POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Esercizi di Riepilogo

Esercizio 1

Con riferimento al circuito in Fig.1, in cui $R_1 = 10\mathrm{k}\Omega$ e $R_2 = 100\mathrm{k}\Omega$, si determinino l'amplificazione di tensione $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, la resistenza d'ingresso R_{in} e la resistenza d'uscita R_{out}:

- nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ($A_d \rightarrow \infty$)
- nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia descritto dal modello lineare in Fig.2, con $A_d = 10^4$, resistenze d'ingresso trascurabili e resistenza d'uscita $R_{out,op} = 100\Omega$

Sotto le ipotesi del secondo punto, si determini la banda passante del circuito, assumendo che il prodotto banda-guadagno f_T dell'operazionale sia 5MHz.

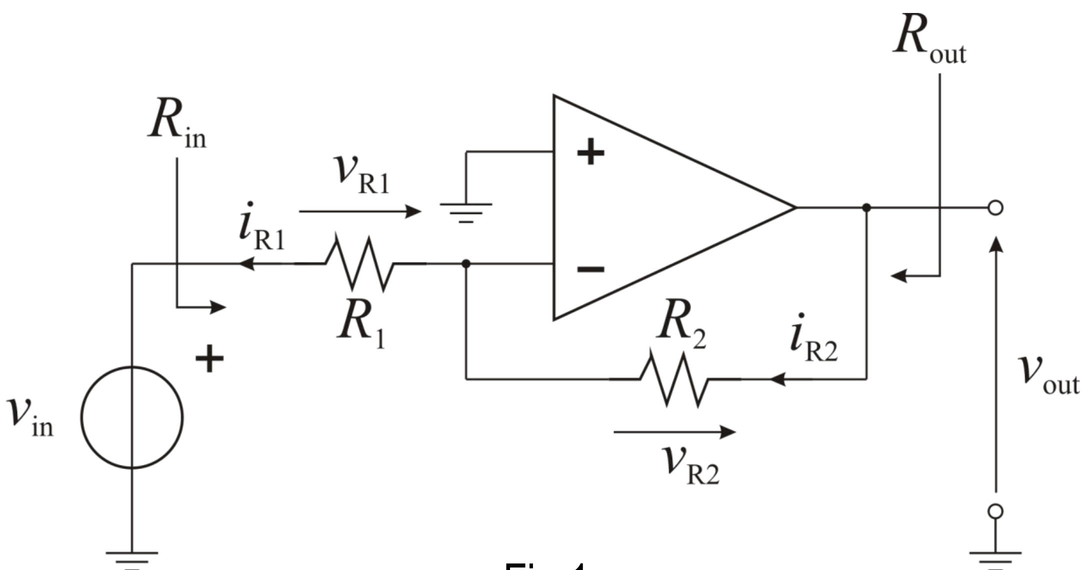


Fig.1

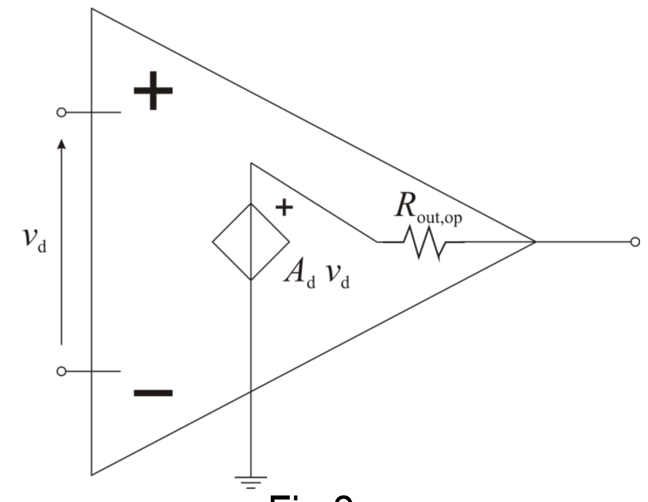
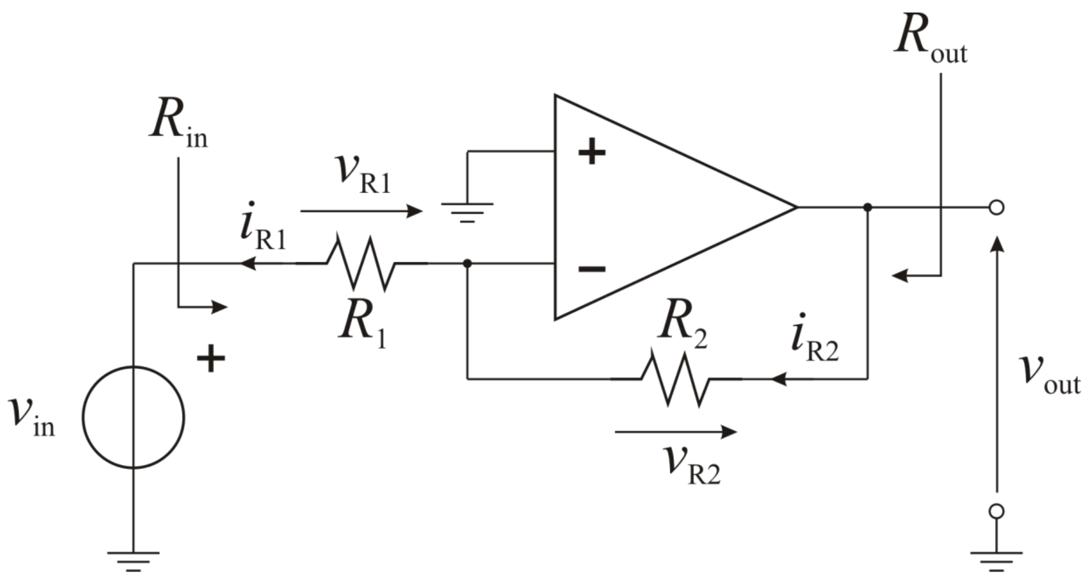


Fig.2

Esercizio

Con riferimento al circuito in figura a sinistra, in cui $R_1 = 10\text{k}\Omega, R_2 = 100\text{k}\Omega$, si determini l'amplificazione di tensione $\frac{v_{out}}{v_{in}}$, la resistenza d'ingresso R_{in} e la resistenza d'uscita R_{out}:

- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ($A_d \to \infty$)



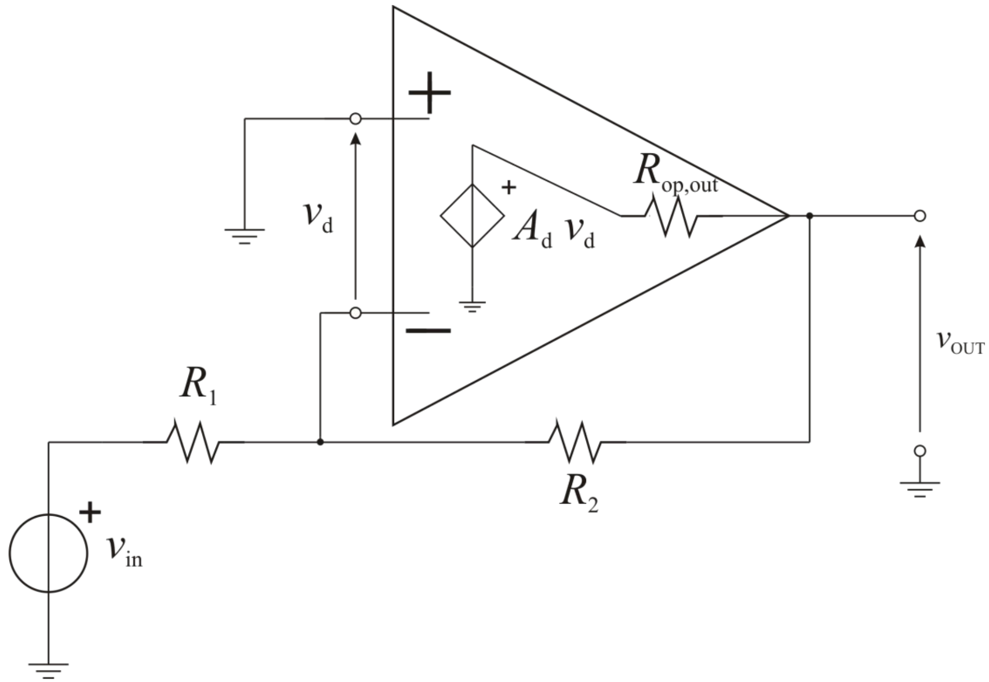
Per $A_d \to \infty$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} = -10$$

$$R_{in} = R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 0$$

Esercizio



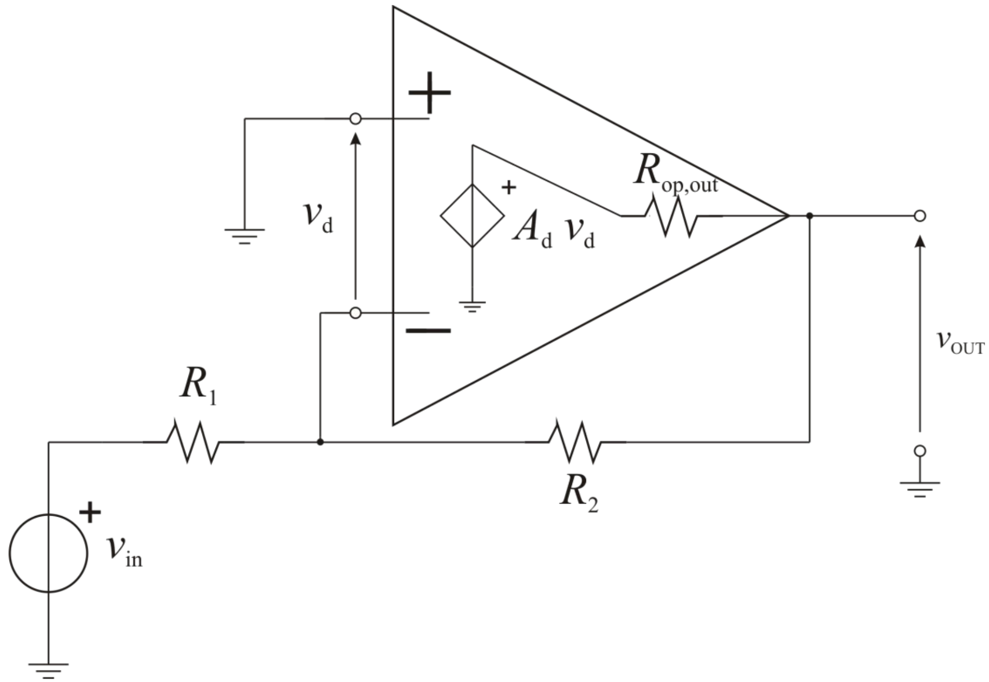
Per A_d finita:calcolo di $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$ (metodo del pilota):

$$v_d = -v_{in}\frac{R_2 + R_{out,op}}{R_1 + R_2 + R_{out,op}} - A_d v_d \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{out,op}}$$

$$v_d[R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}] = -v_{in}(R_2 + R_{out,op})$$

$$\boxed{v_d = -\frac{v_{in}(R_2 + R_{out,op})}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}}$$

Esercizio



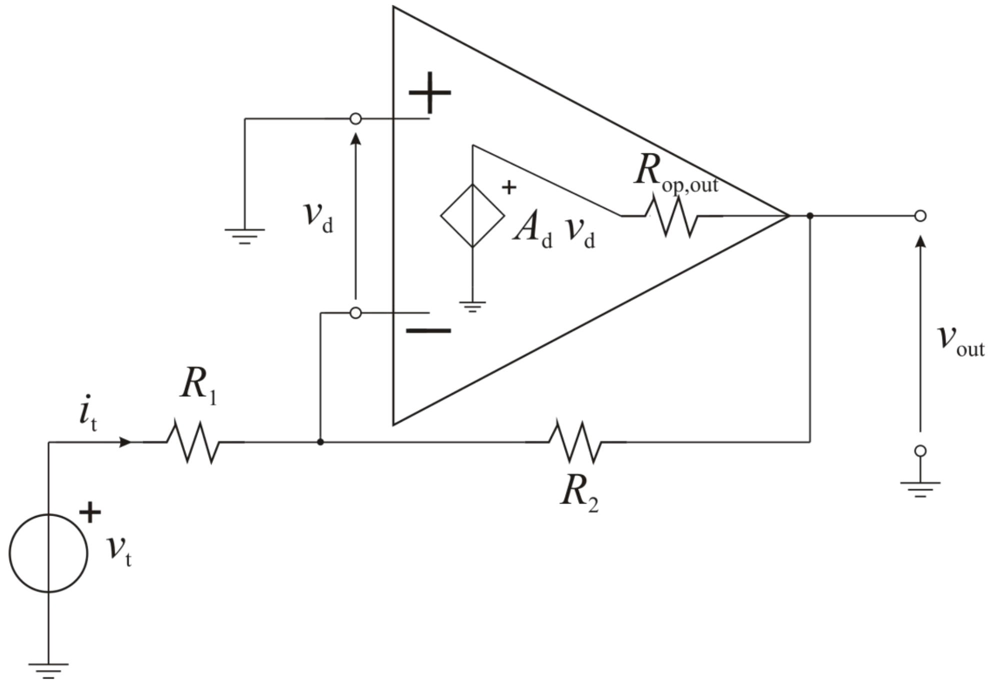
$$v_{out} = A_d v_d \; \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_{out,op}} + v_{in} \frac{R_{out,op}}{R_1 + R_2 + R_{out,op}}$$

$$v_{out} = -\frac{v_{in}}{R_1 + R_2 + R_{out,op}} \left[\frac{A_d \big(R_2 + R_{out,op}\big)(R_1 + R_2) - R_{out,op}\,\big(R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}\big)}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}} \right]$$

