

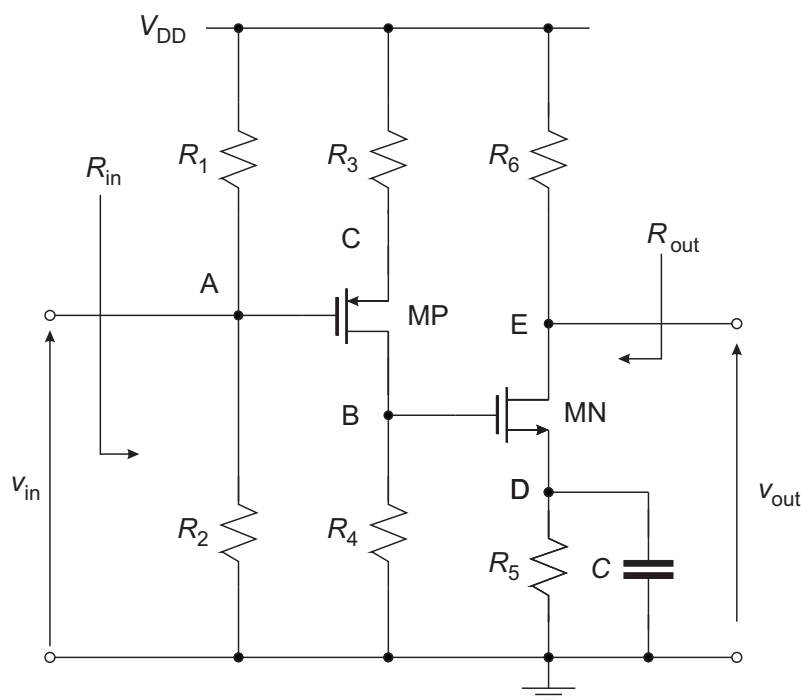
Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure
Appello del 11/9/2020

Nome:	_____
Cognome:	_____ SOLUZIONE _____
Matricola:	_____

ATTENZIONE

1. Compilare subito questa pagina con nome, cognome e numero di matricola
2. Per i quesiti a risposta multipla, la risposta errata determina la sottrazione di un punteggio pari a metà del valore della risposta esatta
3. Riportare le **risposte esatte** dei quesiti a risposta multipla nella tabella posta all'inizio della relativa sezione
4. Le risposte ai vari quesiti vanno riportate **esclusivamente** nello spazio reso disponibile immediatamente dopo il quesito stesso
5. Si può fare uso di fogli di brutta **bianchi** resi disponibili a cura dello studente. La brutta non deve essere consegnata
6. Non si possono utilizzare libri, appunti o formulari

Esercizio n. 1



$$R_1=150\text{k}\Omega$$

$$R_2=350\text{k}\Omega$$

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

$$R_4=25\text{k}\Omega$$

$$R_5=25\text{k}\Omega$$

$$R_6=50\text{k}\Omega$$

$$V_A=3.5\text{V}$$

$$V_B=2.5\text{V}$$

$$V_C=4\text{V}$$

$$V_D=1.25\text{V}$$

$$V_E=2.5\text{V}$$

$$V_{DD}=5\text{V}$$

per MP:

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

$$V_{THP}=0.4\text{V}$$

$$\lambda=0$$

per MN:

$$\beta_n=10\text{mA/V}^2$$

$$V_{THN}=1.15\text{V}$$

$$\lambda=0$$

$$C=\frac{10}{2\pi}\mu\text{F}$$

Con riferimento al circuito in figura:

1. verificare il funzionamento dei transistori MP ed MN in regione di saturazione;
2. determinarne i parametri di piccolo segnale di MP e di MN nel punto di lavoro;
3. assumendo che il condensatore C si comporti in banda come un corto circuito determinare - in condizioni di piccolo segnale - l'amplificazione di tensione $A_v = v_{out}/v_{in}$
4. assumendo che il condensatore C si comporti in banda come un corto circuito, determinare - in condizioni di piccolo segnale - la resistenza d'ingresso R_{in} e la resistenza d'uscita R_{out} indicate in figura;
5. determinare l'amplificazione di tensione di piccolo segnale nel dominio della frequenza $A_v(s) = V_{out}(s)/V_{in}(s)$;
6. determinare l'espressione di $v_{out}(t)$ a regime per segnale d'ingresso (accoppiato in AC) $v_{in}(t) = V_{in} \cos(2\pi f_0 t)$ con $V_{in} = 1\text{mV}$, $f_0 = 50\text{Hz}$.

