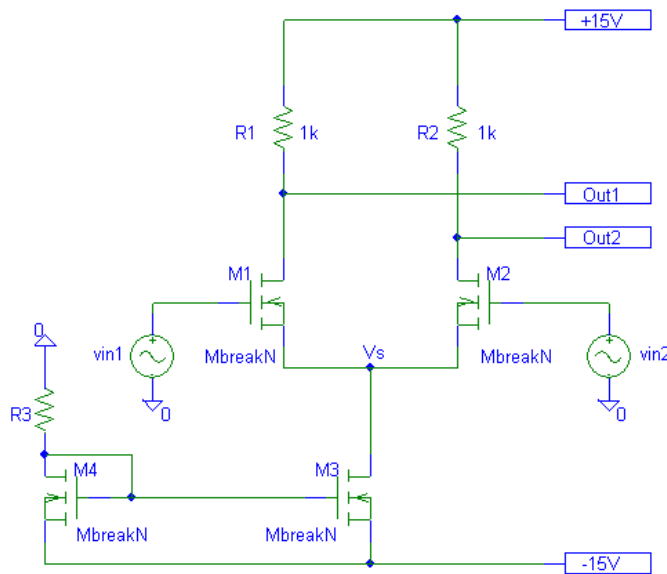


DISTORSIONE e DINAMICA in uno stadio differenziale.

Parte 1: Polarizzazione del circuito

Calcolo teorico: tensione di Early infinita

Studiare la polarizzazione del seguente circuito dimensionando la resistenza R3 affinché i nodi di uscita V_{out1} e V_{out2} siano ad un potenziale di 10V quando gli ingressi sono nulli. Fare i conti nel caso di tensione di Early infinita, $V_a = \infty$



$$V_T = 0.75V$$

$$k_n = \mu C_{ox} = 120 \mu A/V^2$$

$$r_0 = \infty$$

Dimensioni dei MOS:

$$W_1/L_1 = 7 \mu / 0.7 \mu,$$

$$W_2/L_2 = 7 \mu / 0.7 \mu,$$

$$W_3/L_3 = 140 \mu / 0.35 \mu,$$

$$W_4/L_4 = 70 \mu / 0.35 \mu.$$

Valori di polarizzazione e calcolo di R3:

$$\frac{1}{2} \mu C_{ox} W/L|_1 =$$

$$\frac{1}{2} \mu C_{ox} W/L|_2 =$$

$$\frac{1}{2} \mu C_{ox} W/L|_3 =$$

$$\frac{1}{2} \mu C_{ox} W/L|_4 =$$

$$I_{M1} =$$

$$g_{m1} =$$

$$1/g_{m1} =$$

$$I_{M2} =$$

$$g_{m2} =$$

$$1/g_{m2} =$$

$$I_{M3} =$$

$$V_S =$$

$$V_{od}|_{M1,M2} =$$

$$I_{M4} =$$

$$V_{GS,M3} =$$

$$R_3 =$$

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/laboratorio1/91pspstst.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 transistor 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= μC_{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 transistor 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 in uscita (caso di LAMBDA = 0)

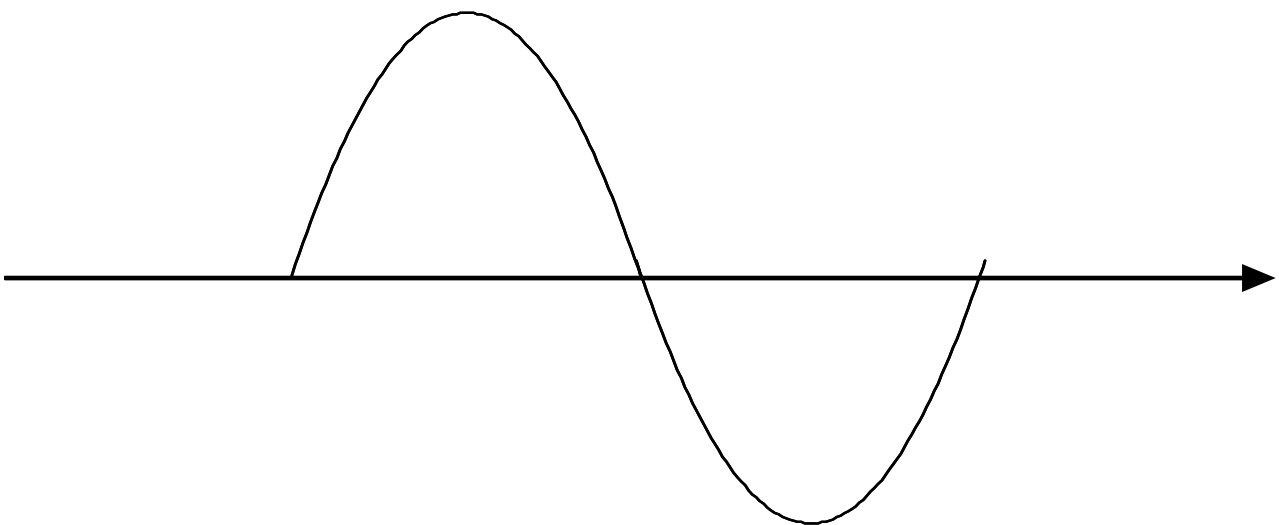
SINGOLA USCITA (V_{out2})

