

Amplificatore differenziale e multistadio

Esercizio 1

DATI:

$$V_{DD} = 5V, V_{SS} = -5V, V_{REF} = -3V, R_D = 8k\Omega;$$

$$M1 \text{ e } M2: k_{n1} = 4mA \cdot V^{-2}, k_{n2} = 4mA \cdot V^{-2}, V_{TN} = 1V$$

$$M3: k_{n3} = 2mA \cdot V^{-2}; \lambda_{n3} = 0.01V^{-1}$$

1) Punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$

Corrente attraverso il MOSFET M_3

$$V_{GS3} = V_{REF} - V_{SS} = 2V$$

$$I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{2} \cdot (V_{GS3} - V_{TN})^2 = 1 \cdot mA$$

$$I_{DS1} = \frac{I_{DS3}}{2} = 0.5 \cdot mA$$

$$I_{DS2} = I_{DS1} = 0.5 \cdot mA$$

$$V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 1.5V$$

$$V_{GS2} = V_{GS1} = 1.5V$$

$$V_{G1} = 0 \quad V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = -1.5V \quad V_{D1} = V_{DD} - I_{DS1} \cdot R_D = 1V$$

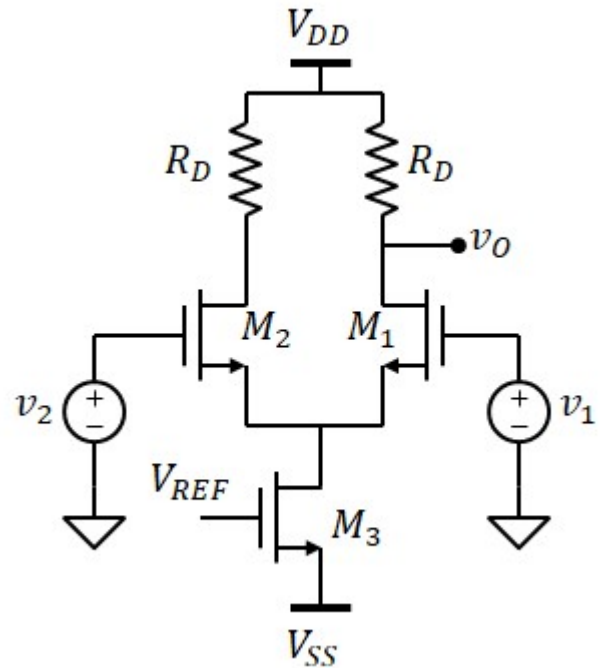
$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 2.5V$$

$$V_{GS1} - V_{TN} = 0.5V \quad \text{OK, M1 Saturazione}$$

$$V_{DS2} = V_{DS1} = 2.5V$$

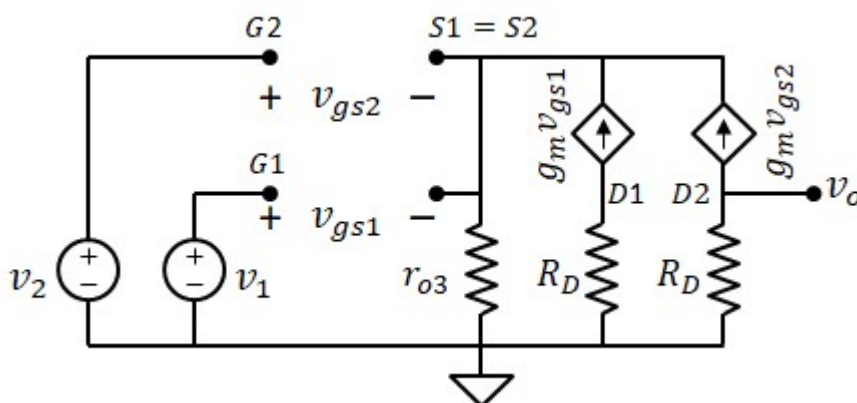
$$V_{DS3} = V_{S1} - V_{SS} = 3.5V$$

$$V_{GS3} - V_{TN} = 1V \quad \text{OK, M3 Saturazione}$$



2) Guadagno differenziale

Modello ai piccoli segnali



$$r_{O3} = \frac{1}{I_{DS3} \cdot \lambda_{n3}} = 100 \cdot k\Omega$$

$$g_m = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 2 \cdot mS$$

Solo modo differenziale

$$v_1 = \frac{v_d}{2} \quad v_2 = -\frac{v_d}{2}$$

legge di Kirchhoff in $S1=S2$:

$$g_m \cdot \left(\frac{v_d}{2} - v_s \right) + g_m \cdot \left(-\frac{v_d}{2} - v_s \right) = \frac{v_s}{r_s}$$

$$v_s = 0 \quad v_{gs2} = v_2 = -\frac{v_d}{2}$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs2} \cdot R_D = -R_D \cdot g_m \cdot \left(-\frac{v_d}{2} \right)$$

$$A_d = \frac{R_D \cdot g_m}{2} = 8$$

3) Guadagno di modo comune

Solo modo comune $v_1 = v_2 = v_c$

legge di kirchhoff in S1=S2:
$$g_m \cdot (v_c - v_s) + g_m (v_c - v_s) = \frac{v_s}{r_{o3}} \quad v_s = \frac{2 \cdot g_m \cdot r_{o3}}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} \cdot v_c$$

$$v_{gs1} = v_c - v_s = \frac{1}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} \cdot v_c$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs1} \cdot R_D = -R_D \cdot g_m \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} \cdot v_c$$

$$A_c = \frac{-R_D \cdot g_m}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} = -0.04$$

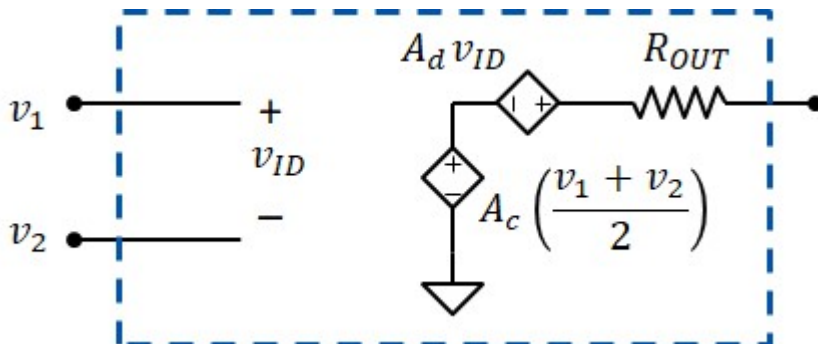
4) CMRR

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = 200.5$$

5) resistenza di uscita

$$R_{OUT} = R_D = 8 \cdot k\Omega$$

6) Modello elettrico equivalente



Esercizio 2

DATI:

$$V_{DD} = 10V, V_{SS} = -10V, V_{REF} = 7V, R_D = 20k\Omega;$$

$$M1 \text{ e } M2: k_{p1} = 2mA \cdot V^{-2}, k_{p2} = 2mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -2V$$

$$M3: k_{p3} = 1mA \cdot V^{-2}; \lambda_{p3} = 0.005V^{-1}$$

1) Punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$

Corrente attraverso il MOSFET M_3

$$V_{GS3} = V_{REF} - V_{DD} = -3V$$

$$I_{DS3} = \frac{k_{p3}}{2} \cdot (V_{GS3} - V_{TP})^2 = 0.5 \cdot mA$$

$$I_{DS1} = \frac{I_{DS3}}{2} = 0.25 \cdot mA \quad I_{DS2} = I_{DS1} = 0.25 \cdot mA$$

$$V_{GS1} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{p1}}} = -2.5V$$

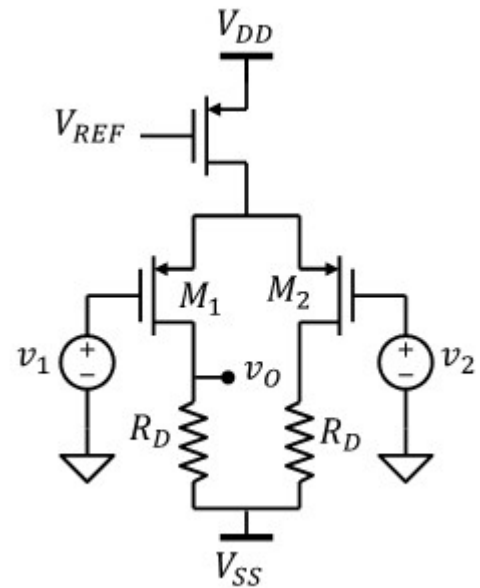
$$V_{GS2} = V_{GS1} = -2.5V$$

$$V_{G1} = 0 \quad V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 2.5V \quad V_{D1} = V_{SS} + I_{DS1} \cdot R_D = -5V$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = -7.5V \quad V_{GS1} - V_{TN} = -3.5V \quad \text{OK, } M1 \text{ Saturazione}$$

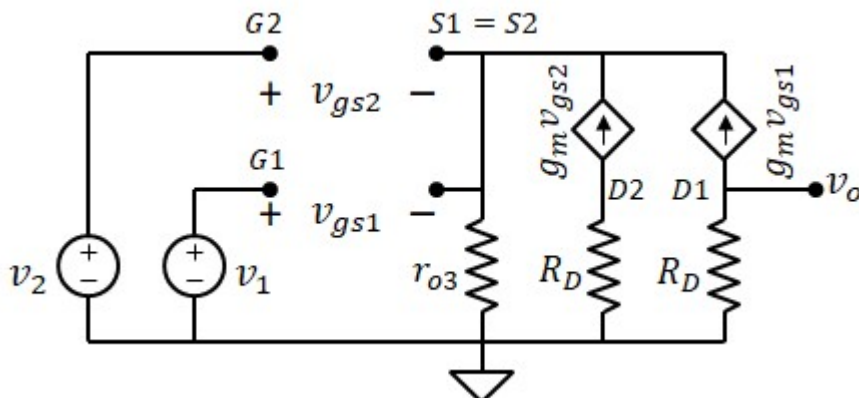
$$V_{DS3} = V_{S1} - V_{DD} = -7.5V \quad V_{GS3} - V_{TN} = -4V \quad \text{OK, } M3 \text{ Saturazione}$$

$$V_{DS2} = V_{DS1} = -7.5V$$



2) Guadagno differenziale

Modello ai piccoli segnali



$$r_{o3} = \frac{1}{I_{DS3} \cdot \lambda_{p3}} = 400 \cdot k\Omega$$

$$g_m = -k_{p1} \cdot (V_{GS1} - V_{TP}) = 1 \cdot mS$$

Solo modo differenziale

$$v_1 = \frac{v_d}{2} \quad v_2 = -\frac{v_d}{2}$$

legge di Kirchhoff in $S1=S2$:

$$g_m \cdot \left(\frac{v_d}{2} - v_s \right) + g_m \cdot \left(-\frac{v_d}{2} - v_s \right) = \frac{v_s}{r_{o3}}$$

$$v_s = 0$$

$$v_{gs1} = \frac{v_d}{2}$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs1} \cdot R_D = -R_D \cdot g_m \cdot \left(\frac{v_d}{2} \right)$$

$$A_d = -\frac{R_D \cdot g_m}{2} = -10$$

3) Guadagno di modo comune

Solo modo comune $v_1 = v_2 = v_c$

legge di kirchhoff in S1=S2: $g_m \cdot (v_c - v_s) + g_m (v_c - v_s) = \frac{v_s}{r_{o3}}$ $v_s = \frac{2 \cdot g_m \cdot r_{o3}}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} \cdot v_c$

$$v_{gs1} = v_c - v_s = \frac{1}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} \cdot v_c$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs1} \cdot R_D = -R_D \cdot g_m \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} \cdot v_c$$

