

Esercizio n. 3 pag. 51

Con riferimento al circuito in figura, in cui $v_{IN} = V_{IN} + V_{in} \sin(2\pi f_0)$

- Verificare il funzionamento del transistor MOS in regione di saturazione
- Determinare $A_v = v_{out}/v_{in}$ in condizioni di piccolo segnale.
- Determinare R_{out} indicata in figura, in condizioni di piccolo segnale.
- Determinare la forma d'onda della tensione uscita v_{OUT}

N.B. Per evitare confusione di notazione la resistenza serie del generatore di ingresso è stata denominata R_S (resistenza di sorgente).

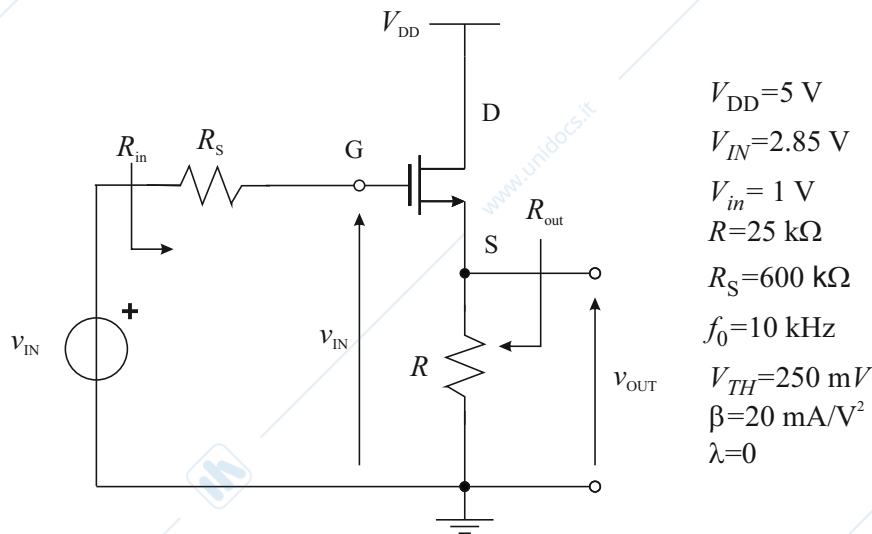


Figura 1: Circuito per l'esercizio n. 3 pag. 51

Verifica del funzionamento nel punto di quiescenza Q

Per calcolare il punto di funzionamento a riposo si devono considerare solo i generatori in continua: in questo caso è sufficiente porre $v_{in} = 0$ per cui la tensione di ingresso si riduce alla sola componente continua V_{IN} . Si osservi anche che il gate ha corrente nulla e la resistenza di sorgente R_S non ha alcuna influenza per il calcolo di Q .

Si ha:

$$V_G = V_{IN}$$

Indicando con I_D la corrente in DC del MOS, la tensione nel nodo di source è:

$$V_S = RI_D$$

e

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_{IN} - RI_D$$

Sostituendo l'espressione della corrente nel caso in cui $\lambda = 0$:

$$I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{GS} - V_{TH})^2$$

Si ottiene una equazione di secondo grado in V_{GS}

$$V_{GS} = V_{IN} - \frac{1}{2}R\beta(V_{GS} - V_{TH})^2$$

Sviluppando:

$$\frac{1}{2}R\beta V_{GS}^2 + (1 - R\beta V_{TH})V_{GS} + \frac{1}{2}R\beta V_{TH}^2 - V_{IN} = 0$$

L'equazione ammette le due soluzioni:

$$V_{GS} = \begin{cases} 146\text{mV (non accettabile: } < V_{TH}) \\ 350\text{mV (accettabile : } > V_{TH}) \end{cases}$$

Ne segue:

$$V_{GS} - V_{TH} = 0.1\text{ V} \Rightarrow I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{GS} - V_{TH})^2 = 100\mu\text{A}$$

Poiché:

$$V_{DS} = V_{DD} - RI_D = 5 - 2.5 = 2.5\text{ V}$$

Si verifica che

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH} = 0.1\text{ V}$$

Il transistor MOS lavora quindi in regione di saturazione. La tensione di uscita in continua dello stadio è $V_{OUT} = V_S = 2.5\text{ V}$.

Calcolo dei parametri del circuito equivalente di piccolo segnale

La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 2\text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita è nulla ($\lambda = 0$). Il circuito equivalente del MOS è in questo caso:

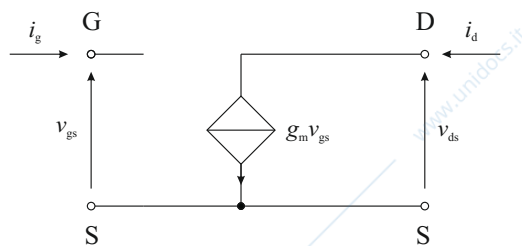


Figura 2: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS per l'esercizio n. 3 pag. 51

Circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio completo

Si devono considerare solo i generatori di segnale e cortocircuitare i generatori in tensione DC. Si ottiene il circuito di Fig. 3 (a) che può essere ridisegnato in forma compatta come in Fig. 3 (b). Si tratta di uno *stadio a drain comune*. La presenza della resistenza di sorgente è anche in questo caso influente e la resistenza di ingresso dello stadio risulta infinita.

