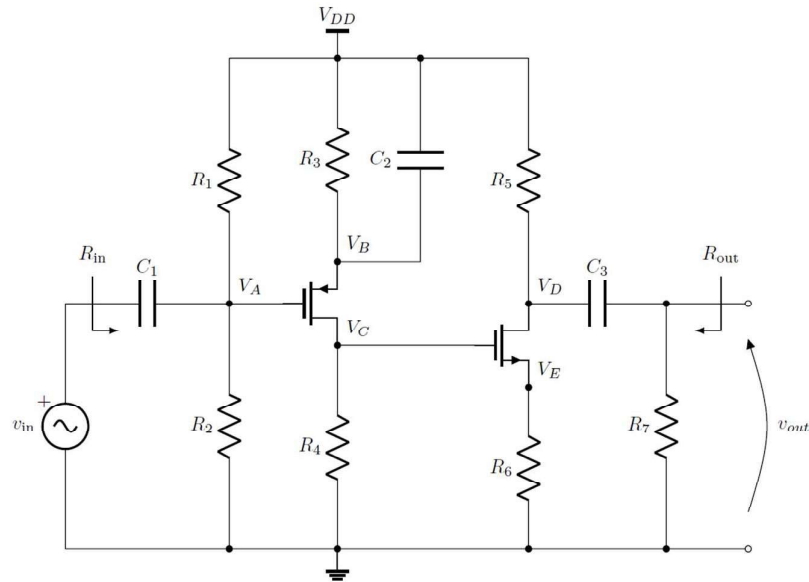


ESTM 2024
Esercitazione 5

Esame del (3/5/2023)



$p\text{MOS: } \beta_p = 4 \text{ mA/V}^2, V_{THp} = 0.5 \text{ V}, \lambda_p = 0$

$n\text{MOS: } \beta_n = 5 \text{ mA/V}^2, V_{THn} = 0.3 \text{ V}, \lambda_n = 0$

Tensioni DC: $V_{DD} = 5 \text{ V}, V_A = 3.5 \text{ V}, V_B = 4.2 \text{ V}, V_C = 2 \text{ V}, V_D = 2.5 \text{ V}, V_E = 1.5 \text{ V}$

Resistori: $R_1 = 30 \text{ k}\Omega, R_2 = 70 \text{ k}\Omega, R_3 = 10 \text{ k}\Omega, R_4 = R_5 = 25 \text{ k}\Omega, R_6 = 15 \text{ k}\Omega, R_7 = 100 \text{ k}\Omega$

Con riferimento al circuito in figura:

1. verificare il funzionamento dei transistori in regione di saturazione e determinare i parametri di piccolo segnale nel punto di lavoro;
2. determinare, in condizioni di piccolo segnale, l'amplificazione di tensione $A_v = v_{\text{out}}/v_{\text{in}}$, la resistenza d'ingresso R_{in} e la resistenza di uscita R_{out} , assumendo che tutti i condensatori (C_1, C_2 e C_3) si comportino come cortocircuiti nella banda del segnale applicato (disegnare il circuito equivalente e riportare sia l'espressione analitica sia i risultati numerici di A_v, R_{in} e R_{out});
3. disegnare l'amplificatore di tensione equivalente del circuito dato nella banda del segnale.

Soluzione

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore MP

$$V_{SG} = V_B - V_A = 0.7 \text{ V}; \quad V_{SG} - V_{TH} = 0.2 \text{ V} > 0;$$

$$V_{SD} = V_B - V_C = 2.2 \text{ V} > V_{SG} - V_{TH};$$

Non richiesto: $I_D = 80 \mu\text{A}$.

$$g_{mp} = \beta_n (V_{SG} - V_{TH}) = 800 \mu\text{S}; \quad r_0 = \infty$$

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore MN

$$V_{GS} = V_C - V_E = 0.5 \text{ V}; \quad V_{GS} - V_{TH} = 0.2 \text{ V} > 0;$$

$$V_{DS} = V_D - V_E = 1 \text{ V} > V_{GS} - V_{TH};$$

Non richiesto: $I_D = 100 \mu\text{A}$.

$$g_{mn} = \beta_n (V_{GS} - V_{TH}) = 1 \text{ mS}; \quad r_0 = \infty$$

Analisi Stadio a centro banda

Sostituendo C_1 , C_2 e C_3 con un corto circuito, ottiene una cascata di due stadi a source comune.