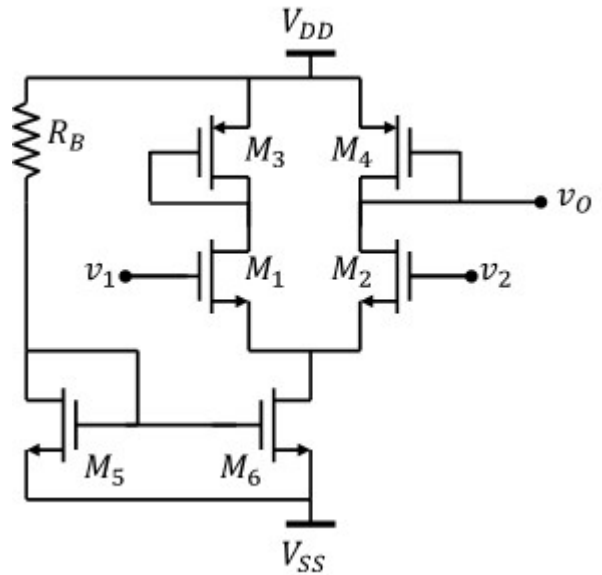
$$A_c = \frac{-R_D \cdot g_m}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o3}} = -0.025$$

4) CMRR

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = 400.5$$

5) resistenza di uscita

$$R_{OUT} = R_D = 20 \cdot k\Omega$$

Esercizio 3DATI: $V_{DD} = 3V$, $V_{SS} = -3V$ M1,M2: $k_{n1} = 10mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = k_{n1}$ M3,M4: $k_{p3} = 0.1mA \cdot V^{-2}$, $k_{p4} = 0.1mA \cdot V^{-2}$ M5,M6: $k_{n5} = 5mA \cdot V^{-2}$, $k_{n6} = 5mA \cdot V^{-2}$, $\lambda_n = 0.01V^{-1}$ $V_{TN} = 0.4V$, $V_{TP} = -0.4V$ **1) Valore di R_B per avere $g_{m1} = 2mS$** Tensione V_{GS} richiesta $V_{GS1} = \frac{g_{m1}}{k_{n1}} + V_{TN} = 0.6V$

$$V_{GS2} = V_{GS1}$$

Corrente richiesta (in saturazione) per M1, M2, M5 e M6:

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = 0.2mA \quad I_{DS2} = I_{DS1} \quad I_{DS5} = I_{DS1} + I_{DS2} = 0.4mA \quad I_{DS6} = I_{DS5}$$

Polarizzazione richiesta a M5:
$$V_{GS5} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS5}}{k_{n5}}} = 0.8V$$

Resistenza R_B :

$$R_B = \frac{V_{DD} - V_{GS5} - V_{SS}}{I_{DS5}} = 13 \cdot k\Omega$$

2) Punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$

M5) $V_{DS5} = V_{GS5} = 0.8V$ Saturazione

M6) $V_{GS6} = V_{GS5} = 0.8V$ $V_{D6} = 0 - V_{GS1} = -0.6V$ $V_{DS6} = V_{D6} - V_{SS} = 2.4V$ Saturazione

M3 e M4) $I_{DS3} = I_{DS1} = 0.2mA$ $I_{DS4} = I_{DS3} = 0.2mA$

$$V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{p3}}} \quad V_{DS3} = V_{GS3}$$

$$V_{GS4} = V_{GS3} = -2.4V \quad \text{Saturazione}$$

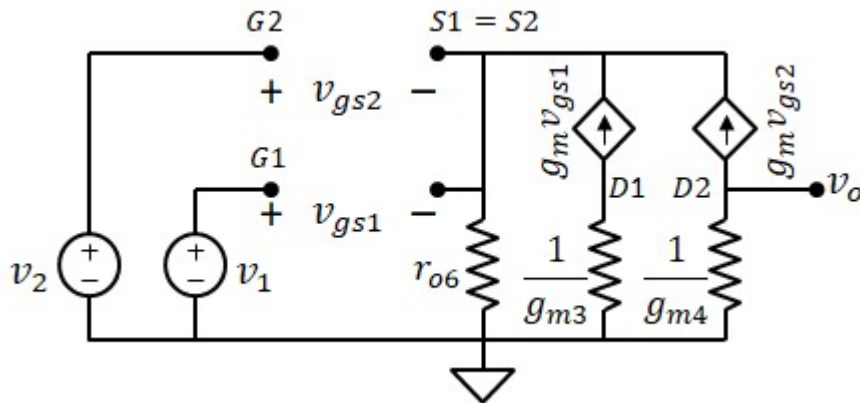
$$V_{DS4} = V_{DS3} = -2.4V \quad \text{Saturazione}$$

M1 e M2) $V_{GS1} = 0.6V$ $V_O = V_{DD} + V_{DS4} = 0.6V$ $V_{DS1} = V_O - V_{D6} = 1.2V$ Saturazione

$$V_{GS2} = 0.6V \quad V_{DS2} = V_{DS1} = 1.2V \quad \text{Saturazione}$$

3) Guadagno differenziale

Modello ai piccoli segnali



$$g_{m1} = 2 \cdot \text{mS}$$

$$g_{m2} = g_{m1} = 2 \cdot \text{mS}$$

$$g_{m3} = -k_{p3} \cdot (V_{GS3} - V_{TP}) = 0.2 \cdot \text{mS}$$

$$g_{m4} = -k_{p4} \cdot (V_{GS4} - V_{TP}) = 0.2 \cdot \text{mS}$$

$$r_{o6} = \frac{1}{\lambda_n \cdot I_{DS6}} = 250 \cdot \text{k}\Omega$$

$$A_d = \frac{\left(\frac{1}{g_{m4}} \right) \cdot g_{m2}}{2} = 5$$

4) Guadagno di modo comune

$$A_c = \frac{-\left(\frac{1}{g_{m4}} \right) \cdot g_{m2}}{1 + 2 \cdot g_{m2} \cdot r_{o6}} = -0.01$$

5) CMRR

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c} = 500$$

6) resistenza di uscita

$$R_{OUT} = \frac{1}{g_{m4}} = 5 \cdot \text{k}\Omega$$

Esercizio 4

DATI:

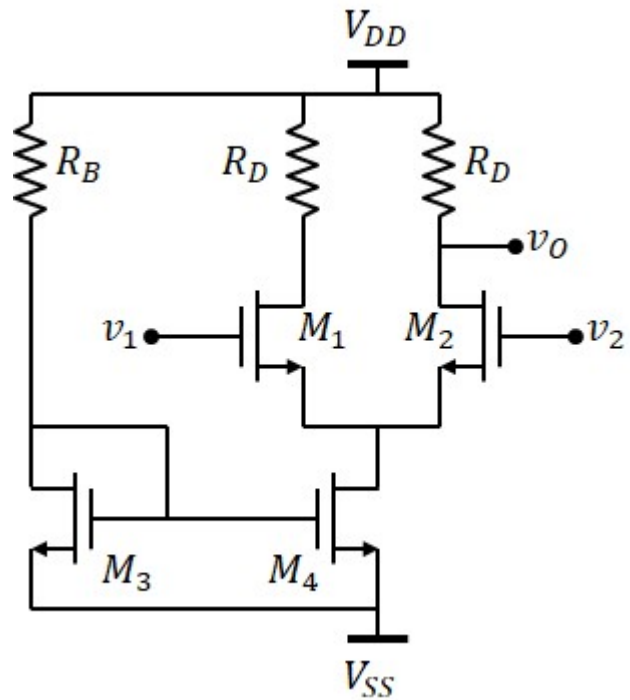
$$V_{DD} = 10V, V_{SS} = -10V,$$

$$M1 \text{ e } M2: k_{n1} = 1 \cdot \text{mA} \cdot V^{-2}, k_{n2} = 1 \cdot \text{mA} \cdot V^{-2},$$

$$M3: k_{n3} = 5 \text{mA} \cdot V^{-2}$$

$$M4: k_{n4} = 2 \text{mA} \cdot V^{-2}, \lambda_{n4} = 0.0025 V^{-1}$$

$$V_{TN} = 3V$$

**1) Valore di R_B per avere $I_{DS4} = 1\text{mA}$**

$$I_{DS3} = I_{DS4} \cdot \frac{k_{n3}}{k_{n4}} = 2.5 \cdot \text{mA}$$

$$V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{n3}}} = 4V$$

$$R_B = \frac{V_{DD} - (V_{SS} + V_{GS3})}{I_{DS3}} = 6.4 \cdot \text{k}\Omega$$

2) Resistenza R_D per ottenere guadagno differenziale $A_d = 10$

$$I_{DS1} = \frac{I_{DS4}}{2} = 0.5 \cdot \text{mA} \quad V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 4V$$

$$A_d = \frac{g_m \cdot R_D}{2} \quad g_m = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 1 \cdot \text{mS}$$

$$R_D = \frac{2 \cdot A_d}{g_m} = 20 \cdot \text{k}\Omega$$

3) Punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$

$$M1 \text{ e } M2: V_{G1} = 0 \quad V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} \quad V_{D1} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS1} = 0V \quad V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 4V$$

$$V_{GS2} = V_{GS1} = 4V \quad V_{DS2} = V_{DS1} = 4V$$

$$V_{GS1} - V_{TN} = 1V \quad \text{OK saturazione}$$

$$M3: V_{DS3} = V_{GS3} = 4V \quad I_{DS3} = 2.5 \cdot \text{mA} \quad I_{DS4} = 1 \cdot \text{mA}$$

$$M4: V_{GS4} = V_{GS3} = 4V \quad V_{DS4} = V_{S1} - V_{SS} = 6V$$

4) Guadagno di modo comune e CMRR

$$\text{Dal modello ai piccoli segnali, ricaviamo:} \quad r_s = \frac{2}{k_{n3} \cdot (V_{GS3} - V_{TN})^2 \cdot \lambda_{n3}} = 40 \cdot \text{k}\Omega \quad r_d = R_D = 20 \cdot \text{k}\Omega$$

Guadagno di modo comune:

$$A_c = \frac{-r_d \cdot g_m}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_s} = -0.247$$

Rapporto di reiezione del modo comune:

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c} = 40.5$$

5.1) tensione di uscita con $v_1 = 5\text{mV}$ e $v_2 = -5\text{mV}$

Ingresso di modo comune: $v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 0\text{mV}$

uscita di modo comune: $A_c \cdot v_c = 0\text{mV}$

Ingresso di modo differenziale: $v_d = v_1 - v_2 = 10\text{mV}$

uscita di modo differenziale: $A_d \cdot v_d = 100\text{mV}$

Tensione di uscita: $v_o = A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c = 100\text{mV}$

5.2) tensione di uscita con $v_1 = 10\text{mV}$ e $v_2 = 20\text{mV}$

Ingresso di modo comune: $v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 15\text{mV}$

uscita di modo comune: $A_c \cdot v_c = -3.7\text{mV}$

Ingresso di modo differenziale: $v_d = v_1 - v_2 = -10\text{mV}$

uscita di modo differenziale: $A_d \cdot v_d = -100\text{mV}$

Tensione di uscita: $v_o = A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c = -103.7\text{mV}$

5.3) tensione di uscita con $v_1 = 20\text{mV}$ e $v_2 = 10\text{mV}$

Ingresso di modo comune: $v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 15\text{mV}$

uscita di modo comune: $A_c \cdot v_c = -3.7\text{mV}$

Ingresso di modo differenziale: $v_d = v_1 - v_2 = 10\text{mV}$

uscita di modo differenziale: $A_d \cdot v_d = 100\text{mV}$

Tensione di uscita: $v_o = A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c = 96.3\text{mV}$