Si osservi che

$$v_{gs} = v_{in} - v_{out} \quad \text{e} \quad v_{out} = R g_m v_{gs}$$

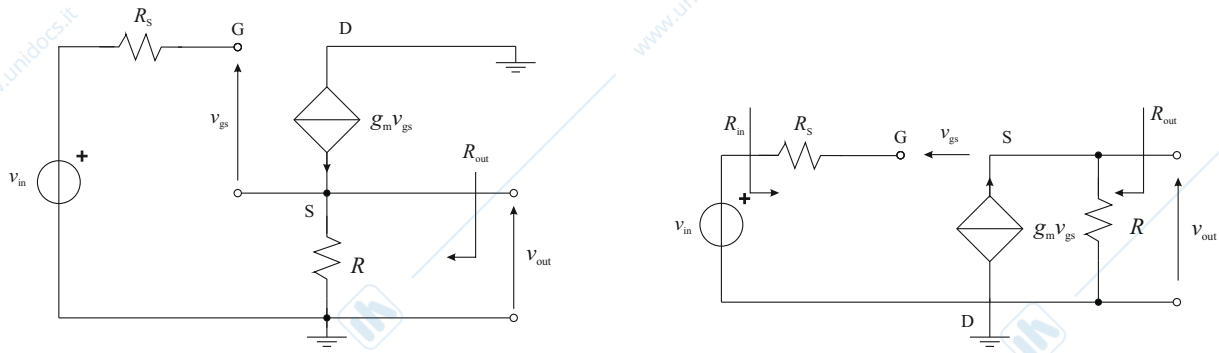


Figura 3: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS - es. n. 3 pag. 51

ovvero:

$$(1 + g_m R) v_{out} = g_m R v_{in}$$

Il guadagno di tensione dello stadio risulta:

$$A_v = \frac{g_m R}{1 + g_m R} = \frac{50}{51} = 0.98 \text{ (-0.172 dB)}$$

La resistenza di uscita si ottiene imponendo una corrente di test in uscita e “spegnendo” i generatori indipendenti di ingresso, vedi Fig. 4. Con $v_{in} = 0$, lo stadio è caratterizzato da $v_{gs} = -v_{out}$ e

$$v_t = R(i_t - g_m v_t) \Rightarrow v_t(1 + g_m R) = R i_t$$

ovvero

$$R_{out} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R}{1 + g_m R} = \frac{25\text{k}\Omega}{1 + 50} = 490\Omega$$

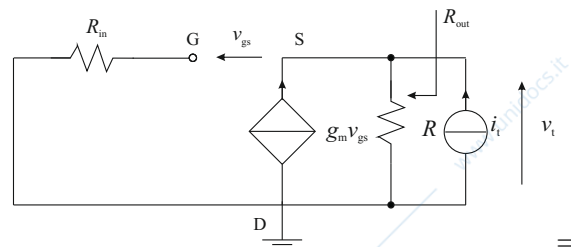


Figura 4: Circuito equivalente per il calcolo della resistenza di uscita - es. n. 3 pag. 51

Tensione di uscita dell'amplificatore

La tensione di segnale in uscita dallo stadio sarà data dal guadagno di tensione per la tensione di ingresso:

$$v_{out} = A_v V_{in} \sin(2\pi f_0) = V_{out} \sin(2\pi f_0) \quad \text{con} \quad V_{out} = A_v V_{in} = 0.98 \times 1\text{V} = 0.98\text{V}$$

La tensione totale di uscita sarà la somma della componente DC e di quella di segnale:

$$v_{OUT} = V_{OUT} + v_{out} = 2.5 + 0.98 \sin(2\pi f_0 t)$$

Esercizio n. 5 pag. 53

Con riferimento al circuito in figura

- Verificare il funzionamento del transistore MOS in regione di saturazione
- Determinare $A_v = v_{out}/v_{in}$ in condizioni di piccolo segnale.
- Determinare R_{out} indicata in figura, in condizioni di piccolo segnale.