(sviluppando i prodotti e dopo semplificazioni algebriche)

$$\boxed{A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{A_d R_2 - R_{out,op}}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}} = -9.989}$$

Esercizio



Per A_d finita:calcolo di $R_{in} = \frac{v_t}{i_t}$ (metodo del pilota):

$$v_d = -\frac{v_t\left(R_2 + R_{out,op}\right)}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}$$

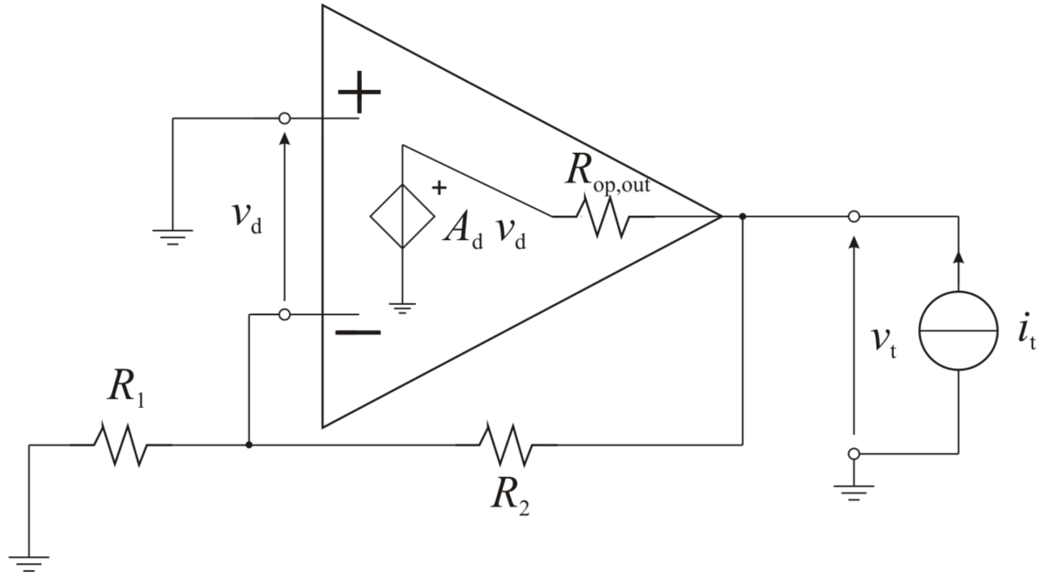
(v_t è nella stessa posizione di v_{in}, quindi l'espressione di v_d è quella trovata in precedenza)

$$i_t = \frac{v_t + v_d}{R_1} = v_t \frac{(1 + A_d)}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}$$

Nota v_d, si può ricavare direttamente i_t (la tensione su R_1 è v_t+v_d dalla KVL)

$$\boxed{R_{in} = \frac{v_t}{i_t} = R_1 + \frac{R_2 + R_{out,op}}{1 + A_d} = 10.01k\Omega}$$

Esercizio



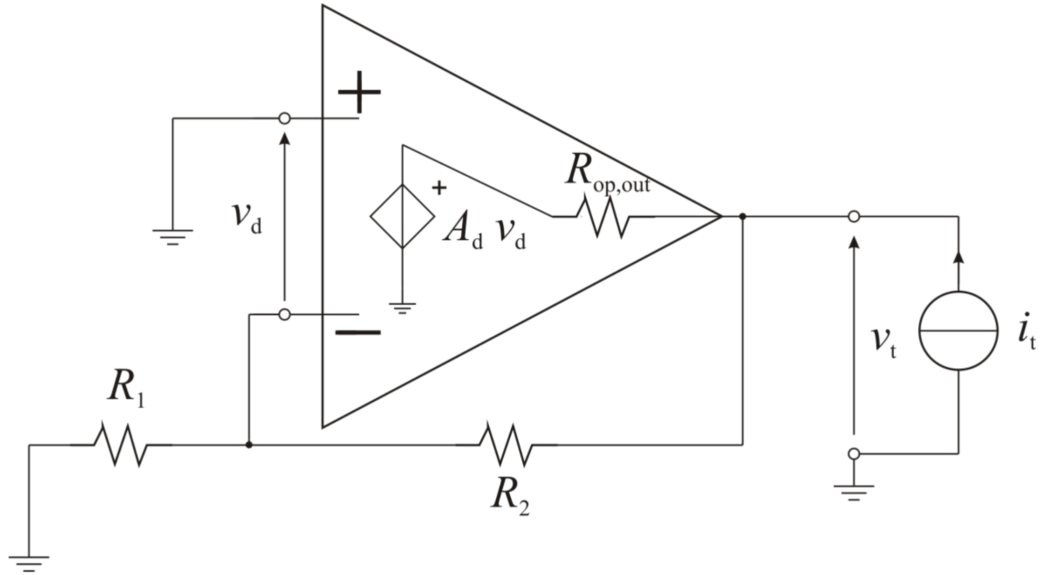
Per A_d finita:calcolo di $R_{out} = \frac{v_t}{i_t}$ (generatore di corrente di test, metodo del pilota):

$$v_d = -i_t\left[R_{out,op} \parallel (R_1 + R_2)\right]\frac{R_1}{R_1 + R_2} - A_d v_d \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{out,op}}$$

$$v_d = -i_t \frac{R_1 R_{out,op}}{R_1 + R_2 + R_{out,op}} - A_d v_d \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{out,op}}$$

$$\boxed{v_d = -\frac{i_t R_1 R_{out,op}}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}}$$

Esercizio



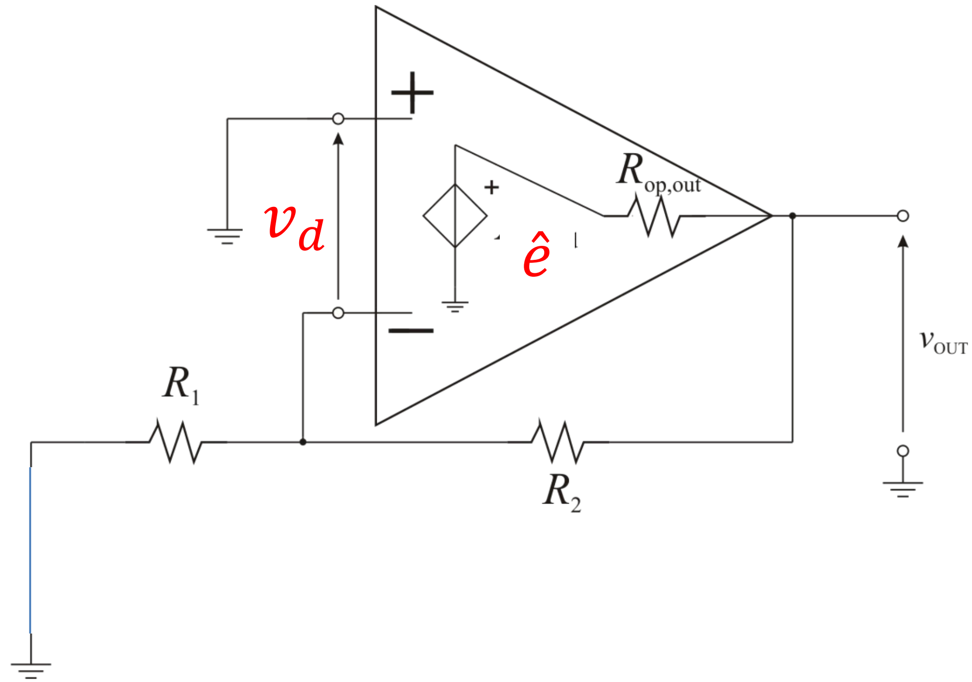
Per A_d finita:calcolo di $R_{out} = \frac{v_t}{i_t}$ (generatore di corrente di test, metodo del pilota):

$$v_d = -\frac{i_t R_1 R_{out,op}}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}$$

$$v_t = \left(1 - \frac{A_d R_1}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}\right)\left[R_{out,op} \parallel (R_1 + R_2)\right] i_t$$

$$\boxed{R_{out} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_1 + R_2 + R_{out,op}}{R_1(1 + A_d) + R_2 + R_{out,op}}\left[R_{out,op} \parallel (R_1 + R_2)\right] = 0.11\Omega}$$

Esercizio



Richiami di teoria

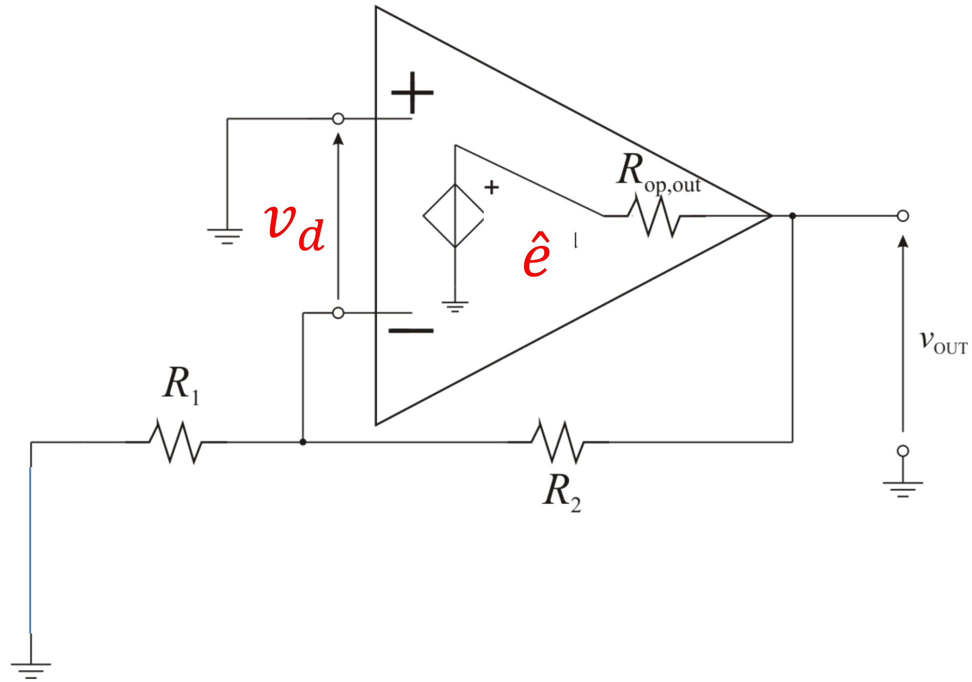
Un circuito con retroazione negativa è in banda fino a che il guadagno d'anello $|\beta A_d(f)| > 1$.
dove il fattore $\beta = -\frac{v_d}{\hat{e}}$ è il contributo di $\hat{e}$ alla grandezza pilota v_d, cambiato di segno.

Essendo, per $f \gg f_p$, $|A_d(f)| \simeq \frac{A_{d0} f_p}{f} = \frac{f_T}{f}$

$$|\beta A_d(f)| > 1 \quad \leftrightarrow \quad \frac{\beta f_T}{f} > 1 \leftrightarrow \quad f < \beta f_T = B$$

dove f_p è la frequenza del polo di A_d, f_T è la frequenza a guadagno unitario dell'operazionale (detta anche prodotto banda-guadagno) e $B = \beta f_T$ è il limite di banda

Esercizio



Per determinare la banda, determiniamo il fattore β che compare nel guadagno d'anello

$$v_d = -\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{out,op}}\hat{e}$$

$$\beta = -\frac{v_d}{\hat{e}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{out,op}} = 0.0908$$

In base a quanto osservato, la banda B del circuito è data immediatamente da βf_T

$$\boxed{B = \beta f_T = 5\text{MHz} \cdot 0.0908 = 454\text{kHz}}$$

Esercizio 2

Con riferimento al circuito in Fig.1:

- determinare la regione di funzionamento di MN e la corrente di *drain* nel punto di funzionamento a riposo,
- determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale, considerando C come un circuito aperto,
- determinare le funzioni di trasferimento $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$, $Z_{in}(s)$ ed $Z_{out}(s)$ in condizioni di piccolo segnale.