Esercizio 5

DATI:

$$V_{DD} = 25V$$

$$V_{SS} = -25V$$

$$V_{REF} = -23V$$

$$R_{D1} = 10k\Omega$$

$$R_{G2} = 20k\Omega$$

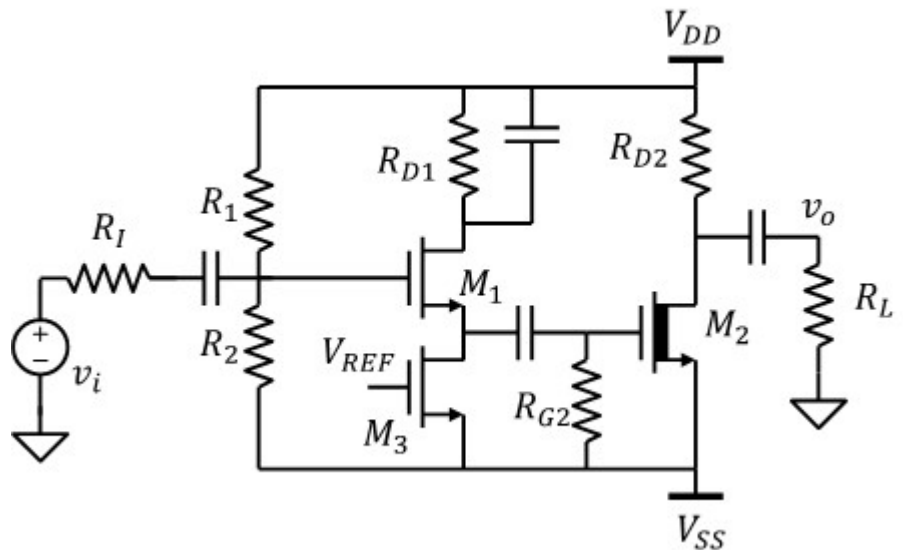
$$R_I = 4k\Omega,$$

$$R_L = 120k\Omega$$

$$M1: k_{n1} = 1mA \cdot V^{-2}, V_{TN1} = 3V$$

$$M2: k_{n2} = 0.25mA \cdot V^{-2}, V_{TN2} = -2V$$

$$M3: k_{n3} = 4mA \cdot V^{-2}, V_{TN3} = 1V$$

**1) Il punto di lavoro dei MOSFET, sapendo che $V_{DS1} = 10V$** Corrente attraverso M_3 (uguale alla corrente attraverso M_1 e R_{D1})

$$V_{GS3} = V_{REF} - V_{SS} = 2V \quad I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{2} \cdot (V_{GS3} - V_{TN3})^2 = 2mA \quad I_{DS1} = I_{DS3} = 2mA$$

Calcoliamo il potenziale del drain di M_3 (=source di M_1):

$$V_{D3} = V_{DD} - R_{D1} \cdot I_{DS1} - V_{DS1} = -5V \quad V_{S1} = V_{D3}$$

tensione drain-source di M_3 :

$$V_{DS3} = V_{D3} - V_{SS} = 20V \quad V_{GS3} - V_{TN3} = 1V \quad \text{OK Saturazione}$$

Polarizzazione di $M1$:tensione gate-source di M_1 :

$$V_{GS1} = V_{TN1} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 5V \quad V_{GS1} - V_{TN1} = 2V$$

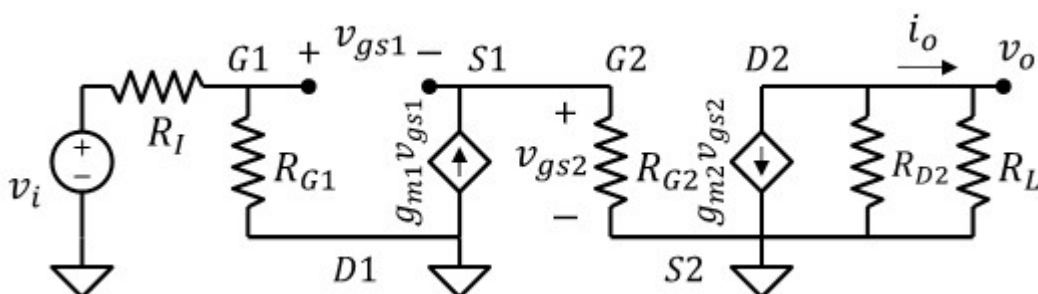
$$V_{DS1} = 10V \quad \text{OK Saturazione}$$

Corrente di $M2$:

$$V_{GS2} = 0V \quad I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN2})^2 = 0.5mA$$

2) Circuito ai piccoli segnali

Drain comune + source comune



$$g_{m1} = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN1}) = 2mS$$

$$g_{m2} = k_{n2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN2}) = 0.5mS$$

$$R_{G1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

3) Resistenze R_1, R_2, R_{D2} affinché l'amplificatore abbia: $R_{IN} = 100\text{k}\Omega$, e $R_{OUT} = 60\text{k}\Omega$

Resistenza di ingresso: $R_{IN} = R_{G1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

R_1 e R_2 devono essere in rapporto tale che: $V_{G1} = V_{S1} + V_{GS1} = 0\text{ V}$

$$V_{G1} = V_{SS} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (V_{DD} - V_{SS}) \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{G1} - V_{SS}}{V_{DD} - V_{G1}} \quad \frac{V_{G1} - V_{SS}}{V_{DD} - V_{G1}} = 1 \quad R_1 = R_2$$

$$R_{IN} = \frac{R_1}{2} \quad R_1 = 2 \cdot R_{IN} \quad \boxed{R_2 = R_1 = 200 \cdot \text{k}\Omega}$$

Resistenza di uscita: $R_{OUT} = R_{D2} \quad \boxed{R_{D2} = R_{OUT} = 60 \cdot \text{k}\Omega}$

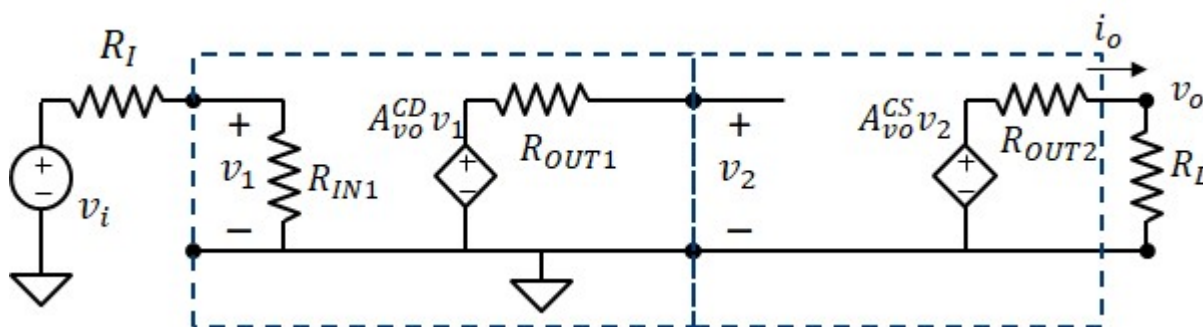
4) Verifica della condizione di polarizzazione di tutti i MOSFET

M1 e M3: già verificata al punto 1

M2: $\boxed{V_{DS2} = V_{DD} - V_{SS} - R_{D2} \cdot I_{DS2} = 20\text{ V}} \quad V_{GS2} - V_{TN2} = 2\text{ V} \quad \text{OK Saturazione}$

5) Guadagno di tensione

Dividiamo il circuito in due stadi, ma consideriamo la resistenza R_{G2} nel primo stadio. In questo modo abbiamo uno stadio CD con resistenza di uscita pari a R_{G2} seguito da un CS con resistenza di ingresso infinita



Primo stadio (drain comune):

Secondo stadio (source comune):

$$A_{vo1} = \frac{g_{m1} \cdot R_{G2}}{1 + g_{m1} \cdot R_{G2}} = 0.976$$

$$A_{vo2} = -g_{m2} \cdot R_{D2} = -30$$

$$R_{IN1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 100 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{IN2} = \infty$$

$$R_{OUT1} = \frac{R_{G2}}{1 + g_{m1} \cdot R_{G2}} = 0.488 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT2} = R_{D2} = 60 \cdot \text{k}\Omega$$

$$A_{vo} = A_{vo1} \cdot A_{vo2} = -29$$

$$\boxed{A_v = \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_{IN}}{R_I + R_{IN}} = -18.8}$$

$$\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = 0.667$$

$$\frac{R_{IN}}{R_I + R_{IN}} = 0.962$$

Esercizio 6

DATI:

$V_{DD} = 15V,$

$V_{SS} = -15V,$

$R_{D1} = 30k\Omega,$

$R_{S1} = 10k\Omega,$

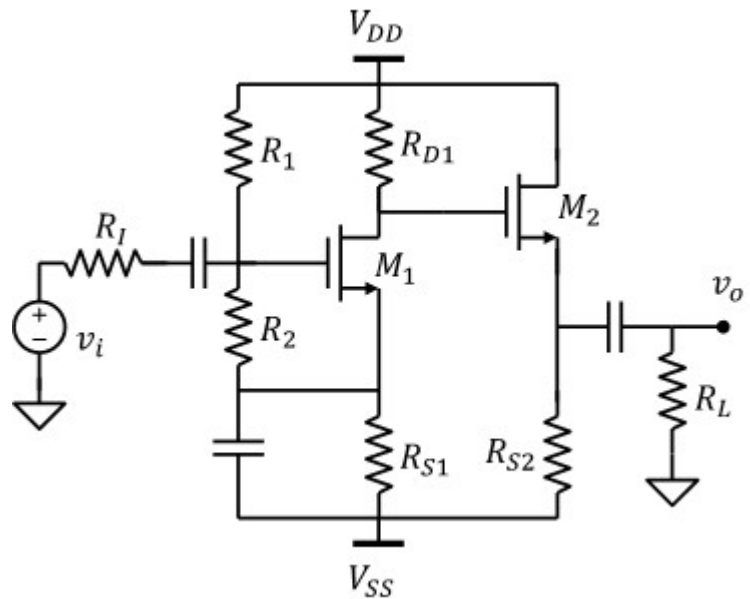
$R_{S2} = 5.5k\Omega,$

$R_2 = 30k\Omega,$

$R_I = 10k\Omega,$

$R_L = 5k\Omega$

$M1 \text{ e } M2: k_n = 1mA \cdot V^{-2}, V_{TN} = 2V$

**1. Il punto di lavoro dei MOS e il valore della resistenza R_1 , sapendo che la corrente di $M1$ è $I_{DS1} = 0.5mA$** Calcolo del punto di lavoro di M_1 Tensione gate-source di $M1$:

$$V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_n}} = 3V$$

Potenziale del drain di $M1$:

$$V_{D1} = V_{DD} - I_{DS1} \cdot R_{D1} = 0V$$

Corrente attraverso R_2 :

$$I_{R2} = \frac{V_{GS1}}{R_2} = 0.1mA$$

Corrente attraverso R_{S1} :

$$I_{RS1} = I_{DS1} + I_{R2} = 0.6mA$$

Potenziale del source di $M1$:

$$V_{S1} = V_{SS} + R_{S1} \cdot I_{RS1} = -9V$$

Tensione drain-source di $M1$:

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 9V$$

Potenziale del gate di $M1$:

$$V_{G1} = V_{S1} + V_{GS1} = -6V$$

Resistenza R_1 :

$$R_1 = \frac{V_{DD} - V_{G1}}{I_{R2}} = 210k\Omega$$

Calcolo del punto di lavoro di M_2 Tensione di gate di $M2$:

$$V_{G2} = V_{D1} = 0V$$

$$V_{G2} - V_{SS} = V_{GS2} + R_{S2} \cdot \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 \quad \text{poniamo } x = V_{GS2} - V_{TN}$$

$$x^2 + \frac{2 \cdot x}{R_{S2} \cdot k_n} + \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{G2} + V_{SS})}{R_{S2} \cdot k_n} = 0 \quad b = \frac{2}{R_{S2} \cdot k_n} = 0.364V^{-2} \cdot V^{-1} \quad c = \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{G2} + V_{SS})}{R_{S2} \cdot k_n} = -4.727V^2$$

Soluzioni:

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot c}}{2} = 2V$$

accettabile

$$V_{GS2} = V_{TN} + x_1 = 4V$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot c}}{2} = -2.364V$$

non accettabile

Corrente attraverso M_2 :

$$I_{DS2} = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 = 2 \cdot \text{mA}$$

oppure: $I_{DS2} = \frac{V_{G2} - V_{GS2} - V_{SS}}{R_{S2}} = 2 \cdot \text{mA}$

Potenziale del source di M_2 :

$$V_{S2} = V_{G2} - V_{GS2} = -4 \text{ V}$$

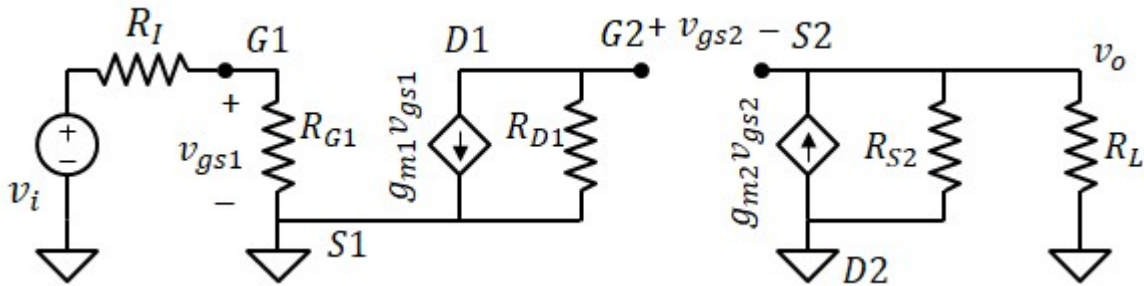
Tensione drain source di M_2 :

$$V_{DS2} = V_{DD} - V_{S2} = 19 \text{ V}$$

$$V_{GS2} - V_{TN} = 2 \text{ V} \quad \text{OK Saturazione}$$

2. Calcolare la resistenza di ingresso e di uscita dell'amplificatore

Modello ai piccoli segnali:



$$R_{G1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 26.25 \cdot \text{k}\Omega$$

$$g_{m1} = k_n \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 1 \cdot \text{mS}$$

$$g_{m2} = k_n \cdot (V_{GS2} - V_{TN}) = 2 \cdot \text{mS}$$

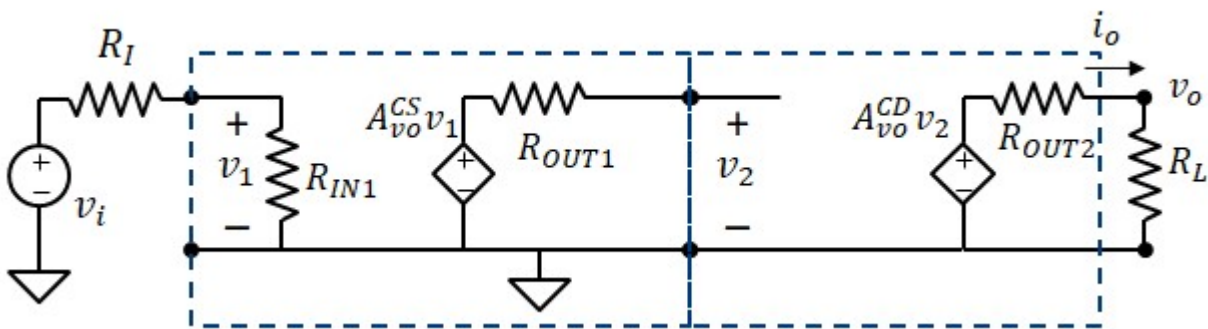
La resistenza di ingresso è quella del primo stadio (CS)

$$R_{IN} = R_{G1} = 26.25 \cdot \text{k}\Omega$$

La resistenza di uscita è quella del secondo stadio (CD)

$$R_{OUT} = \frac{R_{S2}}{1 + g_{m2} \cdot R_{S2}} = 0.458 \cdot \text{k}\Omega$$

3. Guadagno di tensione



Primo stadio (CS)

$$R_{IN1} = R_{G1} = 26.25 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT1} = R_{D1} = 30 \cdot \text{k}\Omega$$

$$A_{vo1} = -g_{m1} \cdot R_{D1} = -30$$

$$A_{vo} = A_{vo1} \cdot A_{vo2} = -27.5$$

Secondo stadio (CD)

$$R_{IN2} = \infty$$

$$R_{OUT2} = \frac{R_{S2}}{1 + g_{m2} \cdot R_{S2}} = 0.458 \cdot \text{k}\Omega$$

$$A_{vo2} = \frac{g_{m2} \cdot R_{S2}}{1 + g_{m2} \cdot R_{S2}} = 0.917$$

$$A_v = \frac{R_{IN1}}{R_{IN1} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT2} + R_L} = -18.2$$

$$\frac{R_{IN1}}{R_{IN1} + R_I} = 0.724$$

$$\frac{R_L}{R_{OUT2} + R_L} = 0.916$$

Esercizio 6

DATI:

$$V_{DD} = 5V,$$

$$V_{SS} = -5V,$$

$$R_2 = 5k\Omega,$$

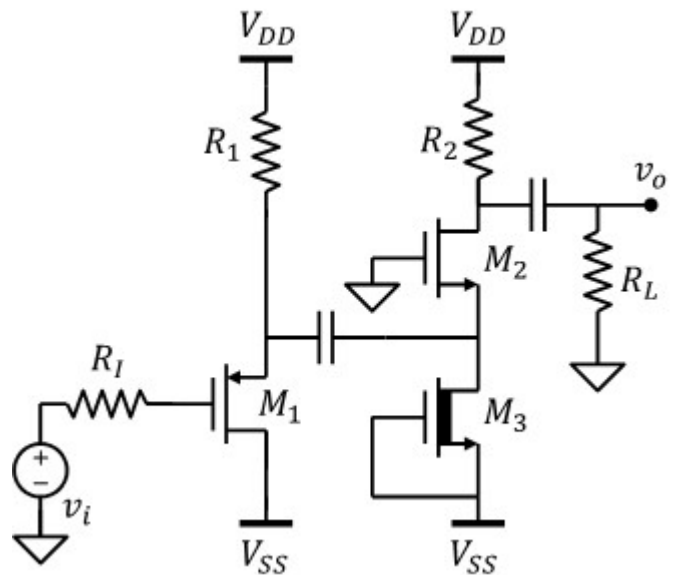
$$R_I = 20k\Omega,$$

$$R_L = 15k\Omega$$

$$M1: k_{p1} = 8mA \cdot V^{-2}, V_{TP1} = -0.5V$$

$$M2: k_{n2} = 1mA \cdot V^{-2}, V_{TN2} = 0.5V$$

$$M3: k_{n3} = 1mA \cdot V^{-2}, V_{TN3} = -1V, \lambda_n = 0.01V^{-1}$$

**1) Il valore di R_1 per ottenere $g_{m1} = 10mS$**

Tensione gate-source di M_1 : $V_{GS1} = V_{TP1} - \frac{g_{m1}}{k_{p1}} = -1.75V$

Potenziale del gate di M_1 : $V_{G1} = 0V$ Potenziale del source di M_1 : $V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 1.75V$

Tensione drain-source di M_1 : $V_{DS1} = V_{SS} - V_{S1} = -6.75V$

Corrente attraverso M_1 : $I_{DS1} = \frac{k_{p1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TP1})^2 = 6.25mA$

Valore di R_1 :

$$R_1 = \frac{V_{DD} - V_{S1}}{I_{DS1}} = 520\Omega$$

2) Punto di polarizzazione di tutti i MOS

$M1$: $V_{GS1} = -1.75V$ $V_{DS1} = -6.75V$ $I_{DS1} = 6.25mA$ $V_{GS1} - V_{TP1} = -1.25V$ $M1$ è in saturazione

$M2$ e $M3$: $V_{GS3} = 0$ $I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{2} \cdot (V_{GS3} - V_{TN3})^2 = 0.5mA$

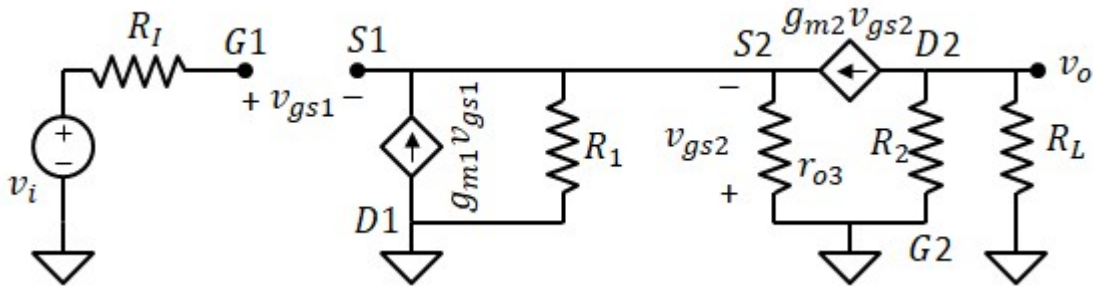
$I_{DS2} = I_{DS3} = 0.5mA$ $V_{GS2} = V_{TN2} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n2}}} = 1.5V$ $V_{S2} = 0 - V_{GS2} = -1.5V$

$V_{DS3} = V_{S2} - V_{SS} = 3.5V$ $V_{GS3} - V_{TN3} = 1V$ $M3$ è in saturazione

$V_{D2} = V_{DD} - R_2 \cdot I_{DS2} = 2.5V$ $V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 4V$ $V_{GS2} - V_{TN2} = 1V$ $M2$ è in saturazione

3) Resistenze di ingresso e uscita e guadagno

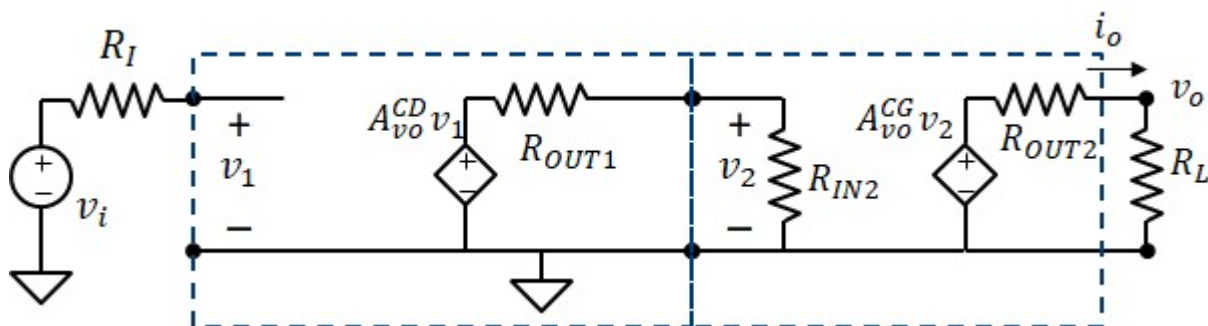
Modello ai piccoli segnali (gate comune - drain comune)



$$g_{m1} = 10 \cdot \text{mS}$$

$$g_{m2} = k_{n2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN2}) = 1 \cdot \text{mS}$$

$$r_{o3} = \frac{1}{I_{DS3} \cdot \lambda_{n3}} = 200 \cdot \text{k}\Omega$$



Primo stadio: drain comune

Secondo stadio: gate comune

$$R_{IN1} = \infty$$

$$R_{IN2} = \frac{r_{o3}}{1 + g_{m2} \cdot r_{o3}} = 0.995 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT1} = \frac{R_1}{1 + g_{m1} \cdot R_1} = 83.9 \cdot \Omega$$