Soluzione

1. Per il transistor MP:

$$V_{SG} = V_C - V_A = 4V - 3.5V = 500mV > V_{THP} = 400mV$$

e

$$V_{SD} = V_C - V_B = 4V - 2.5V = 1.5V > V_{SG} - V_{THP} = 100mV$$

Il transistor MP è dunque polarizzato in regione di saturazione.

Per il transistor MN:

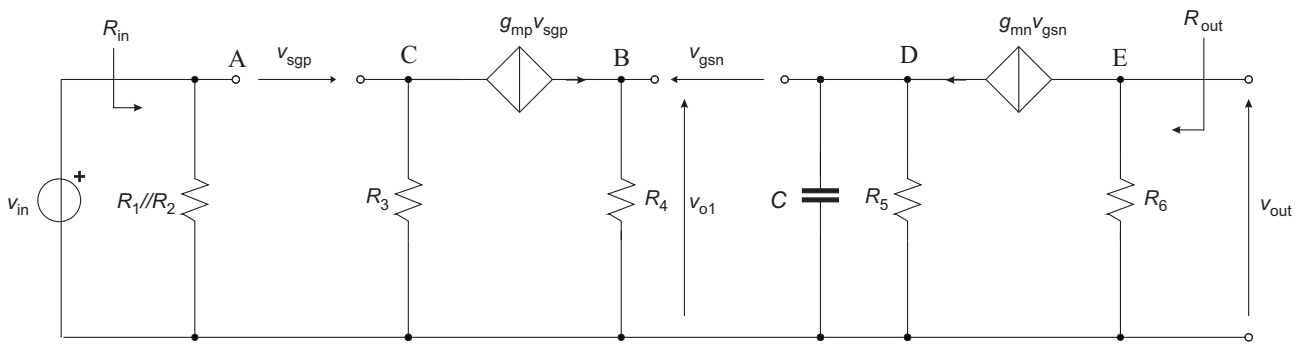
$$V_{GS} = V_B - V_D = 2.5V - 1.25V = 1.25V > V_{THN} = 1.15V$$

e

$$V_{DS} = V_E - V_D = 2.5V - 1.25V = 1.25mV > V_{GS} - V_{THN} = 100mV$$

Il transistor MP è dunque polarizzato in regione di saturazione.

2. La transconduttanza di piccolo segnale del transistor MP può essere valutata come $g_{mp} = \beta_p(V_{SG} - V_{TH}) = 2 \text{ mS}$. La conduttanza di uscita di MP è nulla essendo $\lambda = 0$. Analogamente, la transconduttanza di piccolo segnale di MN è data da $g_{mn} = \beta_n(V_{GS} - V_{TH}) = 1 \text{ mS}$. La conduttanza di uscita di MN è nulla essendo $\lambda = 0$.



Il circuito equivalente per il piccolo segnale è quello riportato sopra in figura. Si tratta di due stadi *source comune* in cascata, il primo con resistore sul *source*, il secondo con resistore sul *source* cortocircuitato per il segnale (in banda) da C.

3. Amplificazione di Tensione
- A_v
- in banda

È possibile ricavare la tensione di controllo v_{sgp} dalla KVL alla maglia d'ingresso:

$$v_{in} = -v_{sgp} - g_{mp}v_{sgp}R_3$$

da cui:

$$v_{sgp} = -\frac{v_{in}}{1 + g_{mp}R_3}$$

la tensione d'uscita del primo stadio, che coincide con la tensione v_{gsn} del secondo stadio considerando C come un corto circuito, vale pertanto:

$$v_{o1} = v_{gsn} = g_{mp}R_4v_{sg} = -\frac{g_{mp}R_4}{1 + g_{mp}R_3}v_{in}.$$

La tensione d'uscita vale pertanto

$$v_{out} = -g_{mn}R_6v_{gsn} = g_{mn}R_6\frac{g_{mp}R_4}{1 + g_{mp}R_3}v_{in}.$$