Si supponga poi di avere due stadi identici a quello in Fig.1 collegati in cascata come in Fig.2 e collegati ad una sorgente con resistenza interna $R_s = 50k\Omega$ e ad un carico $R_L = 20k\Omega$. I condensatori C_d in banda possono essere considerati corto circuiti. Determinare:

- $A_{vl} = \frac{v_l}{v_s}$ nella banda del segnale.
- $A_{vl}(s) = \frac{V_l}{V_s}$ e tracciarne i diagrammi di Bode, assumendo che i condensatori C_d si comportino sempre come corto circuiti

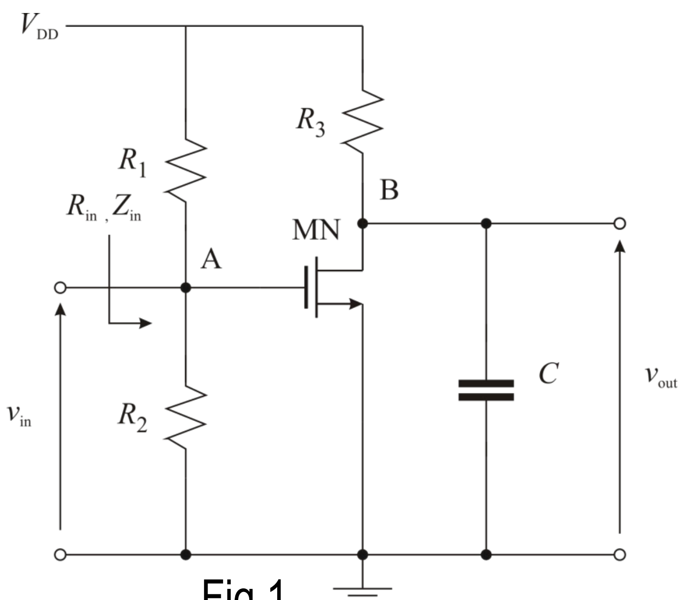


Fig.1

Tensioni ai nodi in DC

$V_A = 1V$

$V_B = 1.5V$

$V_{DD} = 3.3V$

Transistore MN

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

$V_{TH} = 0.7V$

$\lambda \simeq 0$

$R_1 = 690k\Omega$

$R_2 = 300k\Omega$

$R_3 = 20k\Omega$

$C = 10\text{pF}$

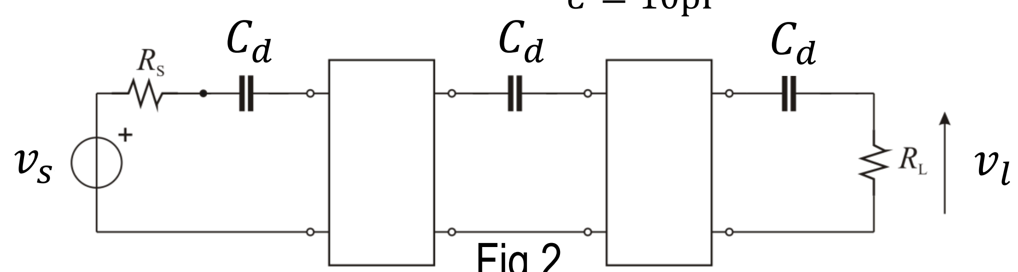
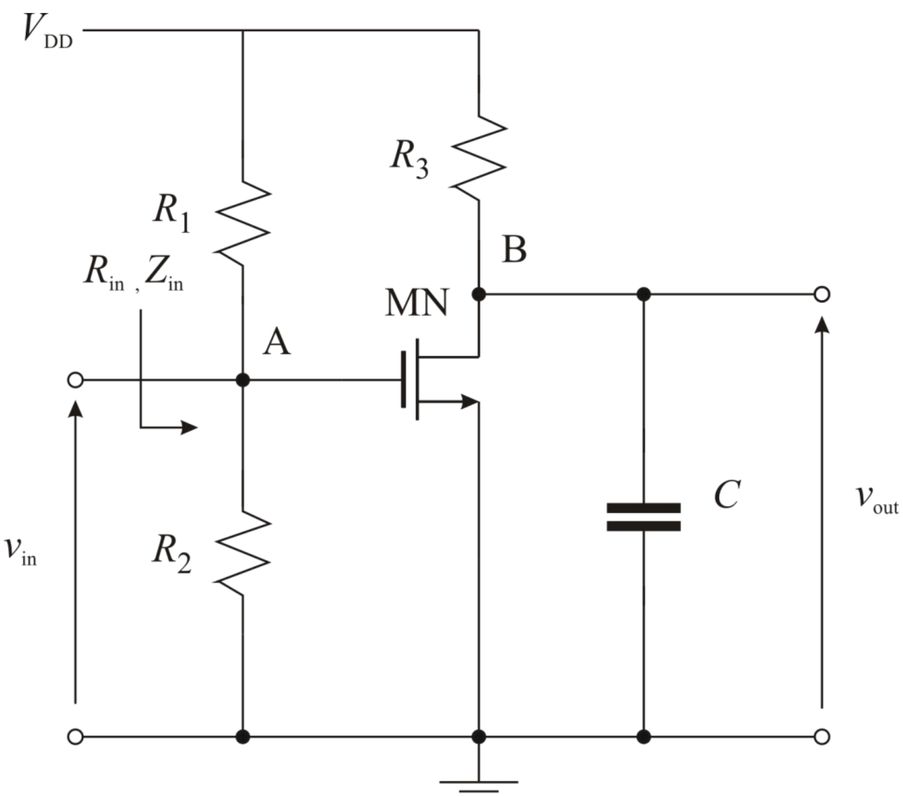


Fig.2

Esercizio

- Determinare la regione di funzionamento di MN e la corrente di *drain* nel punto di funzionamento a riposo.



Tensioni ai nodi in DC

$$V_A = 1V$$
$$V_B = 1.5V$$
$$V_{DD} = 3.3V$$

Transistore MN

$$\beta = 2\mathrm{mA/V}^2$$
$$V_{TH} = 0.7V$$
$$\lambda \simeq 0$$

$$R_1 = 690k\Omega$$
$$R_2 = 300k\Omega$$
$$R_3 = 20k\Omega$$

Dalle tensioni ai nodi si ricava subito che:

$$V_{GS} = V_A = 1V > V_{TH}$$
$$V_{DS} = V_B = 1.5V > V_{GS} - V_{TH} = 0.3V$$

Regione di funzionamento: SATURAZIONE

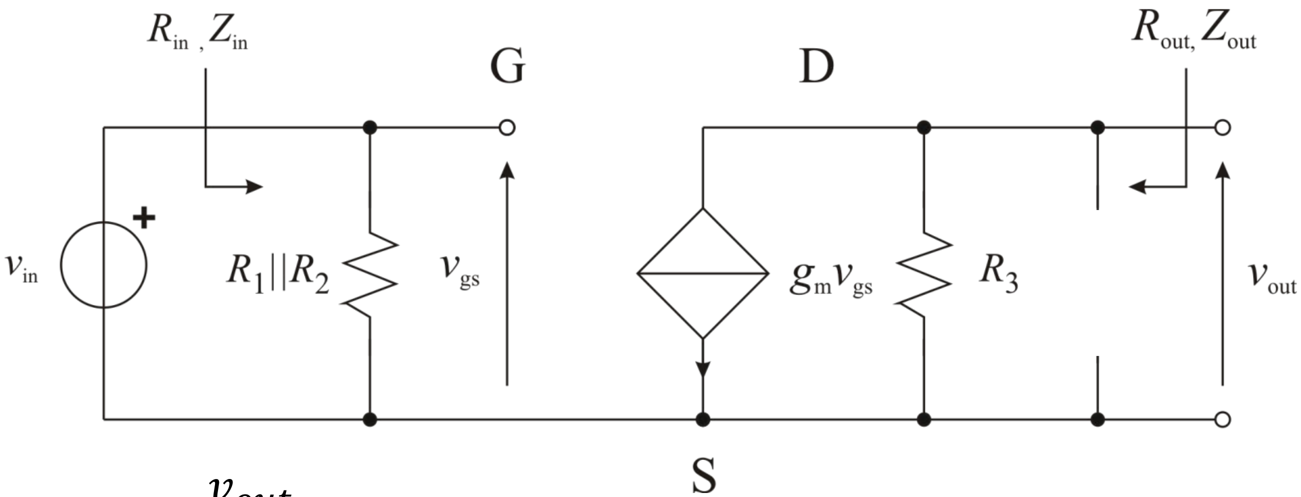
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_B}{R_3} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_{TH})^2 = 90\mu A$$

Per il punto successivo, si ricavano i parametri dell'equivalente per il piccolo segnale di MN:

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 600\mu S \qquad g_o = \frac{1}{r_o} \simeq \lambda I_D = 0$$

Esercizio

- Determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale, considerando C come un circuito aperto..



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 600\mu S$$

$$g_o = 0$$

$$R_1 = 690k\Omega$$
$$R_2 = 300k\Omega$$
$$R_3 = 20k\Omega$$

Si tratta di un stadio source comune

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$v_{gs} = v_{in}$$

$$v_{out} = -g_m v_{gs} R_3 = -g_m R_3 v_{in}$$

$$R_{in} = \frac{v_{t,in}}{i_{t,in}} = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{out} = \frac{v_{t,out}}{i_{t,out}} = R_3 = 20k\Omega$$

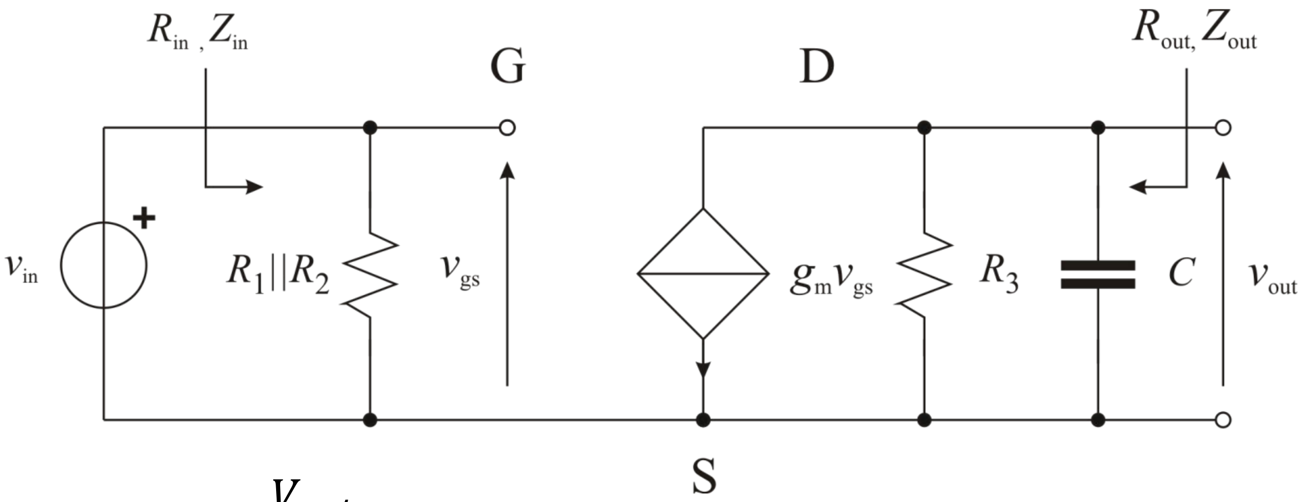
$$\boxed{A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m R_3 = -6 \ \ (15\text{dB})}$$

$$\boxed{R_{in} = R_1 \parallel R_2 = 209k\Omega}$$

$$\boxed{R_{out} = R_3 = 20k\Omega}$$

Esercizio

- Determinare le funzioni di trasferimento $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$, $Z_{in}(s)$ ed $Z_{out}(s)$ in condizioni di piccolo segnale.