$$R_{OUT2} = R_2 = 5 \cdot \text{k}\Omega$$

$$A_{vo1} = \frac{g_{m1} \cdot R_1}{1 + g_{m1} \cdot R_1} = 0.839$$

$$A_{vo2} = g_{m2} \cdot R_2 = 5$$

La resistenza di ingresso è quella del primo stadio

$$R_{IN} = R_{IN1}$$

La resistenza di uscita è quella del secondo stadio

$$R_{OUT} = R_{OUT2} = 5 \cdot \text{k}\Omega$$

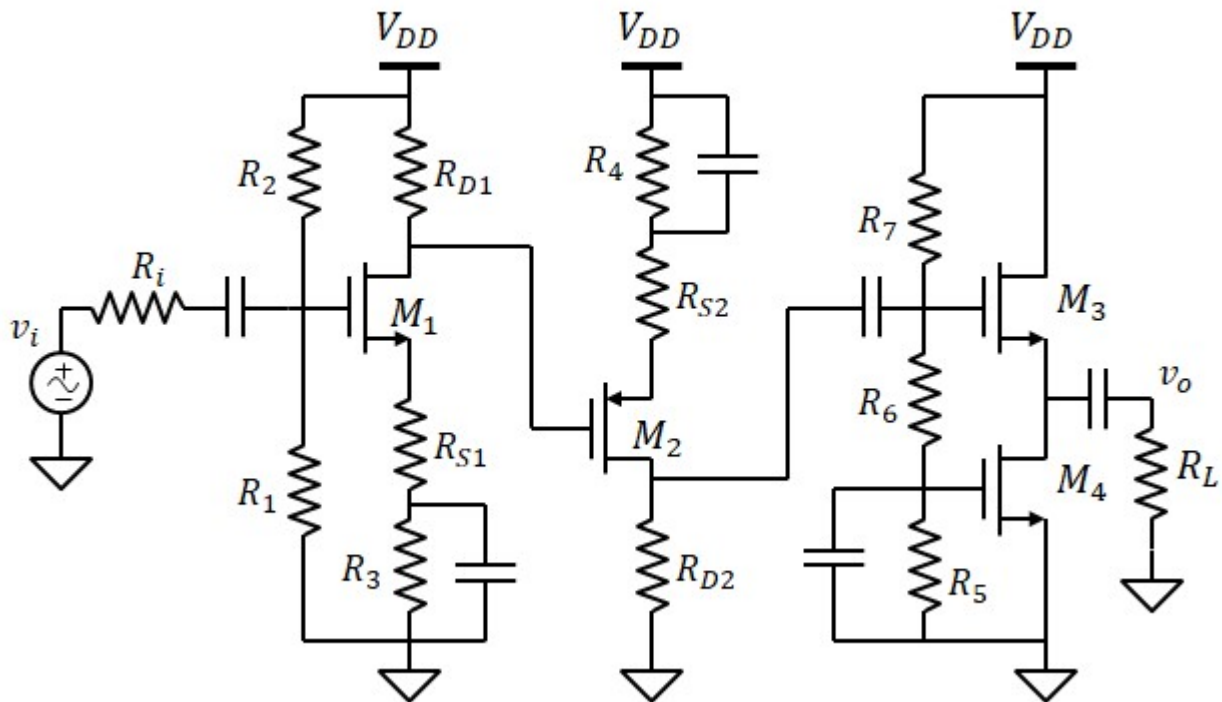
Guadagno a vuoto: $A_{vo} = A_{vo1} \cdot \frac{R_{IN2}}{R_{OUT1} + R_{IN2}} \cdot A_{vo2} = 3.868$

$$\frac{R_{IN2}}{R_{OUT1} + R_{IN2}} = 0.922$$

Guadagno complessivo:

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT2} + R_L} = 2.9$$

$$\frac{R_L}{R_{OUT2} + R_L} = 0.75$$

Esercizio 8

DATI: $V_{DD} = 10V$

$R_i = 10k\Omega$

$R_1 = 300k\Omega$, $R_2 = 700k\Omega$, $R_{S1} = 2k\Omega$, $R_{D1} = 20k\Omega$

$R_{S2} = 2k\Omega$, $R_{D2} = 24k\Omega$

$R_5 = 160k\Omega$

$R_L = 10k\Omega$

$k_{n1} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{p2} = 4mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 10mA \cdot V^{-2}$, $k_{n4} = 10mA \cdot V^{-2}$

$V_{TN} = 1V$, $V_{TP} = -1V$

$\lambda_{n1} = \lambda_{n2} = \lambda_{n3} = 0$, $\lambda_{n4} = 0.005V^{-1}$

1) Determinare R_3 e R_4 affinché i MOSFET M1 e M2 abbiano transconduttanza: $g_{m1} = 0.5mS$, $g_{m2} = 1mS$

Primo stadio

Tensione gate-source richiesta: $V_{GS1} = V_{TN} + \frac{g_{m1}}{k_{n1}} = 1.5V$

$$g_{m2} \cdot R_{D2} = 24$$

Potenziale del gate: $V_{G1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 3V$

$$1 + g_{m2} \cdot R_{S2} = 3$$

Potenziale del source: $V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 1.5V$

Corrente attraverso la serie di R_3 e R_{S1} (uguale a quella su M1): $I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = 0.125mA$

Resistenza R_3 :

$$R_3 = \frac{V_{S1}}{I_{DS1}} - R_{S1} = 10k\Omega$$

Secondo stadio

Tensione gate-source richiesta: $V_{GS2} = V_{TP} - \frac{g_{m2}}{k_{p2}} = -1.25 \text{ V}$

Potenziale del gate (uguale al drain di M1): $V_{D1} = V_{DD} - R_{D1} \cdot I_{DS1} \quad V_{G2} = V_{D1} = 7.5 \text{ V}$

Potenziale del source: $V_{S2} = V_{G2} - V_{GS2} = 8.75 \text{ V}$

Corrente attraverso la serie di R_4 e R_{S2} (uguale a quella su M2): $I_{DS2} = \frac{k_{p2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TP})^2 = 0.125 \text{ mA}$

Resistenza R_6 : $R_4 = \frac{V_{DD} - V_{S2}}{I_{DS2}} - R_{S2} = 8 \cdot \text{k}\Omega$

Potenziale del drain di M2: $V_{D2} = R_{D2} \cdot I_{DS2} = 3 \text{ V}$

Verifica della polarizzazione di M1 e M2:

$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 6 \text{ V} \quad V_{GS1} - V_{TN} = 0.5 \text{ V} \quad \text{M1 è in saturazione}$

$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = -5.75 \text{ V} \quad V_{GS2} - V_{TP} = -0.25 \text{ V} \quad \text{M2 è in saturazione}$

1) Determinare R_6 e R_7 affinché M3 abbia: $g_{m3} = 10 \text{ mS}$ e la tensione di uscita in condizioni DC sia $V_O = 5 \text{ V}$

Tensione gate-source richiesta a M3: $V_{GS3} = V_{TN} + \frac{g_{m3}}{k_{n3}} = 2 \text{ V}$

Corrente attraverso M3 e M4: $I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{2} \cdot (V_{GS3} - V_{TN})^2 \quad I_{DS4} = I_{DS3} = 5 \cdot \text{mA}$

Tensione gate-source richiesta a M4: $V_{GS4} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS4}}{k_{n4}}} = 2 \text{ V}$

Tensione ai capi di R_5 (uguale alla tensione gate-source di M4): $V_{R5} = V_{GS4} = 2 \text{ V}$

Corrente su R_5 (uguale a quella attraverso R_6 e R_7): $I_{R5} = \frac{V_{R5}}{R_5} = 12.5 \cdot \mu\text{A}$

Potenziale richiesto al gate di M3: $V_{G3} = V_O + V_{GS3} = 7 \text{ V}$

Tensione ai capi di R_6 : $V_{R6} = V_{G3} - V_{GS4} = 5 \text{ V}$ resistenza R_6 :

$$R_6 = \frac{V_{R6}}{I_{R5}} = 400 \cdot \text{k}\Omega$$

Tensione ai capi di R_7 : $V_{R7} = V_{DD} - V_{G3} = 3 \text{ V}$ resistenza R_7 :

$$R_7 = \frac{V_{R7}}{I_{R5}} = 240 \cdot \text{k}\Omega$$

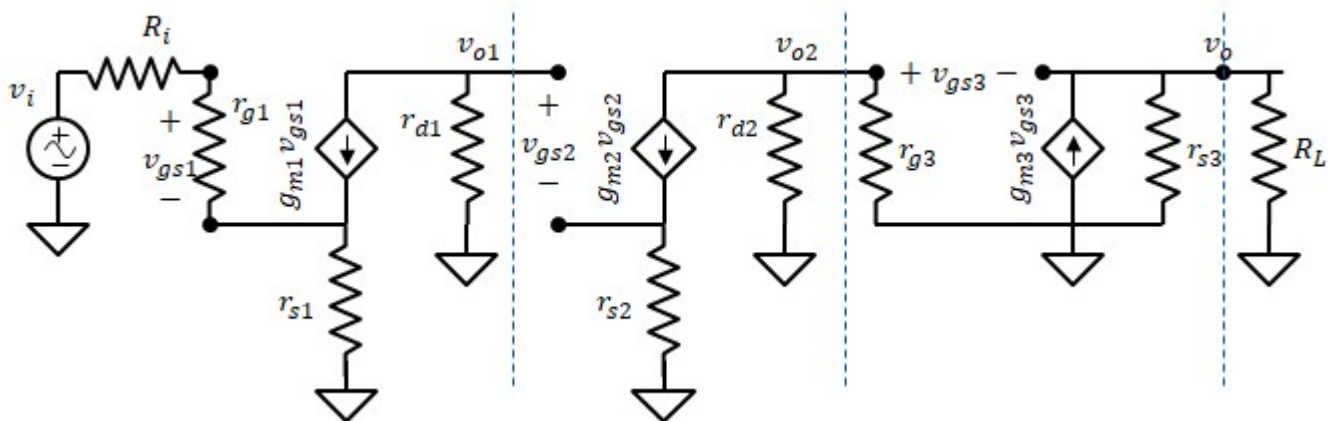
Verifica della polarizzazione di M3 e M4:

$V_{DS3} = V_{DD} - V_O = 5 \text{ V} \quad V_{GS3} - V_{TN} = 1 \text{ V} \quad \text{M3 è in saturazione}$

$V_{DS2} = V_O = 5 \text{ V} \quad V_{GS4} - V_{TN} = 1 \text{ V} \quad \text{M4 è in saturazione}$

3) resistenza di ingresso e uscita dell'intero amplificatore

Modello ai piccoli segnali (CS + CS + CD)



Primo stadio (CS)

$$r_{g1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 210 \cdot \text{k}\Omega$$

$$r_{s1} = R_{S1} = 2 \cdot \text{k}\Omega$$

$$r_{d1} = R_{D1} = 20 \cdot \text{k}\Omega$$

$$g_{m1} = 0.5 \cdot \text{mS}$$

$$A_{vo1} = \frac{g_{m1} \cdot r_{d1}}{1 + g_{m1} \cdot r_{s1}} = 5$$

$$R_{IN1} = r_{g1} = 210 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT1} = r_{d1} = 20 \cdot \text{k}\Omega$$

Secondo stadio (CS)

$$r_{s2} = R_{S2} = 2 \cdot \text{k}\Omega$$

$$r_{d2} = R_{D2} = 24 \cdot \text{k}\Omega$$

$$g_{m2} = 1 \cdot \text{mS}$$

$$A_{vo2} = \frac{g_{m2} \cdot r_{d2}}{1 + g_{m2} \cdot r_{s2}} = 8$$

$$R_{IN2} = \infty$$

$$R_{OUT2} = r_{d2} = 24 \cdot \text{k}\Omega$$

Terzo stadio (CS)

$$r_{g3} = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} = 150 \cdot \text{k}\Omega$$

$$r_{s3} = \frac{1}{I_{DS4} \cdot \lambda_{n4}} = 40 \cdot \text{k}\Omega$$

$$g_{m3} = 10 \cdot \text{mS}$$

$$A_{vo3} = \frac{g_{m3} \cdot r_{s3}}{1 + g_{m3} \cdot r_{s3}} = 0.998$$

$$R_{IN3} = r_{g3} = 150 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT3} = \frac{r_{s3}}{1 + g_{m3} \cdot r_{s3}} = 0.1 \cdot \text{k}\Omega$$

