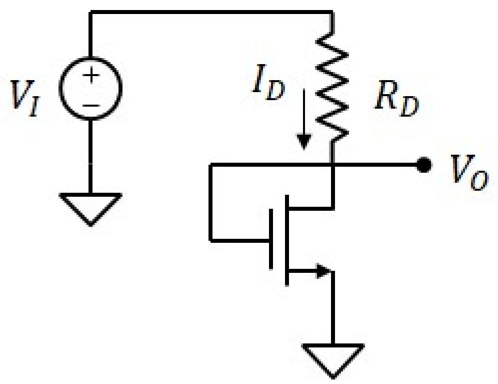
MOSFET

Esercizio 1



DATI: $R_D = 5k\Omega$, $k_n = 0.8mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$

1) Corrente e tensione per $V_I = 0.5V$

Se il MOSFET è acceso, funziona in saturazione.
La tensione V_I si ripartisce in parte sul MOSFET e in parte su R_D.
Quindi $V_{GS} < V_I$
Se $V_I = 0.5V$ $< V_{TN}$, il MOSFET è spento.

$\boxed{I_D = 0}$ $\boxed{V_O = V_I - R_D \cdot I_D = 0.5\,V}$

2) Corrente e tensione per $V_I = 2V$

Dalla legge di kirchhoff:

$$\frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = \frac{V_I - V_{GS}}{R_D}$$

poniamo $x = V_{GS} - V_{TN}$
(N.B. x > 0 sempre, altrimenti il MOSFET è spento)

$$\frac{k_n}{2} \cdot x^2 = \frac{V_I - V_{TN} - x}{R_D}$$

$$x^2 + \frac{2}{k_n \cdot R_D} x + 2 \cdot \frac{V_{TN} - V_I}{k_n \cdot R_D} = 0$$

Poniamo: $b = \frac{2}{k_n \cdot R_D} = 0.5\,V$ $c = 2 \cdot \frac{V_{TN} - V_I}{k_n \cdot R_D} = -0.5\,V^2$ e otteniamo l'equazione: $x^2 + b + c = 0$

Soluzioni: $x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 0.5\,V$ Soluzione accettabile, poichè superiore a V_{TN}

$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -1\,V$ Soluzione non accettabile poichè MOSFET sarebbe spento

$V_{GS} = x_1 + V_{TN}$ Corrente: $\boxed{I_D = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 0.1 \cdot mA}$ Tensione: $\boxed{V_O = V_{GS} = 1.5\,V}$

3) Corrente e tensione per $V_I = 4V$

In modo analogo: $b = \frac{2}{k_n \cdot R_D} = 0.5\,V$ $c = 2 \cdot \frac{V_{TN} - V_I}{k_n \cdot R_D} = -1.5\,V^2$ $x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -1.5\,V$

Unica soluzione accettabile (positiva): $x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 1\,V$ $V_{GS} = x_1 + V_{TN} = 2\,V$

Corrente: $\boxed{I_D = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 0.4 \cdot mA}$ Tensione: $\boxed{V_O = V_{GS} = 2\,V}$

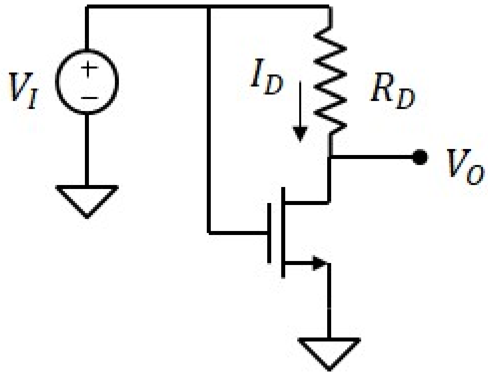
4) Corrente e tensione per $V_I = 11V$ $b = \frac{2}{k_n \cdot R_D} = 0.5\,V$ $c = 2 \cdot \frac{V_{TN} - V_I}{k_n \cdot R_D} = -5\,V^2$

Unica soluzione accettabile (positiva): $x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 2\,V$ $V_{GS} = x_1 + V_{TN}$

Corrente: $\boxed{I_D = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 1.6 \cdot mA}$ Tensione: $\boxed{V_O = V_{GS} = 3\,V}$