$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 600\mu S$$

$$g_o = 0$$

$$R_1 = 690k\Omega$$
$$R_2 = 300k\Omega$$
$$R_3 = 20k\Omega$$

$$A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \qquad V_{gs} = V_{in}$$

$$V_{out} = -g_m V_{in} R_3 \parallel \frac{1}{sC}$$

$$\boxed{A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{g_m R_3}{1 + sCR_3}}$$

$$Z_{in} = \frac{V_{t,in}}{I_{t,in}} = R_1 \parallel R_2$$

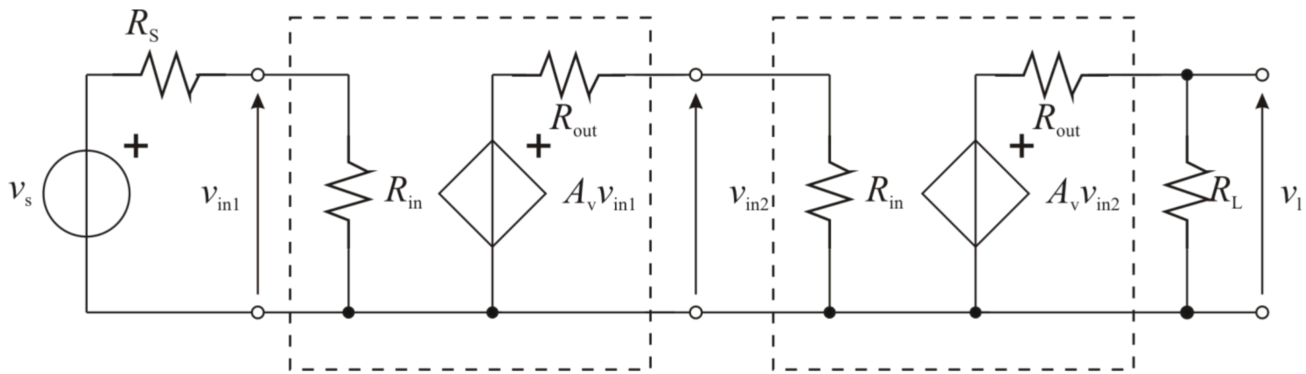
$$\boxed{Z_{in} = R_1 \parallel R_2}$$

$$Z_{out} = \frac{V_{t,out}}{I_{t,out}} = R_3 \parallel \frac{1}{sC}$$

$$\boxed{Z_{out} = \frac{R_3}{1 + sCR_3}}$$

Esercizio

- Determinare $A_{vl} = \frac{v_l}{v_s}$ nella banda del segnale (nel disegnare il circuito, i condensatori di accoppiamento sono stati sostituiti con un corto circuito e gli amplificatori sono descritti dal doppio bipolo equivalente



parametri del modello a doppio bipolo dello stadio analizzato

$$A_v = -6$$
$$R_{in} = 209k\Omega$$
$$R_{out} = 20k\Omega$$

$$R_s = 50k\Omega$$
$$R_L = 20k\Omega.$$

$$v_{in1} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} v_s$$

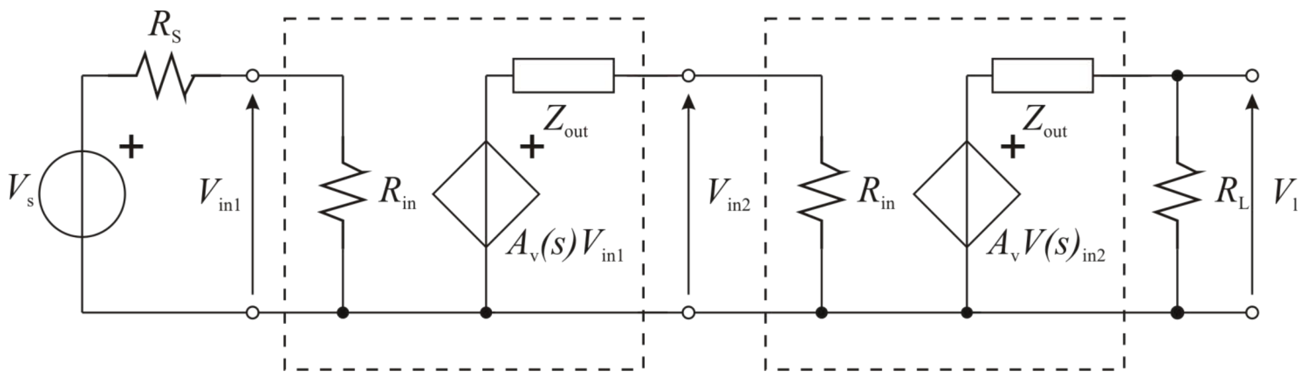
$$v_{in2} = A_v v_{in1} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{out}}$$

$$v_l = A_v v_{in2} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$$

$$\boxed{A_{vl} = A_v^2 \frac{R_L}{R_L + R_{out}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{out}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} = 36 \cdot 0.5 \cdot 0.912 \cdot 0.807 = 13.2\ (22\text{dB})}$$

Esercizio

- Determinare $A_{vl}(s) = \frac{V_l}{V_s}$ e tracciarne i diagrammi di Bode (i condensatori C_d sono già stati sostituiti con corto circuiti)



parametri del modello a doppio bipolo dello stadio analizzato

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_3}{1 + sCR_3}$$

$$Z_{in} = R_{in} = R_1 \parallel R_2$$

$$Z_{out} = \frac{R_3}{1 + sCR_3}$$

$$R_s = 50k\Omega$$
$$R_L = 20k\Omega.$$

$$V_{in1} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} V_s$$

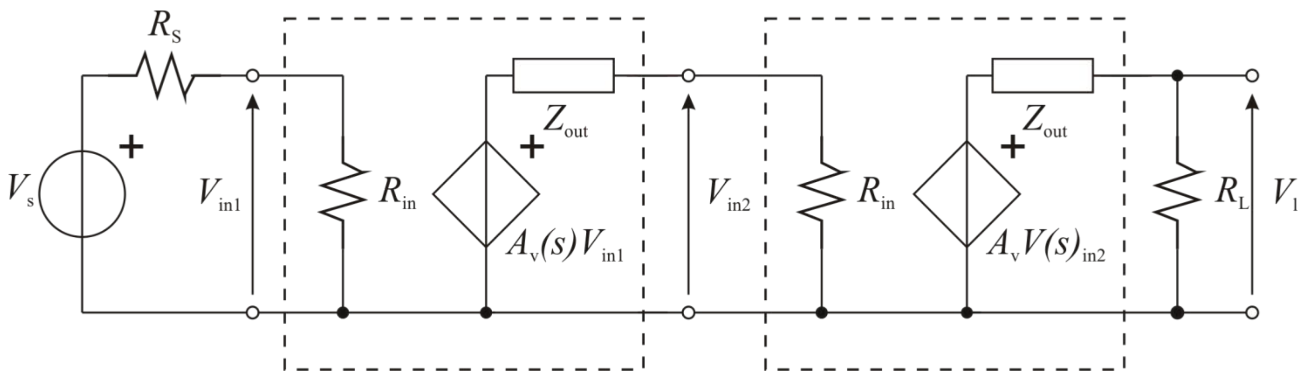
$$V_{in2} = A_v(s) V_{in1} \frac{R_{in}}{R_{in} + Z_{out}}$$

$$V_l = A_v(s) V_{in1} \frac{R_L}{R_{in} + Z_{out}}$$

$$\boxed{A_{vl}(s) = A_v^2(s) \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \frac{R_{in}}{R_{in} + Z_{out}} \frac{R_L}{R_{in} + Z_{out}}}$$

Esercizio

- Determinare $A_{vl}(s) = \frac{V_l}{V_s}$ e tracciarne i diagrammi di Bode (i condensatori C_d sono già stati sostituiti con corto circuiti)



parametri del modello a doppio bipolo dello stadio analizzato

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_3}{1 + sCR_3}$$

$$Z_{in} = R_{in} = R_1 \parallel R_2$$

$$Z_{out} = \frac{R_3}{1 + sCR_3}$$

$$C = 10\text{pF}$$
$$R_3 = 20k\Omega$$
$$R_s = 50k\Omega$$
$$R_L = 20k\Omega.$$

$$A_{vl}(s) = A_v^2(s)\frac{R_{in}}{R_{in}+R_s}\frac{R_{in}}{R_{in}+Z_{out}}\frac{R_L}{R_L+Z_{out}}$$

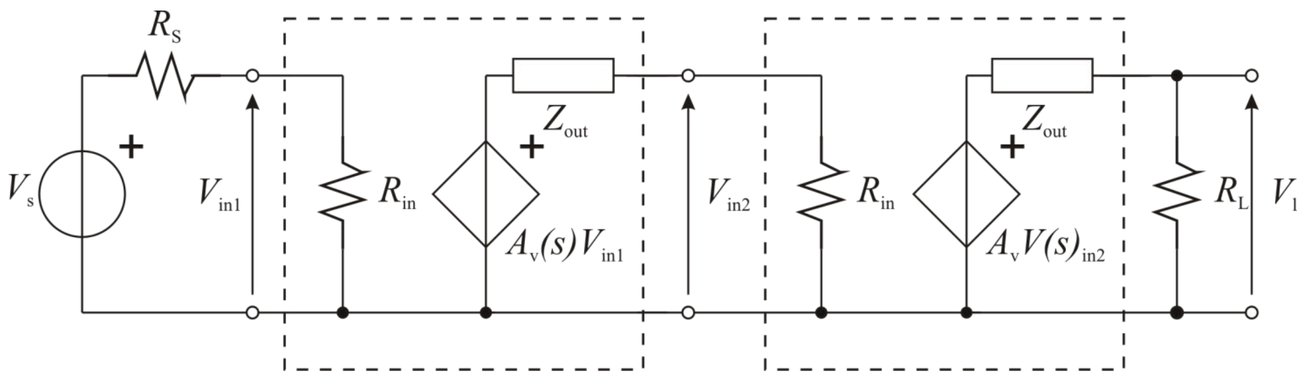
$$A_{vl}(s) = \frac{(g_m R_3)^2}{(1+sCR_3)^2}\frac{R_{in}}{R_{in}+R_s}\frac{R_{in}}{R_{in}+\frac{R_3}{1+sCR_3}}\frac{R_L}{R_L+\frac{R_3}{1+sCR_3}}$$

$$A_{vl}(s) = \frac{(g_m R_3 R_{in})^2 R_L}{R_{in}+R_s}\frac{1}{R_{in}+R_3+sCR_3R_{in}}\frac{1}{R_L+R_3+sCR_3R_L}$$

$$A_{vl}(s) = \frac{(g_m R_3 R_{in})^2 R_L}{(R_{in}+R_s)(R_{in}+R_3)(R_L+R_3)}\frac{1}{1+\frac{sCR_3R_{in}}{R_{in}+R_3}}\frac{1}{1+\frac{sCR_3R_L}{R_L+R_3}} = \frac{k}{\left(1-\frac{s}{s_{p1}}\right)\left(1-\frac{s}{s_{p2}}\right)}$$

Esercizio

- Determinare $A_{vl}(s)=\frac{V_l}{V_s}$ e tracciarne i diagrammi di Bode (i condensatori C_d sono già stati sostituiti con corto circuiti)



$R_{in}=209k\Omega$
$R_s=50k\Omega$
$R_L=20k\Omega$
$R_3=20k\Omega$
$C=10\text{pF}$

$$A_{vl}(s)=\frac{(g_mR_3R_{in})^2R_L}{(R_{in}+R_s)(R_{in}+R_3)(R_L+R_3)}\frac{1}{1+sC(R_3\|R_{in})}\frac{1}{1+sC(R_3\|R_L)}=\frac{k}{\left(1-\frac{s}{s_{p1}}\right)\left(1-\frac{s}{s_{p2}}\right)}$$

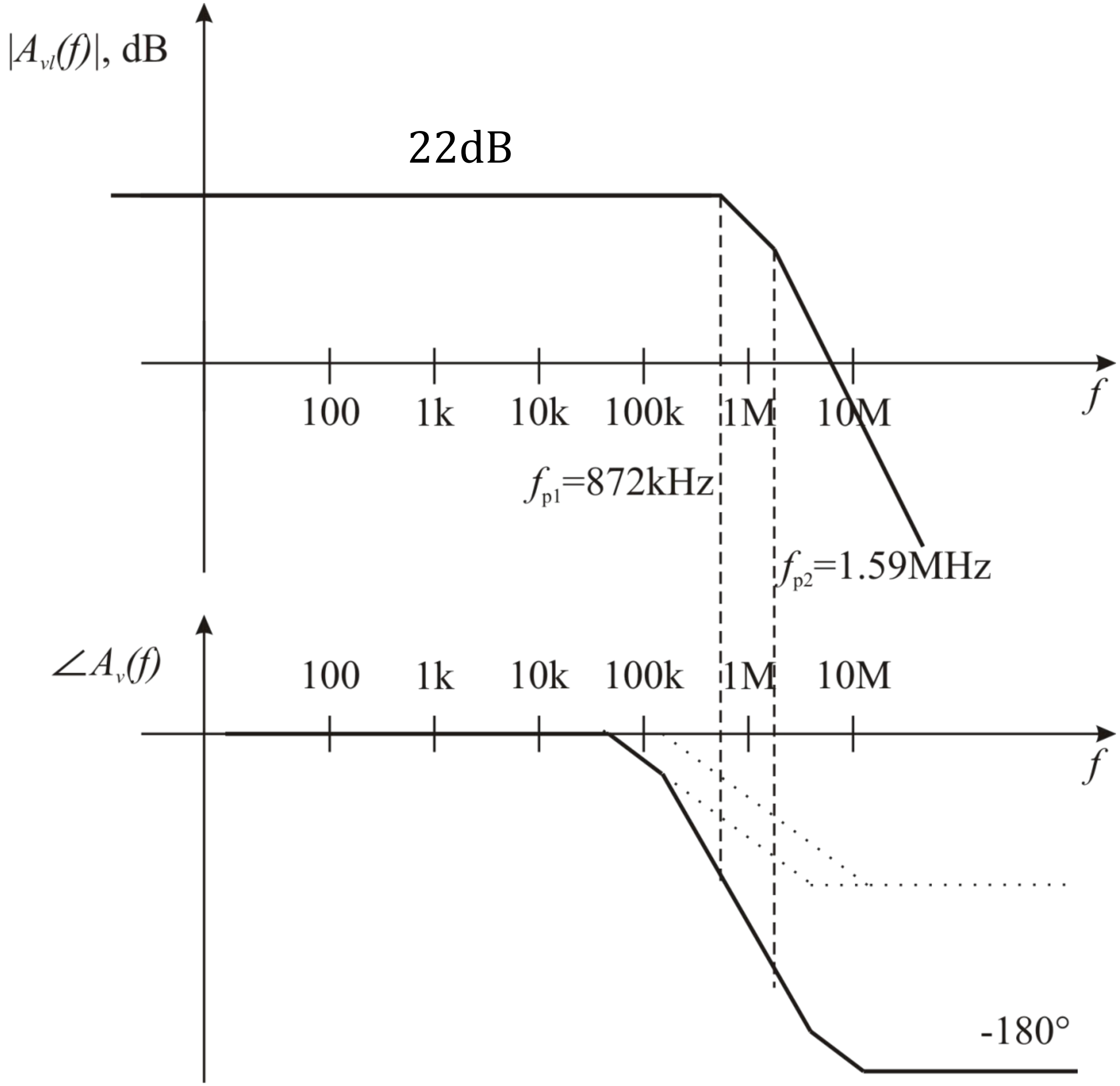
Funzione di trasferimento con due poli reali negativi