Resistenza di ingresso:

$$R_{IN} = R_{IN1} = 210 \cdot \text{k}\Omega$$

Resistenza di uscita

$$R_{OUT} = R_{OUT3} = 0.1 \cdot \text{k}\Omega$$

4) guadagno di tensione con carico R_L

$$A_{vo} = A_{vo1} \cdot A_{vo2} \cdot \frac{R_{IN3}}{R_{IN3} + R_{OUT2}} \cdot A_{vo3} = 34.4$$

$$A_{vo1} \cdot A_{vo2} \cdot A_{vo3} = 39.9 \quad \frac{R_{IN3}}{R_{IN3} + R_{OUT2}} = 0.862$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_i} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = 32.5$$

$$\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_i} = 0.955$$

$$\frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = 0.99$$

Esercizio 9

DATI:

$$M1: k_{p1} = 4\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}$$

$$M2: k_{p2} = 8\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}$$

$$M3: k_{p3} = 0.8\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}$$

$$M4: k_{p4} = 4\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}$$

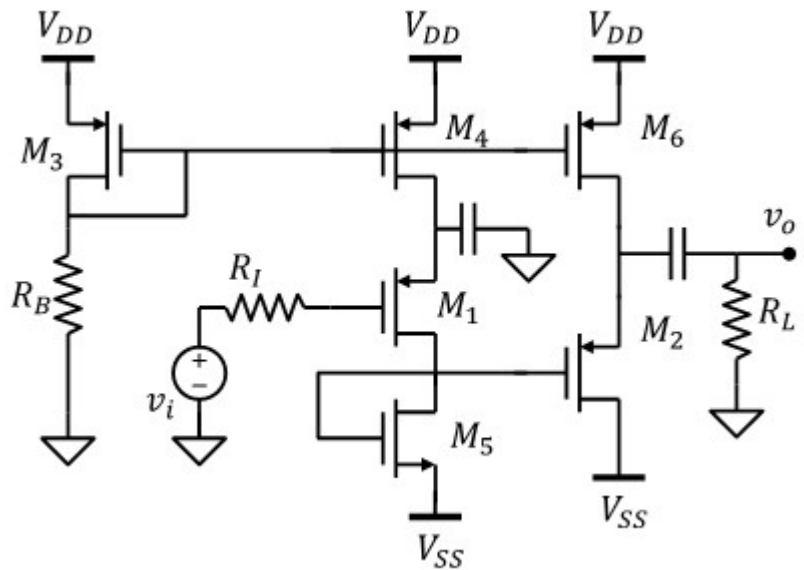
$$M5: k_{n5} = 0.25\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}, V_{TN} = 0.5\text{V}$$

$$M6: k_{p6} = 8\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}, \lambda_{p6} = 0.01\cdot\text{V}^{-1}$$

$$V_{TP} = -0.5\text{V}$$

$$V_{DD} = 3\text{V}, V_{SS} = -3\text{V}$$

$$R_I = 20\text{k}\Omega, R_L = 1\text{k}\Omega$$



1. Calcolare il valore di R_B in modo tale che la corrente attraverso M_1 sia: $I_{DS1} = 0.5\text{mA}$

$$I_{DS1} = I_{DS4} = \frac{k_{p4}}{k_{p3}} \cdot I_{DS3}$$

$$I_{DS3} = \frac{k_{p3}}{k_{p4}} \cdot I_{DS1} = 0.1\text{mA}$$

$$V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{p3}}} = -1\text{V}$$

$$R_B = \frac{V_{DD} - (-V_{GS3})}{I_{DS3}} = 20\text{k}\Omega$$

2. Trovare il punto di polarizzazione di tutti i MOS

$$M3: V_{DS3} = V_{GS3} = -1\text{V}$$

$$M5: I_{DS5} = I_{DS1} = 0.5\text{mA}$$

$$V_{GS5} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS5}}{k_{n5}}} = 2.5\text{V}$$

$$V_{DS5} = V_{GS5} = 2.5\text{V}$$

$$M1: V_{GS1} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{p1}}} = -1\text{V}$$

$$V_{D1} = V_{SS} + V_{DS5} = -0.5\text{V} \quad V_{S1} = 0 - V_{GS1} = 1\text{V}$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = -1.5\text{V}$$

$$M4: V_{GS4} = V_{GS3} = -1\text{V}$$

$$V_{DS4} = V_{S1} - V_{DD} = -2\text{V}$$

$$M2: I_{DS6} = \frac{k_{p6}}{k_{p3}} \cdot I_{DS3} = 1\text{mA}$$

$$I_{DS2} = I_{DS6} = 1\text{mA}$$

$$V_{GS2} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{p2}}} = -1\text{V}$$

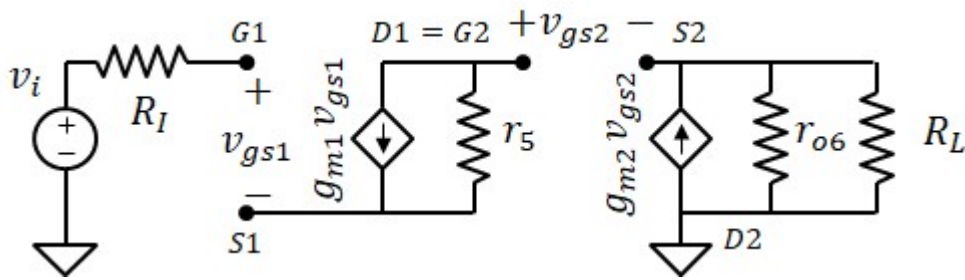
$$V_{S2} = V_{D1} - V_{GS2} = 0.5\text{V}$$

$$V_{DS2} = V_{SS} - V_{S2} = -3.5\text{V}$$

$$M6: V_{GS6} = V_{GS3} = -1\text{V}$$

$$V_{DS6} = V_{S2} - V_{DD} = -2.5\text{V}$$

3. Disegnare il circuito ai piccoli segnali



$$g_{m1} = -k_{p1} \cdot (V_{GS1} - V_{TP}) = 2 \cdot \text{mS} \quad g_{m5} = k_{n5} \cdot (V_{GS5} - V_{TP}) = 0.75 \cdot \text{mS} \quad r_5 = \frac{1}{g_{m5}} = 1.33 \cdot \text{k}\Omega$$

$$g_{m2} = -k_{p2} \cdot (V_{GS2} - V_{TP}) = 4 \cdot \text{mS} \quad r_{o6} = \frac{1}{I_{DS6} \cdot \lambda_{p6}} = 100 \cdot \text{k}\Omega$$

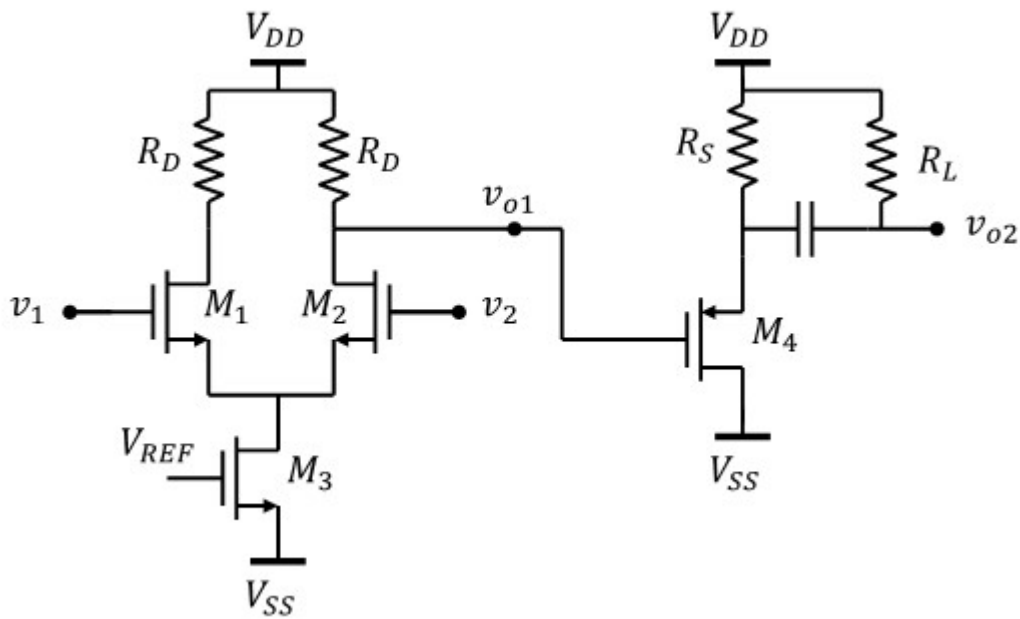
4. Calcolare la resistenza di ingresso e di uscita dell'amplificatore

$$R_{IN} = \infty \quad R_{OUT} = \frac{r_{o6}}{1 + g_{m2} \cdot r_{o6}} = 0.249 \cdot \text{k}\Omega$$

5. Calcolare il guadagno di tensione

	Primo Stadio:	Secondo stadio
Resistenza di ingresso	$R_{IN1} = \infty$	$R_{IN2} = \infty$
Resistenza di uscita	$R_{OUT1} = r_5 = 1.33 \cdot \text{k}\Omega$	$R_{OUT2} = \frac{r_{o6}}{1 + g_{m2} \cdot r_{o6}} = 0.249 \cdot \text{k}\Omega$
Guadagno a vuoto	$A_{vo1} = -g_{m1} \cdot r_5 = -2.67$	$A_{vo2} = \frac{g_{m2} \cdot r_{o6}}{1 + g_{m2} \cdot r_{o6}} = 0.998$

$$A_V = A_{vo1} \cdot A_{vo2} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT2} + R_L} = -2.13$$

Esercizio 10

DATI:

$$V_{DD} = 20V, V_{SS} = -20V, R_L = 20k\Omega,$$

$$M1: k_{n1} = 5mA \cdot V^{-2}, V_{TN1} = 4.6V$$

$$M2: k_{n2} = 5mA \cdot V^{-2}, V_{TN1} = 4.6V,$$

$$M3: k_{n3} = 0.4mA \cdot V^{-2}, V_{TN3} = 2V, \lambda_{n3} = 0.01V^{-1}$$

$$M4: k_{p4} = 1mA \cdot V^{-2}, V_{TP4} = -4V$$

1) Calcolare R_D e V_{REF} per avere un guadagno di modo differenziale $A_d = 50$ e tensione DC di uscita del

primo stadio $V_{O1} = 0V$

Con $V_{O1} = 0V$ e $v_2 = v_1 = 0V$ M_1 e M_2 sono in saturazione con $V_{GS} = V_{DS}$.

Condizioni da imporre (ipotizzando M_3 in saturazione):

$$\text{Guadagno di modo comune: } A_d = \frac{g_m \cdot R_D}{2} = 50 \quad g_{m1} = \sqrt{2k_{n1} \cdot I_{DS1}} \quad A_d = \frac{\sqrt{2k_{n1} \cdot I_{DS1}} \cdot R_D}{2} = 50 \quad (1)$$

$$\text{Tensione di uscita: } V_{O1} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS1} = 0 \quad I_{DS1} = \frac{V_{DD}}{R_D} \quad (2)$$

Sostituendo (2) in (1):

$$A_d = \frac{\sqrt{2k_{n1} \cdot \frac{V_{DD}}{R_D}} \cdot R_D}{2} = \sqrt{\frac{k_{n1} \cdot V_{DD} \cdot R_D}{2}}$$

$$R_D = \frac{2 \cdot A_d^2}{k_{n1} \cdot V_{DD}} = 50 \cdot k\Omega$$

$$I_{DS1} = \frac{V_{DD}}{R_D} = 0.4 \cdot mA \quad I_{DS3} = 2 \cdot I_{DS1} = 0.8 \cdot mA \quad V_{GS3} = V_{TN3} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{n3}}} = 4V$$

Verifica della regione di funzionamento dei MOSFET:

M_1 e M_2 sono sicuramente in saturazione avendo $V_{DS1} = V_{GS1} > V_{GS1} - V_{TN1}$

Tensione drain-source di M_3 : $V_{DS3} = V_{S1} - V_{SS}$

$$V_{GS1} = V_{TN1} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 5 \text{ V} \quad V_{G1} = 0 \quad V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = -5 \text{ V}$$

$$V_{DS3} = V_{S1} - V_{SS} = 15 \text{ V} \quad V_{GS3} - V_{TN3} = 2 \text{ V} \quad \text{OK, } M_3 \text{ è in saturazione}$$

Tensione V_{REF} :

$$V_{REF} = V_{SS} + V_{GS3} = -16 \text{ V}$$

2) Resistenza R_S affinché: $I_{DS4} = 2 \text{ mA}$

Tensione gate-source richiesta: $V_{GS4} = V_{TP4} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS4}}{k_{p4}}} = -6 \text{ V}$

