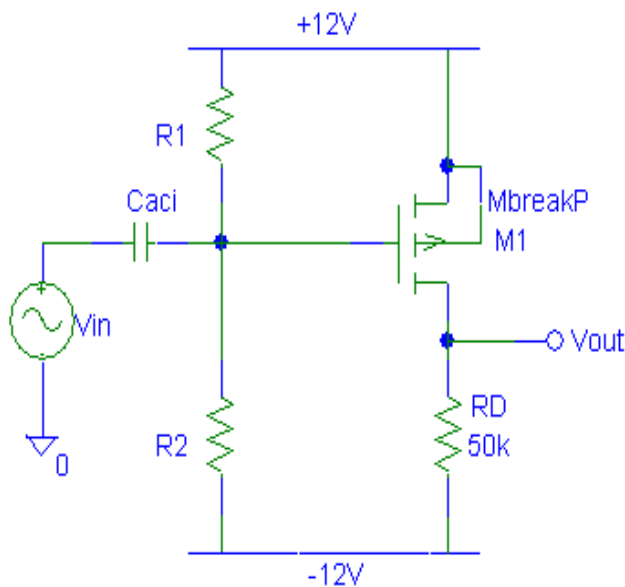


Analisi della DISTORSIONE in amplificatori di tensione a MOSFET

Parte 1: Circuito Source comune : Polarizzazione

Calcolo teorico: tensione di Early infinita

Nello schema sottostante è mostrato un semplice amplificatore di tensione impiegante un transistor pMOS. Dimensionare le resistenze R_1 e R_2 in modo tale che il MOSFET abbia una transconduttanza g_m di 0.6mA/V e complessivamente il circuito assorba dalle alimentazioni una potenza pari a 6mW . Le caratteristiche del transistor sono le seguenti: $\mu C_{ox} = 40\mu\text{A/V}^2$, $W = 12\mu\text{m}$, $L = 0.6\mu\text{m}$, $V_T = -0.9\text{V}$ ed, inizialmente, $V_A = \infty\text{V}$ ($r_0 = \infty$). Si consideri inoltre $C_{aci} = 250\text{nF}$.



Svolgimento:

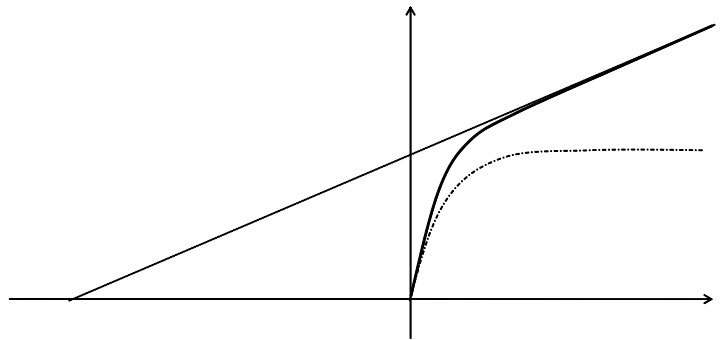
Risultati:	$k =$
$I_D =$	$V_G =$
$I_{R1,R2} =$	$V_{SG} =$
$V_D =$	$V_{od} =$
$R1 =$	$R2 =$

Calcolo teorico: tensione di Early=50V

Mantenendo invariati i valori di resistenza R1 e R2 trovati, ricalcolare la corrente di drain nel caso di $V_A=50V$, e calcolare la nuova transconduttanza.

Visualizzare il nuovo punto di lavoro del pMOSFET sulla curva caratteristica seguente.

Svolgimento:



Risultato: $r_0=$ $\text{nuova } I_D =$ $\text{nuova } g_m =$
Variazione % di I tra $V_A=\infty$ e $V_A=50V=$

RISULTATI della SIMULAZIONE della POLARIZZAZIONE

Lambda = 0

Lambda = 0.02

I_D simulata=

I_D simulata=

V_D simulata=

V_D simulata=

$g_m =$

$g_m =$

Convinti dei vostri calcoli di Polarizzazione ?

Avete notato quanto bravi siete stati nel calcolare i valori carta&penna molto simili ai risultati del simulatore ? Bene, ora continuate.

Guida all'uso del Simulatore Spice

Nel caso non foste già abituati ad usare il simulatore, scaricate pSPICE da :

<http://guazzoni.faculty.polimi.it/fde/ftp/laboratorio1/91pspsu.exe>

Installatelo sul vostro PC.