$$k=\frac{(g_mR_3R_{in})^2R_L}{(R_{in}+R_s)(R_{in}+R_3)(R_L+R_3)}=A_{vl}(0)=13.2$$

$$s_{p1}=-\frac{1}{C(R_3\|R_{in})}=-5.48\cdot 10^6\ \text{rad/s}\qquad f_{p1}=\frac{|s_{p1}|}{2\pi}=872\text{kHz}$$

$$s_{p2}=-\frac{1}{C(R_3\|R_L)}=-10^7\ \text{rad/s}\qquad f_{p2}=\frac{|s_{p2}|}{2\pi}=1.59\text{MHz}$$

Esercizio



$$A_{vl}(s) = \frac{k}{\left(1 - \frac{s}{s_{p1}}\right)\left(1 - \frac{s}{s_{p2}}\right)}$$

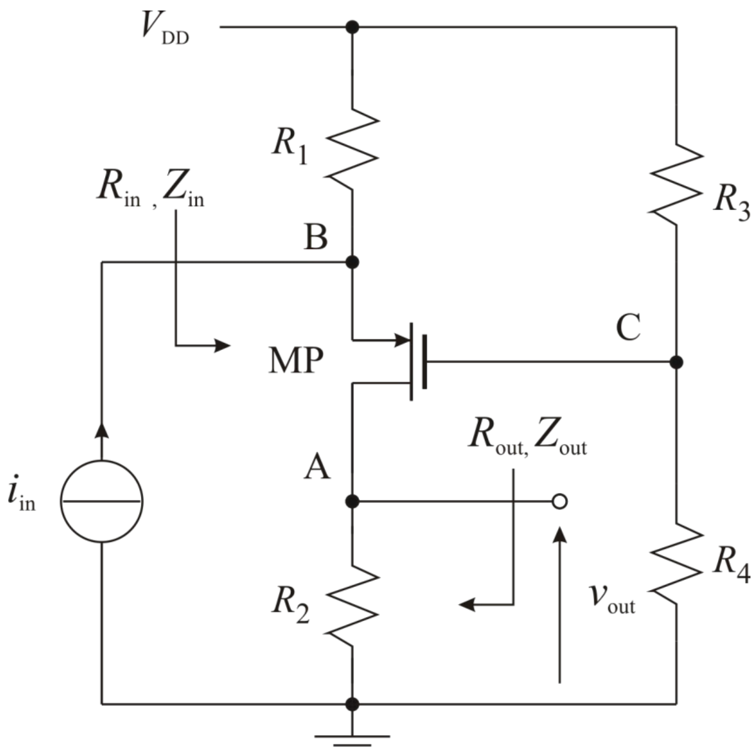
$$f_{p1} = \frac{|s_{p1}|}{2\pi} = 872\text{kHz}$$

$$f_{p2} = \frac{|s_{p2}|}{2\pi} = 1.59\text{MHz}$$

$$k = A_{vl}(0) = 13.2\ (22\text{dB})$$

Esercizio 2

- Determinare la regione di funzionamento di MP e la corrente di *drain* nel punto di funzionamento a riposo.
- Determinare $R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale.
- Con riferimento ai parametri R_m, R_{in} ed R_{out} ricavati al punto precedente, descrivere lo stesso amplificatore in termini dei parametri A_v, R_{in} ed R_{out} (ampl. di tensione) e A_i, R_{in} ed R_{out} (ampl. di corrente).
- Supponendo che l'amplificatore sia collegato ad una sorgente con resistenza interna $R_s = 1M\Omega$ e che piloti un carico con $R_L = 10\Omega$ (accoppiati in AC così da non influenzare la polarizzazione), quale tra le tre descrizioni (quella originale e le due ricavate al punto precedente) è più appropriata dal punto di vista degli effetti di carico?



Tensioni ai nodi in DC

$V_A = 2.5V$
$V_B = 4.5V$
$V_C = 3.8V$
$V_{DD} = 5V$

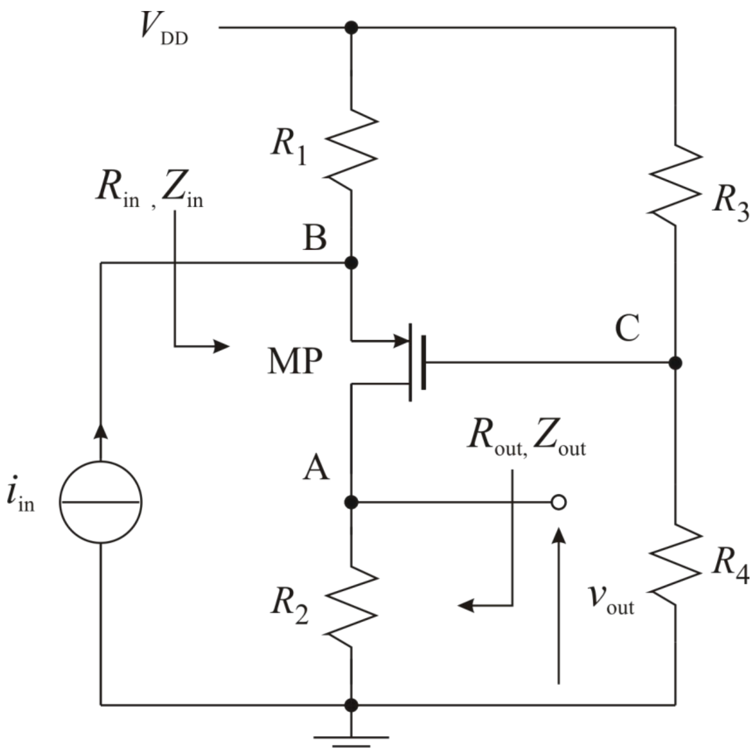
Transistore MP

$\beta = 2\text{mA/V}^2$
$V_{TH} = 0.5V$
$\lambda \simeq 0$

$R_1 = 12.5k\Omega$
$R_2 = 62.5k\Omega$
$R_3 = 120k\Omega$
$R_4 = 380k\Omega$

Esercizio

- Determinare la regione di funzionamento di MP e la corrente di drain nel punto di funzionamento a riposo..



$R_1 = 12.5k\Omega$
$R_2 = 62.5k\Omega$
$R_3 = 120k\Omega$
$R_4 = 380k\Omega$

Tensioni ai nodi in DC
$V_A = 2.5V$
$V_B = 4.5V$
$V_C = 3.8V$
$V_{DD} = 5V$

Transistore MP
$\beta = 2\mathrm{mA/V^2}$
$V_{TH} = 0.5V$
$\lambda \simeq 0$

Dalle tensioni ai nodi si ricava subito che:

$$V_{SG} = V_B - V_C = 0.7V > V_{TH} = 0.5V$$
$$V_{SD} = V_B - V_A = 2V > V_{GS} - V_{TH} = 0.2V$$

Regione di funzionamento: SATURAZIONE

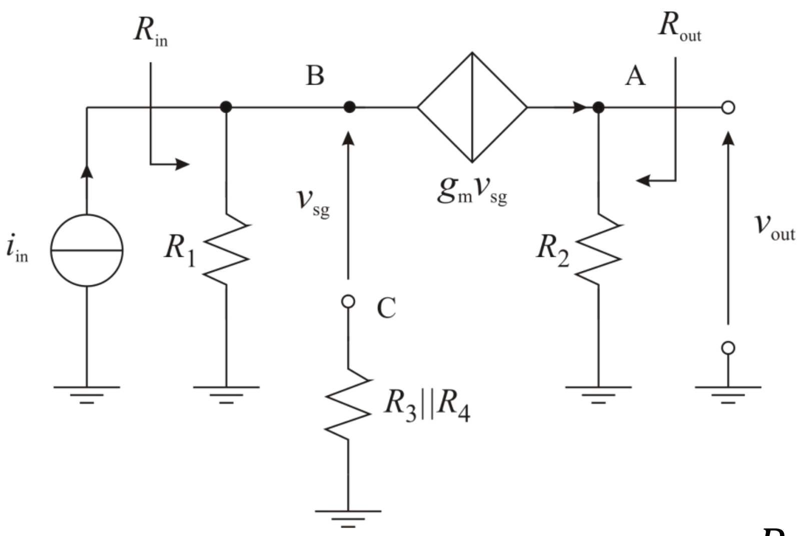
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_B}{R_1} = \frac{\beta}{2}(V_{SG} - V_{TH})^2 = 40\mu A$$

Per il punto successivo, si ricavano i parametri dell'equivalente per il piccolo segnale di MN:

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 400\mu S \qquad g_o = \frac{1}{r_o} \simeq \lambda I_D = 0$$

Esercizio

- Determinare $R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale.



$R_1 = 12.5k\Omega \quad g_m = 400\mu S$

$R_2 = 62.5k\Omega$

$R_3 = 120k\Omega$

$R_4 = 380k\Omega$

Si tratta di un stadio *gate comune*

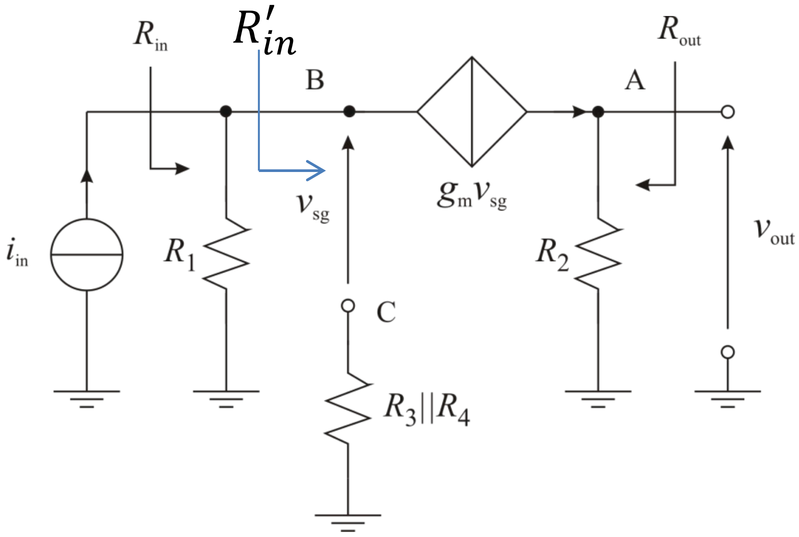
$$v_{sg} = R_1(i_{in} - g_m v_{sg}) \qquad v_{sg} = \frac{R_1 i_{in}}{1 + g_m R_1}$$

$$v_{sg}(1 + g_m R_1) = R_1 i_{in} \qquad v_{out} = g_m v_{sg} R_2 = \frac{g_m R_1 R_2}{1+g_m R_1} i_{in}$$

$$\boxed{R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}} = \frac{g_m R_1 R_2}{1 + g_m R_1} = 52.1k\Omega}$$

Esercizio

- Determinare $R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale.