Quindi:

$$A_v = v_{out}/v_{in} = \frac{g_{mp}R_4g_{mn}R_6}{1 + g_{mp}R_3} = 119. \quad (41.5dB)$$

4. Resistenza d'ingresso e d'uscita:

dal circuito equivalente di piccolo segnale, per la resistenza d'ingresso si ricava direttamente per ispezione:

$$R_{\text{in}} = R_1 \parallel R_2 = 105\text{k}\Omega$$

Per la resistenza d'uscita, applicando un generatore di test i_t alla porta d'uscita e spegnendo il generatore d'ingresso, la corrente che scorre nel generatore pilotato è nulla, pertanto

$$v_t = i_t R_6$$

e la resistenza d'uscita è data da:

$$R_{\text{out}} = R_6 = 50\text{k}\Omega$$

5. Considerando il condensatore C nel circuito equivalente per il piccolo segnale, si può calcolare l'amplificazione di tensione nel dominio della frequenza come:

$$A_v(s) = \frac{g_{\text{mp}} R_4}{1 + g_{\text{mp}} R_3} \frac{g_{\text{mn}} R_6}{1 + g_{\text{mn}} Z_5}$$

dove

$$Z_5 = \frac{R_5}{1 + sCR_5}.$$

Sostituendo:

$$A_v(s) = \frac{g_{\text{mp}} R_4}{1 + g_{\text{mp}} R_3} \frac{g_{\text{mn}} R_6}{1 + g_{\text{mn}} R_5} \frac{1 + sCR_5}{1 + \frac{sCR_5}{1 + g_{\text{mn}} R_5}}$$

6. Essendo il circuito lineare, la tensione di uscita richiesta può essere espressa come

$$v_{\text{out}}(t) = V_{\text{out}} \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$$

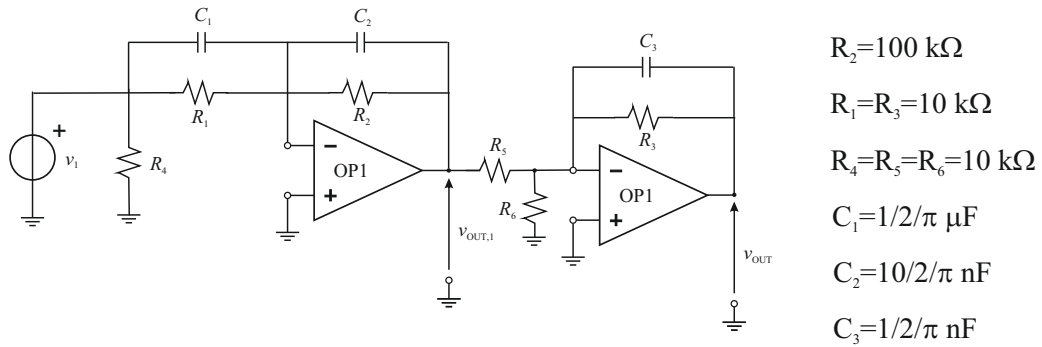
dove $f_0 = 50\text{ Hz}$ e

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} |A_v(j2\pi f_0)| = 51.7\text{ mV};$$

$$\varphi = \angle A_v(j2\pi f_0) = 1.04\text{ rad} = 59.7^\circ.$$

Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure
Appello del 11/9/2020

Esercizio 2.



Nel circuito in figura determinare:

1. l'espressione delle tensioni $v_{OUT,1}$ e v_{OUT} in condizioni statiche
2. l'espressione delle funzioni di trasferimento $A_{v1} = v_{OUT,1}/v_1$ e $A_v = v_{OUT}/v_1$, disegnandone i diagrammi di Bode del modulo e della fase
3. supponendo che la tensione v_1 sia una sinusoide alla frequenza di 10 kHz con ampiezza 20 mV e fase nulla, si scriva l'espressione della tensione di uscita e se ne disegni il grafico in funzione del tempo.

