Politecnico di Milano

Elettronica Analogica – Prof. Marco Sampietro

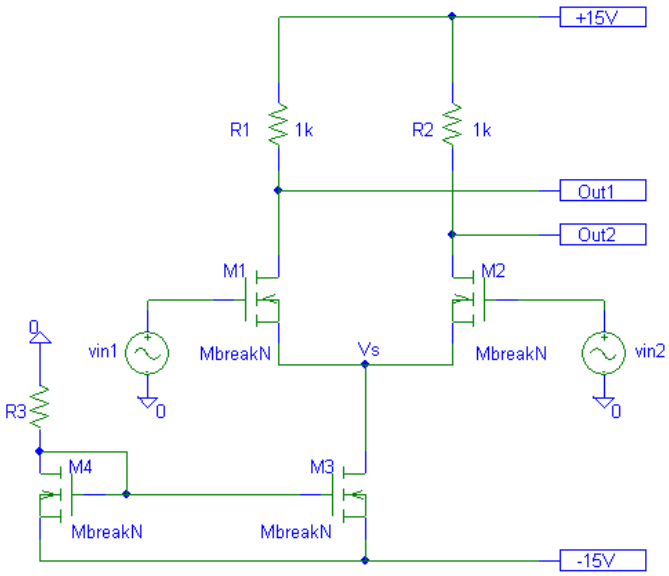
12-19 Novembre 2026 - Anno accademico 2026/2027

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:

$\frac{1}{2}\mu C_{ox}W/L|_1=$ $\frac{1}{2}\mu C_{ox}W/L|_2=$ $\frac{1}{2}\mu C_{ox}W/L|_3=$ $\frac{1}{2}\mu C_{ox}W/L|_4=$

$I_{M1}=$ $g_{m1}=$ $1/g_{m1}=$

$I_{M2}=$ $g_{m2}=$ $1/g_{m2}=$

$I_{M3}=$ $V_S=$ $V_{od}|_{M1,M2}=$

$I_{M4}=$ $V_{GS,M3}=$ **$R_3=$**

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

Calcolo teorico:

Calcolare carta&penna il guadagno lineare (di piccolo segnale) per un ingresso differenziale:

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:

Verificare che i valori delle tensioni/correnti di polarizzazione utilizzando il simulatore SPICE siano uguali ai valori calcolati teoricamente.

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:

- ***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)

- Oltre che misurare all'oscilloscopio l'ampiezza della sinusoide in uscita, potete calcolare il guadagno lineare del circuito 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: $G = (V_{out1}-V_{out2})/ (V_{in1}-V_{in2}) =$

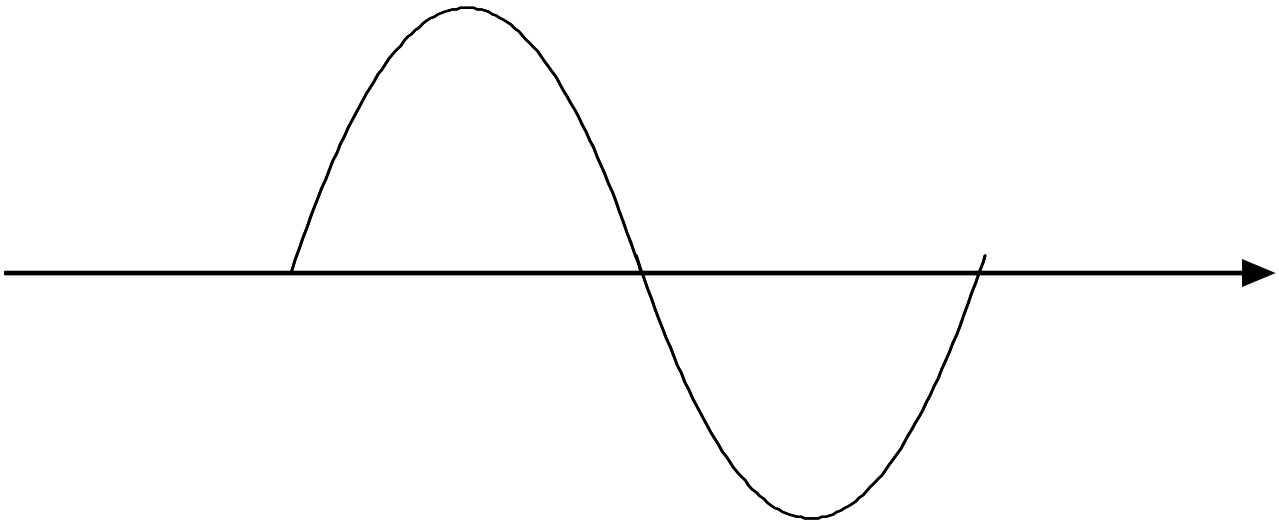
Parte 3 : Distorsione del segnale in uscita (caso di LAMBDA = 0)

