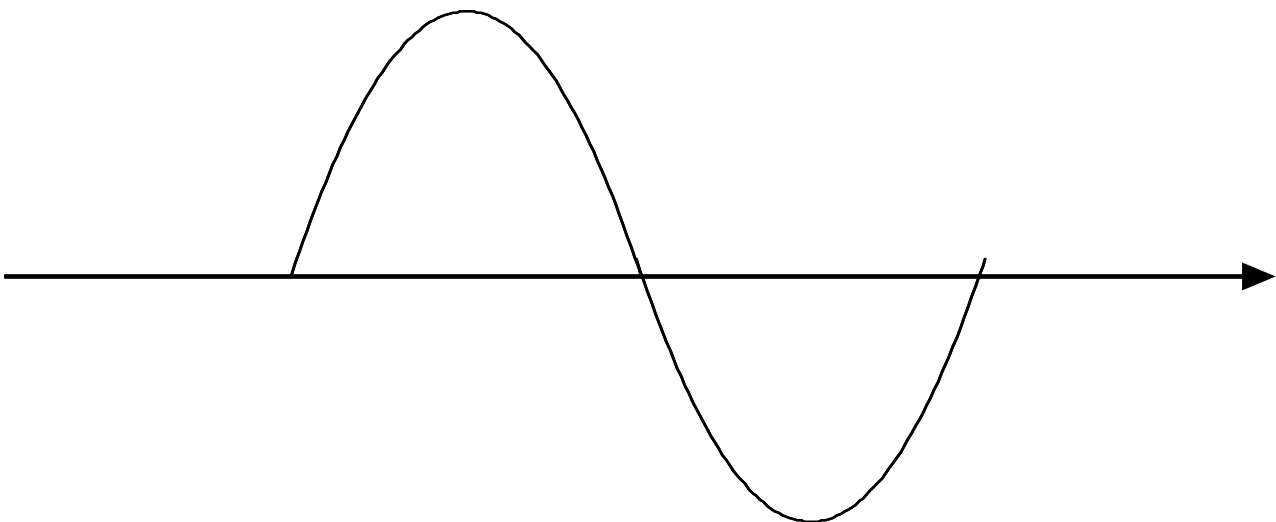
### Parte 3 : Distorsione del segnale differenziale in uscita (caso di LAMBDA = 0 )

#### **Calcolo teorico:**

Con in ingresso una sinusoide a 1kHz e di **ampiezza di picco differenziale pari a 2V**, proviamo a prevedere quanto sarà ampia la forma d'onda in uscita, completando la tabella seguente.

	Colonna per i conti ed il risultato
Valore di picco in $V_{out2}$ se il circuito si comportasse in modo perfettamente lineare:	Quotare con questo risultato il grafico in basso.
Valore di $\varepsilon$ (%) vero (termine cubico/termine lineare) ricavato con i conti a lezione :	$\varepsilon'''(\%) \cong \left( \frac{v_1 - v_2}{2 \cdot V_{OD}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2}$
Valore di picco <b>positivo/negativo</b> calcolato carta-e-penna utilizzando quest'ultimo $\varepsilon$ .	Disegnare nel grafico in basso la sinusoide che ci aspettiamo quindi in uscita dal circuito, quotata con questo risultato. Riflettete sul fatto che la $\varepsilon$ appena trovata debba diminuire l'ampiezza della curva ideale disegnata all'inizio.

Disegnare l'andamento atteso dell'uscita rispetto alla sinusoide ideale riportata qui sotto (quotare le curve sulla base dei valori calcolati sopra) :



### Simulazione Spice:

Simulare il valore di picco dell'uscita  $V_{out2}$  nel caso di sinusoide in ingresso di **ampiezza differenziale**  $V_{diff}=(V_{in1}-V_{in2})$  di picco pari a **2V** ( $V_{in1}=1V$ ,  $V_{in2}=1V$  sfasato di  $180^\circ$ ).

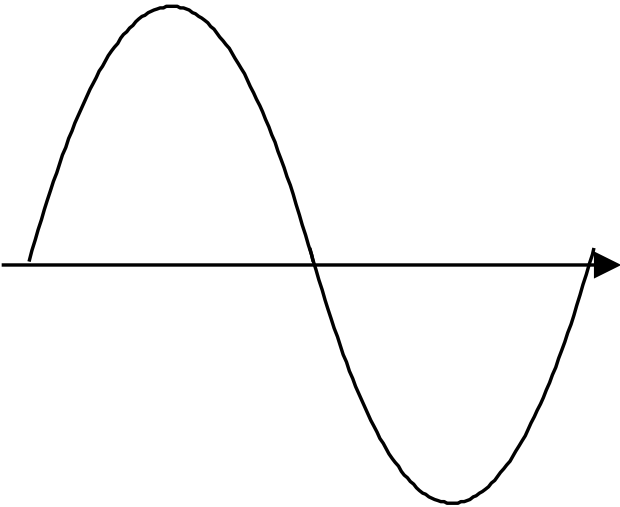
Valore di picco positivo simulato:	
Valore di picco negativo simulato:	

Confrontare i risultati simulati con i valori di picco positivo e negativo prima stimati.