1. Espressione della tensione d'uscita in continua:

$$v_{\text{out},1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 = -10v_1$$

$$v_{\text{out}} = -\frac{R_3}{R_5} v_{\text{out},1} = 10v_1$$

2. Funzione di trasferimento

$$A_{v1} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

con

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + sR_1C_1}; \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + sR_2C_2}$$

Quindi

$$A_{v1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1 + sR_1C_1}{1 + sR_2C_2} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1 - s/s_z}{1 - s/s_{p1}}$$

dove

$$s_z = -\frac{1}{R_1C_1}, \quad s_{p1} = -\frac{1}{R_2C_2}.$$

corrispondenti alle frequenze dello zero e del polo:

$$f_z = 100 \text{ Hz}, \quad f_{p1} = 1 \text{ kHz}.$$

La funzione di trasferimento è rappresentata in rosso nella figura.

La funzione A_v è invece:

$$A_v = -A_{v1} \frac{Z_3}{R_5}$$

con

$$Z_3 = \frac{R_3}{1 + sR_3C_3}$$

Complessivamente:

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_5} \frac{1 + sR_1C_1}{(1 + sR_2C_2)(1 + sR_3C_3)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_5} \frac{1 - s/s_z}{(1 - s/s_{p1})(1 - s/s_{p2})}$$

dove

$$s_{p2} = -\frac{1}{R_3C_3}$$

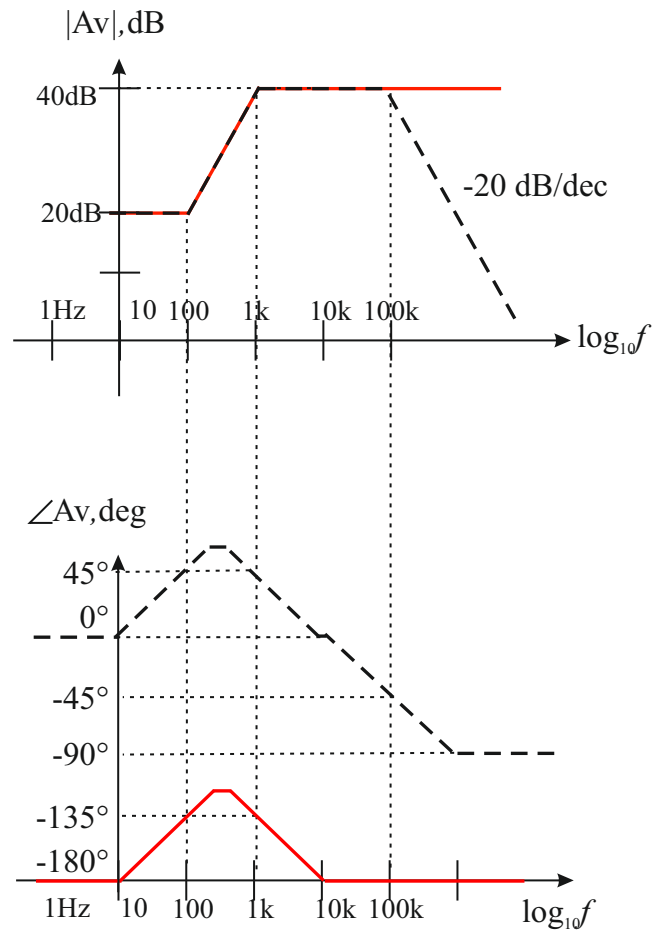
corrispondente al secondo polo a frequenza:

$$f_{p2} = 100 \text{ kHz}$$

La funzione è complessivamente di tipo passa-banda ed è rappresentata in figura con linea nera tratteggiata. Per $f = 0$ (continua) il guadagno è

$$A_0 = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_5} = 10$$

ovvero 20 dB. A centro-banda (ovvero per $s \gg s_z$ e $s \gg s_{p1}$ ma $s \ll s_{p2}$) il guadagno vale $A_0 \frac{s_{p1}}{s_z} = 100$ corrispondente a 40 dB. Si noti che il primo stadio è invertente mentre lo stadio complessivo risulta non-invertente.



3. Alla frequenza di 10 kHz la risposta è quella di centro banda. L'ampiezza dell'onda di ingresso viene amplificata di 100 mentre lo sfasamento è pressochè nullo. L'onda di uscita sarà quindi

$$v_{out}(t) = 2 \sin(2\pi f_0 t) \text{ V}$$

con $f_0 = 10 \text{ kHz}$ e periodo $T = 10^5 \text{ ns}$.