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

<https://sampietro.faculty.polimi.it/didattica/EIAnscaricabile.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= 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 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: Circuito Source comune : Comportamento su segnale

Calcolo teorico: guadagno di piccolo segnale

Calcolare carta&penna il guadagno lineare di piccolo segnale tra ingresso e uscita.

guadagno lineare teorico con LAMBDA=0:

guadagno lineare teorico con LAMBDA=0.02:

Simulazione Spice :

Simulare ora il circuito con Spice sia nel caso di LAMBDA=0 che nel caso di LAMBDA=0.02, applicando una sinusoide a 10kHz (in modo che stia oltre il polo di C_{aci} , 10Hz) ampia **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*).
- Dal menu *Analysis 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 1ms e *step ceiling*, che rappresenta il massimo passo temporale di simulazione, a 0.1 μ s.
- Dal menu *Analysis Setup* selezionare *Simulate*.

guadagno fornito dal simulatore con LAMBDA=0:

guadagno fornito dal simulatore con LAMBDA=0.02:

Confrontare i valori ottenuti dal simulatore con quelli teorici prima calcolati e convincervi della bontà dei vostri calcoli.

Distorsione del segnale sinusoidale in uscita (caso di $LAMBDA=0$)

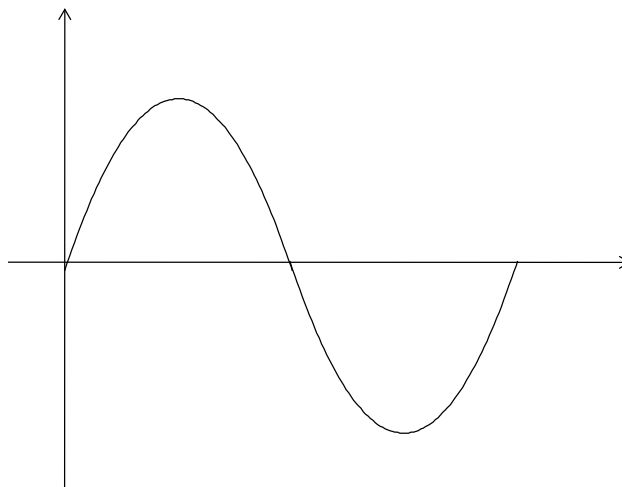
Calcolo teorico: Calcolare con carta&penna il valore di picco del segnale di uscita ottenuto a) con un guadagno lineare e b) tenendo conto del fattore ϵ di non-linearità nel caso di sinusoidi in ingresso di ampiezza di picco pari a **300mV**. Calcolare anche il fattore di distorsione armonica.

Spazio per i conti :

Tabella riassuntiva :

	$V_p=300mV$
Valore di picco dell'uscita con guadagno lineare:	
Valore di ϵ	
Valore di picco positivo del segnale d'uscita calcolato carta-e-penna utilizzando ϵ	
Valore di picco negativo del segnale d'uscita calcolato carta-e-penna utilizzando ϵ	
$HD_2 = \frac{2^\circ\text{armonica}}{1^\circ\text{armonica}}$:	

Disegno la forma d'onda d'uscita quando in ingresso ho 300mV, avendo come riferimento la traccia seguente:



Simulazione Spice : (caso di $LAMBDA=0$)

Simulare ora in ingresso una sinusoide a 10kHz e di ampiezza di picco pari a **300mV**.

Per valutare il rapporto tra l'ampiezza della seconda armonica e l'ampiezza della prima armonica, HD_2 , abilitare la funzione *Fourier Analysis* nel finestra di setup della simulazione *Transient*; dopo aver rilanciato la simulazione; trovate le ampiezze delle armoniche in fondo a *Analysis -> Examine Output*).

	$V_p=300mV$
Valore di picco positivo simulato:	
Valore di picco negativo simulato:	
$HD_2 = \frac{2^\circ\text{armonica}}{1^\circ\text{armonica}}$:	

Confrontare i risultati con quelli ottenuti carta&penna alla pagina precedente.

Come potete osservare, pur con segnali di ampiezza di ingresso grandi per i quali quindi l'analisi lineare è poco accurata, tenendo conto del fattore ϵ di non linearità, si riesce a prevedere l'asimmetria del segnale di uscita (i picchi negativi e positivi) con ottima precisione !