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 ε (%) (termine cubico/termine lineare) ricavato con i conti a lezione (Cap.7 del libro) e riportato qui di fianco:	$\varepsilon'''(\%) \cong \left(\frac{v_1 - v_2}{2 \cdot V_{OD}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2}$
Valore di picco positivo/negativo calcolato carta-e-penna utilizzando quest'ultimo ε .	Disegnare nel grafico in basso la sinusoide che ci aspettiamo quindi in uscita dal circuito, quotata con questo risultato. Riflettete sul fatto che la ε appena trovata debba diminuire l'ampiezza della curva ideale.

Disegnare l'andamento aspettato dell'uscita V_{out2} 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°).

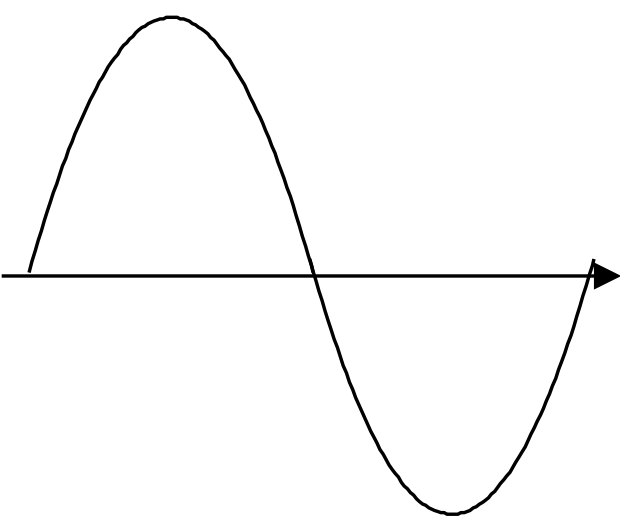
Valore di picco positivo simulato:	
Valore di picco negativo simulato:	

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 V_{out2}** del transistor e disegnatene 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 disegnatene sotto.

Ampiezza 1° armonica :	Disegnate qui le varie armoniche e la curva totale come loro somma 
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^a, 5^a, 7^a etc...).

Riflettere su come ciò sia possibile.

Notate che l'ampiezza della 1° armonica (ricavata dal simulatore) è minore di quella prevista nella pagina precedente per un circuito perfettamente lineare. Per capirlo, ricordatevi che quando fate il cubo produce anche una prima armonica, che in questo caso va a sottrarsi (vedi CAP.7). L'espressione qui accanto è corretta, mettetene i valori.	$\left[+\frac{1}{2}(v_1 - v_2) \cdot \sqrt{2 \cdot k \cdot I_{RIF}} - \frac{k\sqrt{2k}(v_1 - v_2)^3}{8\sqrt{I_{RIF}}} \cdot \frac{3}{4} \right] \cdot R_L$
---	---

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 !).	$\varepsilon=$	$HD_2=$
--	----------------	---------