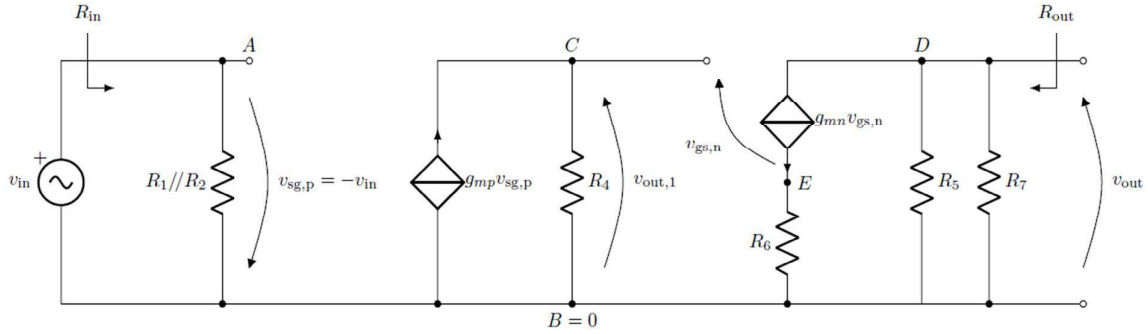


Figura 1: Circuito di piccolo segnale dello stadio.

Primo stadio:

$$v_{sg,p} = -v_{in}$$

$$v_{out,1} = -R_4 g_{mp} v_{sg,p}$$

Secondo stadio:

Definendo $R_p = R_5 // R_7 = 20 \text{ k}\Omega$:

$$v_{gs,n} = v_{out,1} - v_{R6}$$

$$v_{out} = -\frac{g_{mn} R_p}{1 + g_{mn} R_6} v_{out,1}$$

$$v_{out} = \frac{g_{mn} g_{mp} R_4 R_p}{1 + g_{mn} R_6} v_{in}$$

$$A_v = \frac{g_{mn} g_{mp} R_4 R_p}{1 + g_{mn} R_6} = 25 (\approx 28 \text{ dB})$$

$$R_{in} = R_1 // R_2 = 21 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_p = 20 \text{ k}\Omega$$

Infine, considerando sempre i condensatori come corto-circuiti, l'amplificatore di tensione equivalente al circuito dato è:

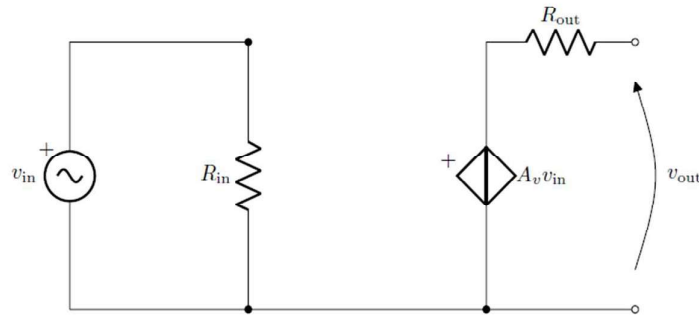
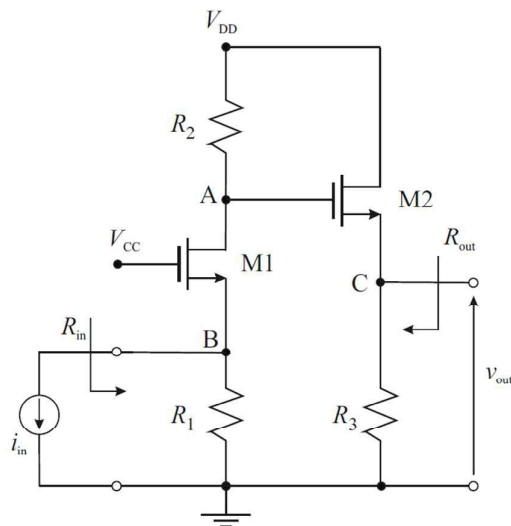


Figura 2: Circuito amplificatore di tensione equivalente.