Corrente di M_2 : $I_{DS2} = I_{DS1} = 0.4 \text{ mA}$

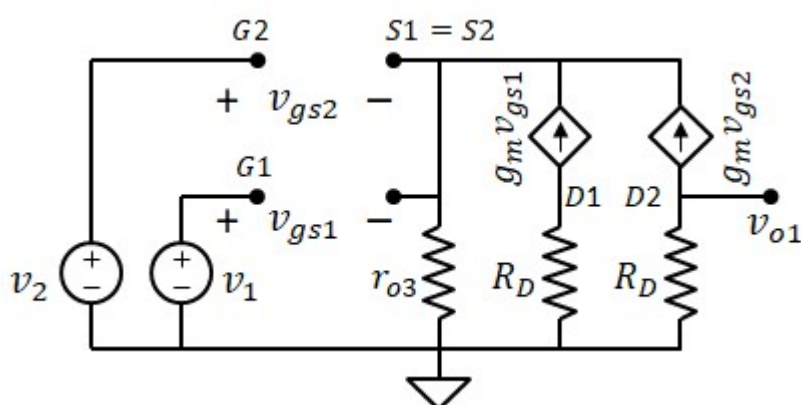
Potenziale del gate: $V_{G4} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS2} = 0 \text{ V}$

Potenziale del source: $V_{S4} = V_{G4} - V_{GS4} = 6 \text{ V}$

$$R_S = \frac{V_{DD} - V_{S4}}{I_{DS4}} = 7 \cdot \text{k}\Omega$$

3) guadagno di modo differenziale e di modo comune dell'intero circuito

Modello ai piccoli segnali primo stadio:



$$g_m = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN1}) = 2 \cdot \text{mS}$$

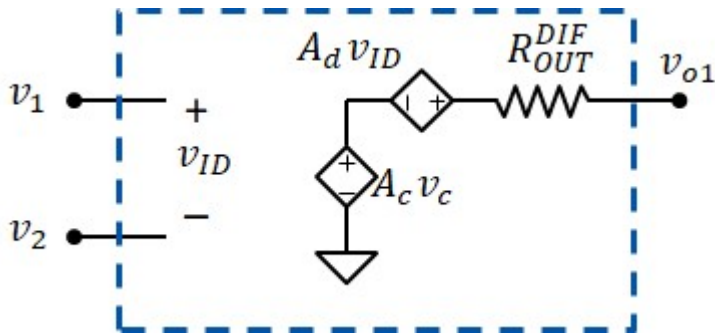
$$r_{o3} = \frac{1}{I_{DS3} \cdot \lambda_{n3}} = 125 \cdot \text{k}\Omega$$

Guadagno di modo differenziale: $A_d = \frac{g_m \cdot R_D}{2} = 50$ (Dato del problema)

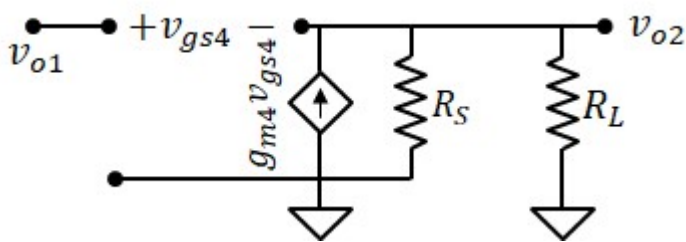
Guadagno di modo comune: $A_c = \frac{-g_m \cdot R_D}{1 + 2g_m \cdot r_{o3}} = -0.2$

Resistenza di uscita: $R_{OUT_DIF} = R_D = 50 \cdot \text{k}\Omega$

Modello elettrico equivalente al primo stadio:

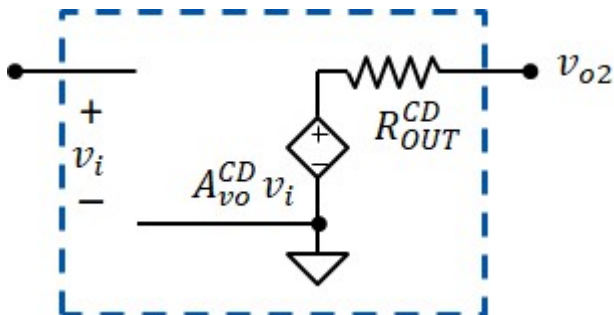


Modello ai piccoli segnali secondo stadio (gate comune):



$$g_{m4} = -k_{p4} \cdot (V_{GS4} - V_{TP4}) = 2 \cdot \text{mS}$$

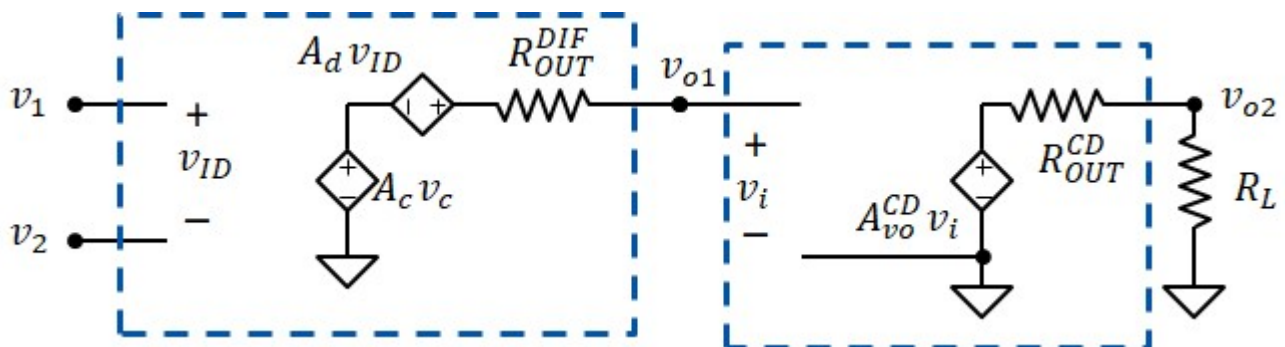
Modello elettrico equivalente al secondo stadio:



$$A_{vo_CD} = \frac{g_{m4} \cdot R_S}{1 + g_{m4} \cdot R_S} = 0.933$$

$$R_{OUT_CD} = \frac{R_S}{1 + g_{m4} \cdot R_S} = 0.467 \cdot \text{k}\Omega$$

Modello elettrico equivalente all'intero circuito:



$$A_d = 50$$

$$A_c = -0.2$$

$$A_{vo_CD} = 0.933$$

$$\frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}} = 0.977$$

$$v_{o2} = A_{vo_CD} \cdot (A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c) \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}}$$

Guadagno di modo differenziale complessivo:

$$A_{d_TOT} = \frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}} \cdot A_{vo_CD} \cdot A_d = 45.6$$

Guadagno di modo comune complessivo:

$$A_{c_TOT} = \frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}} \cdot A_{vo_CD} \cdot A_c = -0.18$$

4.1) tensione di uscita v_{o1} e v_{o2} con $v_1 = 10\text{mV}$ e $v_2 = -10\text{mV}$

Ingresso di modo comune: $v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 0\text{mV}$ uscita di modo comune: $A_c \cdot v_c = 0\text{mV}$

Ingresso di modo differenziale: $v_d = v_1 - v_2 = 20\text{mV}$ uscita di modo differenziale: $A_d \cdot v_d = 1\text{V}$

Tensione di uscita primo stadio: $v_{o1} = (A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c) = 1\text{V}$

Tensione di uscita secondo stadio: $v_{o2} = A_{vo_CD} \cdot v_{o1} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}} = 0.912\text{V}$

4.2) tensione di uscita v_{o1} e v_{o2} con $v_1 = 40\text{mV}$ e $v_2 = 60\text{mV}$

Ingresso di modo comune: $v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 50\text{mV}$ uscita di modo comune: $A_c \cdot v_c = -10\text{mV}$

Ingresso di modo differenziale: $v_d = v_1 - v_2 = -20\text{mV}$ uscita di modo differenziale: $A_d \cdot v_d = -1\text{V}$

Tensione di uscita primo stadio: $v_{o1} = (A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c) = -1.01\text{V}$

Tensione di uscita secondo stadio: $v_{o2} = A_{vo_CD} \cdot v_{o1} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}} = -0.921\text{V}$

4.1) tensione di uscita v_{o1} e v_{o2} con $v_1 = 60\text{mV}$ e $v_2 = 40\text{mV}$

Ingresso di modo comune: $v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 50\text{mV}$ uscita di modo comune: $A_c \cdot v_c = -10\text{mV}$

Ingresso di modo differenziale: $v_d = v_1 - v_2 = 20\text{mV}$ uscita di modo differenziale: $A_d \cdot v_d = 1\text{V}$

Tensione di uscita primo stadio: $v_{o1} = (A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c) = 0.99\text{V}$

Tensione di uscita secondo stadio: $v_{o2} = A_{vo_CD} \cdot v_{o1} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT_CD}} = 0.903\text{V}$

3) Punto di lavoro di tutti i transistor

M1 e M2 hanno lo stesso punto di lavoro (già calcolato):

$$V_{GS1} = V_{GS2} = 6 \text{ V}$$

$$V_{DS1} = V_{DS2} = 11 \text{ V}$$

$$I_{DS1} = I_{DS2} = 2.5 \text{ mA}$$

M3 (già calcolato):

$$V_{GS3} = -5 \text{ V}$$

$$V_{DS3} = -10 \text{ V}$$

$$I_{DS3} = 2 \text{ mA}$$

M4 (già calcolato):

$$V_{GS4} = 4 \text{ V}$$

$$V_{DS4} = V_{GS4} = 4 \text{ V}$$

$$I_{DS4} = 0.1 \text{ mA}$$

M5 (già calcolato):

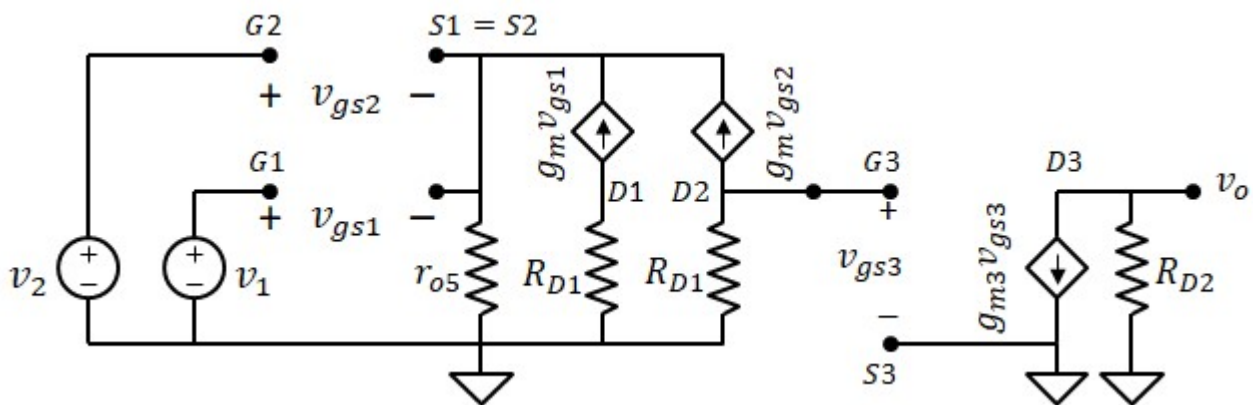
$$V_{GS5} = 4 \text{ V}$$

$$V_{DS5} = 4 \text{ V}$$

$$I_{DS5} = I_{DS1} + I_{DS2} = 5 \text{ mA}$$

4) Il guadagno di tensione di modo differenziale e il CMRR

Modello ai piccoli segnali:



Stadio 1: (differenziale)

Stadio 2: (source comune)

$$g_m = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN1}) = 1 \text{ mS} \quad r_{o5} = \frac{1}{I_{DS5} \cdot \lambda_{n5}} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m3} = -k_{p3} \cdot (V_{GS3} - V_{TP3}) = 2 \text{ mS}$$

Guadagno modo differenziale: $A_{do1} = \frac{g_m \cdot R_{D1}}{2} = 1$
(a vuoto)

Guadagno a vuoto: $A_{vo2} = -g_{m3} \cdot R_{D2} = -10$

Guadagno modo comune: $A_{co1} = \frac{-g_m \cdot R_{D1}}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{o5}} = -0.049$
(a vuoto)

Resistenza di ingresso: $R_{IN2} = \infty$

Resistenza di ingresso: $R_{IN1} = \infty$

Resistenza di uscita: $R_{OUT2} = R_{D2} = 5 \text{ k}\Omega$

Resistenza di uscita: $R_{OUT1} = R_{D1} = 2 \text{ k}\Omega$

Entrambi gli stadi hanno impedenza di ingresso infinita e l'uscita del secondo stadio non ha carico esterno. Quindi il guadagno complessivo del circuito coincide con quello a vuoto.