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

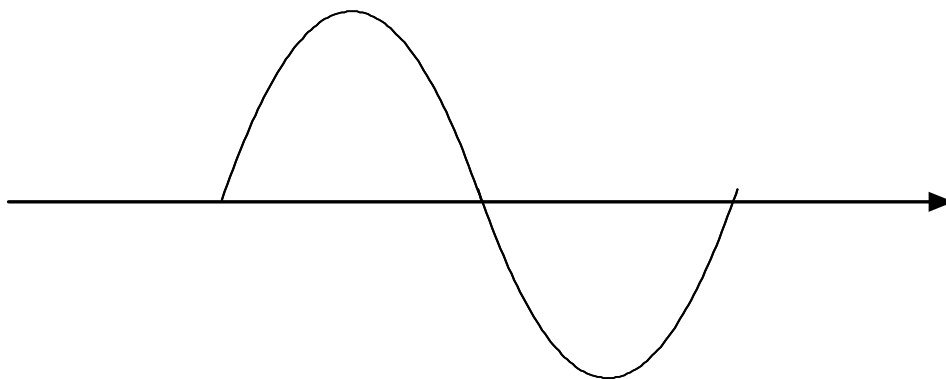
	Da calcoli teorici	Da SPICE : Riportate il valore di THD fornito dal simulatore
$THD :$	$HD_3 \cong \frac{\varepsilon}{4} = \left(\frac{v_1 - v_2}{2 \cdot V_{OD}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} =$	

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

MOVIMENTO DEL SOURCE

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 $V_s(t)$.



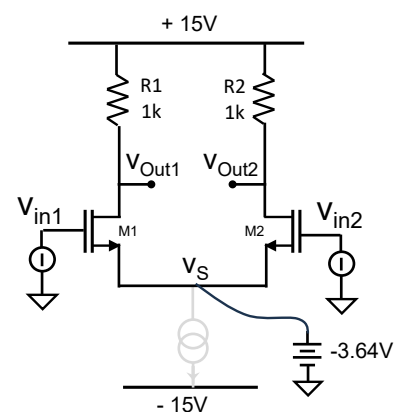
Commentare il corrispondente andamento di $V_{GS}(t)$ e metterlo in relazione con la linearità complessiva del circuito.

Distorsione con USCITA DIFFERENZIALE ($V_{out1}-V_{out2}$)

Ci chiediamo se il segnale preso differenzialmente in uscita ($V_{out1}-V_{out2}$) presenti una distorsione diversa da quella trovata guardando una singola uscita V_{out2} . A tal fine, farsi calcolare da SPICE la distorsione differenziale abilitando in *Transient / Fourier Analysis* la simulazione di ($V_{out1}-V_{out2}$).

	Da SPICE : Singola uscita V_{Out2}	Da SPICE : Uscita differenziale ($V_{out1}-V_{out2}$)
THD di stadio differenziale		

Per confronto (e divertimento) andiamo a vedere quale sarebbe la distorsione differenziale di due semplici Source a massa appaiati! A tal fine collegate il Source del nostro differenziale (punto V_S dello schema) ad un generatore ideale di tensione al valore di polarizzazione $V_S=-3.64V$. Su segnale quindi questo punto verrà bloccato. Fate calcolare la distorsione del segnale differenziale delle due uscite ($V_{out1}-V_{out2}$).



	Da SPICE : Singola uscita V_{Out2}	Da SPICE Uscita differenziale ($V_{out1}-V_{out2}$)
THD di due stadi Source a massa accoppiati		

Vi aspettavate questi risultati ?

Parte 4: Comportamento su grandi segnali di ingresso (LAMBDA=0)

Dinamica massima con segnale di ingresso differenziale

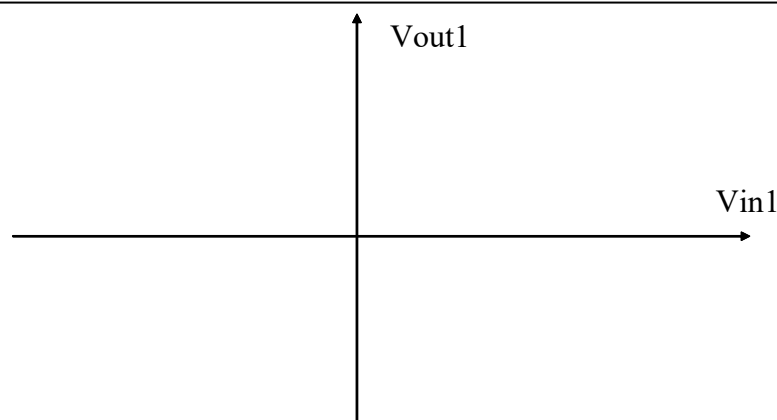
Calcolare la massima tensione differenziale di ingresso tale da sbilanciare completamente la coppia differenziale, cioè fare portare tutta la corrente ad un transistor e zero all'altro.

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 transistor continua a portare tutta la corrente del generatore di coda!

Parte 5: 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:

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

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

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

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

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

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