SINGOLA USCITA (Vout2)

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 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 Vout2 rispetto alla sinusoide ideale riportata qui sotto (quotare le curve sulla base dei valori calcolati sopra) :



Simulazione Spice:

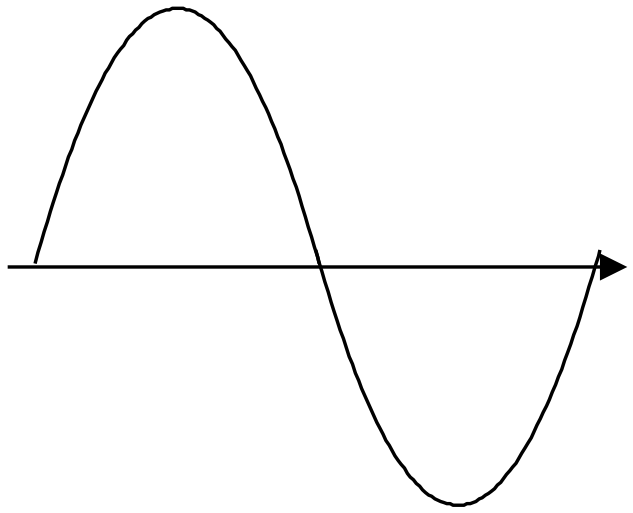
Simulare il valore di picco dell'**uscita V_{out2}** nel caso di sinusoide in ingresso di **ampiezza differenziale** $V_{diff}=(V_{in1}-V_{in2})$ di picco pari **a 2V (V_{in1}=1V, V_{in2}=1V sfasato di 180°).**

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*** **Vout2** del transistore e disegnatele qui sotto. Per ottenere le armoniche con **V_{diff}=2V** abilitare la funzione *Fourier Analysis* scegliendo 10 armoniche. Dopo aver rilanciato la simulazione, trovate le ampiezze delle armoniche e disegnatele sotto.

Ampiezza **1° armonica** : Ampiezza **2° armonica** : Ampiezza **3° armonica** :	Disegnate qui le varie armoniche e la curva totale come loro somma 

Notate che, pur impiegando transistori dalla caratteristica perfettamente quadratica:

- sono praticamente assenti le armoniche pari;

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 producete anche una prima armonica, che in questo caso va a sottrarsi (vedi CAP.7), come nell'espressione qui accanto. Calcolate i valori dei due addendi e troverete la risposta alle vostre domande.	$\left[+\frac{1}{2}(v_1-v_2)\cdot\sqrt{2\cdot k\cdot I_{RIF}}-\frac{k\sqrt{2k}(v_1-v_2)^3}{8\sqrt{I_{RIF}}}\cdot\frac{3}{4}\right]\cdot R_L$

Total Harmonic Distortion

Per apprezzare il valore della distorsione dell'**uscita Vout2** dello stadio differenziale, abituiamoci a stimarlo carta e penna con la formula seguente e confrontiamolo con il valore ottenuto dal simulatore:

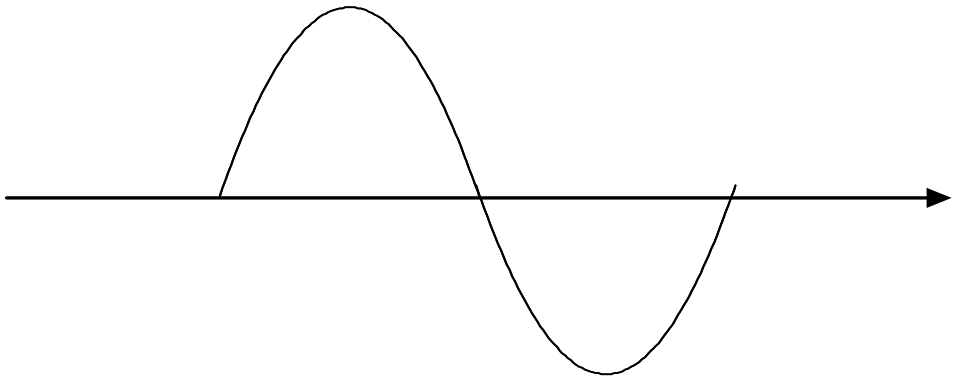
	Da calcoli teorici	Da SPICE : Riportate il valore di THD fornito dal simulatore
THD :	$HD_3 \cong \frac{\varepsilon}{4} = \left(\frac{v_1 - v_2}{2 \cdot V_{OD}}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} =$	

Notate che la distorsione è piccola. 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 $\mathbf{V_{diff}=(Vin_1-Vin_2)=2V}$.

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



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

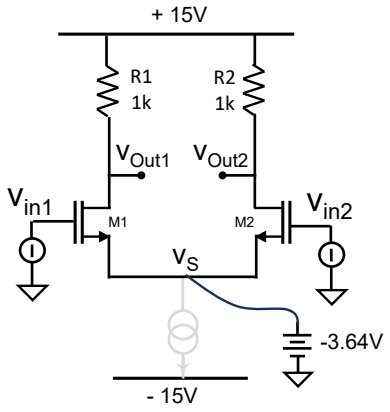
Distorsione con USCITA DIFFERENZIALE (Vout1-Vout2)

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 *Fourier Analysis* la simulazione di (V_{out1}-V_{out2}), facendo calcolare Fourier di V(out1,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 Vs 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}).

(Per ottenere la distorsione in questa situazione potreste anche semplicemente mettere un condensatore di valore molto elevato tra il Source della coppia differenziale e massa)



	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 ?

Perché NON si fa mai un circuito “differenziale” con due Source a massa accoppiati ? Cosa ha in più lo stadio differenziale classico rispetto ai due Source a massa accoppiati ?

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

Dinamica massima con segnale di ingresso differenziale

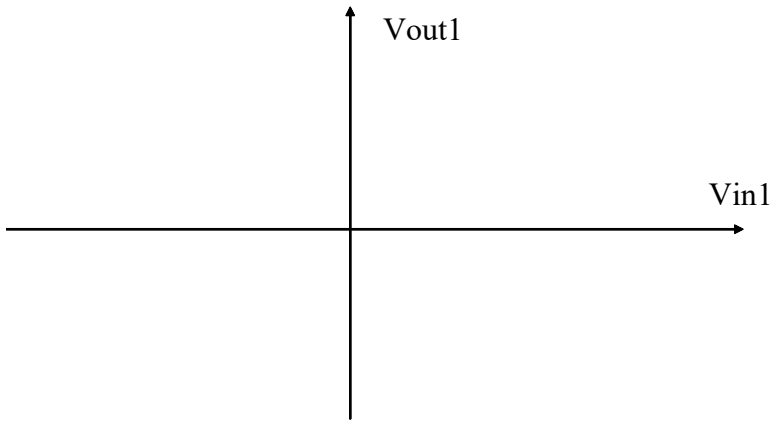
Calcolare la massima tensione differenziale di ingresso tale da sbilanciare completamente la coppia differenziale, cioè fare portare tutta la corrente ad un transistore e zero all'altro.

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!

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 transistore 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 **$(v_1-v_2)=2mV$** (V_{in1}=1mV, V_{in2}=1mV 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: Stima del guadagno differenziale $(V_{out1}-V_{out2})/(V_{in1}-V_{in2})$: Come mai il guadagno è maggiore di quello senza V_A?	Valori forniti dal simulatore: V_{out2}/V_{diff} = $(V_{out1}-V_{out2})/V_{diff}$ =

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 !