ESAME DEL 5/9/2023



$$R_1 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 1.8 \text{ V}$$

$$V_{CC} = 1.2 \text{ V}$$

$$V_A = 1.6 \text{ V}$$

$$V_B = 0.5 \text{ V}$$

$$V_C = 1.0 \text{ V}$$

per M1:

$$\beta = 20 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TH} = 0.6 \text{ V}$$

$$\lambda = 0$$

per M2:

$$\beta = 20 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TH} = 0.5 \text{ V}$$

$$\lambda = 0$$

Con riferimento al circuito in figura:

1. verificare il funzionamento dei transistori MOS in regione di saturazione e determinarne i parametri di piccolo segnale nel punto di lavoro;
2. determinare, in condizioni di piccolo segnale, l'amplificazione di transresistenza $R_m = v_{out}/i_{in}$, R_{in} e R_{out} indicate in figura;
3. si supponga che lo stadio amplificatore sia collegato alla porta d'ingresso ad una sorgente che presenta tensione a vuoto v_s e resistenza interna $R_S = 400\Omega$ e che piloti un carico $R_L = 400\Omega$ collegato alla porta d'uscita. Sia la sorgente, sia il carico sono accoppiati in AC mediante condensatori che si possono considerare come corto circuiti nella banda del segnale. Determinare l'amplificazione di tensione $A_v = v_{out}/v_s$ nelle condizioni descritte.

Soluzione

1. Per il transistor M1:

$$V_{GS1} = V_{CC} - V_C = 1.2V - 0.5V = 700mV > V_{TH1} = 600mV$$

e

$$V_{DS1} = V_A - V_B = 1.6V - 0.5V = 1.1V > V_{GS1} - V_{TH1} = 100mV$$

Il transistor M1 è polarizzato in regione di saturazione.

La transconduttanza di piccolo segnale può essere valutata come $g_{m1} = \beta(V_{GS1} - V_{TH1}) = 2mS$. La conduttanza di uscita è nulla essendo $\lambda = 0$.

Per il transistor M2:

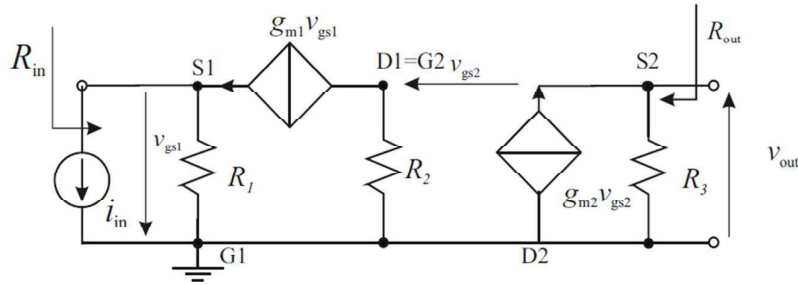
$$V_{GS2} = V_A - V_C = 1.6V - 1V = 0.6V > V_{TH2} = .5V$$

e

$$V_{DS2} = V_{DD} - V_C = 1.8V - 1V > V_{GS2} - V_{TH2} = 100mV$$

Il transistor M2 è polarizzato in regione di saturazione.

La transconduttanza di piccolo segnale può essere valutata come $g_{m2} = \beta(V_{GS2} - V_{TH2}) = 2mS$. La conduttanza di uscita è nulla essendo $\lambda = 0$.



2. Il circuito equivalente per il piccolo segnale è quello riportato sopra in figura. Si tratta di uno stadio gate comune collegato in cascata ad uno stadio drain comune.

- Transresistenza:

per lo stadio gate comune è possibile ricavare la tensione di controllo v_{gs1} dalla KCL al nodo B come:

$$i_{in} = \frac{v_{gs1}}{R_1} + g_{m1}v_{gs1}$$

da cui:

$$v_{gs1} = \frac{i_{in}R_1}{1 + g_{m1}R_1}$$

e quindi la tensione d'uscita v_{o1} del primo stadio vale:

$$v_{o1} = -g_{m1}R_2v_{gs1} = -\frac{g_{m1}R_1R_2}{1 + g_{m1}R_1}i_{in}.$$

Per lo stadio drain comune, dalla KVL alla maglia d'uscita

$$v_{gs2} = v_{o1} - g_{m2}R_3v_{gs2}$$

la tensione di controllo v_{gs2} si può esprimere come:

$$v_{gs2} = \frac{v_{o1}}{1 + g_{m2}R_3}$$

e quindi la tensione d'uscita complessiva v_{out} è data da:

$$v_{out} = g_{m2}R_3v_{gs2} = v_{o1} \frac{g_{m2}R_3}{1 + g_{m2}R_3} = -\frac{g_{m2}R_3}{1 + g_{m2}R_3} \frac{g_{m1}R_1R_2}{1 + g_{m1}R_1} i_{in}.$$