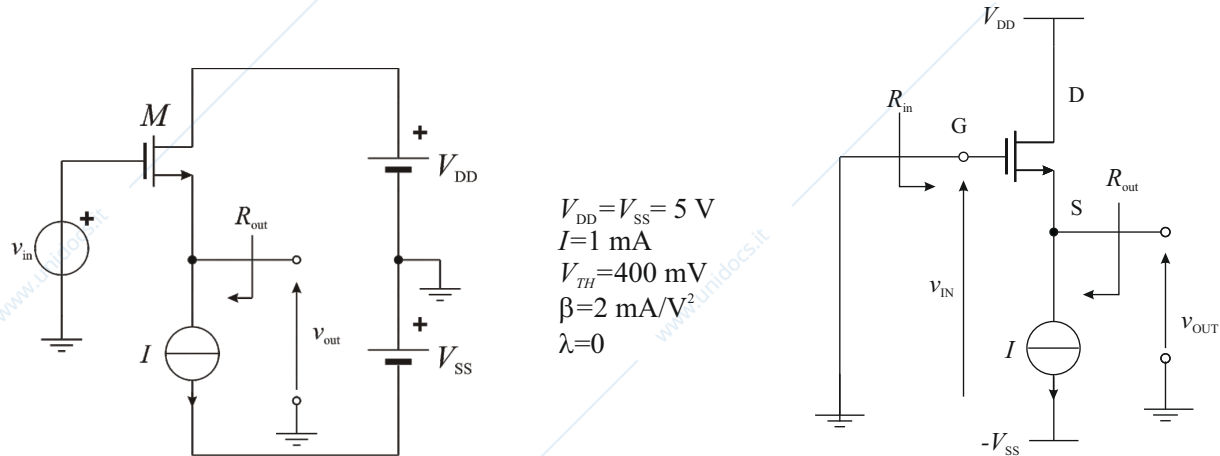


Figura 5: Sinistra: circuito per l'esercizio n. 5 pag. 53. A destra la sua versione equivalente per il calcolo del punto di quiescenza (il generatore di segnale in ingresso è cortocircuitato).

Verifica del funzionamento nel punto di quiescenza Q

Si osserva che la corrente del generatore corrisponde alla corrente del MOS:

$$I_D = I = \frac{1}{2}\beta(V_{GS} - V_{TH})^2 \Rightarrow V_{GS} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2I}{\beta}} = 1.4 \text{ V}$$

In ingresso si ha $V_G = 0$ e

$$V_{OUT} = -V_{GS} = -1.4 \text{ V}$$

Infine si scrive l'equazione alla maglia di uscita

$$V_{DD} - V_{DS} - V_{OUT} = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - V_{OUT} = 5 - (-1.4) = 6.4 \text{ V}$$

Poichè $V_{GS} > V_{TH}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ il MOS è in saturazione.

Calcolo dei parametri del circuito equivalente di piccolo segnale

La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 2 \text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita è nulla ($\lambda = 0$). Il circuito equivalente del MOS è uguale a quello di Fig. 2.

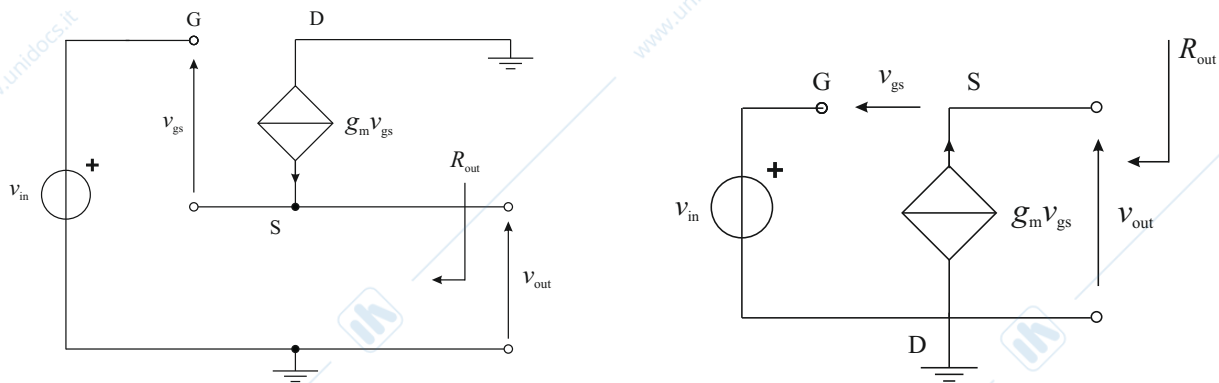


Figura 6: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS - es. n. 5 pag. 53

Circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio completo

Il circuito equivalente dello stadio si ottiene aprendo la maglia del generatore di corrente in DC. Si ottiene il circuito in Fig. 6.

Si noti che si tratta di uno stadio a drain comune simile a quello dell'esercizio 3 pag. 51: poichè però in questo caso l'uscita è presa a vuoto, si possono utilizzare le stesse formule dell'esercizio 3 nel limite $R \Rightarrow \infty$. Alternativamente si procede in maniera canonica a risolvere il circuito. La porta di uscita in aperto impone che la corrente del generatore sia nulla, ovvero:

$$g_m v_{gs} = 0$$

ma

$$v_{gs} = v_{in} - v_{out}$$

che può essere risolta solamente nel caso $v_{in} = v_{out}$ ovvero con guadagno di tensione $A_v = 1$. Si parla in questo caso di inseguitore di tensione, poichè l'uscita segue l'ingresso.

