

Amplificatori di tensione: stadi elementari

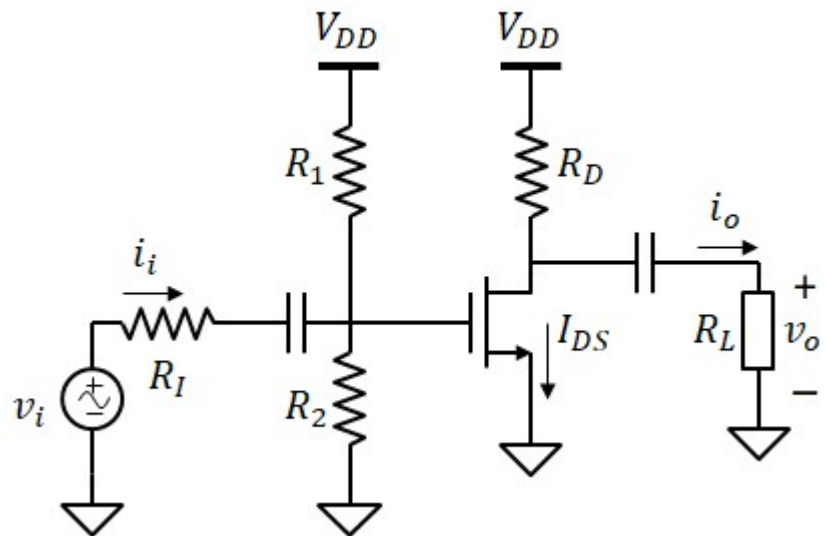
Esercizio 1

DATI:

$$V_{DD} = 12V$$

$$R_I = 1k\Omega, R_L = 1k\Omega, R_1 = 300k\Omega$$

$$V_{TN} = 1V$$



1) R_2 e R_D sapendo che il punto di polarizzazione del MOSFET è $V_{GS} = 4V$, $V_{DS} = 6V$ e $I_{DS} = 2mA$

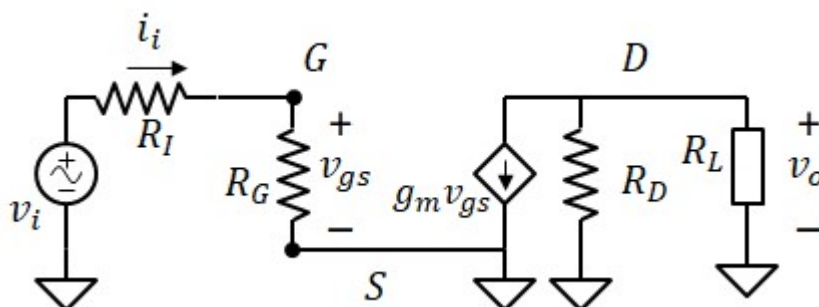
$$V_G = 0 + V_{GS} = 4V$$

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Quindi:} \quad R_2 = \frac{V_G}{V_{DD} - V_G} \cdot R_1 = 150k\Omega$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_{DS}} = 3k\Omega$$

2) modello ai piccoli segnali:

(configurazione a source comune)



$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 100k\Omega$$

$$g_m = \frac{2 \cdot I_{DS}}{V_{GS} - V_{TN}} = 1.33mS$$

3. Calcolare le resistenze di ingresso e di uscita dello stadio amplificatore

$$R_{IN} = R_G = 100k\Omega$$

$$R_{OUT} = R_D = 3k\Omega$$

4. Guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o sapendo che all'uscita è connesso il carico R_L

$$v_{gs} = \frac{R_G}{R_I + R_G} \cdot v_i = 0.99 \cdot v_i$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot \left(\frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \right) = -0.99 \cdot v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -0.99$$

Oppure riconoscendo che si tratta di uno stadio a source comune senza resistenza al source:

$$A_{vo} = -g_m \cdot R_D = -4$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = -0.99$$

Esercizio 2

DATI: $V_{DD} = -5V$, $V_{SS} = 5V$, $R_G = 100k\Omega$, $k_p = 1.6mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -1V$

1. Trovare i valori delle resistenze R_S e R_D tali che

$$V_{DS} = 2(V_{GS} - V_{TP}) \text{ e } I_{DS} = 0.8mA.$$

Analisi DC: annulliamo il generatore di segnale.

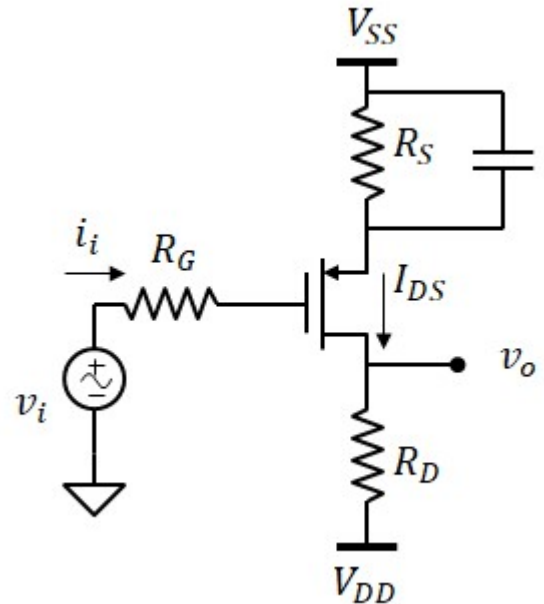
$$V_G = 0 \quad (\text{Non passa corrente attraverso la resistenza } R_G)$$

$$V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = -2V \quad V_S = V_G - V_{GS} = 2V$$

$$R_S = \frac{V_{SS} - V_S}{I_{DS}} = 3.75 \cdot k\Omega$$

$$V_{DS} = 2 \cdot V_{GS} = -4V \quad V_D = V_S + V_{DS} = -2V$$

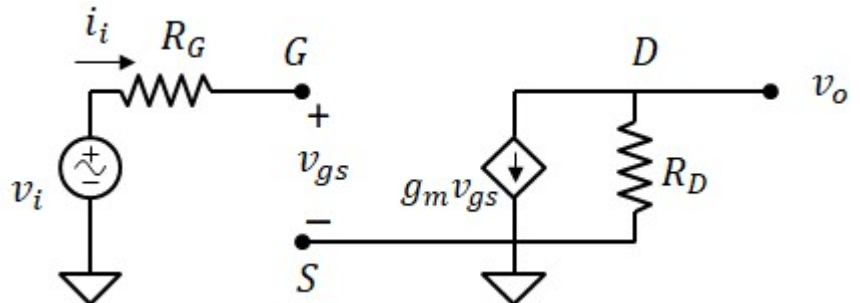
$$R_D = \frac{V_D - V_{DD}}{I_{DS}} = 3.75 \cdot k\Omega$$



2. Calcolare la resistenza di ingresso e di uscita dello stadio amplificatore al piccolo segnale

Modello al piccolo segnale (configurazione a source comune):

$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 1.6 \cdot mA$$



$$R_{IN} = \infty$$

$$R_{OUT} = R_D = 3.75 \cdot k\Omega$$

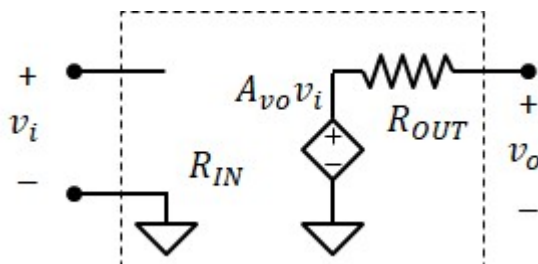
3. Calcolare il guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o .

Stadio a source comune:

$$A_{v0} = -g_m \cdot R_D = -6$$

Nessun carico in uscita, resistenza di ingresso infinita, quindi $A_v = A_{v0}$

4. Disegnare il modello a doppio bipolo per l'amplificatore.



$$R_{OUT} = 3.75 \cdot k\Omega$$

$$A_{v0} = -6$$

Esercizio 3

DATI: $V_{DD} = 36V$, $R_I = 100k\Omega$, $R_B = 1M\Omega$,

$R_D = 6k\Omega$, $R_{S1} = 200\Omega$, $R_L = 4k\Omega$,

$k_n = 0.4mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 5V$

1. Trovare le resistenze R_1 , R_2 e R_{S2}

affinché il MOSFET abbia:

$I_{DS} = 3mA$

$V_{DS} = 12V$

Scegliere R_1 e R_2 in modo che

$R_1 || R_2 = R_B$.

$$V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_n}} = 8.87V$$

Verifichiamo che $V_{DS} > V_{GS} - V_{TN} = 3.873V$

$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS} = 18V$$

$$V_S = V_D - V_{DS} = 6V$$

$$V_G = V_S + V_{GS} = 14.873V$$

$$R_{S2} = \frac{V_S}{I_{DS}} - R_{S1} = 1.8 \cdot k\Omega$$

In condizioni di polarizzazione DC, R_B non è percorsa da corrente, quindi:

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

Sappiamo inoltre che R_1 e R_2 devono essere scelte in modo che:

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_G}{V_{DD}} \cdot R_1 \quad (2)$$

Otteniamo quindi da (2):

$$R_1 = \frac{V_{DD} \cdot R_B}{V_G} = 2.42 \cdot M\Omega$$

Da (1) ricaviamo:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{V_G}{V_{DD} - V_G} = 1.7 \cdot M\Omega$$