Dovreste aver trovato che :

- i valori di picco negativo e positivo sono uguali tra loro, cioè la curva in uscita è simmetrica;
- i valori sono molto simili a quelli appena calcolati carta&penna, dimostrando che avete capito bene e che sapete prevedere la realtà con ragionevole precisione.

Guardate ora **le singole armoniche** presenti **al terminale di uscita** del transistor e disegnatele qui sotto. Per ottenere le armoniche con  $V_{diff}=2V$  abilitare la funzione *Fourier Analysis* nella finestra di setup della simulazione *Transient* scegliendo 10 armoniche. Dopo aver rilanciato la simulazione, trovate le ampiezze delle armoniche in *Analysis -> Examine Output* e disegnatele qui sotto.

Ampiezza 1° armonica :	<p>Disegnate qui le varie armoniche e la curva totale come loro somma</p> 
Ampiezza 2° armonica :	
Ampiezza 3° armonica :	

Notate che, pur impiegando transistori dalla caratteristica perfettamente quadratica:

- sono praticamente assenti le armoniche pari;
- vengono generate anche le armoniche superiori (3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> etc...).

Riflettere su come ciò sia possibile.

<p>Notate che l'ampiezza della <b>1° armonica</b> (ricavata dal simulatore) è minore di quella prevista nella pagina precedente per un circuito perfettamente lineare. Per capirlo, ricordatevi che quando fate il cubo produceate anche una prima armonica, che in questo caso va a sottrarsi. L'espressione qui accanto è corretta, mettetene i valori.</p>	$\frac{1}{2}(v_1 - v_2) \cdot \sqrt{2k} \cdot I_{rif} - \frac{k\sqrt{2k}(v_1 - v_2)^3}{8\sqrt{I_{rif}}} \cdot \frac{3}{4}$
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Total Harmonic Distortion

Per apprezzare il valore della distorsione dello stadio differenziale, facciamo innanzitutto un calcolo carta-e-penna della distorsione che potremmo avere nel caso peggiore possibile, cioè se il Source non si muovesse ( $v_s=0V$  su segnale).

Valore di $HD_2$ (%) stimato nel caso semplificato in cui $v_s=0$ (E' come se il differenziale fosse fatto da due Source a massa !).	$\epsilon =$ <span style="float: right;"><math>HD_2 =</math></span>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------

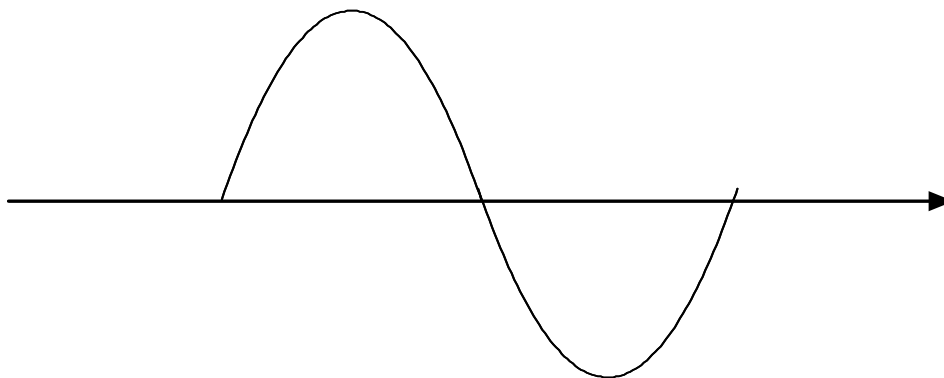
Stimiamo ora la distorsione fornitaci dai calcoli teorici e guardiamo cosa ci dice il simulatore, compilando la tabella seguente:

	Da calcoli teorici	Da SPICE : Riportate il valore di THD fornito dal simulatore
$THD :$	$HD_3 \cong \frac{\epsilon}{4} = \left( \frac{v_1 - v_2}{2 \cdot V_{OD}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} =$	

Notate che la distorsione è piccola, molto minore di quella che avremmo se  $v_s=0V$ . Ciò è molto bello ma perchè ?

Per capire meglio le ragioni di questo comportamento, rilevare lo spostamento della **tensione nel punto  $V_s$**  (il source dei due MOSFET) nel caso di  $V_{diff}=(V_{in1}-V_{in2})=2V$ .

Disegnare l'andamento nel tempo di  $V_s(t)$  rispetto al valore di polarizzazione e confrontarlo con la sinusoide  $V_{in1}(t)$  già tracciata. Indicare il valore dell'ampiezza di  $V_s(t)$ .



Commentare il corrispondente andamento di  $V_{GS}(t)$  e metterlo in relazione con la linearità complessiva del circuito.

## Parte 4: Effetto della resistenza di Early dei MOSFET

Si renda ora il modello dei MOSFET più realistico introducendo l'effetto dello spostamento del punto di pinch-off. A questo scopo si aggiorni il modello di **tutti** i transistori per tenere conto di una tensione di Early di  **$V_a=50V$** :

```
.model Mbreakn NMOS(  
VTO = 0.75  
KP = 120e-6  
LAMBDA=0.02)  
*$
```

Il simulatore ora utilizza la seguente espressione della corrente di drain in zona satura:

$$I_D = \frac{1}{2} KP \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TO})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Stimare teoricamente le modifiche subite dal circuito prodotte dalla presenza del termine LAMBDA e verificare tramite il simulatore la bontà delle stime utilizzate.