La transresistenza dello stadio è quindi data da:

$$R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}} = -\frac{g_{m2}R_3}{1 + g_{m2}R_3} \frac{g_{m1}R_1R_2}{1 + g_{m1}R_1} = -1.73k\Omega \quad (\approx 65 \text{ dB}\Omega)$$

- Resistenza d'ingresso:

applicando un generatore di test i_t alla porta d'ingresso,

$$v_t = v_{gs1} = \frac{i_t R_1}{1 + g_{m1}R_1}$$

la resistenza d'ingresso R_{in} si può quindi esprimere come:

$$R_{in} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_1}{1 + g_{m1}R_1} = 455\Omega$$

- Resistenza d'uscita:

applicando un generatore di test i_t alla porta d'uscita e spegnendo il generatore d'ingresso

$$v_t = v_{gs2} = \frac{i_t R_3}{1 + g_{m2}R_3}$$

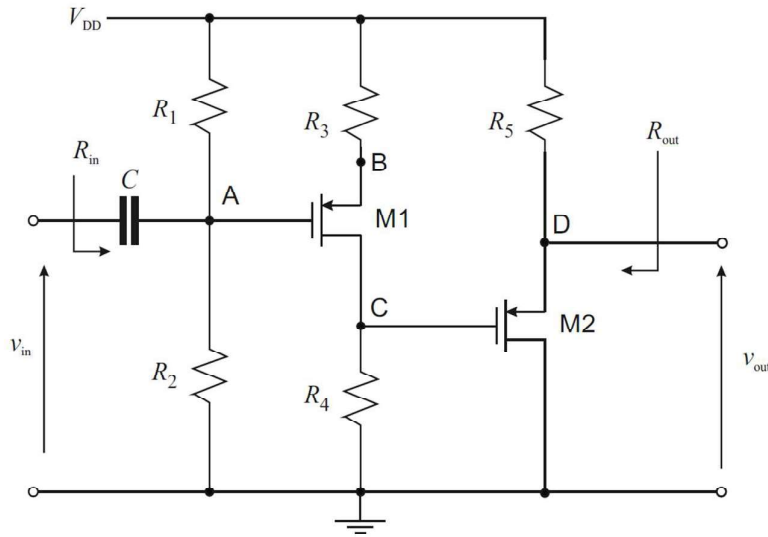
e la resistenza d'uscita si ricava pertanto come:

$$R_{out} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_3}{1 + g_{m2}R_3} = 476\Omega$$

3. Per lo stadio caricato

$$A_v = \frac{R_m R_L}{(R_S + R_{in})(R_L + R_{out})} = -0.92$$

Esame del 19 Febbraio 2021



$R_1 = 330 \text{ k}\Omega$	$V_A = 2 \text{ V}$
$R_2 = 660 \text{ k}\Omega$	$V_B = 2.8 \text{ V}$
$R_4 = 100 \text{ k}\Omega$	$V_C = 1 \text{ V}$
$R_3 = 20 \text{ k}\Omega$	$V_D = 2 \text{ V}$
$R_5 = 25 \text{ k}\Omega$	$V_{DD} = 3 \text{ V}$

<i>per M1:</i>	<i>per M2:</i>
$\beta = 2 \text{ mA/V}^2$	$\beta = 1 \text{ mA/V}^2$
$V_{TH} = 0.7 \text{ V}$	$V_{TH} = 0.6 \text{ V}$
$\lambda = 0$	$\lambda = 0.1 \text{ V}^{-1}$

Esercizio 1.

Con riferimento allo stadio in figura

1. verificare la regione di funzionamento di M1 e M2 determinarne i parametri del modello per il piccolo segnale;
2. determinare il guadagno di tensione $A_v = v_{out}/v_{in}$ a centro banda, ovvero con $C \rightarrow \infty$ (espressione simbolica e valore numerico).
3. determinare la resistenza di ingresso e la resistenza di uscita indicate in figura (espressione simbolica e valore numerico).
4. C'è effetto di carico tra il primo e il secondo stadio? Caricare le foto per giustificare la risposta.