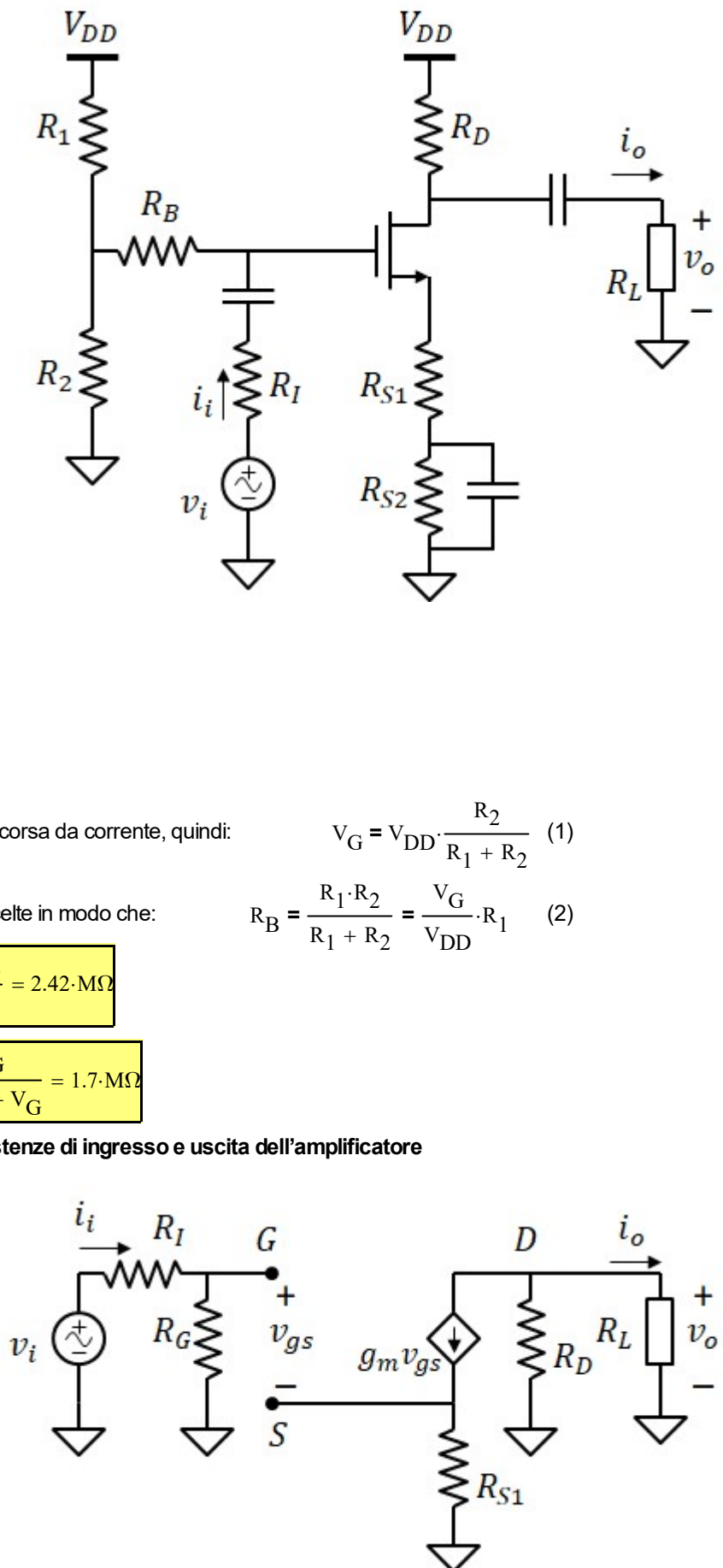
2) Calcolare il guadagno di tensione e le resistenze di ingresso e uscita dell'amplificatore

Modello ai piccoli segnali

(configurazione a source comune con resistenza al source):

$$R_G = R_B + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 2 \cdot M\Omega$$

$$g_m = k_n \cdot (V_{GS} - V_{TN}) = 1.55 \cdot mS$$



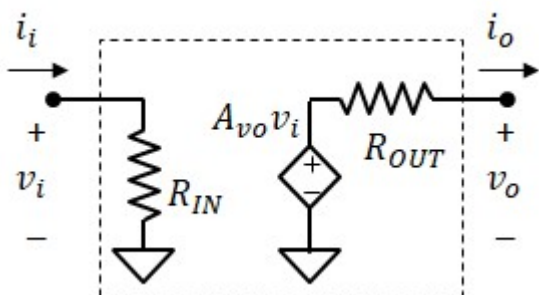
$$R_{IN} = R_G = 2 \cdot M\Omega$$

$$R_{OUT} = R_D = 6 \cdot k\Omega$$

$$A_{vo} = \frac{-g_m \cdot R_D}{1 + g_m \cdot R_{S1}} = -7.1$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = -2.7$$

3. Disegnare il modello a doppio bipolo dell'amplificatore



$$R_{IN} = 2 \cdot M\Omega$$

$$R_{OUT} = 6 \cdot k\Omega$$

$$A_{vo} = -7.1$$

Esercizio 4

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

$R_2 = 100k\Omega$, $R_D = 10k\Omega$, $R_I = 25k\Omega$, $R_L = 90k\Omega$;

$k_p = 0.5mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -3V$

1) Valore della resistenza R_1 affinché la corrente del transistor sia $I_{DS} = 1mA$.

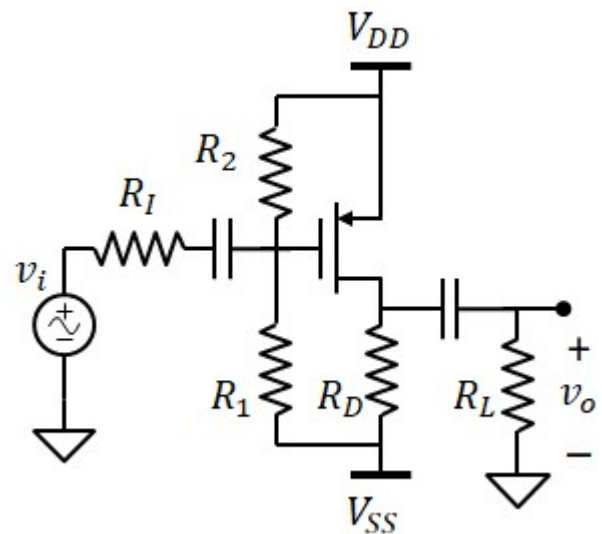
Supponendo il MOSFET in saturazione:

$$V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = -5V$$

Regola del partitore di tensione:

$$V_{R2} = -V_{GS} = 5V \quad V_{R1} = V_{DD} - V_{SS} - V_{R2} = 15V$$

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{V_{R1}}{V_{R2}} = 300 \cdot k\Omega$$



2) Punto di lavoro del transistor

$$V_{GS} = -5V$$

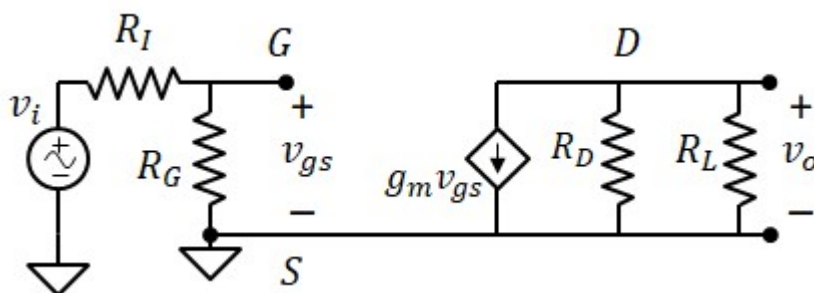
$$I_{DS} = 1 \cdot mA$$

$$V_{DS} = -[(V_{DD} - V_{SS}) - R_D \cdot I_{DS}] = -10V$$

$$V_{GS} - V_{TP} = -2V \quad \text{OK! il MOSFET è in saturazione}$$

4) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a source comune):



Stadio Source Comune

$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 1 \cdot mS$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 75 \cdot k\Omega$$

$$R_{IN} = R_G = 75 \cdot k\Omega$$

$$R_{OUT} = R_D = 10 \cdot k\Omega$$

3) Guadagno di tensione

$$A_v = -g_m \cdot \left(\frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \right) \cdot \frac{R_G}{R_G + R_I} = -6.75$$

Esercizio 5

DATI:

$$V_{DD} = 20V, V_{SS} = -10V;$$

$$R_1 = 500k\Omega, R_2 = 100k\Omega, R_D = 12k\Omega,$$

$$R_S = 1k\Omega, R_I = 10k\Omega, R_L = 100k\Omega;$$

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

1) Punto di lavoro del transistor

$$\frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = \frac{V_{DD} - (V_G - V_{GS})}{R_S}$$

$$V_G = V_{SS} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (V_{DD} - V_{SS}) = 15V$$

$$\text{Poniamo } x = V_{GS} - V_{TP} = x$$

$$\frac{R_S \cdot k_p}{2} \cdot x^2 = V_{DD} - V_G + V_{TP} + x$$

$$a = \frac{R_S \cdot k_p}{2} = 0.5 \cdot V^{-1}$$

$$c = -(V_{DD} - V_G + V_{TP}) = -4V$$

$$a \cdot x^2 - x + c = 0 \quad \text{Soluzioni:} \quad x_1 = \frac{1 + \sqrt{1 - 4 \cdot a \cdot c}}{2a} = 4V \quad \text{non accettabile}$$

$$x_2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \cdot a \cdot c}}{2a} = -2V \quad \text{accettabile}$$

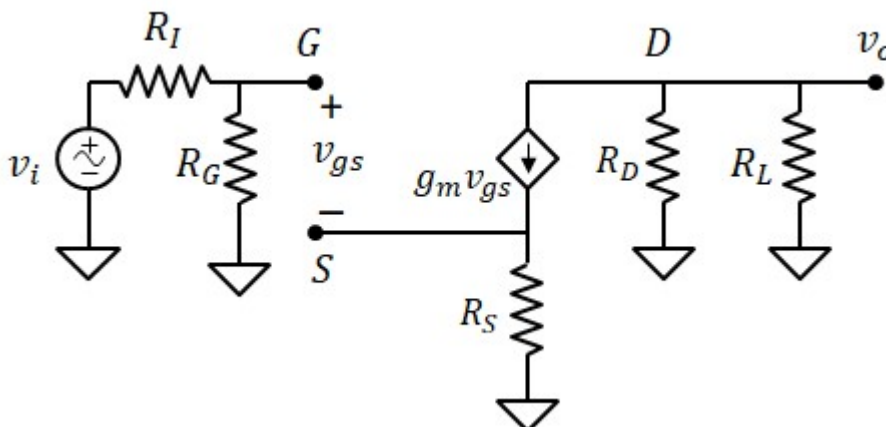
$$V_{GS} = V_{TP} + x_2 = -3V$$

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = 2mA$$

$$V_{DS} = -[V_{DD} - V_{SS} - (R_D + R_S) \cdot I_{DS}] = -4V \quad V_{GS} - V_{TP} = -2V \quad \text{OK! Saturazione}$$

2) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a source comune con resistenza al source):