La resistenza di uscita si ottiene come illustrato precedentemente. Con riferimento al circuito di Fig. 7, si osserva che $i_t = -g_m v_{gs} = g_m v_t$ da cui immediatamente

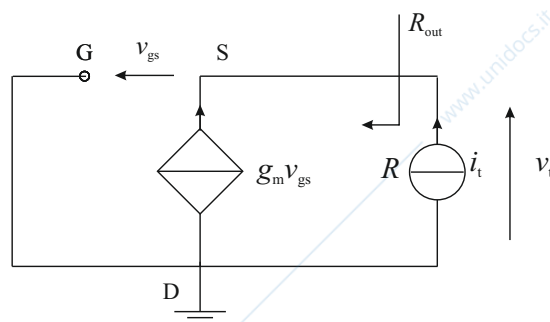


Figura 7: Circuito equivalente per il calcolo della resistenza di uscita - es. n. 5 pag. 53

$$R_{out} = \frac{1}{g_m} = 500 \Omega$$

Anche in questo caso lo stesso risultato si ottiene dall'esercizio 3 nel limite $R \Rightarrow \infty$.

Esercizio n. 1 pag. 49

Con riferimento al circuito in figura

- Verificare il funzionamento del transistore MOS in regione di saturazione
- Determinare $A_v = v_{out}(s)/v_{in}(s)$ in condizioni di piccolo segnale.
- Determinare $Z_{out}(s)$ indicata in figura, in condizioni di piccolo segnale.

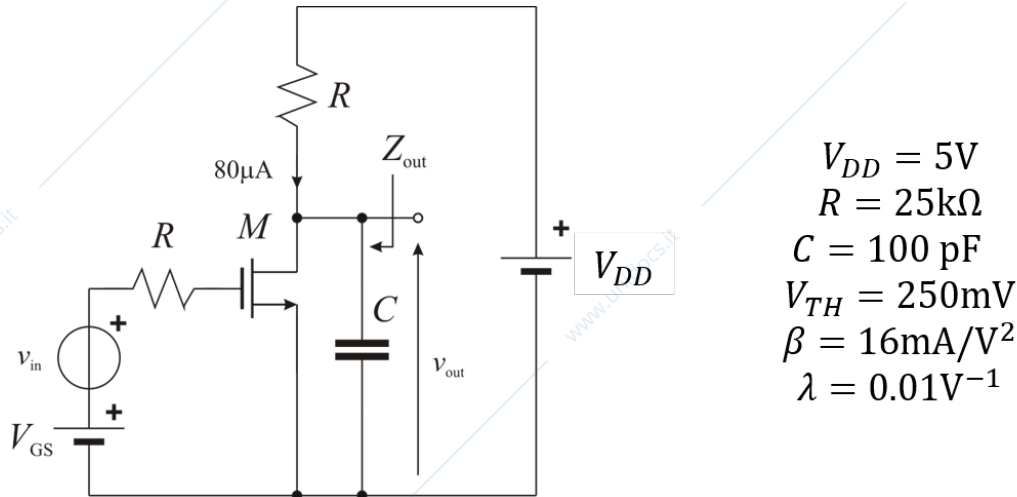


Figura 8: Circuito per l'esercizio n. 1 pag. 49 (svolto in classe).

Verifica del funzionamento nel punto di quiescenza Q

La corrente che scorre nel MOS è nota $I_D = 80\mu A$. Questo consente di calcolare immediatamente

$$V_{DS} = V_{DD} - R I_D = 3V$$

Inoltre

$$V_{GS} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta(1 + \lambda V_{DS})}} = \sqrt{\frac{2 \times 80 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-3} \times 1.03}} = 98.5mV \simeq 0.1V$$

Si noti che la correzioni dovuta al valore finito del parametro λ è comunque trascurabile.

Sono verificate le due condizioni: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ e $V_{GS} > V_{TH}$, quindi il MOS è in saturazione.

Calcolo dei parametri del circuito equivalente di piccolo segnale

La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_{TH})(1 + \lambda V_{DS}) \simeq \beta(V_{GS} - V_{TH}) \simeq 16 \times 10^{-3} \times 0.1V = 1.6 \text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita è:

$$g_o = \lambda I_D = 0.01 \times 80 \times 10^{-6} = 80 \times 10^{-8} \text{ S}$$

a cui corrisponde una resistenza di uscita di $r_o = 1/80 \times 10^8 \Omega = 1.25 \text{ M}\Omega$

Circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio completo

In questo caso si devono considerare solo i generatori di segnale (cortocircuitando i generatori in tensione DC). Lo stadio risultante è a source comune.

