



# PROVA FINALE SIMULAZIONI SPICE DI CIRCUITI ELETTRONICI

C. Guazzoni

Anno Accademico 2024/2025 – Quarto Laboratorio

## Simulazione pSpice di uno stadio amplificante a singolo transistorore in configurazione source a massa e con degenerazione di source

Si consideri uno stadio amplificante a singolo transistorore realizzato con il transistorore 2N6659, un transistorore MOS a canale N ad *enhancement* prodotto con un processo concepito per applicazioni di potenza, ormai un po' obsoleto, ma utile per la simulazione. A questo link e' possibile visualizzarne il *datasheet* <http://pdf.tixer.ru/524742.pdf>). Prenderemo in esame sia la configurazione source a massa che quella con degenerazione di source, come mostrato nella figura seguente. Ci si propone di analizzare tale circuito sia mediante analisi "carta e penna", che con simulazioni pSpice. Il modello Spice del transistorore e' il seguente:

```
.model M2N6659 NMOS(Level=3
+ Gamma=0
+ Delta=0
+ Eta=0
+ Theta=0
+ Kappa=0.2
+ Vmax=0
+ Xj=0
+ Tox=2u
+ Uo=600
+ Phi=.6
+ Kp=1.047u
+ W=.32
+ L=2u
+Rs=20m
+ Vto=1.7
+ Rd=.4672
+ Rds=3.5MEG
+ Cgso=1.885p
+ Cgdo=7.564p
+ Cbd=118p
+ Mj=.5
+ Pb=.8
+ Fc=.5
+ Rg=209.5
+ Is=10f
+ N=1
+ Rb=1m)
```

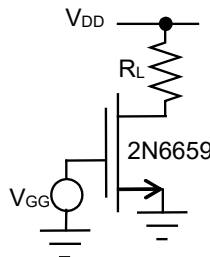
Si ricorda che KP in Spice e' pari esclusivamente al prodotto della mobilita' dei portatori per la capacita' specifica dell'ossido.



Ci si propone, innanzitutto, di simulare le caratteristiche di uscita e la transcaratteristica del transistor considerato e di determinarne, quindi, i parametri caratteristici (transconduttanza, resistenza di uscita, etc.). Si procederà quindi, alla determinazione del punto di lavoro desiderato per il proprio amplificatore e all'analisi di piccolo segnale. Si concluderà l'analisi delle prestazioni del circuito studiando anche la funzione di trasferimento dello stadio.

### A. Caratteristiche del transistor

Si disegni lo schematico del circuito in figura impiegante un transistor 2N6659. Sperimentalmente la resistenza  $R_L$  (di valore delle centinaia di ohm, ad esempio  $390 \Omega$  sarebbe necessaria per poter misurare la corrente di *drain*, in assenza di un misuratore di corrente, altrimenti sostituire nella simulazione per semplicità la resistenza con un filo e valutare la corrente che ivi scorre (sperimentalmente tale filo andrebbe sostituito con un amperometro, strumento per la misura della corrente). Si tragga indicazione dal *datasheet* per l'intervallo di tensioni da esplorare.



- Simulare e tracciare il grafico delle caratteristiche  $I_D-V_{DS}$  ( $V_{GS} = 0-10V$ ) al variare della tensione  $V_{GS}$  applicata. Effettuare una analisi del tipo *DC sweep* sulla variabile  $V_{DS}$ . Si può impostare contestualmente una analisi parametrica sulla variabile  $V_{GS}$ . Riconoscere le regioni di funzionamento del transistor.
- Simulare la transcaratteristica  $I_D-V_{GS}$  del transistor fissata la tensione  $V_{DS} = 5V$ , mediante una simulazione del tipo *DC Sweep* sulla variabile  $V_{GS}$ . Da questa simulazione ricavare l'andamento della transconduttanza  $g_m$ , in funzione della corrente di *drain*, utilizzando sapientemente i comandi del postprocessore grafico *Probe*.

### B. Polarizzazione del transistor in configurazione source a massa.

Considerare un transistor 2N6659 in configurazione *source* comune polarizzato attraverso un partitore di resistenze (resistenza totale del partitore dell'ordine delle centinaia di kohm, ad esempio  $400 k\Omega$ ) e con una sola tensione di alimentazione,  $V_{DD} = 10V$ . La resistenza di carico è pari a  $R_d = 390\Omega$ .

- Calcolare il punto di polarizzazione desiderato per il circuito, sulla base delle caratteristiche misurate al punto A, selezionare il corretto valore di resistenze da impiegare e simulare le tensioni DC ai morsetti del transistor (*Bias Point Detail*) e le correnti circolanti nei rami del circuito (corrente di partitore e di *drain*). Confrontare i risultati ottenuti con quanto atteso con conti cartacei.
- Effettuare una analisi parametrica al variare della temperatura per valutare di quanto si sposta il punto di lavoro.

### C. Analisi su segnale in configurazione source a massa.

Nel circuito del punto B applicare un generatore di tensione di segnale sinusoidale in ingresso, disaccoppiando il segnale con una capacità da  $100nF$ . Scegliere opportunamente l'ampiezza del segnale in ingresso e la sua frequenza perché sia soddisfatta la condizione di piccolo segnale, il circuito resti in dinamica e ci si trovi entro la banda del circuito.