$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 83.3 \cdot k\Omega$$

$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 2 \cdot mS$$

$$R_{IN} = R_G = 83.3 \cdot k\Omega$$

$$R_{OUT} = R_D = 12 \cdot k\Omega$$

2) Guadagno di tensione

$$A_{vo} = \frac{-g_m \cdot R_D}{1 + g_m \cdot R_S} = -8$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_I + R_{IN}} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = -6.38$$

Esercizio 6

DATI:

$$V_{DD} = 12V, R_I = 1k\Omega, R_1 = 300k\Omega, R_2 = 100k\Omega$$

$$R_L = 1k\Omega, R_S = 1k\Omega; k_p = 3mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -1V$$

1) Calcolare la polarizzazione del MOSFET

Legge di Kirchhoff:

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = \frac{V_{DD} - V_S}{R_S}$$

$$\text{Poniamo } x = V_{GS} - V_{TP} < 0$$

$$\text{Quindi: } V_S = V_G - V_{GS} = V_G - V_{TP} - x$$

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD}$$

$$x^2 - 2 \cdot \frac{x}{k_p \cdot R_S} + 2 \cdot \frac{V_G - V_{TP} - V_{DD}}{k_p \cdot R_S} = 0$$

$$b = -\frac{2}{k_p \cdot R_S} = -0.667V$$

$$c = 2 \cdot \frac{V_G - V_{TP} - V_{DD}}{k_p \cdot R_S} = -5.333V^2$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 2.667V$$

non accettabile

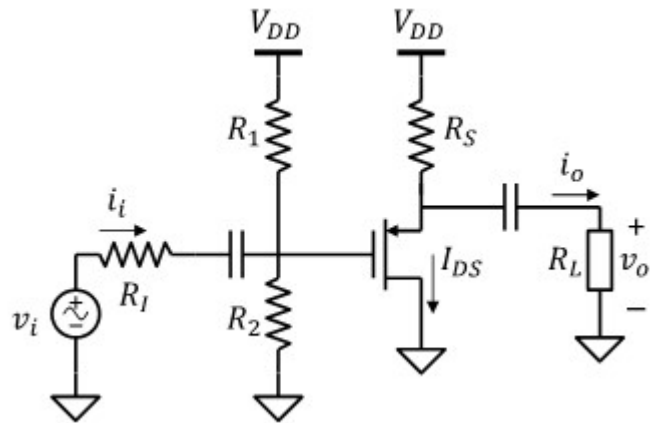
$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -2V$$

$$V_{GS} = x_2 + V_{TP} = -3V$$

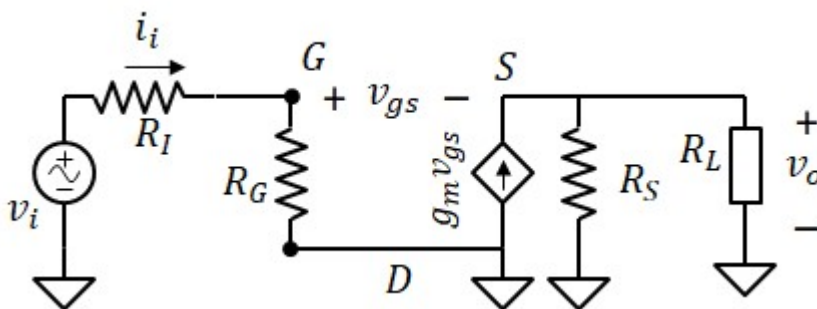
$$V_S = V_G - V_{GS} = 6V$$

$$V_{DS} = 0 - V_S = -6V$$

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = 6mA$$

**2) Resistenza di ingresso e di uscita**

Modello ai piccoli segnali (configurazione a drain comune):



$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 6mS$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 75k\Omega$$

$$R_{IN} = R_G = 75k\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 143\Omega$$

3) Guadagno di tensione e di corrente

$$A_{vo} = \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.857$$

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.75$$

Esercizio 7

DATI:

$$V_{DD} = 12V, R_I = 1k\Omega, R_1 = 200k\Omega, R_L = 1k\Omega, V_{TN} = 1V$$

$$V_{GS} = 2V, V_{DS} = 6V, I_{DS} = 2mA$$

1) Resistenza R_2 e R_S

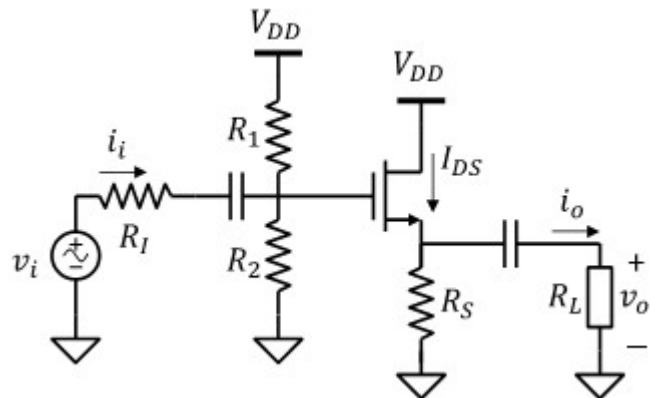
Potenziale del source: $V_S = V_{DD} - V_{DS} = 6V$

Potenziale del gate: $V_G = V_S + V_{GS} = 8V$

Corrente attraverso R_1 : $I_{R1} = \frac{V_{DD} - V_G}{R_1} = 20\mu A$

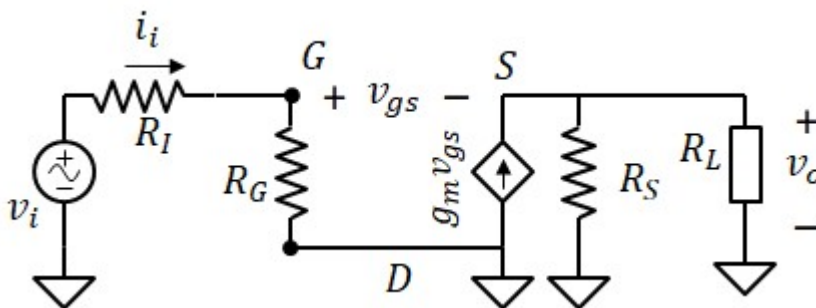
Resistenza R_2 : $R_2 = \frac{V_G}{I_{R1}} = 400k\Omega$

Resistenza R_S : $R_S = \frac{V_S}{I_{DS}} = 3k\Omega$



2) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a drain comune):



$$g_m = 2 \cdot \frac{I_{DS}}{V_{GS} - V_{TN}} = 4mS$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 133.3k\Omega$$

$$R_{IN} = R_G = 133.3k\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.231k\Omega$$

3) Guadagno di tensione e di corrente

$$A_{vo} = \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.923$$

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.75$$

Esercizio 8

DATI:

$$V_{DD} = 4V, R_I = 100\Omega, R_L = 20k\Omega, k_p = 2mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -0.5V$$

1) Resistenza R_D e R_S sapendo che $V_{DS} = -4V$ e $I_{DS} = 0.25mA$

Tensione gate-source: $V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = -1V$

Potenziale del gate: $V_G = 0$

Potenziale del source: $V_S = V_G - V_{GS} = 1V$

Potenziale del drain: $V_D = V_S + V_{DS} = -3V$

Corrente attraverso R_L : $I_L = \frac{V_S}{R_L} = 50 \mu A$

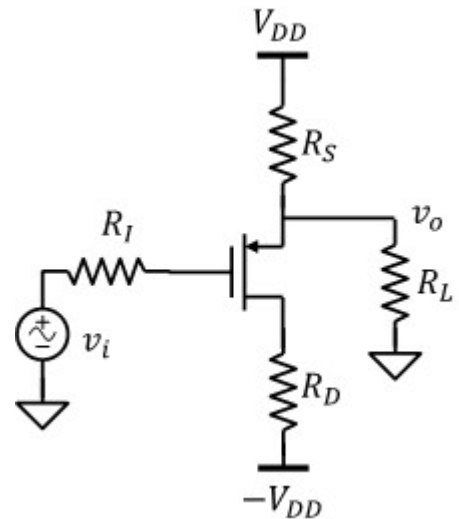
Corrente attraverso R_S : $I_S = I_{DS} + I_L = 0.3 \cdot mA$

Resistenza R_S :

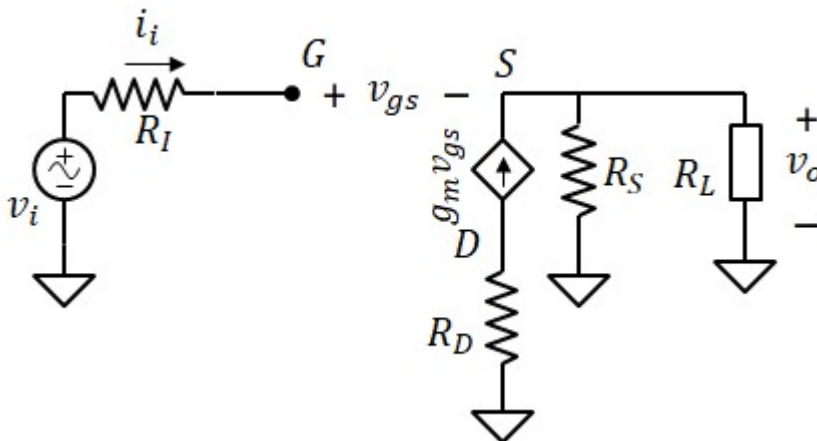
$$R_S = \frac{V_{DD} - V_S}{I_S} = 10 \cdot k\Omega$$

Resistenza R_D :

$$R_D = \frac{V_D - (-V_{DD})}{I_{DS}} = 4 \cdot k\Omega$$

**2) Resistenza di ingresso e di uscita**

Modello ai piccoli segnali (configurazione a drain comune):



$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 1 \cdot mS$$

$$R_{IN} = \infty$$

Posto $v_i = 0$ e fissata v_S , calcoliamo i_S :

$$i_S = \frac{v_S}{R_S} - g_m \cdot (0 - v_S) = v_S \cdot \left(g_m + \frac{1}{R_S} \right)$$

$$R_{OUT} = \frac{R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.909 \cdot k\Omega$$

3) Guadagno di tensione e di correnteRimosso il carico, fissiamo v_g :

$$v_O = R_S \cdot g_m \cdot (v_O - v_g)$$

$$A_{vO} = \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.909$$

$$A_v = A_{vO} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.87$$

Esercizio 9

DATI:

$$V_{DD} = 20\text{V}, R_2 = 280\text{k}\Omega, R_L = 15\text{k}\Omega, R_S = 2\text{k}\Omega$$

$$k_p = 2\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}, V_{TP} = 2\text{V}$$