Andrea Cester

Esercizio 2



DATI: $R_D = 2k\Omega,\ k_n = 0.8mA \cdot V^{-2},\ V_{TN} = 1V$

1) Corrente e tensione per $V_I = 0.5V$

$V_{GS} = V_I < V_{TN}$. Il MOSFET è spento

$I_D = 0$ $\qquad V_{DS} = V_I - R_D \cdot I_D = 0.5\,V$ $\qquad \boxed{V_O = V_{DS} = 0.5\,V}$

2) Corrente e tensione per $V_I = 2V$

$V_{GS} = V_I > V_{TN}$. Il MOSFET è acceso in lineare o in saturazione:

Supponiamo che il MOSFET sia in saturazione: $\qquad V_{GS} = V_I \qquad \boxed{I_D = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 0.4 \cdot mA}$

Legge di kirchhoff alla maglia: $\qquad V_{DS} = V_I - R_D \cdot I_D = 1.2\,V \qquad V_{GS} - V_{TN} = 1\,V \qquad V_{DS} > V_{GS}$

Il MOSFET è correttamente in saturazione $\qquad \boxed{V_O = V_{DS} = 1.2\,V}$

3) Corrente e tensione per $V_I = 4V$

$V_{GS} = V_I > V_{TN}$. Il MOSFET è acceso in lineare o in saturazione:

Supponiamo che il MOSFET sia in saturazione: $\qquad V_{GS} = V_I \qquad I_D = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 3.6 \cdot mA$

Legge di kirchhoff alla maglia: $\qquad V_{DS} = V_I - R_D \cdot I_D = -3.2\,V \qquad V_{GS} - V_{TN} = 3\,V$

Il MOSFET non può essere in saturazione
Supponiamo il MOSFET in zona lineare e imponiamo la legge di kirchhoff

$$k_n \cdot \left[(V_I - V_{TN}) \cdot V_O - \frac{V_O^2}{2} \right] = \frac{V_I - V_O}{R_D}$$

$$V_O^2 - 2 \cdot \left(V_I - V_{TN} + \frac{1}{k_n \cdot R_D} \right) \cdot V_O + \frac{2 \cdot V_I}{k_n \cdot R_D} = 0$$

$$x = V_O \qquad b = V_I - V_{TN} + \frac{1}{k_n \cdot R_D} = 3.625\,V \qquad c = \frac{2 \cdot V_I}{k_n \cdot R_D} = 5\,V^2$$

$x_1 = b + \sqrt{b^2 - c} = 6.478\,V$ $\qquad$ Non accettabile poichè superiore a V_I.

$x_2 = b - \sqrt{b^2 - c} = 0.772\,V$ $\qquad$ Accettabile poichè compresa tra 0 e V_{GS} - V_{TN}

$$\boxed{V_O = x_2 = 0.772\,V} \qquad \boxed{I_D = \frac{V_I - V_O}{R_D} = 1.614 \cdot mA}$$

4) Corrente e tensione per $V_I = 11V$ $\qquad$ Come il punto precedente. il MOSFET è ancora in lineare:

$$b = V_I - V_{TN} + \frac{1}{k_n \cdot R_D} = 10.625\,V \qquad c = \frac{2 \cdot V_I}{k_n \cdot R_D} = 13.75\,V^2$$

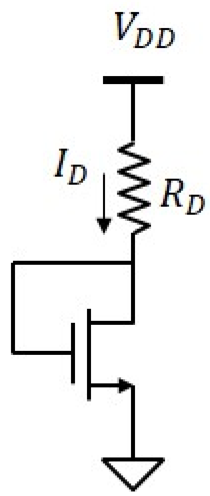
$$x_1 = b + \sqrt{b^2 - c} = 20.582\,V$$

$$x_2 = b - \sqrt{b^2 - c} = 0.668\,V$$

$$\boxed{V_O = x_2 = 0.668\,V} \qquad \boxed{I_D = \frac{V_I - V_O}{R_D} = 5.17 \cdot mA}$$

Esercizio 3

DATI: $R_D = 4k\Omega$, $k_n = 2mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 2V$, $V_{DD} = 7V$



1) regione di funzionamento

Se acceso il MOSFET funziona in saturazione perchè: $V_{DS} = V_{GS} > V_{GS} - V_{TN}$

Supponendo il MOSFET in saturazione (condizione da verificare a posteriori)

$$\frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{R_D}$$

poniamo $x = V_{GS} - V_{TN}$

$$x^2 + \frac{2}{k_n \cdot R_D} \cdot x + \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{DD})}{k_n \cdot R_D} = 0$$

$$x^2 + b \cdot x + c = 0 \qquad b = \frac{2}{k_n \cdot R_D} = 0.25\,V \qquad c = \frac{2 \cdot (V_{TN} - V_{DD})}{k_n \cdot R_D} = -1.25\,V^2$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 1\,V$$