### **Polarizzazione:**

Stimare la corrente di drain di **M3** (conti a mano). Per fare il calcolo abbastanza velocemente riflettere su quale sia tra M3 e M4 il transistorore principalmente responsabile del diverso valore della corrente di polarizzazione rispetto al caso di LAMBDA=0.

Valore di corrente di drain di M3 fornita dal simulatore:

<p>Quale è il nuovo valore di transconduttanza <math>g_{m1}</math> e <math>g_{m2}</math>? (conti a mano)</p>	<p>Transconduttanza dal simulatore :</p>  <p>Confrontarlo con quello con <math>LAMBDA=0</math> :</p>
<p>Stimare il valore di <math>r_0</math> di <math>M1=M2</math>.</p>	<p>Dal simulatore :</p>

**Guadagno lineare :** applicare  $(v_1-v_2)=2mV$  ( $V_{in1}=1mV$ ,  $V_{in2}=1mV$  sfasato di  $180^\circ$ ). :

<p>A fronte dei cambiamenti appena introdotti, stimare il guadagno <math>V_{out2}/(V_{in1}-V_{in2})</math> per <u>piccoli segnali</u> single-ended:</p>    <p>Stima del guadagno differenziale <math>(V_{out1}-V_{out2})/(V_{in1}-V_{in2})</math>:</p>   <p>Come mai il guadagno è maggiore di quello senza <math>V_A</math>?</p>	<p>Valori forniti dal simulatore:</p> $V_{out2}/V_{diff} =$   $(V_{out1}-V_{out2})/V_{diff} =$
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------



**Distorsione: applicare  $v_{diff}=2V$  all'ingresso**

<p>Ti aspetti che la presenza di <math>r_0</math> (sia in M1, M2 che in M3) aumenti o diminuisca la distorsione dello stadio ?</p> <p>Notare che risorge la 2° armonica. Come mai? Chi ne è responsabile, M1, M2 o M3 ?</p> <p>L'oscillazione della tensione al Source è maggiore o minore di prima senza <math>r_0</math> ? Perché ?</p>	<p>Risultato da simulazione (<math>V_{diff}=2V</math> e <math>LAMBDA=0.02</math>)</p> <p>THD =</p> <p>Confrontalo con THD per <math>LAMBDA=0</math> :</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Questa parte è molto difficile. Se l'hai capita sei molto bravo e puoi andare fiero del tuo sapere !

## Parte 5: Comportamento su grandi segnali di ingresso (LAMBDA=0)

### Dinamica massima con segnale di ingresso differenziale

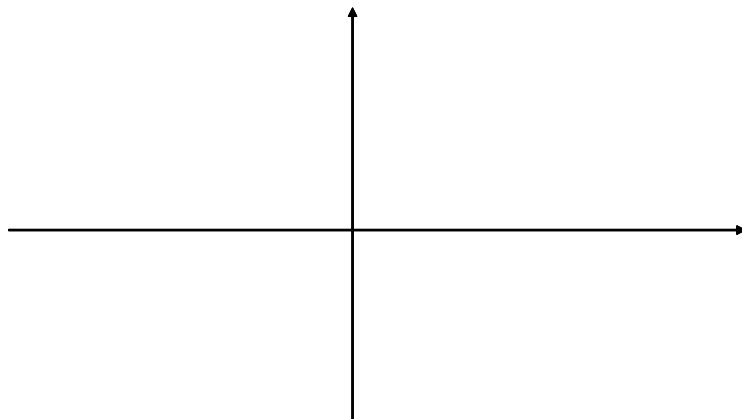
Calcolare la massima tensione differenziale di ingresso tale da sbilanciare completamente la coppia differenziale, cioè fare portare tutta la corrente ad un transistor e zero all'altro.

Spazio per i conti

$V_{diff|max}$

### Caratteristica ingresso-uscita per grandi segnali

Per controllare con il simulatore la dinamica trovata sopra, si tracci la caratteristica ingresso-uscita dello stadio differenziale, ossia si faccia il grafico di  $V_{out1}$  (oppure  $V_{out2}$ ) in funzione dell'ampiezza dell'ingresso. E' utile a questo scopo utilizzare la simulazione "DC sweep" e impostare come variabile di sweep il nome di uno dei generatori di tensione (ad esempio  $V_{in1}$ ) e farne variare la tensione DC tra -15V e +15V (Start value=-15, End Value=15, Increment=15m). L'altro generatore di ingresso ( $V_{in2}$ ) verrà tenuto dal simulatore fermo a 0V.



Giustificare l'andamento trovato della curva.

Determinare i regimi di funzionamento dei transistori nei vari punti della curva. Notare che pur entrando in zona Ohmica, il transistore continua a portare tutta la corrente del generatore di coda!