1) Resistenza R_1 per avere $I_{DS} = 4\text{mA}$

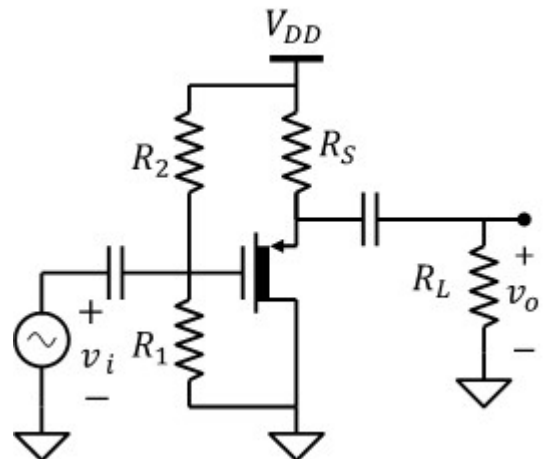
$$\text{Tensione gate-source richiesta: } V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = 0\text{V}$$

$$\text{Potenziale del source: } V_S = V_{DD} - R_S \cdot I_{DS} = 12\text{V}$$

$$\text{Potenziale del gate: } V_G = V_S + V_{GS} = 12\text{V}$$

Dalla regola del partitore di tensione:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{V_G}{V_{DD} - V_G} = 420\text{k}\Omega$$

**2) Punto di lavoro del transistor**

$$V_{GS} = 0\text{V}$$

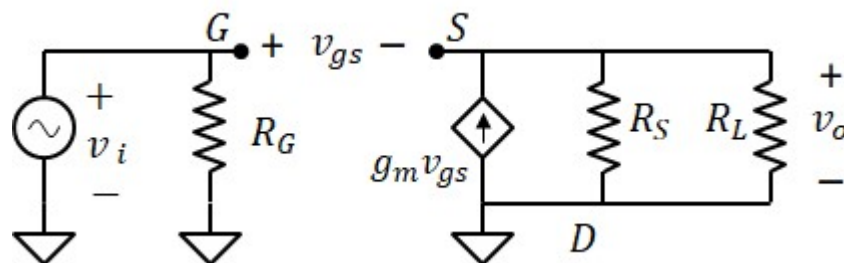
$$V_{DS} = 0 - V_S = -12\text{V}$$

$$V_{GS} - V_{TP} = -2\text{V}$$

OK! il MOSFET è in saturazione

3) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a drain comune):



$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 4\text{mS}$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 168\text{k}\Omega$$

$$R_{IN} = R_G = 168\text{k}\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 222\Omega$$

4) Guadagno di tensione e di corrente

$$A_{vo} = \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.889$$

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.876$$

Esercizio 10

DATI:

$$R_1 = 20\text{k}\Omega, R_2 = 20\text{k}\Omega, R_D = 3.7\text{k}\Omega, R_L = 10\text{k}\Omega;$$

$$V_{DD} = 10\text{V}, V_{SS} = -5\text{V};$$

$$k_n = 1\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}, V_{TN} = 0.5\text{V}$$

1) Il punto di lavoro del transistor

Annullando il generatore di segnale, il source è al potenziale di massa

$$\text{Potenziale di gate: } V_G = V_{SS} + (V_{DD} - V_{SS}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2.5\text{V}$$

$$\text{Tensione gate-source: } V_{GS} = V_G - 0\text{V} = 2.5\text{V}$$

Supponiamo il MOSFET in saturazione:

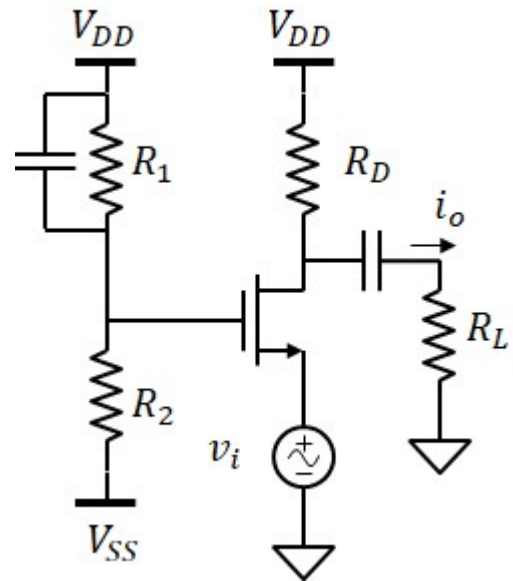
$$I_{DS} = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 2\text{mA}$$

$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS} = 2.6\text{V}$$

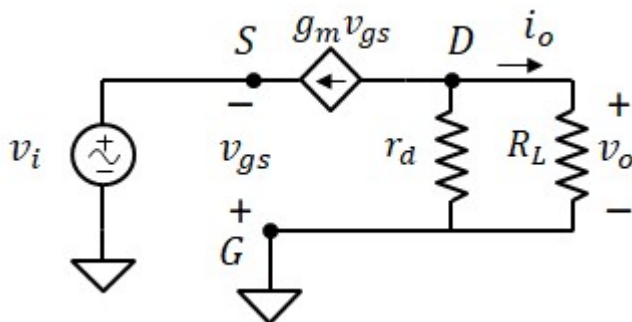
$$V_{DS} = V_D - 0\text{V} = 2.6\text{V}$$

$$V_{GS} - V_{TN} = 2\text{V}$$

OK! Saturazione

**2) Resistenze di ingresso e uscita**

Modello ai piccoli segnali (configurazione a gate comune):



$$g_m = k_n \cdot (V_{GS} - V_{TN}) = 2\text{mS}$$

Resistenza di ingressoImponiamo la tensione v_i all'ingresso e calcoliamo la corrente erogata dal generatore

$$i_i = -g_m \cdot v_{gs} = g_m \cdot v_i \quad R_{IN} = \frac{1}{g_m} = 500\Omega$$

Resistenza di uscitaannulliamo v_i (e quindi v_{gs})

$$R_{OUT} = R_D = 3.7\text{k}\Omega$$

3) Il guadagno di tensione v_o/v_i

$$v_o = \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \cdot (-g_m \cdot v_{gs}) = \frac{R_D}{R_D + R_L} \cdot (g_m \cdot v_i)$$

$$A_v = g_m \cdot \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} = 5.4$$

Esercizio 11

DATI:

$$R_1 = 55\text{k}\Omega, R_L = 24\text{k}\Omega, V_{DD} = 5\text{V}, k_n = 4\text{mA}\cdot\text{V}^{-2}, V_{TN} = 1\text{V}$$

1. Il valore di R_2 , R_S e R_D affinché risulti:

$$v_O = 1\text{V}, I_{DS} = 0.5\text{mA} \text{ e } V_{DS} = 2V_{GS}$$

$$\text{Tensione gate-source: } V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_n}} = 1.5\text{V}$$

$$\text{Tensione drain-source: } V_{DS} = 2 \cdot V_{GS} = 3\text{V}$$

$$\text{Potenziale di drain: } V_D = v_O = 1\text{V}$$

$$\text{Potenziale di source: } V_S = V_D - V_{DS} = -2\text{V}$$

$$\text{Potenziale del gate: } V_G = V_S + V_{GS} = -0.5\text{V}$$

$$\text{Corrente attraverso } R_1 \text{ e } R_2 \quad I_R = \frac{V_{DD} - V_G}{R_1} = 100\text{ }\mu\text{A}$$

Resistenza R_2 :

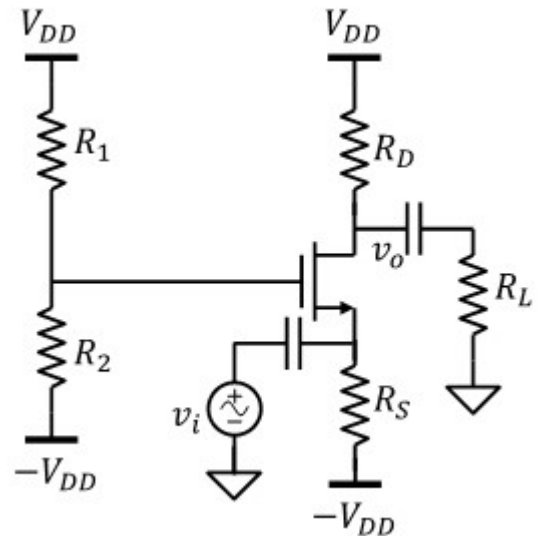
$$R_2 = \frac{V_G - (-V_{DD})}{I_R} = 45\text{ k}\Omega$$

Resistenza R_D :

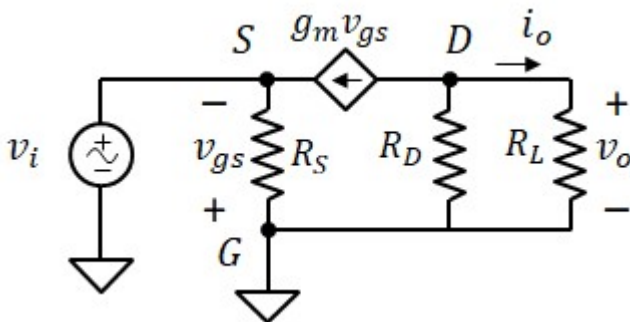
$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_{DS}} = 8\text{ k}\Omega$$

Resistenza R_D :

$$R_S = \frac{V_S - (-V_{DD})}{I_{DS}} = 6\text{ k}\Omega$$

**2) Resistenze di ingresso e uscita**

Modello ai piccoli segnali (configurazione a gate comune):



$$g_m = k_n \cdot (V_{GS} - V_{TN}) = 2\text{ mS}$$

Resistenza di ingressoImponiamo la tensione v_i all'ingresso e calcoliamo la corrente i_i erogata dal generatore

$$i_i = -g_m \cdot v_{gs} = g_m \cdot v_i$$

$$R_{IN} = \frac{R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 0.462\text{ k}\Omega$$

Resistenza di uscitaannulliamo v_i (e quindi v_{gs})