Soluzione accettabile, poichè superiore a V_{TN}

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

Soluzione non accettabile poichè inferiore a V_{TN} e il MOSFET sarebbe spento

$\boxed{V_{GS} = x_1 + V_{TN} = 3\,V}$ $\qquad \boxed{V_{DS} = V_{GS}}$

2) corrente attraverso R_D

$$\boxed{I_D = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{R_D} = 1 \cdot mA}$$

oppure:

$$I_D = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 1 \cdot mA$$

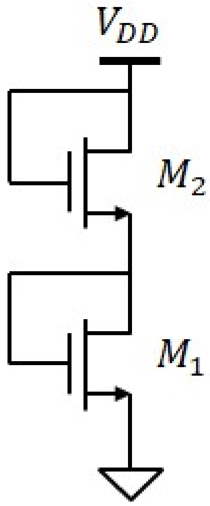
3) Modificare il valore di R_D in modo che la corrente di polarizzazione del MOSFET sia: $I_{DS} = 4mA$

$$V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_n}} = 4\,V$$

$$\boxed{R_D = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{I_{DS}} = 750\,\Omega}$$

Esercizio 4

DATI: $k_{n1} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 4mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$, $V_{DD} = 8V$



Legge di kirchhoff: $\frac{k_{n1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{DD} - V_{GS1} - V_{TN})^2$

$$V_{GS1} - V_{TN} = \sqrt{\frac{k_{n2}}{k_{n1}}} \cdot (V_{DD} - V_{GS1} - V_{TN})$$

$$\boxed{V_{GS1} = \frac{V_{TN} + \sqrt{\frac{k_{n2}}{k_{n1}}} \cdot (V_{DD} - V_{TN})}{\left(1 + \sqrt{\frac{k_{n2}}{k_{n1}}}\right)} = 5\ V}$$

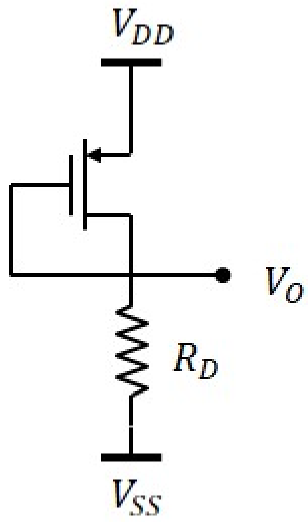
$$\boxed{V_{GS2} = V_{DD} - V_{GS1} = 3\ V}$$

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_{n1}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = 8 \cdot mA}$$

oppure: $I_{DS} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 = 8 \cdot mA$

Esercizio 5

DATI: $R_D = 2k\Omega,\ k_p = 0.25mA\cdot V^{-2},\ V_{TP} = -2V,\ V_{DD} = 7V,\ V_{SS} = -3V$



1) Tensione V_O

Se acceso il MOSFET funziona in saturazione perchè: $V_{DS} = V_{GS} < V_{GS} - V_{TP}$

(Ricordiamo che V_{TP} è negativa)

Supponendo il MOSFET in saturazione (condizione da verificare a posteriori)

$$\frac{k_p}{2}\cdot(V_{GS} - V_{TP})^2 = \frac{V_O - V_{SS}}{R_D} \qquad \text{con: } V_O = V_{DD} + V_{GS}$$

Poniamo $x = V_{GS} - V_{TP}$. *ATTENZIONE: affinchè il MOSFET sia acceso deve essere $x<0$*

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

$$\frac{k_p}{2}\cdot x^2 - \frac{2}{k_p\cdot R_D}\cdot x - \frac{2\cdot(V_{DD} + V_{TP} - V_{SS})}{k_p\cdot R_D} = 0$$

$$x^2 + b\cdot x + c = 0 \quad \text{con:} \quad b = -\frac{2}{k_p\cdot R_D} = -4\,V \qquad c = -\frac{2\cdot(V_{DD} + V_{TP} - V_{SS})}{k_p\cdot R_D} = -32\,V^2$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 8\,V$$ Soluzione non accettabile, poichè positiva