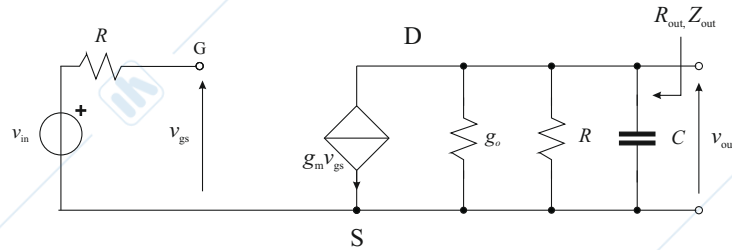


Figura 9: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS - es. n. 1 pag. 49

Si noti che poichè il MOS non ha corrente di ingresso, $v_{gs} = v_{in}$. Denominando

$$R_{out} = R || r_o = 24.6 \text{ k}\Omega$$

si ha

$$Z_{out} = R_{out} || \frac{1}{sC} = \frac{R_{out}}{1 + sCR_{out}}$$

e

$$v_{out} = -g_m Z_{out} v_{in}$$

da cui

$$A_v = -\frac{g_m R_{out}}{1 + sCR_{out}}$$

Il comportamento del circuito si identifica mediante il *guadagno in banda*:

$$A_{v0} = -g_m R_{out} = -39.2 \text{ (31.86 dB } \simeq \text{ 32 dB)}$$

e una funzione di trasferimento con un polo negativo caratterizzato da

$$s_p = -\frac{1}{CR_{out}} = -406 \times 10^3 \text{ rad/s} \Rightarrow f_p = \frac{|s_p|}{2\pi} = 64.6 \text{ kHz}$$

La resistenza di uscita dello stadio risulta pari a Z_{out} (spegnendo l'ingresso si spegne anche il generatore pilotato).

Diagramma di Bode

Il diagramma di Bode si costruisce seguendo le regole illustrate a lezione ed è illustrato in Fig. 10. Si noti la fase iniziale di 180° dovuta al fattore -1 del guadagno (amplificatore invertente).

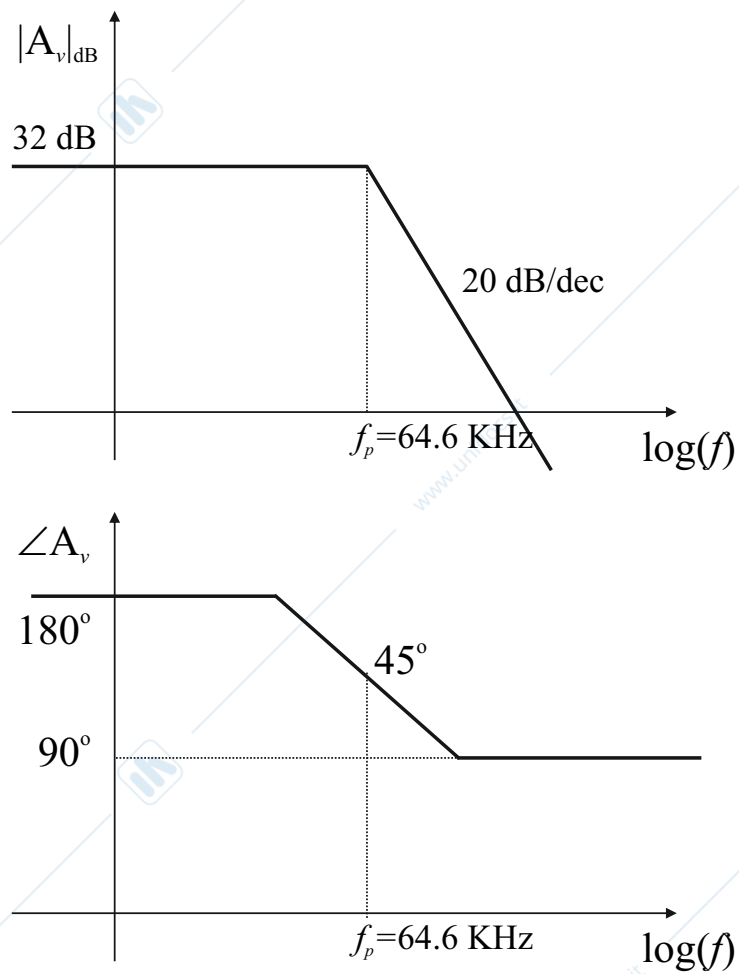
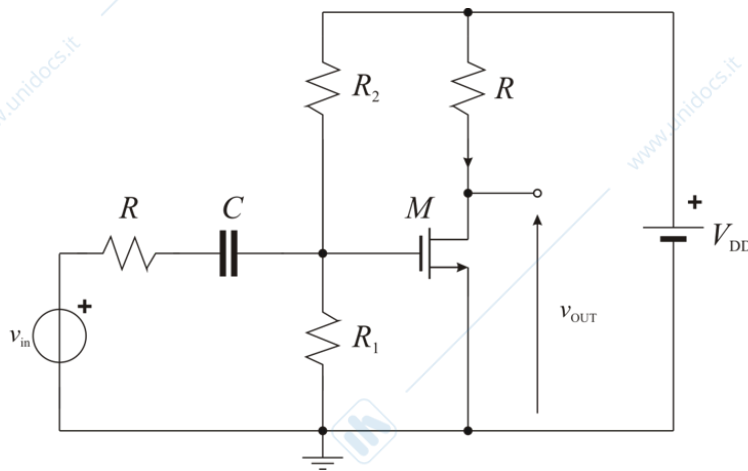