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

3) Il guadagno di tensione v_o/v_i

$$v_o = \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \cdot (-g_m \cdot v_{gs}) = \frac{R_D}{R_D + R_L} \cdot (g_m \cdot v_i)$$

$$A_v = g_m \cdot \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} = 12$$

Esercizio 12

DATI:

$$V_{DD} = 12V, V_{SS} = -12V,$$

$$R_1 = 150k\Omega, R_2 = 750k\Omega, R_D = 5k\Omega, R_I = 500\Omega, R_L = 5k\Omega;$$

$$k_p = 0.6mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -6V.$$

1) Resistenza R_S per ottenere $V_S = 0V$

Potenziale del gate del MOSFET:

$$V_G = V_{SS} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (V_{DD} - V_{SS}) = -8V$$

Tensione gate-source del MOSFET:

$$V_{GS} = V_G - V_S = -8V$$

Corrente attraverso il MOSFET (e attraverso R_S) nell'ipotesi che sia in saturazione:

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = 1.2mA$$

Resistenza R_S :

$$R_S = \frac{V_{DD} - V_S}{I_{DS}} = 10k\Omega$$

2) Punto di lavoro del transistor (e verifica della zona di saturazione)Potenziale del drain del MOSFET: $V_D = V_{SS} + R_D \cdot I_{DS} = -6V$

Tensione drain-source del MOSFET:

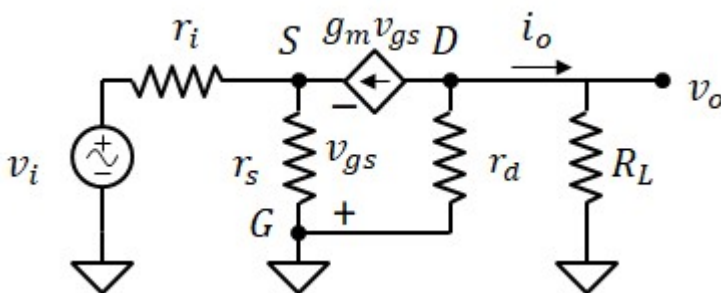
$$V_{DS} = V_D - V_S = -6V$$

$$V_{GS} = -8V$$

$$V_{GS} - V_{TP} = -2V \quad \text{OK! Saturazione}$$

3) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a gate comune):



$$g_m = -k_p \cdot (V_{GS} - V_{TP}) = 1.2mS$$

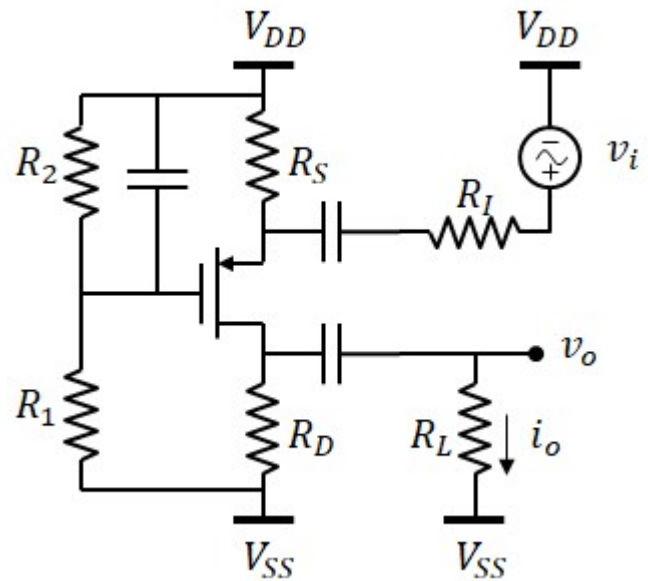
$$R_{IN} = \frac{R_S}{1 + g_m \cdot R_S} = 769\Omega$$

$$R_{OUT} = R_D = 5k\Omega$$

4) Guadagno di tensione e di corrente

$$A_{vo} = g_m \cdot R_D = 6$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = 1.82$$



Esercizio 13

DATI:

$$V_{DD} = 20V, V_B = 15V;$$

$$R_1 = 100k\Omega, R_2 = 100k\Omega, R_I = 50k\Omega, R_L = 75k\Omega;$$

$$M_1: k_n = 4mA \cdot V^{-2}, V_{TN} = 4V, \lambda_n = 0$$

$$M_2: k_p = 1mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -1V, \lambda_p = 0.001V^{-1}$$

1) Il valore di R_S affinché la tensione drain-source di M_2 sia $V_{DS2} = -10V$

Corrente attraverso M_2 (usando anche λ):

$$V_{GS2} = V_B - V_{DD} = -5V$$

$$V_{GS2} - V_{TP} = -4V \quad \text{Il MOSFET è in saturazione con: } V_{DS2} = -10V$$

$$I_{DS2} = \frac{k_p}{2} (V_{GS2} - V_{TP})^2 = 8 \cdot mA$$

$$I_{DS1} = I_{DS2}$$

Tensione gate-source richiesta a M_1 (per ipotesi in saturazione):

$$V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_n}} = 6V$$

$$\text{Potenziale del gate di } M_1: V_{G1} = V_{DD} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10V$$

$$V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 4V$$

Resistenza R_S :

$$R_S = \frac{V_{S1} - 0}{I_{DS1}} = 500 \Omega$$

$$V_{DS1} = V_{DD} - (-V_{DS2}) - V_{S1} = 6V \quad \text{OK! Saturazione}$$

2) Punto di lavoro dei transistor

$$V_{GS1} = 6V$$

$$V_{DS1} = 6V$$

$$I_{DS1} = 8 \cdot mA$$

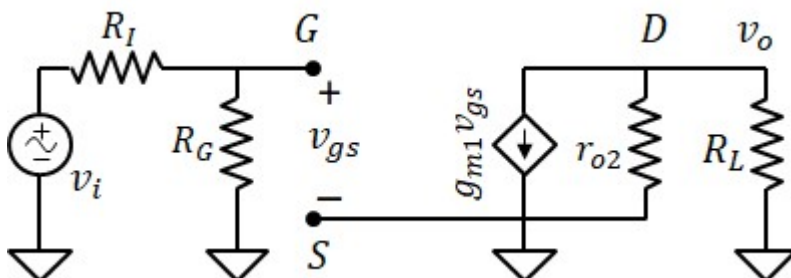
$$V_{GS2} = -5V$$

$$V_{DS2} = -10V$$

$$I_{DS2} = 8 \cdot mA$$

3) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a source comune):



$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 50 \cdot k\Omega$$

$$g_{m1} = k_n \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 8 \cdot mA$$

$$r_{o2} = \frac{2}{k_p \cdot (V_{GS2} - V_{TP})^2 \cdot \lambda_p} = 125 \cdot k\Omega$$

$$R_{IN} = R_G = 50 \cdot k\Omega$$

$$R_{OUT} = r_{o2} = 125 \cdot k\Omega$$

4) Guadagno di tensione

$$A_{vo} = -g_{m1} \cdot r_{o2} = -1000$$

$$A_{vo} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = -187.5$$

Esercizio 14

DATI:

$$V_{DD} = 15V, V_{SS} = -15V,$$

$$R_G = 100k\Omega, R_D = 2k\Omega, R_I = 100\Omega, R_L = 1k\Omega;$$

$$k_{n1} = 2.5mA \cdot V^{-2}, k_{n2} = 2.5mA \cdot V^{-2}, V_{TN} = 5V,$$

$$\lambda_{n2} = 0.01V^{-1}$$

1) Calcolare la tensione V_{REF} affinché M_1 sia in saturazione e abbia corrente $I_{DS1} = 5mA$.

$$I_{DS2} = I_{DS1} = 5 \cdot mA$$

$$V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n2}}} = 7V$$

$$V_{GS2} = V_{REF} - V_{SS}$$

$$V_{REF} = V_{SS} + V_{GS2} = -8V$$

Verifica:

$$V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 7V \quad V_{S1} = 0V - V_{GS1} = -7V \quad V_{DS2} = V_{S1} - V_{SS} = 8V$$

$$V_{GS2} - V_{TN} = 2V \quad M_2 \text{ è in saturazione}$$

2) Polarizzazione di tutti i MOSFET:

$$M_1: \quad V_{GS1} = 7V \quad V_{D1} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS1} = 5V \quad V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 12V \quad I_{DS1} = 5 \cdot mA$$

$$V_{GS1} - V_{TN} = 2V \quad M_1 \text{ è in saturazione}$$

$$M_2: \quad V_{GS2} = 7V \quad V_{DS2} = 8V \quad I_{DS2} = 5 \cdot mA$$

3) Potenza erogata da V_{DD} e V_{SS} :

Corrente erogata da V_{DD} : $I_{DD} = I_{DS1} = 5 \cdot mA$ positiva se entrante (convenzione dei generatori)

$$P_{DD} = V_{DD} \cdot I_{DD} = 75 \cdot mW \quad \text{Potenza positiva, quindi erogata al carico}$$

Corrente erogata da V_{SS} : $I_{SS} = -I_{DS2} = -5 \cdot mA$ negativa perchè è entrante (convenzione dei generatori)

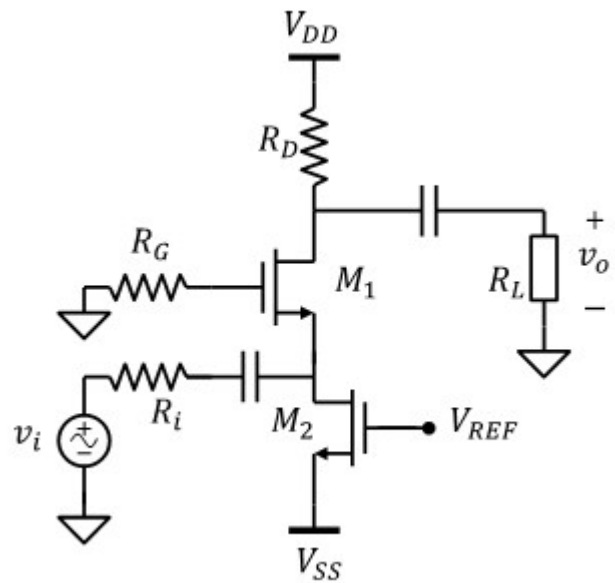
$$P_{SS} = V_{SS} \cdot I_{SS} = 75 \cdot mW \quad \text{Potenza positiva, quindi erogata al carico}$$