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -4\,V$$ Soluzione accettabile $V_{GS} = x_2 + V_{TP} = -6\,V$

$$\boxed{V_O = V_{DD} + V_{GS} = 1\,V}$$

2) corrente attraverso R_D

$$\boxed{I_R = \frac{V_O - V_{SS}}{R_D} = 2\cdot mA}$$ oppure: $$I_R = \frac{k_p}{2}\cdot(V_{GS} - V_{TP})^2 = 2\cdot mA$$

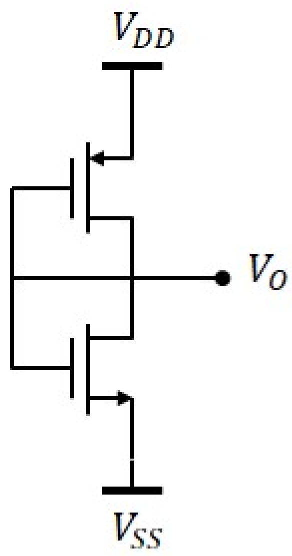
3) Modificare il valore di R_D in modo che la tensione di uscita sia $V_O = 0V$

$$V_{GS} = V_O - V_{DD} = -7\,V$$

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2}\cdot(V_{GS} - V_{TP})^2 = 3.125\cdot mA \qquad \boxed{R_D = \frac{V_O - V_{SS}}{I_{DS}} = 960\,\Omega}$$

Esercizio 6

DATI: $k_n = 4 mA \cdot V^{-2}$, $k_p = 1 mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$ $V_{TP} = -2V$, $V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -4V$



1) Tensione V_O

NMOS) $V_{GSN} = V_{DSN} = V_O - V_{SS}$

PMOS) $V_{GSP} = V_{DSP} = V_O - V_{DD}$

Legge di kirchhoff:

$$\frac{k_n}{2} \cdot (V_{GSN} - V_{TN})^2 = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GSP} - V_{TP})^2$$

$$\frac{k_n}{2} \cdot (V_O - V_{SS} - V_{TN})^2 = \frac{k_p}{2} \cdot (V_O - V_{DD} - V_{TP})^2$$

$$(V_O - V_{SS} - V_{TN}) = \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} \cdot (V_{TP} + V_{DD} - V_{TO})$$

Definiamo: $r = \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} = 0.5$

$V_{SS} + V_{TN} = -3\ V$

$$\boxed{V_O = \frac{V_{SS} + V_{TN} + r \cdot (V_{TP} + V_{DD})}{1 + r} = -1\ V}$$

$r \cdot (V_{TP} + V_{DD}) = 1.5\ V$

2) Corrente attraverso i MOSFET

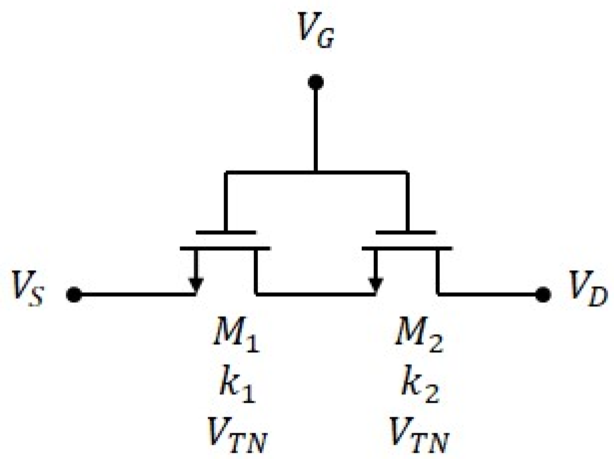
NMOS) $V_{GSN} = V_O - V_{SS} = 3\ V$

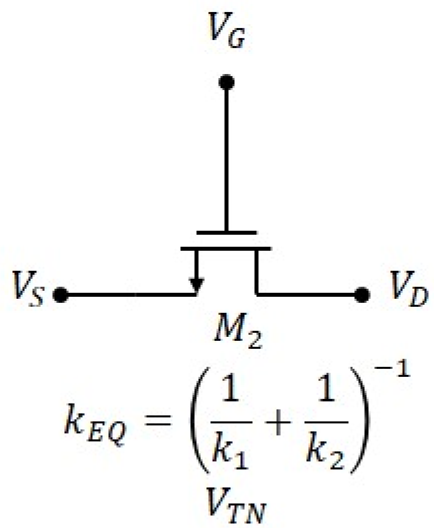
$$\boxed{I_{DSN} = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GSN} - V_{TN})^2 = 8 \cdot mA}$$

PMOS) $V_{GSP} = V_O - V_{DD} = -6\ V$

$$\boxed{I_{DSP} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GSP} - V_{TP})^2 = 8 \cdot mA}$$

Esercizio 7





Supponiamo $V_G - V_S < V_{TN}$.