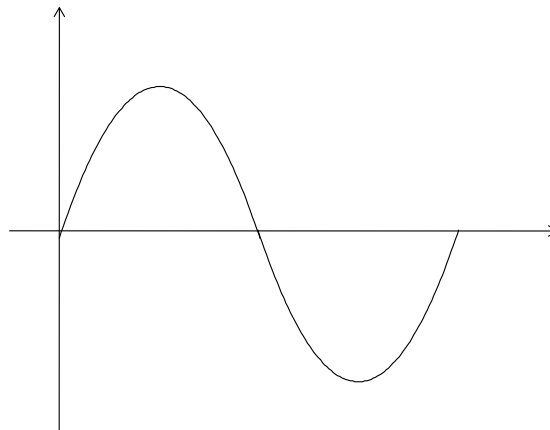
Quante armoniche sono presenti e perchè ?

Simulazione Spice : (caso di $LAMBDA=0.02$)

Simulare ora la situazione in cui $LAMBDA=0.02$, sempre con all'ingresso applicata la sinusoide avente $V_p=300\text{ mV}$. Determinate i nuovi valori di picco e il rapporto tra seconda e prima armonica.

	$V_p=300\text{mV}$
Valore di picco positivo simulato:	
Valore di picco negativo simulato:	
$HD_2 = \frac{2^\circ\text{armonica}}{1^\circ\text{armonica}}$:	

Disegnare la forma d'onda d'uscita quando in ingresso ho 300mV, avendo come riferimento la traccia seguente:



Come potete osservare, la presenza di $LAMBDA$ (e quindi della resistenza r_o) rende la forma d'onda all'uscita meno distorta e quindi migliora la linearità del circuito (ed anche di tanto !). Perché ?

Inoltre guardate HD_2 e THD. C'è differenza e perché ? Quante armoniche sono presenti e perché ?

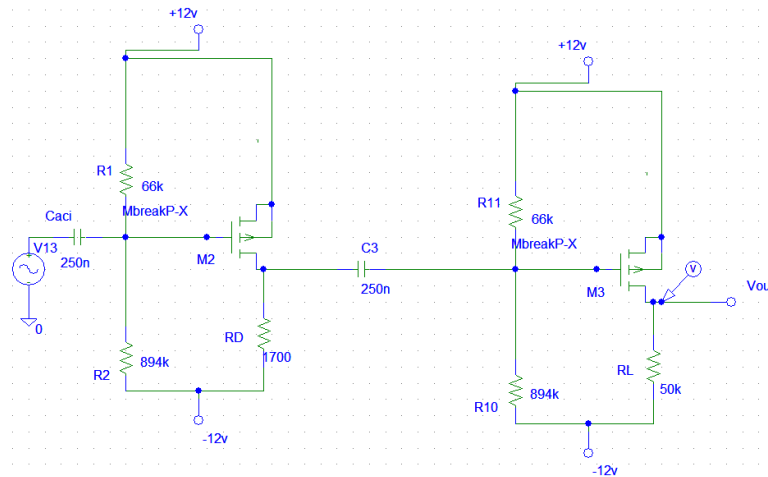
Suggerimento per capire le cose in maniera più profonda: Simulate il circuito con $LAMBDA=0$ e con aggiunta una resistenza esterna da $222\text{k}\Omega$ tra Source e Drain (cioè dello stesso valore di r_o e nella stessa posizione di r_o). Come cambia la distorsione rispetto a prima? Perché ?

Quale è la vera differenza tra questi due casi ?