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore M1

$$V_{SG,1} = V_B - V_A = 0.8 \text{ V}; \quad V_{SG,1} - V_{TH,1} = 0.1 \text{ V} > 0;$$

$$V_{SD,1} = V_B - V_C = 1.8 \text{ V} > V_{SG,1} - V_{TH,1};$$

$$g_{m1} = \beta (V_{SG,1} - V_{TH,1}) = 200 \mu\text{S}; \quad r_{o1} = \infty$$

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore M2

$$V_{SG,2} = V_D - V_C = 1 \text{ V}; \quad V_{SG,2} - V_{TH,2} = 0.4 \text{ V} > 0;$$

$$V_{SD,2} = V_D = 2 \text{ V} > V_{SG,2} - V_{TH,2};$$

$$g_{m2} = \beta (V_{SG,2} - V_{TH,2}) = 400 \mu\text{S}; \quad r_{o2} = 125 \text{ k}\Omega$$

NB. Si trascura l'effetto di λ nel calcolo della corrente di drain e della transconduttanza.

Analisi Stadio

Sostituendo C con un corto circuito si ha una cascata di uno stadio a source comune (con resistenza sul source) e uno stadio a drain comune (Figura 1).

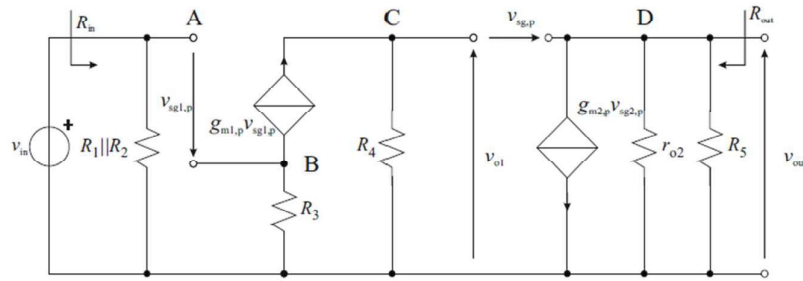


Figure 1: Circuito di piccolo segnale dello stadio

Primo stadio:

$$v_{sg,1} = -g_{m1}R_3v_{sg,1} - v_{in} \Rightarrow v_{sg,1} = -\frac{v_{in}}{1 + g_{m1}R_3}$$

$$v_{o1} = g_{m1}R_4v_{sg,1} = -\frac{g_{m1}R_4}{1 + g_{m1}R_3}v_{in}$$

$$A_{v01} = \frac{-g_{m1}R_4}{1 + g_{m1}R_3} = -4 \text{ (12 dB)}; \quad R_{in,1} = R_p = R_1 // R_2 = 220 \text{ k}\Omega; \quad R_{out,1} = R_3 = 100 \text{ k}\Omega$$

Secondo stadio ($R' = r_{o2} // R_5$):

$$v_{sg,2} = -g_{m2}R'v_{sg,2} - v_{o1} \Rightarrow v_{sg,2} = -\frac{v_{o1}}{1 + g_{m2}R'}$$

$$v_{out} = -g_{m2}R'v_{sg,2} = \frac{g_{m2}R'}{1 + g_{m2}R'}v_{o1}$$

$$A_{v02} = \frac{g_{m2}R'}{1 + g_{m2}R'} = 0.89 (\approx -0.98 \text{ dB}); \quad R_{in,2} = \infty; \quad R_{out,2} = \frac{R'}{1 + g_{m2}R'} = 2.23 \text{ k}\Omega$$

Cascata:

$$v_{out} = \frac{g_{m2}R'}{1 + g_{m2}R'}v_{o1} = -\frac{g_{m1}R_4}{1 + g_{m1}R_3} \frac{g_{m2}R'}{1 + g_{m2}R'}v_{in}$$

$$A_{v0} = -3.57 (\approx 11 \text{ dB}); \quad R_{in} = R_{in,1}; \quad R_{out} = R_{out,2}$$

NB. Non ci sono effetti di carico tra i due stadi poichè la resistenza di ingresso del secondo è infinita.