M_1 è sicuramente spento. Quindi $I_{DS1} = 0$. Per la legge di kirchhoff anche M_2 deve essere spento con $I_{DS2}=0$

Supponiamo $V_G - V_S > V_{TN}$.

Definiamo X il nodo tra i due MOSFET e chiamiamo V_X il suo potenziale.
Osservazione: affinchè M_2 sia acceso è necessario che $V_G - V_X > V_{TN}$ e quindi $V_X < V_G - V_{TN}$
Il nodo X è il drain di M1. Quindi $V_{DS}(M_1) = V_X - V_S < V_G - V_{TN} - V_S = V_{GS}(M1) - V_{TN}$
M_1 è in zona lineare indipendentemente dalla regione di funionamento di M_2

Supponiamo $V_D > V_G - V_{TN}$. M_2 è in saturazione

Legge di kirchhoff: $I_{DS1} = I_{DS2}$

$$k_1\left[(V_{GS} - V_{TN})\cdot(V_X - V_S) - \frac{(V_X - V_S)^2}{2}\right] = \frac{k_2}{2}\cdot(V_G - V_X - V_{TN})^2$$

Per semplicità definiamo $V_{GT} = V_G - V_S - V_{TN}$ e $x = V_X - V_S$

$$k_1\left(V_{GT}\cdot x - \frac{x^2}{2}\right) = \frac{k_2}{2}\cdot(V_{GT} - x)^2$$

$$k_1\left(2V_{GT}\cdot x - x^2\right) - k_2\cdot(V_{GT} - x)^2 = 0$$

$$k_1\left(V_{GT}^2 - V_{GT}^2 + 2V_{GT}\cdot x - x^2\right) - k_2\cdot(V_{GT} - x)^2 = 0$$

$$k_1\cdot V_{GT}^2 - k_1\cdot(V_{GT} - x)^2 - k_2\cdot(V_{GT} - x)^2 = 0$$

$$(V_{GT} - x)^2 = \frac{k_1}{k_1 + k_2}\cdot V_{GT}^2$$

Calcoliamo la corrente usando la formula per M_2:

$$I_{DS} = \frac{k_2}{2}\cdot(V_G - V_X - V_{TN})^2 = \frac{k_2}{2}\cdot(V_{GT} - x)^2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{k_2\cdot k_1}{k_1 + k_2}\cdot V_{GT}^2 = \frac{1}{2}k_{EQ}(V_{GS} - V_{TN})^2$$

$$\boxed{k_{EQ} = \frac{k_2\cdot k_1}{k_1 + k_2} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}}$$

Supponiamo $V_D < V_G - V_{TN}$. M_2 è in lineare

Legge di kirchhoff: $I_{DS1} = I_{DS2}$

$$k_1\left[(V_{GS} - V_{TN})\cdot(V_X - V_S) - \frac{(V_X - V_S)^2}{2}\right] = k_2\left[(V_G - V_X - V_{TN})\cdot(V_D - V_X) - \frac{(V_D - V_X)^2}{2}\right]$$

Definiamo ancora $V_{GT} = V_G - V_S - V_{TN}$ e $x = V_X - V_S$

$$k_1\left(V_{GT}\cdot x - \frac{x^2}{2}\right) = k_2\left[(V_{GT} - x)\cdot(V_{DS} - x) - \frac{(V_{Ds} - x)^2}{2}\right]$$

$$k_1\left[V_{GT}^2 - (V_{GT} - x)^2\right] = k_2\left[(V_{GT} - x)^2 - (V_{GT} - V_{DS})^2\right]$$

$$k_1\cdot V_{GT}^2 - k_1\cdot(V_{GT} - x)^2 = k_2\cdot(V_{GT} - x)^2 - k_2\cdot(V_{GT} - V_{DS})^2$$