Parte 3 : Distorsione di più stadi in cascata

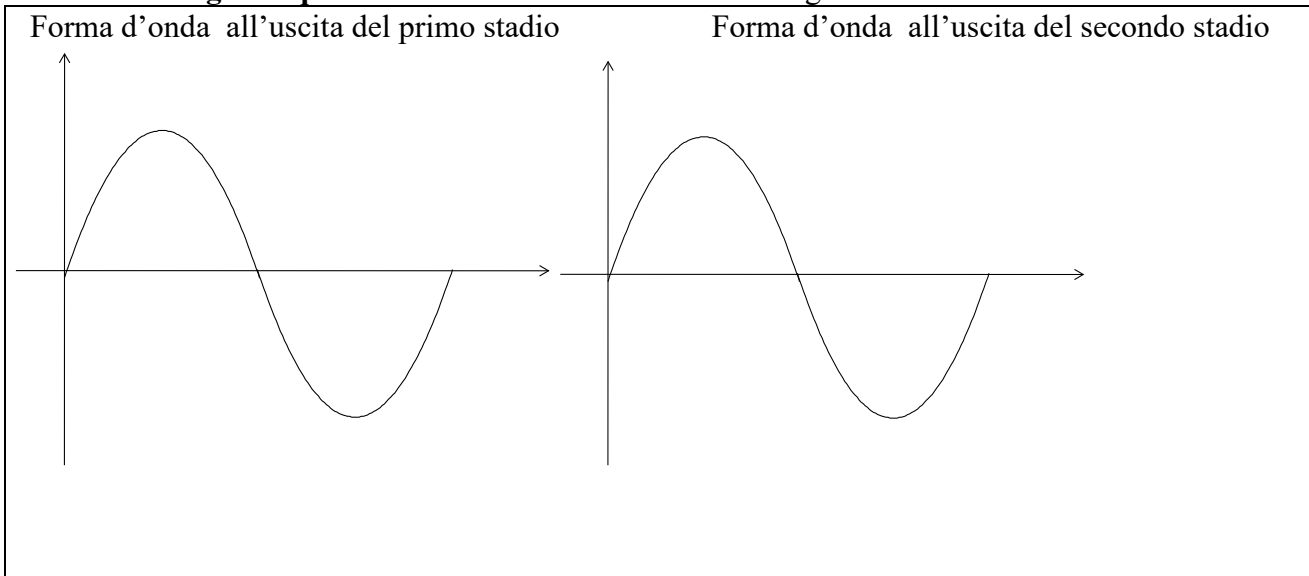
Ci poniamo la domanda di come viene distorto il segnale passando attraverso due stadi amplificanti, ognuno dei quali introduce una propria distorsione

- Riprendere il circuito della Parte 1 (**caso di $\lambda=0$**). Duplicarlo in modo da avere due stadi in cascata accoppiati in AC. Così facendo la polarizzazione di ogni transistor rimane invariata.
- **Modificare $R_D = 1.7k\Omega$** del primo stadio in modo da avere un guadagno del primo stadio pari a circa 1. In questo modo i due stadi hanno in ingresso un segnale di pari ampiezza ma il secondo anche distorto.



Simulare il circuito completo (10kHz, ampiezza **1mV**) Risultato $G_{tot} =$

Provate a disegnare qui sotto le forme d'onda all'uscita di ogni stadio.



Simulare il circuito completo (ampiezza **250mV**, 10 armoniche). Confrontare le onde simulate con quelle stimate sopra. Guardare i valori di THD all'uscita dei due stadi (indicarli quindi entrambi nella finestra di setup di *Transient*).

