

# ELETTRONICA ANALOGICA - Prof. Marco Sampietro

## Correzione appello 16 febbraio 2021

- a) Il partitore R6 e R7 fissa la tensione al gate di T3 che svolge la funzione di generatore di corrente, pari a  $I_{T3}=627\mu\text{A}$ . Di questa  $I_{T1}=500\mu\text{A}$  provengono da T1 e la restante da T2.  $V_{u\pm}=0.4\text{V}$ ,  $1/g_{m1}=1/g_{m4}=1\text{k}\Omega$ ,  $1/g_{m2}=2\text{k}\Omega$ .

- b)  $G \cong -3$

- c) T1 è uno stadio amplificante e, benché degenerato, sicuramente distorcereà. T3 è un generatore di corrente non attraversato dal segnale. T2 è un semplice buffer di corrente e quindi non introdurrà alcuna distorsione. T4 è un follower e, quando ben realizzato, introdurrebbe poca distorsione. In questo caso ha una resistenza R5 di soli  $4.2\text{k}\Omega$  e quindi potrebbe contribuire al risultato finale. Verifichiamo pertanto l'entità della distorsione di T1 e T4.

Se fosse solo T1 a distorcere, troverei  $v_{in|\text{max}}=82\text{mV}$ . E' facile verificare che con questo segnale T4 aggiungerebbe un ulteriore  $HD_2=0.28\%$ . Noto anche che, seguendo le semionde lungo il cammino dall'ingresso all'uscita, le distorsioni di T1 e T4 si sommano e non si compensano.

Possiamo allora impostare il calcolo preciso dicendo che :

$$\varepsilon_{T1} = \frac{v_{sg1}}{2V_{OD}} \cdot \frac{1}{(1 + g_{m1}R_2)} = \frac{v_{in} \cdot \frac{1}{3.2}}{2V_{OD}} \cdot \frac{1}{(1 + g_{m1}R_2)} = 0.049 \cdot v_{in}$$

$$\varepsilon_{T4} = \frac{v_{gs4}}{2V_{OD}} \cdot \frac{1}{(1 + g_{m4}R_5)} = \frac{v_{in} \cdot \frac{12}{3.2} \cdot \frac{1}{5.2}}{2V_{OD}} \cdot \frac{1}{(1 + g_{m4}R_5)} = 0.069 \cdot v_{in}$$

Da cui otteniamo  $\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} + \varepsilon_{T1}\varepsilon_{T2} \cong (0.049 + 0.069) \cdot v_{in}$  che fornisce  $v_{in|\text{max}}=34\text{mV}$ .

- d) Per accertarsi che questo segnale possa effettivamente essere applicato all'ingresso del circuito, vediamo la dinamica. Con **segnali positivi** all'ingresso,  
 - il Drain di T1 scende : quindi T3 potrebbe entrare in Ohmica. T3 entrerebbe in Ohmica con  $v_{in}=0.142\text{V}$ ;  
 - Anche il Drain di T2 scende e potrebbe portare T2 in Ohmica. T2 entrerebbe in Ohmica con  $v_{in}=0.373\text{V}$ .  
 Pertanto la massima tensione positiva applicabile è  $v_{in}=0.142\text{V}$ , limitato dall'uscita dalla saturazione di T3.

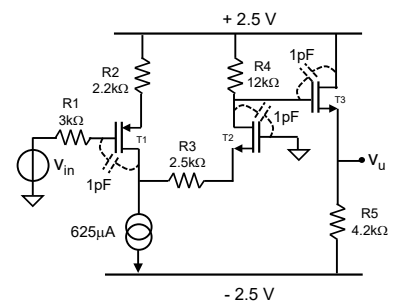
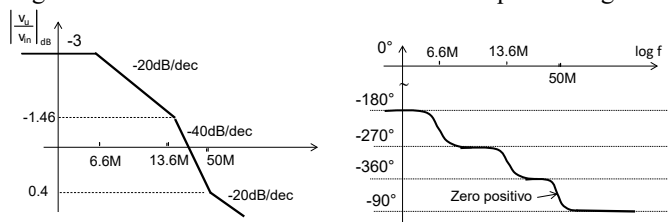
T4 non limita in alcun modo perché si spegnerebbe solo quando Vs raggiunge  $-2.4\text{V}$ , impossibile in questo caso.

Per **segnali negativi** all'ingresso la dinamica è molto maggiore : posso applicare fino a  $400\text{mV}$  prima di spegnere T2 (tutta la corrente di T3 proviene da T1) e l'uscita dalla saturazione di T1 avverrebbe a  $v_{in}=660\text{mV}$ . Pertanto concludiamo che il massimo segnale  $v_{in}=34\text{mV}$  che determina una distorsione totale inferiore al  $0.2\%$  può essere effettivamente applicato.

- e)  $C_{gd}|T1$  non interagisce con le altre capacità. Essa introduce un polo  $f_{pT1}=13.6\text{MHz}$  ( $\tau_{T1}=11.8\text{ns}$ ) ed uno zero positivo alla frequenza  $f_{zT1}=50\text{MHz}$ .