Figura 10: Diagramma di Bode - es. n. 1 pag. 49

Esercizio n. 4 pag. 52

Con riferimento al circuito in figura

- Verificare il funzionamento del transistore MOS in regione di saturazione
- Determinare $A_v = v_{out}/v_{in}$ in condizioni di piccolo segnale assumendo che C possa essere considerata come un corto circuito
- Determinare la funzione di trasferimento $A_v = v_{out}(s)/v_{in}(s)$ per $C = 10\mu\text{F}$ e tracciarne i diagrammi di Bode (modulo e fase).
- A partire da quale frequenza l'assunzione su C al secondo punto pu considerarsi valida?



$$\begin{aligned}
 V_{DD} &= 5\text{V} \\
 R_1 &= 25\text{k}\Omega \\
 R_2 &= 225\text{k}\Omega \\
 R &= 250\text{k}\Omega \\
 V_{TH} &= 400\text{mV} \\
 \beta &= 2\text{mA/V}^2 \\
 \lambda &\approx 0
 \end{aligned}$$

Figura 11: Circuito per l'esercizio n. 4 pag. 52.

Verifica del funzionamento nel punto di quiescenza Q

Si osservi che per il calcolo del punto a funzionamento a riposo i condensatori devono essere considerati dei circuiti aperti (limite in DC). Di conseguenza la tensione del nodo di gate si ottiene dalla partizione di V_{DD} sulla serie di R_1 e R_2 :

$$V_{GS} = V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 5 \frac{25}{25 + 225} = 0.5\text{V}$$

Si verifica immediatamente che $V_{GS} > V_{TH}$. La corrente di drain (con $\lambda = 0$) è:

$$I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.5 \times 2 \times 10^{-3} \times 0.1^2 = 10\mu\text{A}$$

Infine

$$V_{DS} = V_{DD} - R I_D = 5 - (250 \times 10^3 \times 10^{-5}) = 2.5\text{V} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

Il MOS è in saturazione.

Calcolo dei parametri del circuito equivalente di piccolo segnale

La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 0.2 \text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita è nulla.

Circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio completo (limite adinamico)

Lo stadio è a source comune. Trascurando l'effetto della capacità, il circuito equivalente di piccolo segnale è:

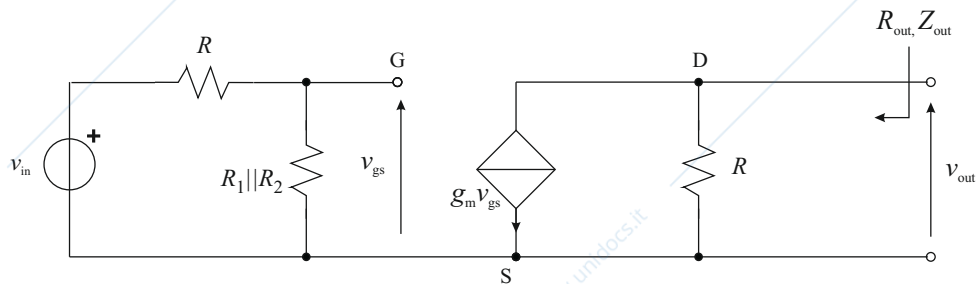


Figura 12: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS (limite adinamico) - es. n. 4 pag. 52

La tensione di gate risulta dalla partizione della tensione di ingresso tra la resistenza serie del generatore e il parallelo $R_1 || R_2$.

Il guadagno di tensione dello stadio si ricava osservando che

$$v_{out} = -g_m R \frac{R_1 || R_2}{R + R_1 || R_2} v_{in} \Rightarrow A_v = -g_m R \frac{R_1 || R_2}{R + R_1 || R_2} = -4.128 \text{ (12.3 dB)}$$

Circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio completo (dinamico)

Inserendo la capacità serie, il circuito si modifica in ingresso come in Fig. 13.

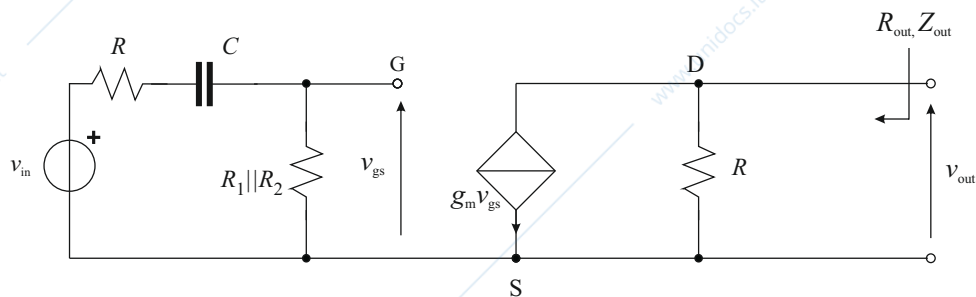


Figura 13: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS - es. n. 4 pag. 52