4) Potenza dissipata nei MOSFET e nelle resistenze R_D e R_G :

$$I_{RG} = 0 \quad I_{RD} = I_{DS1} = 5 \cdot mA$$

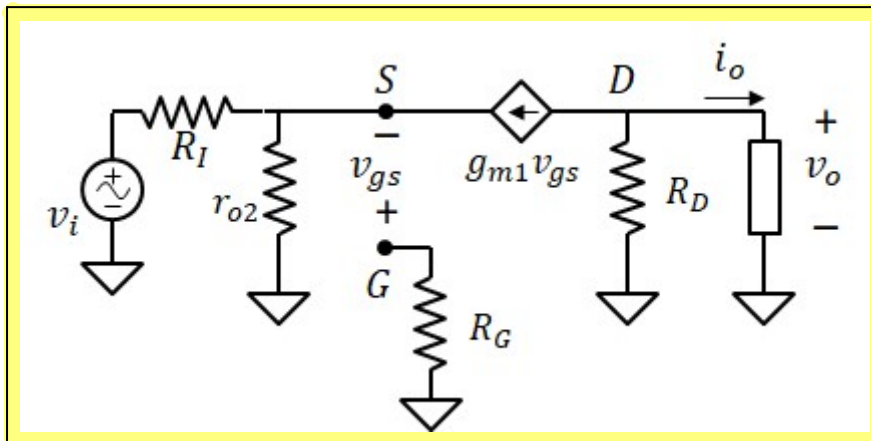
$$P_G = R_G \cdot I_{RG}^2 = 0 \quad P_{M1} = I_{DS1} \cdot V_{DS1} = 60 \cdot mW$$

$$P_D = R_D \cdot I_{RD}^2 = 50 \cdot mW \quad P_{M2} = I_{DS2} \cdot V_{DS2} = 40 \cdot mW$$



5) resistenza di ingresso e di uscita e guadagno di tensione

Modello ai piccoli segnali (configurazione a gate comune):



$$g_{m1} = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 5 \cdot \text{mS}$$

$$r_{o2} = \frac{2}{k_{n2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 \cdot \lambda_{n2}} = 20 \cdot \text{k}\Omega$$

Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = \frac{r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 198 \Omega$$

$$R_{OUT} = R_D = 2 \cdot \text{k}\Omega$$

Guadagno di corrente

$$A_{vo} = g_{m1} \cdot R_D = 10$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_I + R_{IN}} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 2.215$$

Esercizio 15

DATI:

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

$$R_I = 15k\Omega, R_L = 1k\Omega;$$

$$k_{n1} = 5mA \cdot V^{-2}, k_{n2} = 5mA \cdot V^{-2}, k_{n3} = 0.5mA \cdot V^{-2}$$

$$V_{TN} = 2V, \lambda_{n2} = 0.01V^{-1}$$

1) Calcolare la tensione V_{REF} affinché M_1 abbia corrente $I_{DS1} = 2.5mA$.

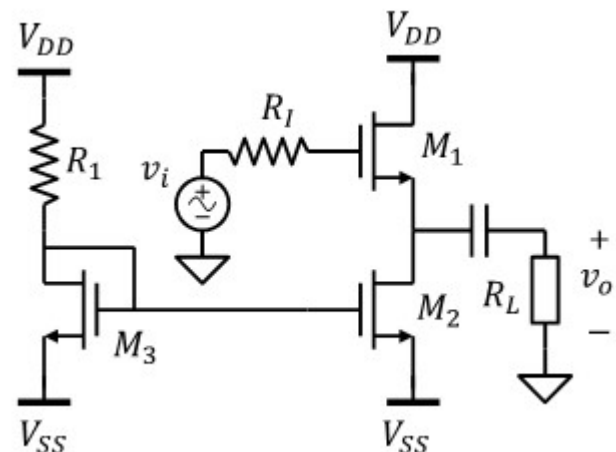
$$I_{DS2} = I_{DS1} = 2.5mA$$

$$V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n2}}} = 3V$$

Specchio di corrente: $I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{k_{n2}} \cdot I_{DS2} = 0.25mA$ $V_{GS3} = V_{GS2}$ $V_{DS3} = V_{GS3}$

Resistenza R_1 :

$$R_1 = \frac{V_{DD} - V_{SS} - V_{DS3}}{I_{DS3}} = 68k\Omega$$



2) Polarizzazione di tutti i MOSFET:

M_1 : Tensione gate-source

$$V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 3V$$

Potenziale del source:

$$V_{S1} = 0 - V_{GS1} = -3V$$

Tensione drain-source

$$V_{DS1} = V_{DD} - V_{S1} = 13V$$

Saturazione

M_2 : Tensione gate-source

$$V_{GS2} = 3V$$

Tensione drain-source

$$V_{DS2} = V_{S1} - V_{SS} = 7V$$

Saturazione

M_3 : Tensione gate-source

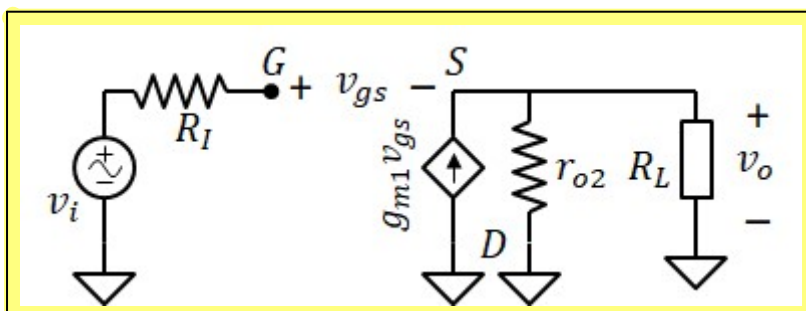
$$V_{GS3} = 3V$$

Tensione drain-source

$$V_{DS3} = 3V$$

3) Modello ai piccoli segnali

Modello ai piccoli segnali (configurazione a drain comune):



$$g_{m1} = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 5mS$$

$$r_{o2} = \frac{2}{k_{n2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 \cdot \lambda_{n2}} = 40k\Omega$$

4) Resistenza di ingresso e di uscita

Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = \infty$$

$$R_{OUT} = \frac{r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 199 \cdot \Omega$$

Guadagno di corrente

$$A_{vo} = \frac{g_{m1} \cdot r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 0.995$$

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.83$$

Esercizio 16

DATI:

$$V_{DD} = 5V$$

$$R_1 = 35k\Omega, R_I = 15k\Omega, R_L = 2k\Omega;$$

$$k_{n1} = 1.6mA \cdot V^{-2}, k_{n2} = 8mA \cdot V^{-2}, k_{n3} = 0.2mA \cdot V^{-2}$$

$$V_{TN} = 0.5V, \lambda_{n2} = 0.01V^{-1}$$

1) Calcolare la corrente attraverso M_3 .

Legge di kirchhoff:

$$I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = \frac{V_{DD} - V_{GS3}}{R_1}$$

Poniamo: $x = V_{GS3} - V_{TN}$

$$x^2 + \frac{2 \cdot x}{k_{n3} \cdot R_1} + \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{DD})}{k_{n3} \cdot R_1} = 0$$

$$b = \frac{2}{k_{n3} \cdot R_1} = 0.286 V$$

$$c = \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{DD})}{k_{n3} \cdot R_1} = -1.286 V^2$$

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -1.286 V$$

$$x_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 1 V$$

$$V_{GS3} = x_2 + V_{TN}$$

$$V_{DS3} = V_{GS3}$$

Saturazione

$$I_{DS3} = \frac{V_{DD} - V_{GS3}}{R_1} = 0.1 mA$$

2) Determinare il valore di V_O

$$V_{GS2} = V_{GS3} = 1.5 V$$

$$I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{k_{n3}} \cdot I_{DS3} = 4 mA$$

Legge di kirchhoff al nodo di uscita:

$$\frac{v_O}{R_L} + I_{DS2} = I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} (V_{DD} - v_O - V_{TN})^2$$

Poniamo: $x = V_{DD} - v_O - V_{TN}$ $v_O = V_{DD} - V_{TN} - x$

$$x^2 + \frac{2 \cdot (x + V_{TN} - V_{DD})}{k_{n1} \cdot R_L} - \frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n1}} = 0$$

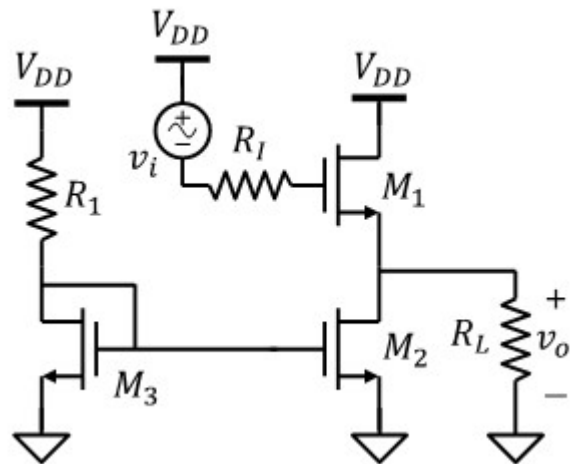
$$b = \frac{2}{k_{n1} \cdot R_L} = 0.625 V$$

$$c = \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{DD})}{k_{n1} \cdot R_L} - \frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n1}} = -7.813 V^2$$

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -3.125 V$$

$$x_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 2.5 V$$

$$v_O = V_{DD} - V_{TN} - x_2 = 2 V$$

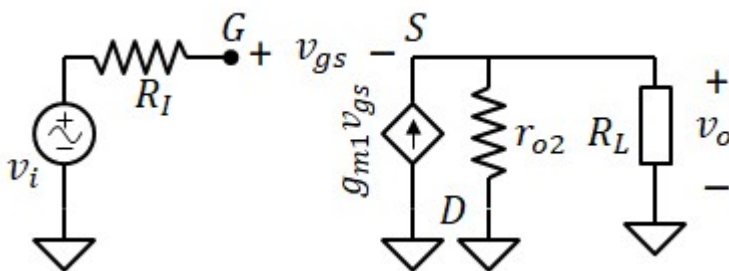


3) Polarizzazione di tutti i MOSFET:

M_1 :	$V_{GS1} = V_{DD} - v_O = 3 \text{ V}$	$V_{DS1} = V_{DD} - v_O = 3 \text{ V}$	$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} (V_{DD} - v_O - V_{TN})^2 = 5 \cdot \text{mA}$
M_2 :	$V_{GS2} = 1.5 \text{ V}$	$V_{DS2} = v_O - 0 = 2 \text{ V}$	$I_{DS2} = 4 \cdot \text{mA}$
M_3 :	$V_{GS3} = 1.5 \text{ V}$	$V_{DS3} = 1.5 \text{ V}$	$I_{DS3} = 0.1 \cdot \text{mA}$

4) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione a drain comune):



$$g_{m1} = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 4 \cdot \text{mS}$$

$$r_{o2} = \frac{2}{k_{n2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 \cdot \lambda_{n2}} = 25 \cdot \text{k}\Omega$$

Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = \infty$$

$$R_{OUT} = \frac{r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 247.5 \cdot \Omega$$

5) Guadagno di tensione

$$A_{vo} = \frac{g_{m1} \cdot r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 0.99$$

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.881$$

Esercizio 17

DATI: $V_{DD} = 25V$, $V_{B2} = 3V$, $V_{B3} = 20V$,

$R_1 = 120k\Omega$, $R_2 = 280k\Omega$, $R_I = 5k\Omega$, $R_L = 250k\Omega$

$M1$: $k_{n1} = 4.4mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN1} = 2V$, $\lambda_{n1} = 0V^{-1}$,

$M2$: $k_{n2} = 1.1mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN2} = 1V$, $\lambda_{n2} = 0.02V^{-1}$,

$M3$: $k_{p3} = 0.5mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP3} = -2V$, $\lambda_{p3} = 0.001V^{-1}$

1) Punto di lavoro dei transistor

Corrente attraverso M2 e M3:

$$V_{GS2} = V_{B2} - 0V = 3V$$

$$V_{GS3} = V_{B3} - V_{DD} = -5V$$

$$I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN2})^2 = 2.2 \cdot mA$$

$$I_{DS3} = \frac{k_{p3}}{2} \cdot (V_{GS3} - V_{TP3})^2 = 2.25 \cdot mA$$

$$I_{DS1} = I_{DS2} = 2.2 \cdot mA$$

$$V_{GS1} = V_{TN1} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 3V$$

Potenziale del gate di M1: $V_G = V_{DD} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 7.5V$

Potenziale del source di M1 (= drain di M2)

$$V_{S1} = V_G - V_{GS1} = 4.5V$$

$$V_{D2} = V_{S1} = 4.5V$$

Tensione drain source di M2:

$$V_{DS2} = V_{D2} - 0 = 4.5V$$

$$V_{GS2} - V_{TN2} = 2V \quad \text{OK! Saturazione}$$

Corrente e tensione sulla resistenza R_L (N.B. il carico è accoppiato in DC)

$$I_{RL} = I_{DS3} - I_{DS2} = 50 \cdot \mu A$$

$$V_O = R_L \cdot I_{RL} = 12.5V = \text{drain di M3 e M1}$$

$$V_{DS1} = V_O - V_{S1} = 8V$$

$$V_{GS1} - V_{TN1} = 1V \quad \text{OK! Saturazione}$$

$$V_{DS3} = V_O - V_{DD} = -12.5V$$

$$V_{GS3} - V_{TP3} = -3V \quad \text{OK! Saturazione}$$

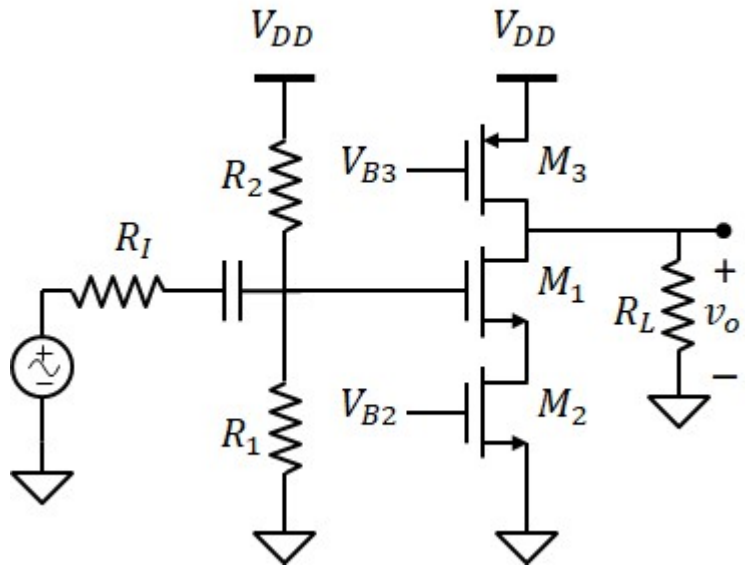
2) Modello ai piccoli segnali

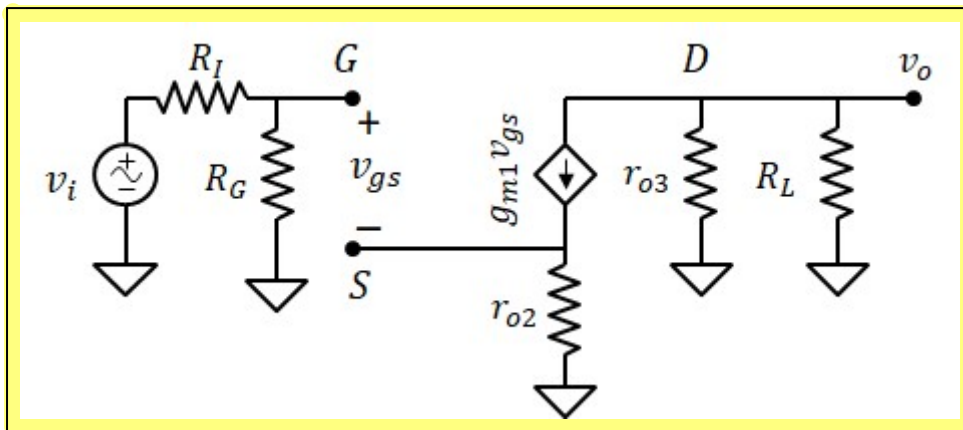
(Source comune con resistenza al source):

$$g_{m2} = k_{n1} \cdot (V_{GS1} - V_{TN1}) = 4.4 \cdot mS$$

$$r_{o2} = \frac{1}{I_{DS2} \cdot \lambda_{n2}} = 22.7 \cdot k\Omega$$

$$r_{o3} = \frac{1}{I_{DS3} \cdot \lambda_{p3}} = 444.4 \cdot k\Omega$$





$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 84 \cdot \text{k}\Omega$$

3) Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = R_G = 84 \cdot \text{k}\Omega$$

$$R_{OUT} = r_{o3} = 444.4 \cdot \text{k}\Omega$$

3) Guadagno di tensione

$$A_{vo} = \frac{-g_{m1} \cdot r_{o3}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = -19.3$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = -6.6$$

QUI

Esercizio 18

DATI:

$$V_{DD} = 20V, V_{B2} = 5V, R_L = 500\Omega, R_I = 16k\Omega$$

$$R_1 = 200k\Omega, R_2 = 800k\Omega$$

$$k_{n1} = 20mA \cdot V^{-2}, V_{TN1} = 5.9V, \lambda_{n1} = 0;$$

$$k_{n2} = 0.2mA \cdot V^{-2}, V_{TN2} = 4V, \lambda_{n2} = 0.02V^{-1};$$

$$k_{p3} = 0.2mA \cdot V^{-2}, V_{TP3} = -4V$$

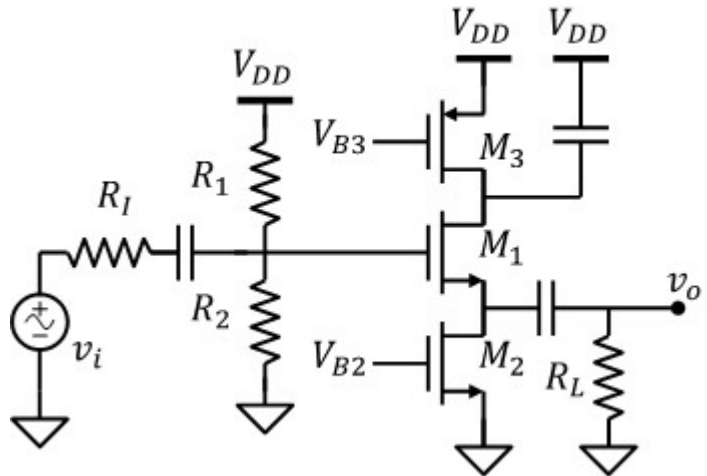
1) Il valore di V_{B3}

$$V_{GS2} = V_{B2} - 0 = 5V$$

$$I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN2})^2 = 0.1mA$$

$$I_{DS3} = I_{DS2} = 0.1mA \quad V_{GS3} = V_{TP3} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{p3}}} = -5V$$

$$V_{B3} = V_{DD} + V_{GS3} = 15V$$

**2) Punto di lavoro dei transistor, sapendo che $V_{DS3} = -5V$**

$$M_1: I_{DS1} = I_{DS2} = 0.1mA$$

$$V_{GS1} = V_{TN1} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 6V$$

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 16V$$

$$V_{S1} = V_G - V_{GS1} = 10V$$

$$V_{D1} = V_{DD} + V_{DS3} = 15V$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 5V$$

$$V_{GS1} - V_{TN1} = 0.1V$$

OK Saturazione

$$M_2: V_{GS2} = 5V$$

$$V_{DS2} = V_{S1} - 0 = 10V$$

$$V_{GS2} - V_{TN2} = 1V$$

OK Saturazione

$$M_3: V_{GS3} = -5V$$

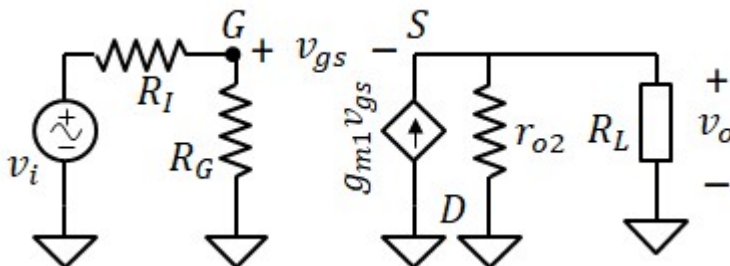
$$V_{DS3} = -5V$$

$$V_{GS3} - V_{TP3} = -1V$$

OK Saturazione

3) Resistenza di ingresso e di uscita

Modello ai piccoli segnali (configurazione gate comune):