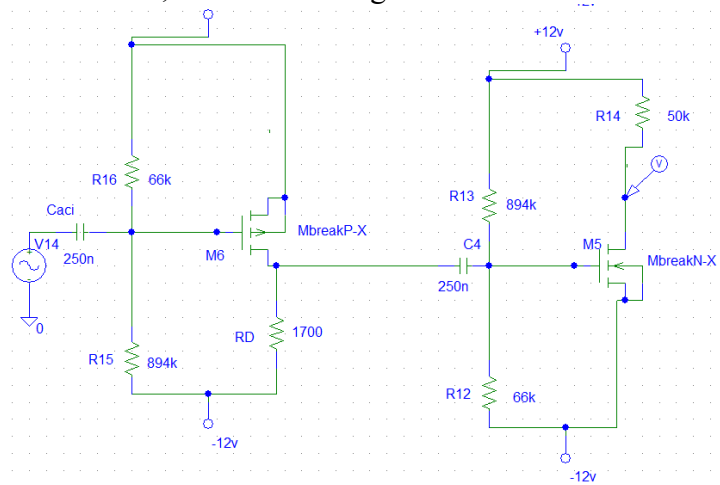
THD (1 stadio) =

THD (uscita) =

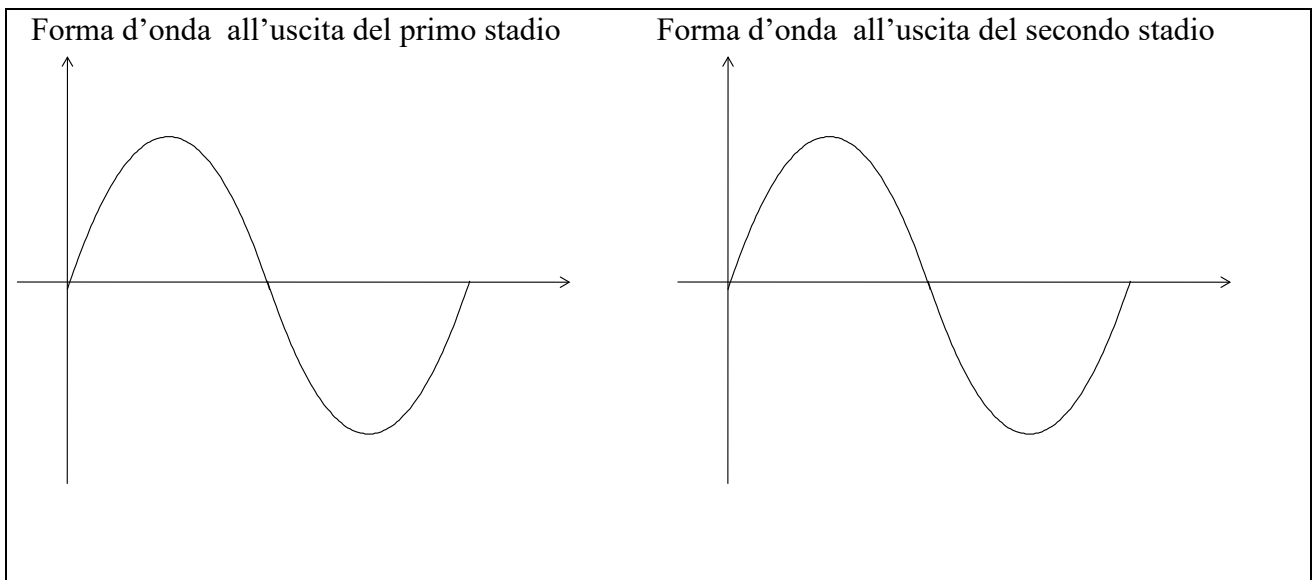
Riflettere sul risultato.

Controllare se in uscita ci sono tutte le armoniche.

Cosa succederebbe se l'amplificatore a due stadi avesse il secondo stadio fatto con un **MOSFET a canale n**, pur presentando lo stesso guadagno totale? Provare a realizzarlo in modo che il nMOSFET porti la stessa corrente, abbia lo stesso g_m etc.



Disegnare l'andamento atteso all'uscita di ognuno degli stadi e riflettere sulle differenze rispetto al caso precedente.



Fare la simulazione completa (ampiezza **250mV**, 10 armoniche) e scrivere i risultati :

THD (1 stadio) =

THD (uscita) =

Cosa è successo ? Come spieghi il risultato ? Riusciresti a trovare le espressioni per quantificare i valori.

Come concludi il discorso sulla distorsione di due amplificatori in serie ?

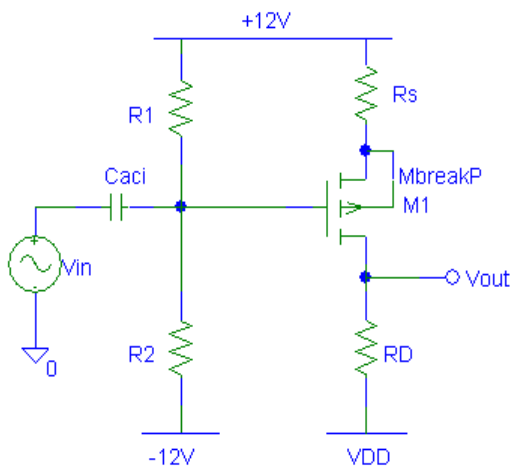
Parte 4 : Circuito con resistenza sul Source

Calcolo teorico: POLARIZZAZIONE : (caso di LAMBDA=0)

Per migliorare le prestazioni dell'amplificatore progettato in precedenza, si può introdurre una resistenza sul Source del transistor MOS come mostrato nella figura seguente.

Progettare il nuovo circuito (R_s , R_D , R_1 , R_2 e V_{DD}) in modo da mantenere le stesse correnti di polarizzazione (sia nel ramo del transistor che in quello del partitore), la stessa V_{out} e lo stesso guadagno lineare di piccolo segnale di prima con $LAMBDA=0$.