Il guadagno si ottiene sostituendo nelle formule precedenti

$$R \rightarrow Z = R + \frac{1}{sC} = \frac{1 + sRC}{sC}$$

solo per la parte del partitore di ingresso, ovvero

$$A_v = -g_m R \frac{R_1 || R_2}{Z + R_1 || R_2} = -g_m R \frac{R_1 || R_2}{\frac{1 + sRC}{sC} + R_1 || R_2} = -g_m \frac{s R R_1 || R_2 C}{1 + sC(R + R_1 || R_2)}$$

che rappresenta una funzione di trasferimento del tipo passa-alto con uno zero nell'origine e un polo alla pulsazione

$$s_p = -\frac{1}{sc(R + R_1 || R_2)} = -0.367 \text{ rad/s} \Rightarrow f_p = \frac{|s_p|}{2\pi} = 0.058 \text{ Hz}$$

Per frequenze $f > f_p$ il limite adinamico è valido: poichè f_p è molto bassa, praticamente per tutte le frequenze significative. Dato il suo elevato valore, la capacità serie in questo caso serve solo da capacità di blocco della componente DC.

Diagramma di Bode

Il diagramma di Bode è riportato nella Fig. 14

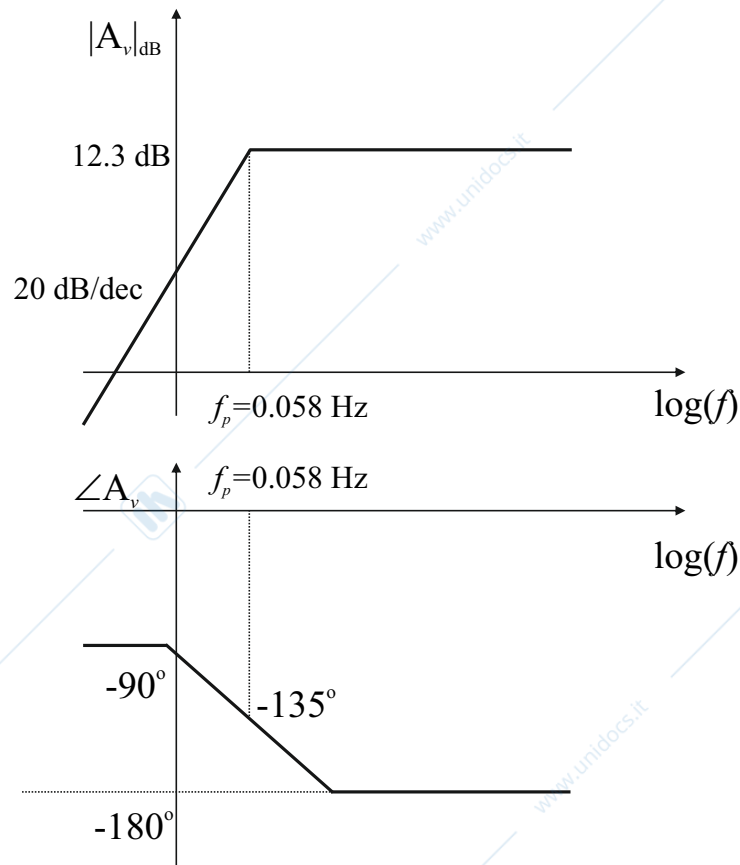


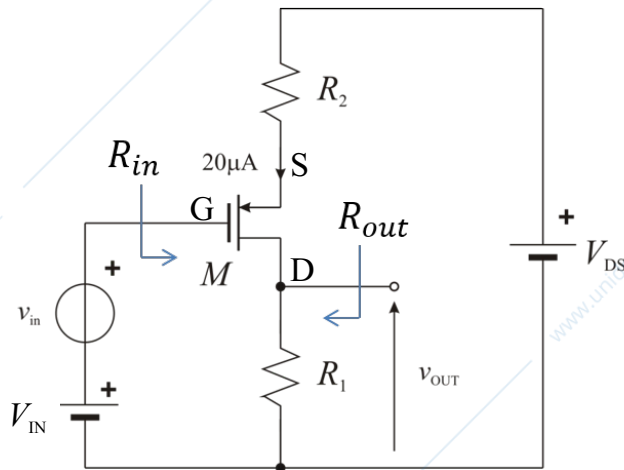
Figura 14: Diagrammi di Bode - es. n. 1 pag. 49

NB. Il diagramma di Bode della fase può essere traslato verso l'alto di 360° se si desidera una rappresentazione con angoli compresi tra 0 e 360 . In questo caso si adotta la rappresentazione canonica compresa tra -180 e 180 . Si ricordi comunque la fase iniziale di -180 (oppure 180) dovuta alla natura invertente dello stadio e la fase di $+90$ dovuta allo zero nell'origine.

Esercizio n. 2 pag. 50

Con riferimento al circuito in figura

- Verificare il funzionamento del transistor MOS in regione di saturazione
- Determinare $A_v = v_{out}/v_{in}$ in condizioni di piccolo segnale.
- Determinare R_{in} e R_{out} indicate in figura, in condizioni di piccolo segnale.



$$\begin{aligned} V_{DD} &= 5V \\ R_1 &= 100k\Omega \\ R_2 &= 10k\Omega \\ V_{TH} &= 300mV \\ \beta &= 4mA/V^2 \\ \lambda &\approx 0 \end{aligned}$$

Figura 15: Circuito per l'esercizio n. 2 pag. 50.