Le altre due capacità sono in parallelo tra loro e determinano un polo a  $f_{p2}=6.6\text{MHz}$  ( $\tau=24\text{ns}$ ).

I diagrammi di Bode del trasferimento saranno quindi i seguenti :



- f) Polo e zero di T1 rimangono invariati.

Separati da T2 troviamo  $C_{dg2}$ ,  $C_{gd3}$  e  $C_{gs3}$  che tra loro interagiscono. Il loro termine  $b=24\text{ns}+6.2\text{ns}=30.2\text{ns}$  a cui corrisponde  $f_{pd}=5.3\text{MHz}$ . Cortocircuitando le due capacità in parallelo, otteniamo il terzo polo  $f_{pe}=99\text{MHz}$ . E' presente uno zero negativo alla frequenza  $f_{zT4}=80\text{MHz}$ .

## ES.2

- $G=-10$
- $G_{loop}(0)=-6$ ;  $G_{real}=-8.6$
- $S_u=1.3 \times 10^{-15} \text{ V}^2/\text{Hz}$  ( $36 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
- Nel calcolare il guadagno di anello si incontra la capacità  $C_{gd|T1}$  che determina un polo ed uno zero destro :

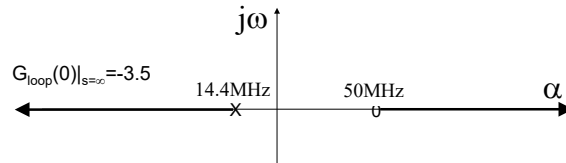
$$G_{loop}(s) = G_{loop}(0) \frac{1 - s\tau_z}{1 + s\tau_p}$$

in cui :

$$\tau_z = C \cdot \left( \frac{1}{g_{m1}} + R_2 \right) = 3.2 \text{ ns} \quad (f_z=50 \text{ MHz})$$

$$\tau_p = C \cdot \left[ R_1 \left\| \left( R_f + \frac{1}{g_{m4}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_3 + \frac{1}{g_{m2}}}{R_2 + \frac{1}{g_{m1}}} \right) + R_3 + \frac{1}{g_{m2}} \right] = 11 \text{ ns} \quad (f_p=14 \text{ MHz})$$

Il luogo delle radici è quindi il seguente:



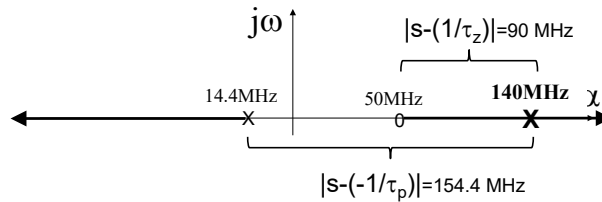
Il luogo ci mostra che potremmo essere instabili. Vediamo di trovare la posizione precisa del polo del circuito retroazionato. Esso sta sul luogo in posizione tale da soddisfare l'equazione dei moduli :

$$|G_{loop}(0)| \cdot \frac{\left| \frac{1}{\tau_p} \right|}{\left| \frac{1}{\tau_z} \right|} \cdot \frac{\left| s - \frac{1}{\tau_z} \right|}{\left| s - \left( -\frac{1}{\tau_p} \right) \right|} = 1$$

Notiamo subito che il punto del luogo all'infinito ( $s=\infty$ ) in corrispondenza del quale il circuito passa dall'essere stabile (estremo sinistro del semipiano sinistro) all'essere instabile (estremo destro del semipiano destro) lo si raggiungerebbe con :

$$|G_{loop}(0)| \cdot \frac{14.4 \text{ MHz}}{50 \text{ MHz}} = 1$$

cioè per  $G_{loop}(0)=-3.5$ . Avendo noi  $G_{loop}(0)=-6$  sappiamo di essere instabili ! Risolvendo l'equazione del modulo analiticamente oppure graficamente come nella figura (il rapporto tra le due distanze indicate in figura deve essere pari a 1.73 come dettata dall'equazione dei moduli), si trova  $f_{retr}=140 \text{ MHz}$  a destra del piano.



Per avere il circuito stabile, il polo deve posizionarsi a sinistra nel piano di Gauss. Dall'equazione del modulo si vede che è utile avere lo zero alla frequenza più alta possibile e il polo alla frequenza più bassa possibile.

Cortocircuitare  $R_2$  va proprio in questa direzione (cortocircuitare  $R_3$  andrebbe nella direzione opposta perché lascerebbe lo zero invariato e velocizzerebbe il polo). Se  $R_2=0$  si avrebbe  $G_{loop}(0)=-19$ ,  $1/\tau_p=8.2 \text{ MHz}$  e  $1/\tau_z=159 \text{ MHz}$ . Questa situazione determina un polo a frequenze elevatissime ma nel semipiano sinistro, e quindi stabile (per un pelo !).