Inoltre scegliere la resistenza R_s in modo da ridurre ad 1/3 rispetto a prima la frazione di segnale che va a cadere tra gate e source del MOSFET .



Svolgimento (si facciano i conti carta&penna con $LAMBDA=0$):

Riporto i dati fissi trovati nella Parte 1:

$$I_D = \quad g_m = \quad 1/g_m =$$

$$I_{R1,R2} = \quad V_{SG} = \quad G =$$

$$V_{out} =$$

Polarizzazione finale :

$$R1 =$$

$$R_s =$$

$$R_D =$$

$$R2 =$$

$$V_G =$$

$$V_{DD} =$$

Calcolo teorico: guadagno su segnale (caso di LAMBDA=0)

Guadagno lineare	G =
Fattore di miglioramento	$(1 + g_m R_s) =$
Valore di non linearità prevista nel caso di sinusoide di ingresso di 300 mV :	$\varepsilon =$
$HD_2 = \frac{2^{\circ} \text{armonica}}{1^{\circ} \text{armonica}} :$	

Confrontare questi risultati con quelli ottenuti senza la resistenza di degenerazione.

A scapito di quale caratteristica dell'amplificatore si ottiene il miglioramento della linearità?

Simulazione Spice : caso LAMBDA=0

POLARIZZAZIONE : Simulare ora la polarizzazione del circuito con la resistenza di Source, nel caso in cui **LAMBDA=0** e riportare i valori nella tabella seguente:

I_D simulata =

V_{SG} simulata =

V_{out} simulata =

g_m =

Confrontare i risultati forniti dal simulatore con i valori previsti carta&penna

COMPORAMENTO SU SEGNALE (caso di LAMBDA=0)

Verificare innanzitutto il valore del guadagno lineare, applicando un piccolo segnale di $V_p=1mV$. Poi calcolare la linearità nella situazione di $V_p=300mV$, $f=10kHz$.

Guadagno di piccolo segnale ($V_p=1mV$)

$G =$

$HD_2 = \frac{2^{\circ}armonica}{1^{\circ}armonica}$ simulato ($V_p=300mV$)

THD =

Il risultato importante, che avevamo previsto carta&penna è che in questo circuito **la distorsione sia molto più piccola di quella nel circuito senza R_s calcolata nella Parte 2 nonostante che il MOSFET sia polarizzato con lo stesso corrente e la stessa transconduttanza.**

Quante armoniche significative ($>10^{-5}$) ci sono ? Come mai, pur essendo $LAMBDA=0$ ci sono armoniche successive alla seconda ? Sapresti disegnare le armoniche ?

CIRCUITO con RESISTENZA sul Source (caso di LAMBDA=0.02)

Calcolo teorico: POLARIZZAZIONE :

Come cambierebbe la polarizzazione del circuito se **LAMBDA=0.02** ?

Avendo il circuito la tensione di Gate fissata, vi aspettate che

- la tensione di uscita si porti in polarizzazione più in alto o più in basso ?
- la transconduttanza aumenti o diminuisca ?

Spazio per giustificare la risposta :

Simulazione Spice : Polarizzazione

La simulazione con **LAMBDA=0.02** fornisce i valori della tabella seguente:

I_D simulata = V_{SG} simulata =

V_{out} simulata = g_m =

Confrontare i risultati forniti dal simulatore con i valori previsti precedentemente. Rispetto al caso senza R_s (Parte 1), i valori differiscono di più o di meno tra il caso **LAMBDA=0** e quello **LAMBDA=0.02** ? Perché?

Guadagno di piccolo segnale ($V_p=1mV$) $G =$

$HD_2 = \frac{2^\circ \text{armonica}}{1^\circ \text{armonica}}$ simulato ($V_p=300mV$) $HD_2 =$

Confrontare il miglioramento in HD_2 ottenuto ora (tra senza r_0 e con r_0) con quello che avevate ottenuto con il Source a massa. Riuscite a giustificare qualitativamente perché ora i due valori differiscano di poco ?

Andando a casa, rifletti su quanto hai capito della distorsione in un circuito elettronico. Se hai colto anche gli aspetti di dettaglio, ti assicuro che sei molto più preparato dei migliori studenti delle migliori Università mondiali. Vanne fiero.