Verifica del funzionamento nel punto di quiescenza Q

Il circuito è basato su un transistor MOS di tipo p . Il source è identificato dalla freccia nel simbolo e, in questo caso, è collegato alla tensione di alimentazione V_{DD} mediante la resistenza R_2 . Il drain del p MOS è invece collegato al riferimento di potenziale tramite R_1 . Per evitare confusione il generatore di ingresso viene rinominato con V_{IN} . Nel transistor a canale p si deve avere una tensione $V_{SD} > 0$ e la corrente risulta in questo modo diretta come nella freccia in figura. Dai dati in figura la corrente di drain risulta pari a $20 \mu A$, da cui

$$V_{SG} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta}} = 0.1 V$$

Ovvero $V_{SG} = 0.4 V$.

Il nodo di source si trova alla tensione $V_S = V_{DD} - R_2 I_D = 5 - 0.2 = 4.8 V$ mentre nel nodo di drain $V_D = R_1 I_D = 2 V$. Infine $V_{SD} = 2.8 V$. Poichè $V_{SD} > V_{SG} - V_{TH}$ il transistor è in saturazione.

Si osservi che la tensione del gate risulta in continua $V_G = V_{DD} - R_2 I_D - V_{SG} = 4.7 V$. Tale valore deve quindi anche essere pari alla tensione in continua del generatore di ingresso V_{IN} (non indicata nel testo del problema e non necessaria ai fini della verifica del punto di quiescenza del MOS).

Calcolo dei parametri del circuito equivalente di piccolo segnale

La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{SG} - V_{TH}) = 0.4 \text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita è nulla.

Circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio completo

Cortocircuitando i generatori in continua e sostituendo il circuito di piccolo segnale del pMOS (cfr. pag. 37 della teoria Transistori) si ottiene il circuito della Fig. 16. Si tratta di uno stadio a source comune con resistenza sul source.

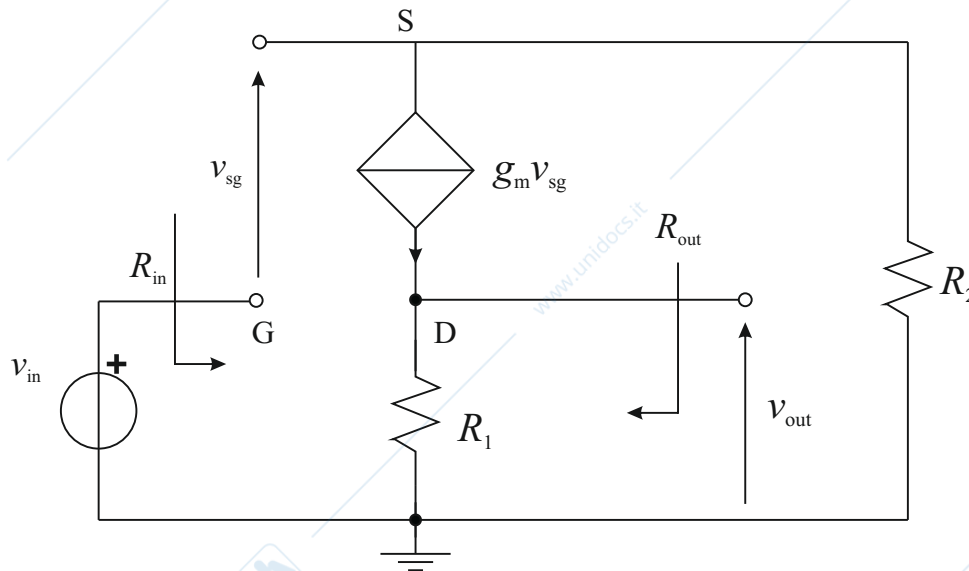


Figura 16: Circuito equivalente di piccolo segnale del MOS - es. n. 2 pag. 50.

Dallo studio dello stadio si ha:

$$v_{sg} = -g_m R_2 v_{sg} - v_{in} \Rightarrow v_{sg} = -\frac{1}{1 + g_m R_2} v_{in}$$

Infine

$$v_{out} = R_1 g_m v_{sg} = -\frac{R_1 g_m}{1 + g_m R_2} v_{in} \Rightarrow A_v = -\frac{R_1 g_m}{1 + g_m R_2} = -8 \text{ (18.06 dB)}$$

La resistenza di ingresso è infinita, mentre per la resistenza di uscita si deve porre $v_{in} = 0$ e inserire un generatore di test in uscita. Si osservi che se $v_{in} = 0$ allora $v_{sg} = -g_m R_2 v_{sg}$ che ha come unica soluzione $v_{sg} = 0$. Essendo spento il generatore pilotato, la resistenza di uscita è risultata uguale a R_1 .