- Simulare, mediante una analisi di tipo *Transient*, l'andamento temporale della tensione in uscita sul *drain* del transistor e visualizzarlo con l'ausilio del postprocessore grafico *Probe*.
- Dal risultato del punto precedente calcolare il guadagno dello stadio *source* comune considerato alla frequenza in esame e confrontarlo con i risultati della analisi "carta e penna".

- c) Analizzare la risposta in uscita al variare dell'ampiezza del segnale di ingresso, ponendo particolare attenzione a misurare sia l'ampiezza dell'ansa positiva della sinusoide che di quella negativa, apprezzando al crescere dell'ampiezza la distorsione subita dalla sinusoide di uscita.

#### **D. Funzione di trasferimento in configurazione source a massa.**

Considerare nuovamente il circuito del punto C.

- a) Simulare la funzione di trasferimento tra ingresso e nodo di gate, mediante una analisi del tipo AC Sweep. Tracciare il diagramma di Bode del modulo e della fase. A chi sono dovute le singolarità?
- b) Simulare la funzione di trasferimento complessiva tra nodo di ingresso e nodo di uscita sul *drain*, sempre mediante una analisi del tipo AC Sweep. Tracciare il diagramma di Bode del modulo e della fase. A chi sono dovute le singolarità?

#### **E. Polarizzazione del transistor in configurazione con degenerazione di source.**

Considerare un transistor 2N6659 in configurazione *source* a massa con degenerazione di *source*, polarizzato attraverso un partitore di resistenze (resistenza totale del partitore dell'ordine delle centinaia di kilohm, ad esempio  $400\text{ k}\Omega$ ) e con una sola tensione di alimentazione,  $V_{DD} = 10\text{V}$ . La resistenza di carico è pari a  $R_d = 390\Omega$ , come nel caso precedente. La resistenza di degenerazione sul *source* è pari a  $51\Omega$ , a piacere si ponga in parallelo alla resistenza di degenerazione una capacità da  $100\text{ nF}$  oppure da  $1\mu\text{F}$ .

- a) Calcolare il punto di polarizzazione desiderato per il circuito, sulla base delle caratteristiche misurate al punto A, selezionare il corretto valore di resistenze da impiegare e simulare le tensioni DC ai morsetti del transistor (*Bias Point Detail*) e le correnti circolanti nei rami del circuito (corrente di partitore e di *drain*). Confrontare i risultati ottenuti con quanto atteso con conti cartacei.
- b) Effettuare una analisi parametrica al variare della temperatura per valutare di quanto si sposta il punto di lavoro. Confrontare i risultati ottenuti con quanto ottenuto nel punto B.b, relativo alla configurazione *source* a massa.

#### **F. Analisi su segnale in configurazione con degenerazione di source.**

Nel circuito del punto E applicare un generatore di tensione di segnale sinusoidale in ingresso, disaccoppiando il segnale con una capacità da  $100\text{ nF}$ . Scegliere opportunamente l'ampiezza del segnale in ingresso e la sua frequenza perché sia soddisfatta la condizione di piccolo segnale, il circuito resti in dinamica e ci si trovi entro la banda del circuito.

- a) Simulare, mediante una analisi di tipo *Transient*, l'andamento temporale della tensione in uscita sul *drain* del transistor e visualizzarlo con l'ausilio del postprocessore grafico *Probe*.
- b) Dal risultato del punto precedente calcolare il guadagno dello stadio *source* a massa con degenerazione di *source* considerato, alla frequenza in esame e confrontarlo con i risultati della analisi "carta e penna".
- c) Analizzare la risposta in uscita al variare dell'ampiezza del segnale di ingresso, ponendo particolare attenzione a misurare sia l'ampiezza dell'ansa positiva della sinusoide che di quella negativa, apprezzando al crescere dell'ampiezza la distorsione subita dalla sinusoide di uscita. Che cosa cambia rispetto a quanto già misurato al punto C?
- d) Se si è posta la capacità in parallelo alla resistenza di degenerazione esplorare il comportamento del circuito al variare anche della frequenza del segnale in ingresso, sempre mediante una analisi di tipo *Transient*.

#### **G. Funzione di trasferimento in configurazione con degenerazione di source.**

Considerare nuovamente il circuito del punto F.

- a) Simulare la funzione di trasferimento complessiva tra nodo di ingresso e nodo di uscita sul *drain*, sempre mediante una analisi del tipo AC Sweep. Tracciare il diagramma di Bode del modulo e della fase. A chi sono dovute le singolarità?

*Nota: i valori forniti per le resistenze da impiegare sono indicativi ed è possibile esplorare valori differenti ed analizzarne l'impatto sul circuito in termini di punto di polarizzazione, guadagno, dinamica, etc. È possibile, altresì, provare ad alimentare i circuiti con alimentazioni duali (positive e negative, cambiando opportunamente i valori delle resistenze laddove necessario) e valutare la possibilità di procedere con un accoppiamento in continua del segnale in ingresso.*

*È possibile, altresì, e sarebbe lodevole, provare a simulare anche altre configurazioni, quali uno stadio Source Follower o, anche, uno stadio differenziale.*

Una utile guida al significato dei parametri del modello SPICE del MOSFET è reperibile alla seguente URL:

[https://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSpice\\_ReferenceguideOrCAD.pdf](https://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSpice_ReferenceguideOrCAD.pdf)

pag. 172 e seguenti