$R_1 = 12.5k\Omega$ $\quad g_m = 400\mu S$
$R_2 = 62.5k\Omega$
$R_3 = 120k\Omega$
$R_4 = 380k\Omega$

$$R_{in} = R_1 \parallel R'_{in}$$

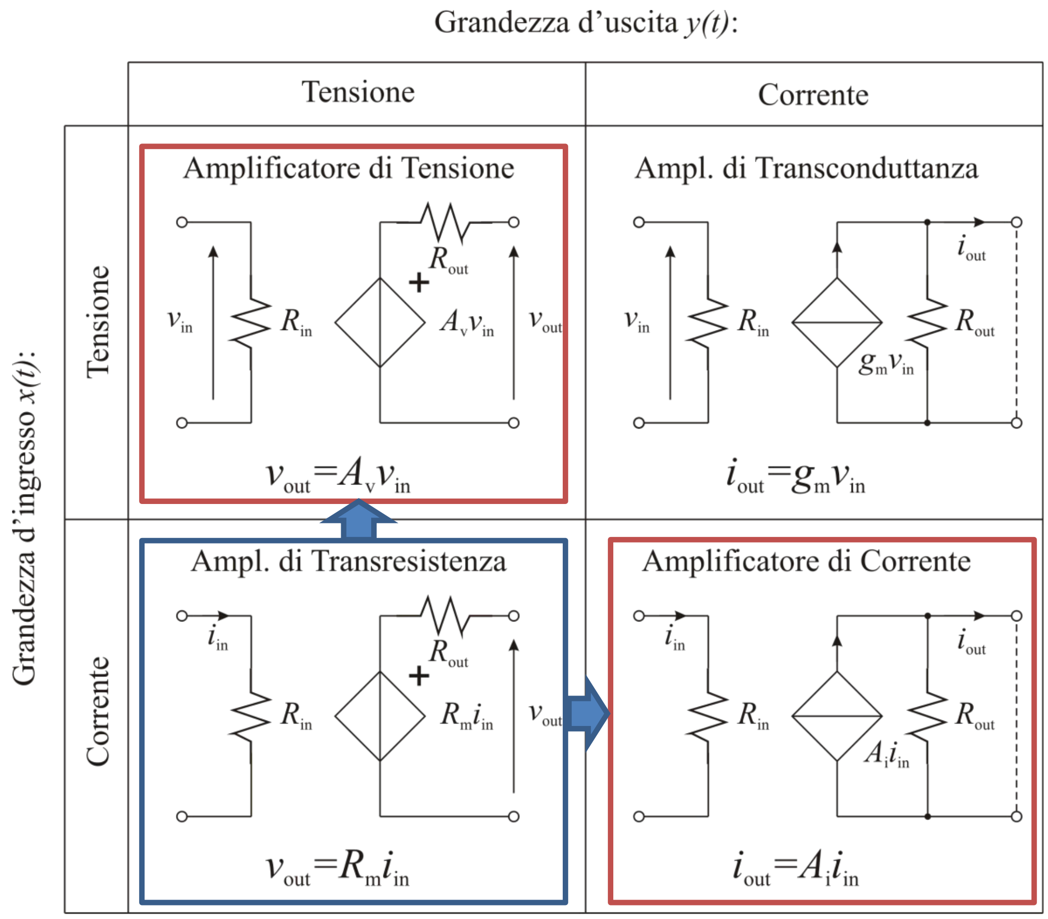
$$R'_{in} = \frac{v'_t}{i'_t} = \frac{1}{g_m}$$

$$\boxed{R_{in} = \frac{1}{g_m} \parallel R_1 = 2.08k\Omega}$$

$$\boxed{R_{out} = R_2 = 62.5k\Omega}$$

Esercizio

- Con riferimento ai parametri R_m, R_{in} ed R_{out} ricavati al punto precedente, descrivere lo stesso amplificatore in termini dei parametri A_v, R_{in} ed R_{out} (ampl. di tensione) e A_i, R_{in} ed R_{out} (ampl. di corrente).



Esercizio

- Con riferimento ai parametri R_m, R_{in} ed R_{out} ricavati al punto precedente, descrivere lo stesso amplificatore in termini dei parametri A_v, R_{in} ed R_{out} (propri dell'ampl. di tensione) e A_i, R_{in} ed R_{out} (propri dell'ampl. di corrente).

Osservando le rappresentazioni con doppi bipoli equivalenti riportati nella slide precedente

Rappresentazione come Amplificatore di Transresistenza

$$R_m = 52.1k\Omega$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Si osserva che

$$v_{in} = R_{in} i_{in}$$

$$v_{out} = R_m i_{in}$$

Rappresentazione come Amplificatore di Tensione

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_m}{R_{in}} = 25$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Rappresentazione come Amplificatore di Transresistenza

$$R_m = 52.1k\Omega$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Bipolo Thévenin → Bipolo Norton alla porta d'uscita

$$i_{out} = \frac{v_{out}}{R_{out}}$$

$$v_{out} = R_m i_{in}$$

Rappresentazione come Amplificatore di Corrente

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{R_m}{R_{out}} = 0.83$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Esercizio

- Supponendo che l'amplificatore sia collegato ad una sorgente con resistenza interna $R_s = 1M\Omega$ e che piloti un carico con $R_L = 10\Omega$ (accoppiati in AC così da non influenzare la polarizzazione), quale tra le tre descrizioni (quella originale e le due ricavate al punto precedente) è più appropriata dal punto di vista degli effetti di carico?

Rappresentazione come Amplificatore di Transresistenza

$$R_m = 52.1k\Omega$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Si osserva che

$$v_{in} = R_{in} i_{in}$$
$$v_{out} = R_m i_{in}$$

Rappresentazione come Amplificatore di Tensione

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_m}{R_{in}} = 25$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Rappresentazione come Amplificatore di Transresistenza

$$R_m = 52.1k\Omega$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

Bipolo Thévenin → Bipolo Norton alla porta d'uscita

$$i_{out} = \frac{v_{out}}{R_{out}}$$
$$v_{out} = R_m i_{in}$$

Rappresentazione come Amplificatore di Corrente

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{R_m}{R_{out}} = 0.83$$
$$R_{in} = 2.08k\Omega$$
$$R_{out} = 62.5k\Omega$$

$$R_{in} = 2.08k\Omega \ll R_s = 1M\Omega$$

Per il valore di R_s dato, l'ingresso è un buon **ingresso in corrente**

$$R_{out} = 62.5k\Omega \gg R_L = 10\Omega$$

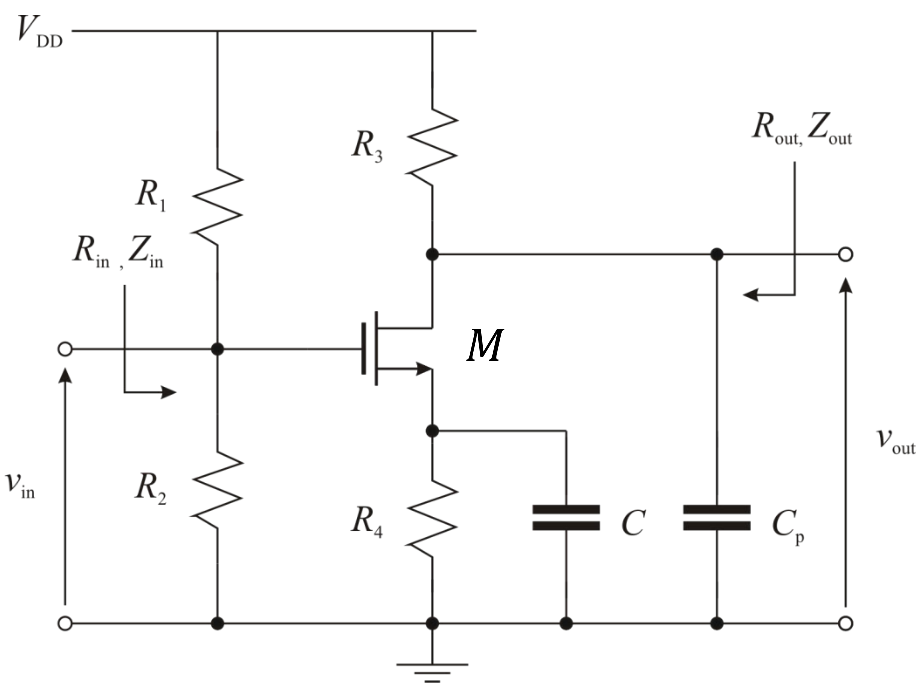
Per il valore di R_L dato, l'uscita è una buona **uscita in corrente**

Nel caso considerato, l'amplificatore si comporta come **amplificatore di corrente**

Esercizio 3

Nello stadio amplificatore in figura, la corrente di *drain* di *M* nel punto di funzionamento a riposo è di $20\mu A$.

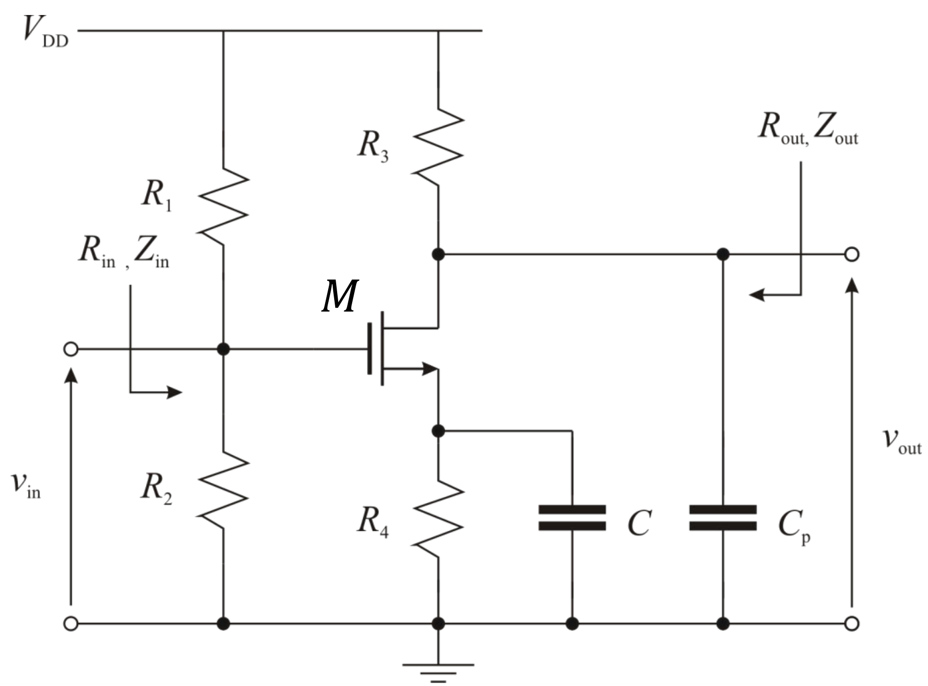
- Si verifichi il funzionamento del transistore nMOS in regione di saturazione
- Si determinino R_{in}, R_{out} e $A_{v0} = \frac{v_{out}}{v_{in}}$ in banda (in banda C può considerarsi come un corto circuito, C_p come un circuito aperto)
- Si determinino Z_{in}, Z_{out} e $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ nel dominio della frequenza e se ne traccino i diagrammi di Bode in modulo e fase.



$V_{DD} = 3.3\text{V}$
$V_{TH} = 450\text{mV}$
$\beta = 1\text{mA/V}^2$
$\lambda \simeq 0$
$I_D = 20\mu\text{A}$
$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$
$R_3 = 100\text{k}\Omega$
$R_4 = 50\text{k}\Omega$
$C = 100\text{nF}$
$C_p = 50\text{pF}$

Esercizio

- Si verifichi il funzionamento del transistore nMOS in regione di saturazione



$V_{DD} = 3.3\text{V}$
$V_{TH} = 450\text{mV}$
$\beta = 1\text{mA/V}^2$
$\lambda \simeq 0$
$I_D = 20\mu\text{A}$
$R_3 = 100\text{k}\Omega$
$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$
$R_4 = 50\text{k}\Omega$
$C = 100\text{nF}$
$C_p = 50\text{pF}$