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

$$r_{o2} = \frac{1}{I_{DS2} \cdot \lambda_{n2}} = 500k\Omega$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 160k\Omega$$

$$R_{IN} = R_G = 160k\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 0.5k\Omega$$

4) Guadagno di corrente

$$A_{vo} = \frac{g_{m1} \cdot r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 0.999$$

$$A_v = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = 0.454$$

Esercizio 19

DATI:

$$k_p = 2.5 \text{ mA} \cdot \text{V}^{-2}, \quad V_{TP} = -4 \text{ V}, \quad \lambda_p = 0.01 \text{ V}^{-1}$$

$$R_1 = 120 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 80 \text{ k}\Omega$$

$$V_{SS} = 10 \text{ V}, \quad V_{DD} = -10 \text{ V}$$

1. Trovare la polarizzazione dei MOS

M_1 e M_2 sono in serie, quindi $I_{DS1} = I_{DS2}$

$$\frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TP})^2 = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TP})^2$$

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

Legge di Kirchhoff alla maglia: $(V_{SS} - V_{DD}) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 2V_{GS1}$

$$V_{GS1} = -\frac{1}{2} \cdot (V_{SS} - V_{DD}) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -6 \text{ V}$$

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

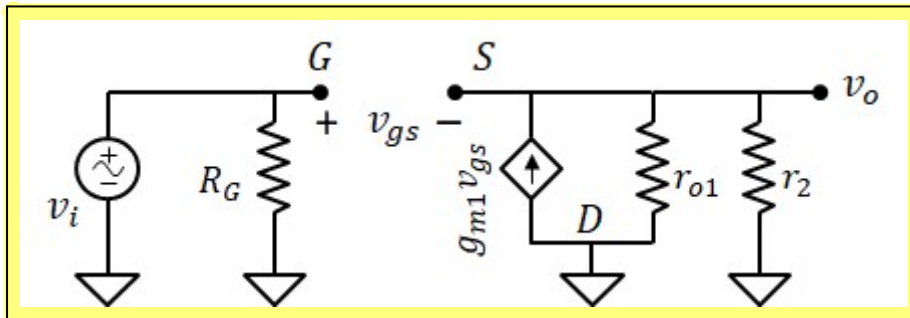
$$I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TP})^2 = 5 \text{ mA}$$

$$V_{DS1} = -(V_{SS} - V_{DD} + V_{GS2}) = -14 \text{ V}$$

$$V_{DS2} = V_{GS2} = -6 \text{ V}$$

2. Disegnare il modello ai piccoli segnali del circuito

(configurazione a drain comune).



$$g_{m1} = -k_p \cdot (V_{GS1} - V_{TP}) = 5 \text{ mS}$$

$$g_{m2} = -k_p \cdot (V_{GS2} - V_{TP}) = 5 \text{ mS}$$

$$r_{o1} = \frac{1}{I_{DS} \cdot \lambda_p} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$r_{o2} = \frac{1}{I_{DS} \cdot \lambda_p} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$r_2 = \frac{r_{o2}}{1 + r_{o2} \cdot g_{m2}} = 0.198 \text{ k}\Omega$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 48 \text{ k}\Omega$$

3) Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = R_G = 48 \text{ k}\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{r_{o1} \cdot r_2}{r_{o1} + r_2} = 0.196 \text{ k}\Omega$$

4) Guadagno di corrente

$$A_v = \frac{g_{m1} \cdot \frac{r_{o1} \cdot r_2}{r_{o1} + r_2}}{1 + g_{m1} \cdot \frac{r_{o1} \cdot r_2}{r_{o1} + r_2}} = 0.495$$

N.B. Se approssimando: $\frac{r_{o1} \cdot r_2}{r_{o1} + r_2} = \frac{1}{g_{m2}}$

otteniamo: $A_v = \frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{m1}} = 0.5$

Esercizio 20

DATI:

$$k_{n1} = 2\text{mA} \cdot \text{V}^{-2}, k_{n2} = 0.5\text{mA} \cdot \text{V}^{-2}, V_{TN} = 1\text{V},$$

$$\lambda_n = 0.02\text{V}^{-1}, R_1 = 100\text{k}\Omega, R_2 = 100\text{k}\Omega, R_D = 3\text{k}\Omega$$

$$V_{SS} = -5\text{V}, V_{DD} = 5\text{V}, R_I = 5\text{k}\Omega, R_L = 20\text{k}\Omega$$

1. Trovare la polarizzazione dei MOS

M_1 e M_2 sono in serie, quindi $I_{DS1} = I_{DS2}$

$$\frac{k_{n1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2$$

$$(V_{GS2} - V_{TN}) = \alpha \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) \quad \text{con: } \alpha = \sqrt{\frac{k_{n1}}{k_{n2}}} = 2$$

$$V_{GS2} = V_{TN} + \alpha \cdot (V_{GS1} - V_{TN})$$

$$V_G = V_{SS} + (V_{DD} - V_{SS}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0\text{V}$$

$$V_G - V_{SS} = V_{GS1} + V_{GS2} = V_{GS1} + V_{TN} + \alpha \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = V_{GS1} \cdot (1 + \alpha) + V_{TN} \cdot (1 - \alpha)$$

$$V_{GS1} = \frac{V_G - V_{SS} - V_{TN} \cdot (1 - \alpha)}{1 + \alpha} = 2\text{V}$$

$$V_{GS2} = V_{TN} + \alpha \cdot (V_{GS1} - V_{TN}) = 3\text{V}$$

$$I_{DS} = \frac{k_{n1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = 1\text{mA} \quad (\text{uguale per } M_1 \text{ e } M_2)$$

$$V_{S1} = V_{SS} + V_{GS2} = -2\text{V}$$

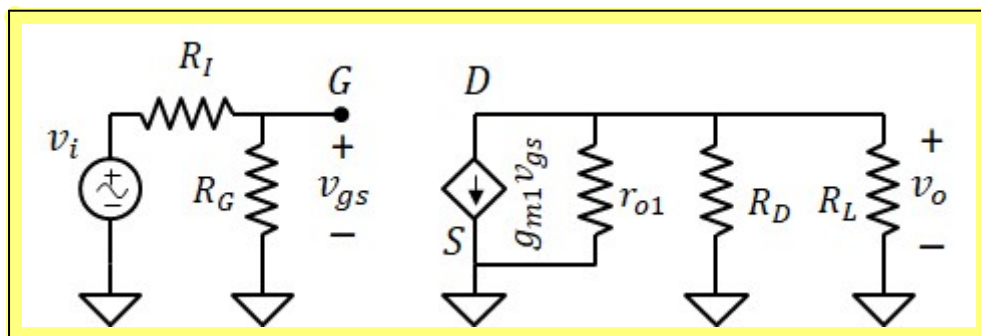
$$V_{D1} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS} = 2\text{V}$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 4\text{V}$$

$$V_{DS2} = V_{GS2} = 3\text{V}$$

2. Disegnare il modello ai piccoli segnali del circuito

(configurazione a source comune).



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

$$r_{o1} = \frac{1}{I_{DS} \cdot \lambda_n} = 50\text{k}\Omega$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 50\text{k}\Omega$$

3) Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = R_G = 50 \cdot k\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{r_{o1} \cdot R_D}{r_{o1} + R_D} = 2.83 \cdot k\Omega$$

4) Guadagno di corrente

$$A_{vo} = -g_{m1} \cdot \frac{r_{o1} \cdot R_D}{r_{o1} + R_D} = -5.7$$

$$A_{vo} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = -4.5$$

Esercizio 21

DATI:

$$V_{DD} = 10V;$$

$$R_1 = 90k\Omega; R_2 = 10k\Omega;$$

$$R_I = 3k\Omega; R_L = 1k\Omega$$

$$M_1: k_{p1} = 1mA \cdot V^{-2}; V_{TP1} = -2V; \lambda_{p1} = 0$$

$$M_2: k_{p2} = 0.25mA \cdot V^{-2}; V_{TP2} = 2V; \lambda_{p2} = 0.01V^{-1}$$

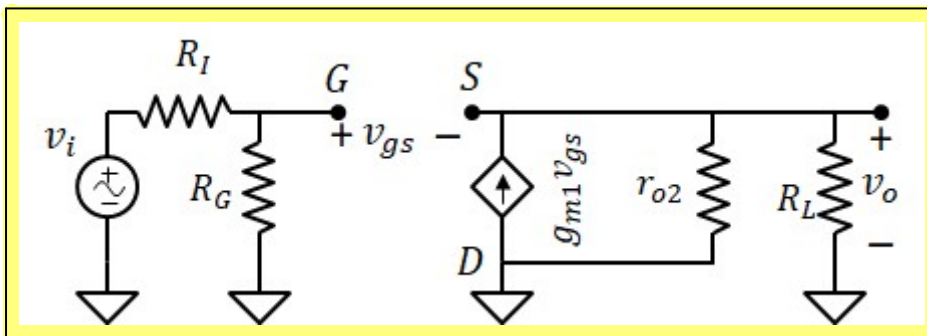
1. Trovare la polarizzazione dei MOS

$$V_{GS2} = 0V \quad I_{DS2} = \frac{k_{p2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TP2})^2 = 0.5 \cdot mA$$

$$V_{G1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 1V \quad V_{GS1} = V_{TP1} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{p1}}} = -3V \quad V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 4V$$

$$V_{DS1} = 0 - V_{S1} = -4V \quad V_{GS1} - V_{TP1} = -1V \quad \text{Saturazione}$$

$$V_{DS2} = V_{S1} - V_{DD} = -6V \quad V_{GS2} - V_{TP2} = -2V$$

2. Disegnare il modello ai piccoli segnali del circuito

$$g_{m1} = -k_{p1} \cdot (V_{GS1} - V_{TP1}) = 1 \cdot mS$$

$$r_{o2} = \frac{1}{I_{DS2} \cdot \lambda_{p2}} = 200 \cdot k\Omega$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 9 \cdot k\Omega$$

3) Resistenza di ingresso e di uscita

$$R_{IN} = R_G = 9 \cdot k\Omega$$

$$R_{OUT} = \frac{r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 0.995 \cdot k\Omega$$

4) Guadagno di tensione

$$A_{vo} = \frac{g_{m1} \cdot r_{o2}}{1 + g_{m1} \cdot r_{o2}} = 0.995$$

$$A_{vo} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_I} \cdot A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = 0.374$$