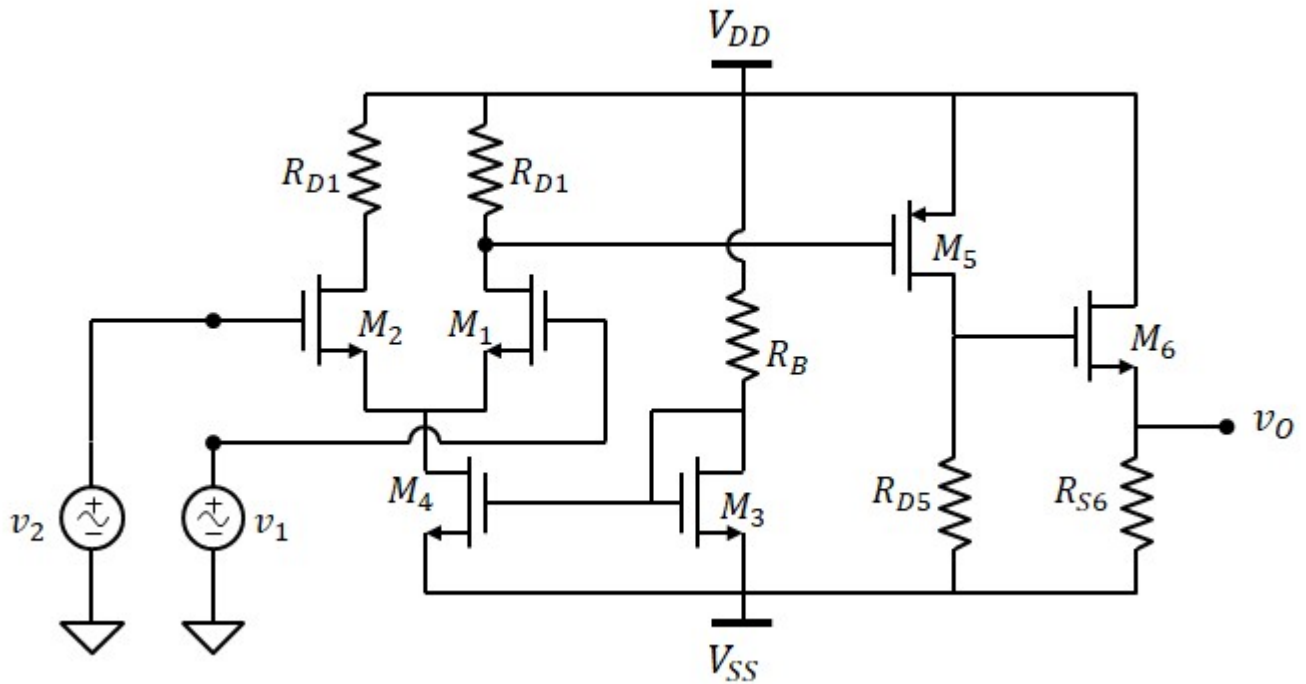
Modo differenziale: $A_d = A_{do1} \cdot A_{vo2} = -10$

Modo comune: $A_c = A_{co1} \cdot A_{vo2} = 0.488$

CMRR: $\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c} = 20.5$

5) La resistenza di uscita dell'amplificatore

$$R_{OUT} = R_{OUT2} = 5 \text{ k}\Omega$$

Esercizio 12

DATI:

$$V_{DD} = 10V, V_{SS} = -10V, R_{D1} = 15k\Omega, R_{D5} = 3k\Omega,$$

$$k_{n1} = 0.1mA \cdot V^{-2}, k_{n2} = 0.1mA \cdot V^{-2}, k_{n3} = 4mA \cdot V^{-2}, k_{n4} = 3.2mA \cdot V^{-2}, k_{n6} = 5mA \cdot V^{-2}, V_{TN} = 1V, \lambda_{n4} = 0.00IV^{-1}$$

$$k_{p5} = 2mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -1V$$

1) Resistenza R_B sapendo che la corrente attraverso M_4 è $I_{DS4} = 0.4mA$

$$I_{DS3} = I_{DS4} \cdot \frac{k_{n3}}{k_{n4}} = 0.5 \cdot mA \quad \text{Tensione richiesta a } M_3: \quad V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{n3}}} = 1.5V$$

$$R_B = \frac{V_{DD} - V_{SS} - V_{DS3}}{I_{DS3}} = 60 \cdot k\Omega$$

2) La polarizzazione di $M1, M2, M3, M4, M5$ e $M6$, sapendo che $V_O = 0V$.

MOSFET $M1$:

$$\text{Corrente di drain: } I_{DS1} = \frac{I_{DS4}}{2} \quad \text{Tensione gate-source: } V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_{DS1}}{k_{n1}}} = 3V$$

$$\text{Potenziali di gate, source e drain: } V_{G1} = 0 \quad V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} \quad V_{D1} = V_{DD} - R_{D1} \cdot I_{DS1} = 7V$$

$$\text{tensione drain.source: } V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 10V \quad V_{GS1} - V_{TN1} = 2V \quad M1 \text{ è in saturazione}$$

MOSFET $M2$ (uguale a $M1$):

$$I_{DS2} = I_{DS1} = 0.2 \cdot mA \quad V_{GS2} = V_{GS1} = 3V \quad V_{DS2} = V_{DS1} = 10V$$

MOSFET $M3$ (già studiato):

$$V_{DS3} = V_{GS3} = 1.5V \quad I_{DS3} = 0.5 \cdot mA$$

MOSFET M4:

$$V_{GS4} = V_{GS3} = 1.5 \text{ V}$$

$$V_{DS4} = V_{S1} - V_{SS} = 7 \text{ V}$$

$$V_{GS4} - V_{TN} = 0.5 \text{ V}$$

M4 è in saturazione

MOSFET M5 (il gate di M5 coincide con il drain di M1):

$$V_{GS5} = V_{D1} - V_{DD} = -3 \text{ V}$$

$$I_{DS5} = \frac{k_{p5}}{2} \cdot (V_{GS5} - V_{TP})^2 = 4 \cdot \text{mA}$$

Potenziale del drain:

$$V_{D5} = V_{SS} + R_{D5} \cdot I_{DS5} = 2 \text{ V}$$

Tensione drain-source

$$V_{DS5} = V_{D5} - V_{DD} = -8 \text{ V}$$

$$V_{GS5} - V_{TP} = -2 \text{ V} \quad \text{M5 è in saturazione}$$

MOSFET M6 (il gate di M6 coincide con il drain di M5):

$$V_{GS6} = V_{D5} - V_O = 2 \text{ V}$$

$$V_{GS6} - V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$V_{DS6} = V_{DD} - V_O = 10 \text{ V}$$

M6 è in saturazione

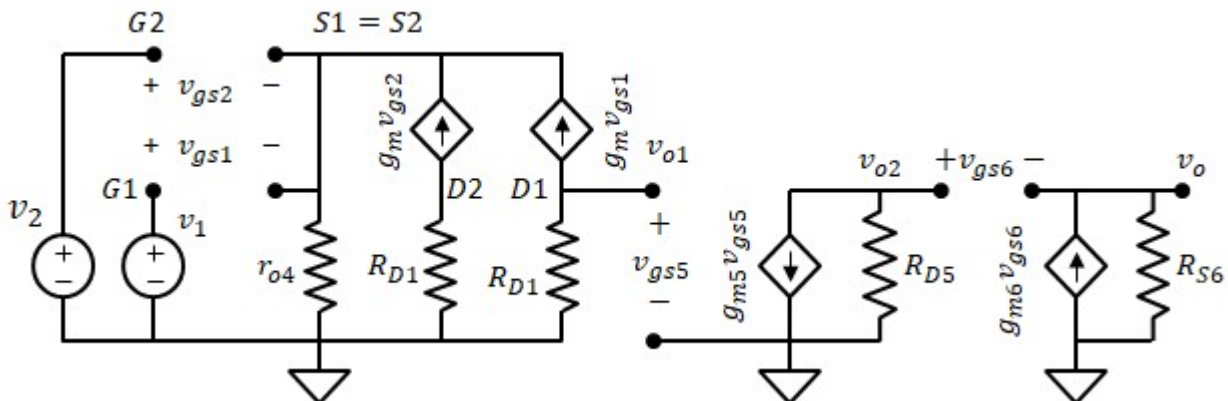
$$I_{DS6} = \frac{k_{n6}}{2} \cdot (V_{GS6} - V_{TN})^2 = 2.5 \cdot \text{mA}$$

3) R_{S3} affinché $V_O = 0 \text{ V}$

$$R_{S6} = \frac{V_O - V_{SS}}{I_{DS6}} = 4 \cdot \text{k}\Omega$$

4) Resistenza di uscita

Modello ai piccoli segnali



1° Stadio (differenziale)

$$g_m = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 0.2 \cdot \text{mS}$$

$$r_{o4} = \frac{1}{(I_{DS4} \cdot \lambda_{n4})} = 2.5 \cdot \text{M}\Omega$$

$$A_{do} = \frac{-g_m \cdot R_{D1}}{2} = -1.5$$

Negativo perché l'uscita è presa al drain di M1

$$A_{co} = \frac{-g_m \cdot R_{D1}}{1 + g_m \cdot r_{o4}} = -0.006$$

$$R_{OUT1} = R_{D1} = 15 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT} = R_{OUT3} = 190 \Omega$$

2° Stadio (CS)

$$g_{m5} = -k_{n5} \cdot (V_{GS5} - V_{TP}) = 5 \cdot \text{mS}$$

$$A_{vo1} = -g_{m5} \cdot R_{D5} = -15$$

$$R_{OUT2} = R_{D5} = 3 \cdot \text{k}\Omega$$

3° Stadio (CD)

$$g_{m6} = k_{n6} \cdot (V_{GS6} - V_{TN}) = 5 \cdot \text{mS}$$

$$A_{vo2} = \frac{R_{S6} \cdot g_{m6}}{1 + R_{S6} \cdot g_{m6}} = 0.952$$

$$R_{OUT3} = \frac{R_{S6}}{1 + R_{S6} \cdot g_{m6}} = 0.19 \cdot \text{k}\Omega$$

5) Guadagno di modo differenziale e CMRR

$$A_d = A_{do} \cdot A_{vo1} \cdot A_{vo2} = 21.4$$

$$A_c = A_{co} \cdot A_{vo1} \cdot A_{vo2} = 0.1$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = 250.5$$

6.1) tensione di uscita con $v_1 = 10\text{mV}$ e $v_2 = -10\text{mV}$

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 0\text{mV} \quad v_d = v_1 - v_2 = 20\text{mV}$$

$$v_o = A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c = 0.429\text{V}$$

componente di modo differenziale:

$$A_d \cdot v_d = 0.429\text{V}$$

componente di modo comune

$$A_c \cdot v_c = 0\text{mV}$$

6.2) tensione di uscita con $v_1 = 60\text{mV}$ e $v_2 = 40\text{mV}$

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = 50\text{mV} \quad v_d = v_1 - v_2 = 20\text{mV}$$

$$v_o = A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c = 0.433\text{V}$$

componente di modo differenziale:

$$A_d \cdot v_d = 0.429\text{V}$$

componente di modo comune

$$A_c \cdot v_c = 4.3\text{mV}$$

6.3) tensione di uscita con $v_1 = -40\text{mV}$ e $v_2 = -60\text{mV}$

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = -50\text{mV} \quad v_d = v_1 - v_2 = 20\text{mV}$$

$$v_o = A_d \cdot v_d + A_c \cdot v_c = 0.424\text{V}$$

componente di modo differenziale:

$$A_d \cdot v_d = 0.429\text{V}$$

componente di modo comune

$$A_c \cdot v_c = -4.3\text{mV}$$