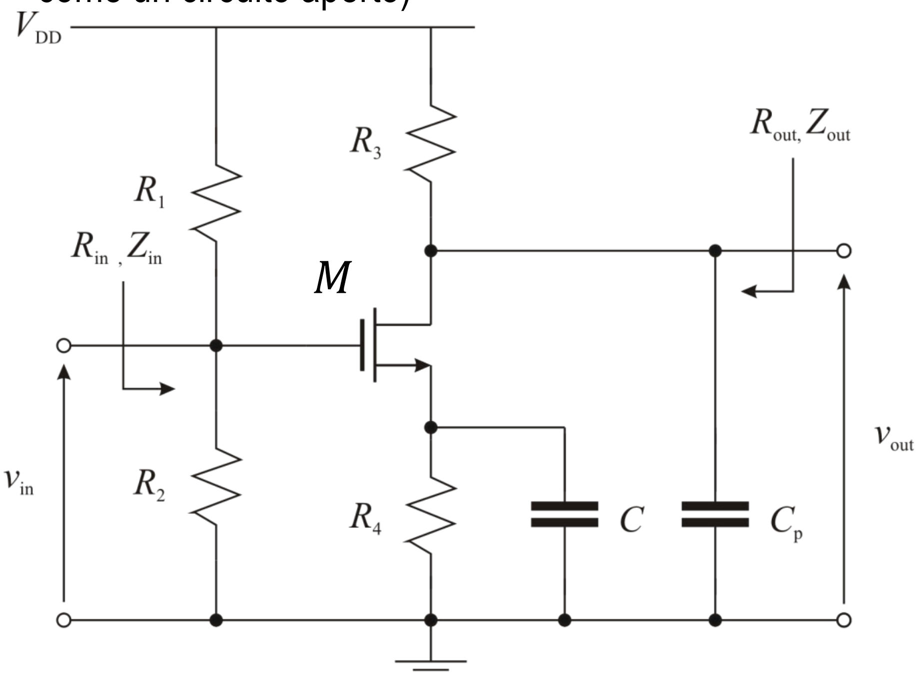
$$V_{GS} = V_{DD}\frac{R_2}{R_2 + R_1} - R_4 I_D = 1.15V > V_{TH}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - R_3 I_D - R_4 I_D = 1.8V > V_{GS} - V_{TH} = 0.7V$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 200\mu S \qquad g_o = \lambda I_D \simeq 0$$

Esercizio

- Si determinino R_{in}, R_{out} e $A_{v0} = \frac{v_{out}}{v_{in}}$ in banda (in banda C può considerarsi come un corto circuito, C_p come un circuito aperto)



$V_{DD} = 3.3\text{V}$

$V_{TH} = 450\text{mV}$

$\beta = 1\text{mA/V}^2$

$\lambda \simeq 0$

$I_D = 20\mu\text{A}$

$R_3 = 100\text{k}\Omega$

$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$

$R_4 = 50\text{k}\Omega$

$C = 100\text{nF}$

$C_p = 50\text{pF}$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 200\mu S$$

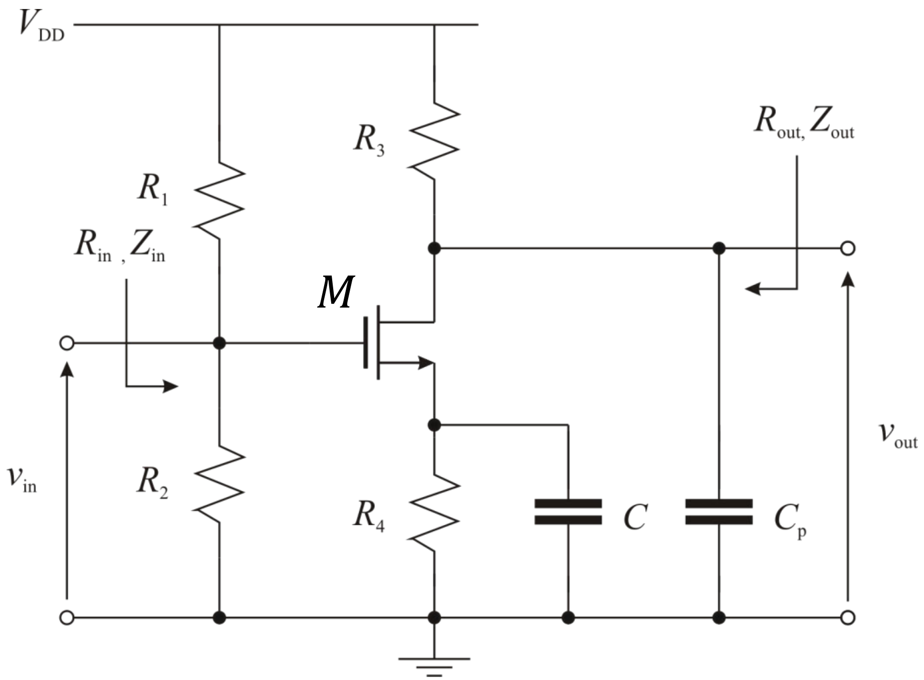
$$\boxed{A_{v0} = -g_m R_3 = -20\ (26\text{dB})}$$

$$\boxed{R_{in} = R_1 \parallel R_2 = 110k\Omega}$$

$$\boxed{R_{out} = R_3 = 100k\Omega}$$

Esercizio

- Si determinino $Z_{in}(s)$ $Z_{out}(s)$ e $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e se ne traccino i diagrammi di Bode in modulo e fase.



$V_{DD} = 3.3\text{V}$

$V_{TH} = 450\text{mV}$

$\beta = 1\text{mA/V}^2$

$\lambda \simeq 0$

$I_D = 20\mu\text{A}$

$R_3 = 100\text{k}\Omega$

$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$

$R_4 = 50\text{k}\Omega$

$C = 100\text{nF}$

$C_p = 50\text{pF}$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 200\mu S$$

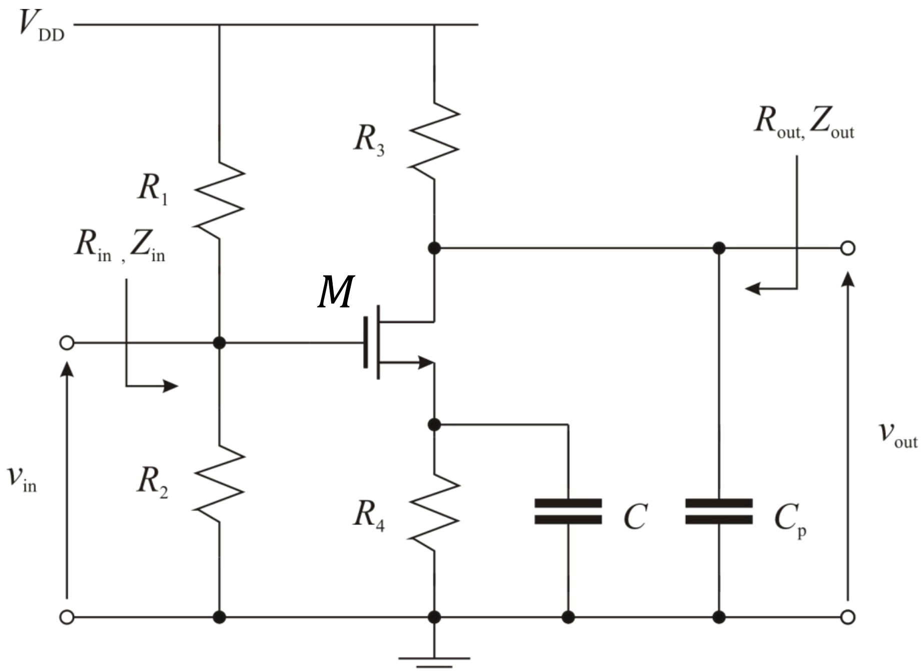
$$A_v(s) = -\frac{g_m Z_3}{1 + g_m Z_4} = -20\ (26\text{dB})$$

$$Z_3 = \frac{R_3}{1 + sC_pR_3} \qquad Z_4 = \frac{R_4}{1 + sCR_4}$$

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_3}{(1 + sC_pR_3)\left(1 + \frac{g_m R_4}{1 + sCR_4}\right)} = -\frac{g_m R_3 (1 + sCR_4)}{(1 + sC_pR_3)(1 + g_m R_4 + sCR_4)}$$

Esercizio

- Si determinino $Z_{in}(s)$ $Z_{out}(s)$ e $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e se ne traccino i diagrammi di Bode in modulo e fase.



$V_{DD} = 3.3\text{V}$
$V_{TH} = 450\text{mV}$
$\beta = 1\text{mA/V}^2$
$\lambda \simeq 0$
$I_D = 20\mu\text{A}$
$R_3 = 100\text{k}\Omega$
$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$
$R_4 = 50\text{k}\Omega$
$C = 100\text{nF}$
$C_p = 50\text{pF}$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 200\mu S$$

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_3}{(1 + sC_pR_3)\left(1 + \frac{g_m R_4}{1 + sCR_4}\right)} = -\frac{g_m R_3 (1 + sCR_4)}{(1 + sC_pR_3)(1 + g_m R_4 + sCR_4)}$$

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_3}{1 + g_m R_4}\frac{(1 + sCR_4)}{(1 + sC_pR_3)\left(1 + \frac{sCR_4}{1 + g_m R_4}\right)} = \frac{k\left(1 - \frac{s}{s_z}\right)}{\left(1 - \frac{s}{s_{p1}}\right)\left(1 - \frac{s}{s_{p2}}\right)}$$

Esercizio

- Determinare la funzione di trasferimento $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e tracciarne i diagrammi di Bode in modulo e fase.

$$\boxed{A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{g_m R_3}{1 + g_m R_4} \frac{(1 + sCR_4)}{(1 + sC_p R_3)\left(1 + \frac{sCR_4}{1 + g_m R_4}\right)}}$$

$R_3 = 100\text{k}\Omega$
$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$
$R_4 = 50\text{k}\Omega$
$C = 100\text{nF}$
$C_p = 50\text{pF}$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 200\mu S$$

$$A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k\left(1 - \frac{s}{s_z}\right)}{\left(1 - \frac{s}{s_{p1}}\right)\left(1 - \frac{s}{s_{p2}}\right)}$$

Funzione di trasferimento con due poli reali negativi e uno zero reale negativo

$$k = A_v(0) = -\frac{g_m R_3}{1 + g_m R_4} = -1.8\ (5.2\text{dB})$$

NB: *k* negativo → fase di 180° per $f \to 0$

$$s_z = -\frac{1}{CR_4} = -200\ \text{rad/s}$$

$$f_z = \frac{|s_z|}{2\pi} = 31.8\text{Hz}$$

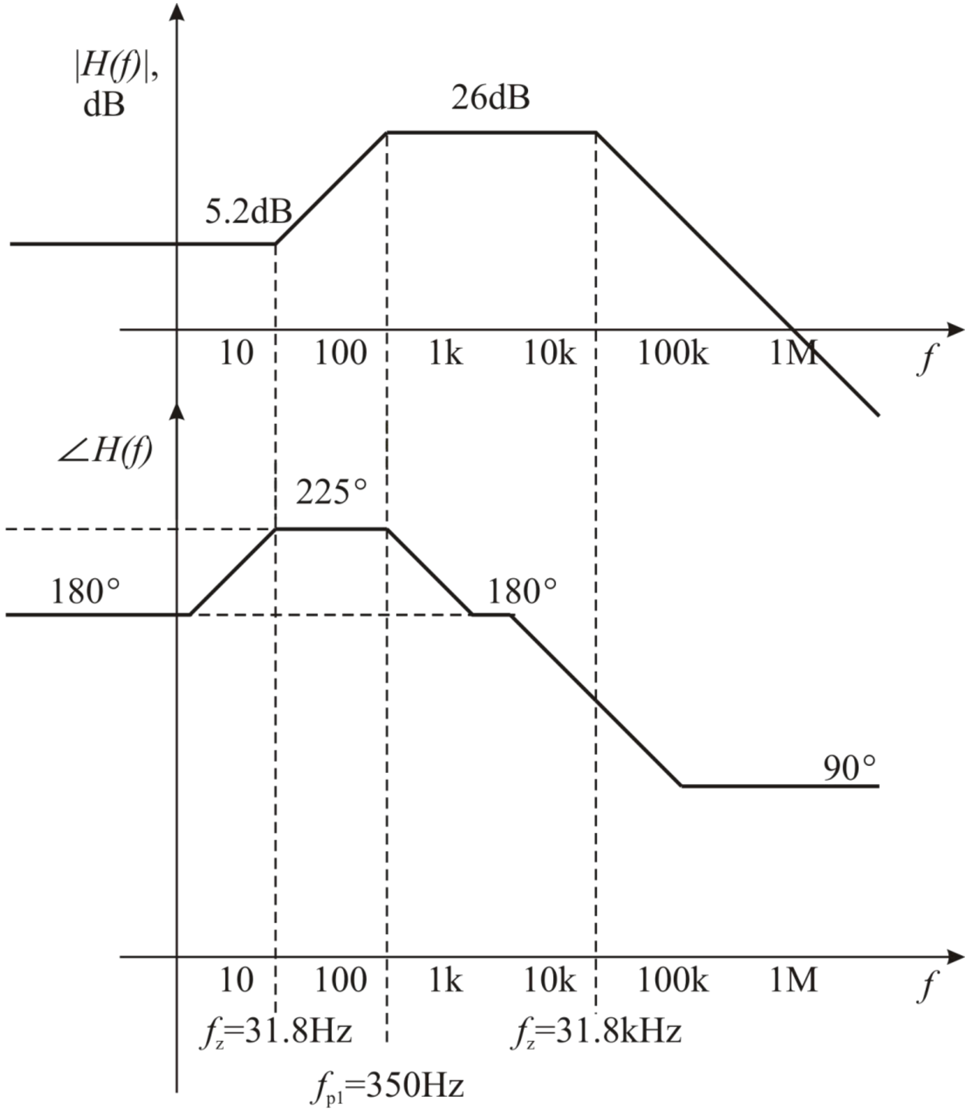
$$s_{p1} = -\frac{1 + g_m R_4}{C_p R_4} = -2.2\ \text{rad/ms}$$

$$f_{p1} = \frac{|s_{p1}|}{2\pi} = 350\text{Hz}$$

$$s_{p2} = -\frac{1}{C_p R_3} = -0.2\ \text{rad/}\mu\text{s}$$

$$f_{p2} = \frac{|s_{p2}|}{2\pi} = 31.8\text{kHz}$$

Esercizio



$$A_v(s) = \frac{k\left(1-\frac{s}{s_z}\right)}{\left(1-\frac{s}{s_{p1}}\right)\left(1-\frac{s}{s_{p2}}\right)}$$

$$k = A_v(0) = -1.8 \text{ (5.2dB)}$$

$$f_z = \frac{|s_z|}{2\pi} = 31.8\text{Hz}$$

$$f_{p1} = \frac{|s_{p1}|}{2\pi} = 350\text{Hz}$$

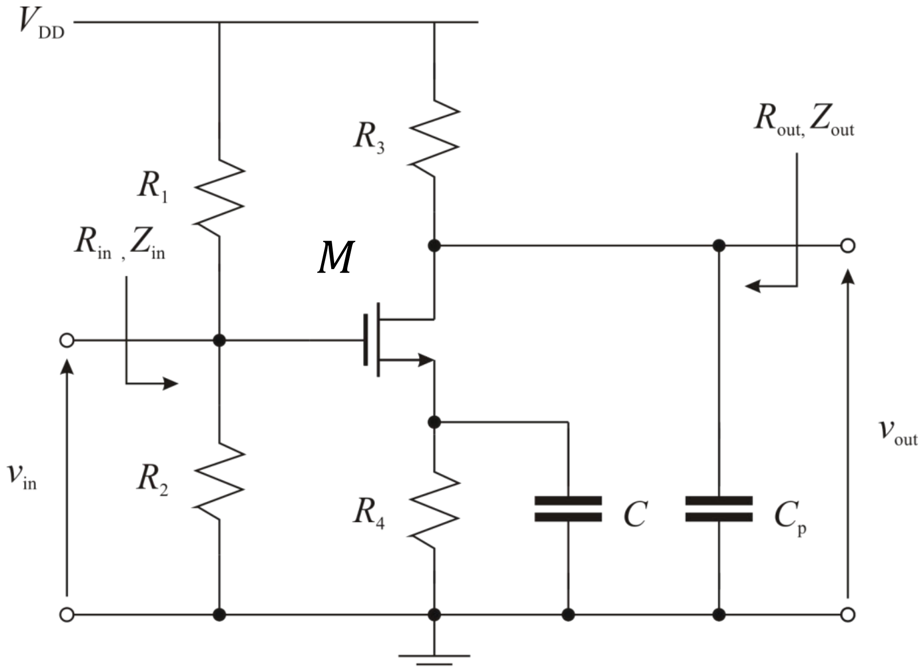
$$f_{p2} = \frac{|s_{p2}|}{2\pi} = 31.8\text{kHz}$$

Guadagno in banda $(f_z, f_{p1} < f < f_{p2})$

$$A_v = k\frac{f_{p1}}{f_z} = 20 \text{ (26dB)}$$

Esercizio

- Si determinino Z_{in}, Z_{out} e $A_v(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ nel dominio della frequenza e se ne traccino i diagrammi di Bode in modulo e fase.



$V_{DD} = 3.3\text{V}$

$V_{TH} = 450\text{mV}$

$\beta = 1\text{mA/V}^2$

$\lambda \simeq 0$

$I_D = 20\mu\text{A}$

$R_3 = 100\text{k}\Omega$

$R_1 = R_2 = 220\text{k}\Omega$

$R_4 = 50\text{k}\Omega$

$C = 100\text{nF}$

$C_p = 50\text{pF}$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 200\mu S$$

$$\boxed{Z_{in} = R_{in} = R_1 \parallel R_2 = 110k\Omega}$$

$$\boxed{Z_{out} = R_3 \parallel \frac{1}{sC_p} = \frac{R_3}{1 + sC_pR_3}}$$

Esercizio 4

- Determinare la regione di funzionamento di MN e la corrente di *drain* nel punto di funzionamento a riposo.
- Determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale.

Si supponga che lo stadio sia accoppiato in AC ad una sorgente con resistenza interna $R_s = 100k\Omega$ e ad un carico $R_L = 30k\Omega$. come in Fig.2. I condensatori C_d possono essere considerati come corto circuiti nella banda del segnale. Determinare:

- $A_{vl} = \frac{v_l}{v_s}$ nella banda del segnale.
- l'amplificazione di potenza di segnale $A_{pl} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ nella banda del segnale.
- la funzione di trasferimento $A_{vl}(s) = \frac{V_l}{V_s}$ ed i relativi diagrammi di Bode (modulo e fase), assumendo $C_d = 100\text{nF}$

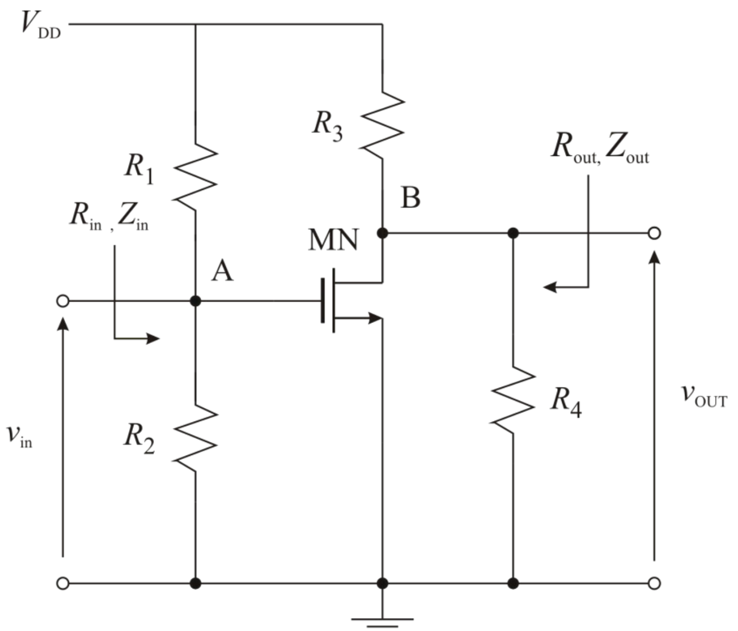


Fig.1

Tensioni ai nodi in DC

$V_A = 0.5V$

$V_B = 1.5V$

$V_{DD} = 3V$

Transistore MN

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

$V_{TH} = 0.4V$

$\lambda \simeq 0$

$R_1 = 500k\Omega$

$R_2 = 100k\Omega$

$R_3 = 10k\Omega$

$R_4 = 30k\Omega$

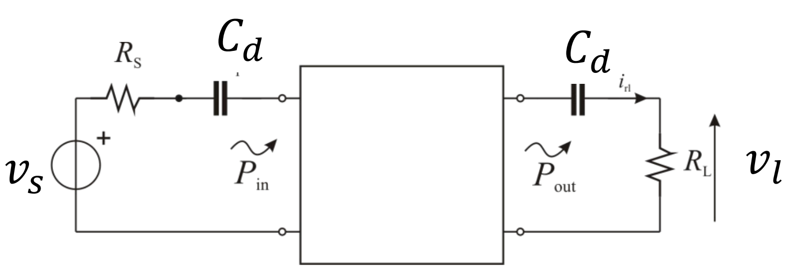
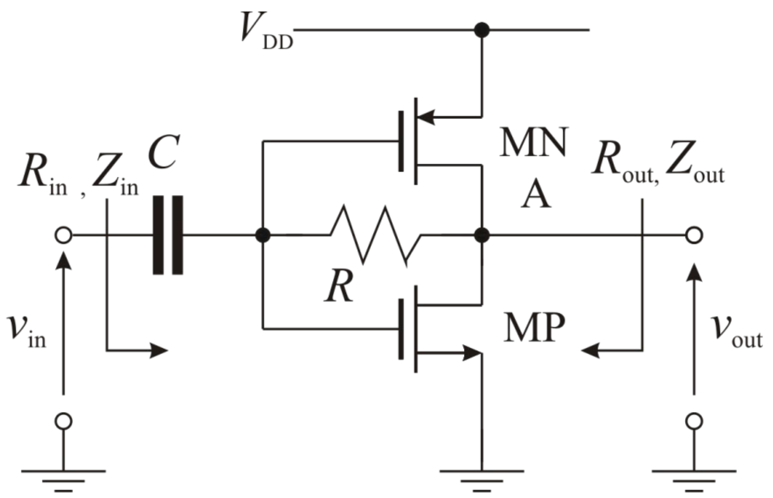


Fig.2

Esercizio 5

- Determinare la regione di funzionamento di MN e di MP e la relativa corrente di *drain* nel punto di funzionamento a riposo.
- Determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale ed assumendo che il condensatore C si comporti come un corto circuito.
- Determinare $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e tracciarne i diagrammi di Bode in modulo e fase.
- Con riferimento al circuito per il piccolo segnale e assumendo che il condensatore C si comporti come un corto circuito, valutare l'amplificazione di tensione inversa $A_{vr} = \left.\frac{v_{in}}{v_{out}}\right|_{i_{in}=0} = h_{12}$ L'amplificatore in oggetto è unidirezionale?



Tensioni ai nodi in DC

$V_A = 1.6V$

$V_{DD} = 3V$

$R_1 = 1\text{M}\Omega$

$C = 100\text{nF}$

Transistore MN

$\beta_n = 200\mu\text{A/V}^2$

$V_{TH,n} = 0.6V$

$\lambda_n = 0.01V^{-1}$

Transistore MP

$\beta_p = 200\mu\text{A/V}^2$

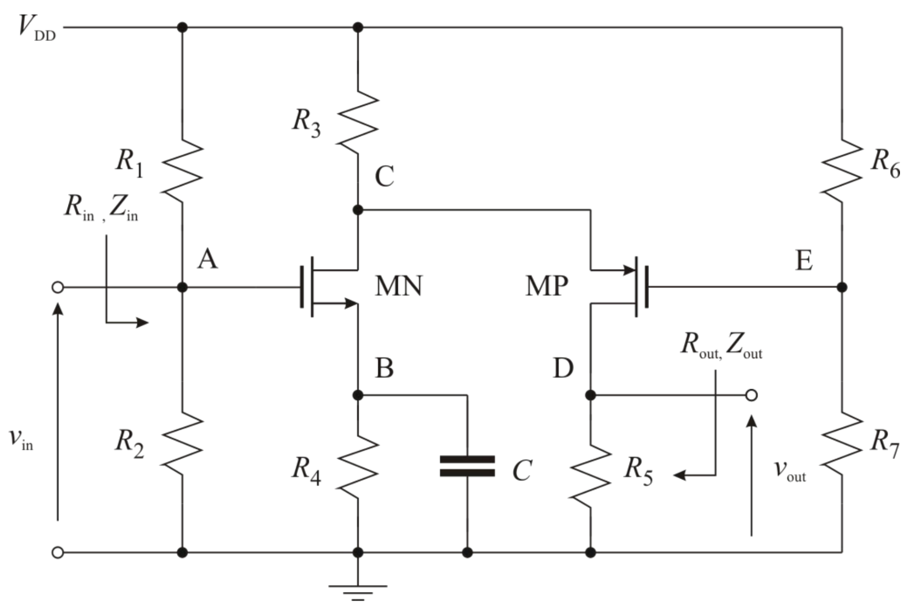
$V_{TH,p} = 0.7V$

$\lambda_p = 0.01V^{-1}$

Esercizio 6

Con riferimento al circuito in figura:

- Verificare la regione di funzionamento di MN ed MP e calcolare le rispettive correnti di *drain* nel punto di funzionamento a riposo.
- Determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale, considerando C come un corto circuito.
- Determinare la funzione di trasferimento $A_v(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e tracciarne i diagrammi di Bode di modulo e fase



Tensioni ai nodi in DC

$V_A = 1.1V$
$V_B = 0.5V$
$V_C = 2V$
$V_D = 0.9V$
$V_E = 1.2V$
$V_{DD} = 3.3V$

$R_1 = 660k\Omega$
$R_2 = 220k\Omega$
$R_3 = 10k\Omega$
$R_4 = 50k\Omega$
$R_5 = 7.5k\Omega$
$R_6 = 210k\Omega$
$R_7 = 120k\Omega$
$C = 100\text{nF}$

Transistore MN

$\beta_n = 2\text{mA/V}^2$
$V_{THn} = 0.5V$
$\lambda \simeq 0$

Transistore MP

$\beta_p = 12\text{mA/V}^2$
$V_{THp} = 0.7V$
$\lambda \simeq 0$