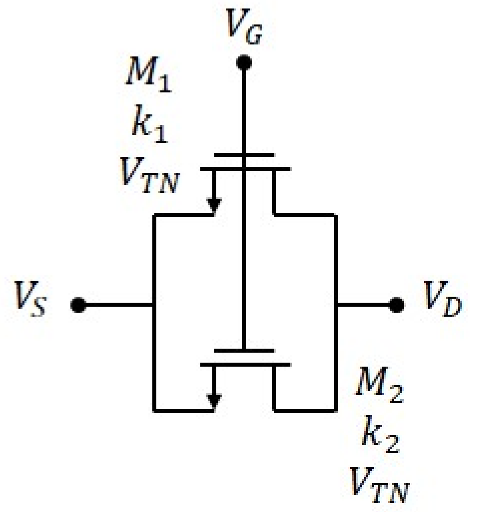
$$(V_{GT} - x)^2 = \frac{k_1\cdot V_{GT}^2 + k_2\cdot(V_{GT} - V_{DS})^2}{k_1 + k_2}$$

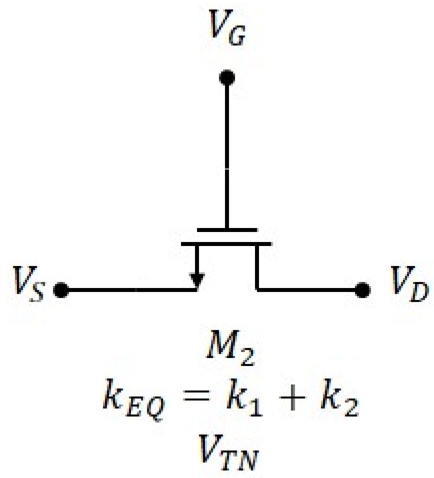
$$I_{DS} = k_1\left(V_{GT}\cdot x - \frac{x^2}{2}\right) = \frac{k_1}{2}\left[V_{GT}^2 - (V_{GT} - x)^2\right] = \frac{k_1}{2}\left[V_{GT}^2 - \frac{k_1\cdot V_{GT}^2 + k_2\cdot(V_{GT} - V_{DS})^2}{k_1 + k_2}\right]$$

$$I_{DS} = \frac{k_1}{2}\left[\frac{k_2\cdot V_{GT}^2 + k_2\cdot(V_{GT} - V_{DS})^2}{k_1 + k_2}\right] = \frac{k_1\cdot k_2}{k_1 + k_2}\cdot\left(V_{GT}\cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right) = k_{EQ}\cdot\left[(V_{GS} - V_{TN})\cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right]$$

$$\boxed{k_{EQ} = \frac{k_1\cdot k_2}{k_1 + k_2} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}}$$

Esercizio 8





Osserviamo che i MOSFET sono entrambi in lineare o entrambi in saturazione con gli stessi valori di V_{GS} e V_{DS}.

Supponiamo entrambi i MOSFET in lineare:

$$I_{DS} = I_{DS1} + I_{DS2} = k_1 \cdot \left[\left(V_{GS} - V_{TN} \right) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] + k_2 \cdot \left[\left(V_{GS} - V_{TN} \right) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$I_{DS} = \left(k_1 + k_2 \right) \cdot \left[\left(V_{GS} - V_{TN} \right) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = k_{EQ} \cdot \left[\left(V_{GS} - V_{TN} \right) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

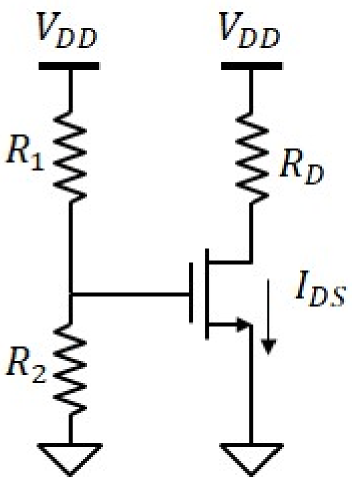
$$\boxed{k_{EQ} = k_{n1} + k_{n2}}$$

Supponiamo entrambi i MOSFET in lineare:

$$I_{DS} = I_{DS1} + I_{DS2} = \frac{k_1}{2} \cdot \left(V_{GS} - V_{TN} \right)^2 + \frac{k_2}{2} \cdot \left(V_{GS} - V_{TN} \right)^2 = \frac{k_{EQ}}{2} \cdot \left(V_{GS} - V_{TN} \right)^2$$

$$\boxed{k_{EQ} = k_{n1} + k_{n2}}$$

Esercizio 9



DATI:

$R_1 = 70k\Omega, R_2 = 70k\Omega, R_D = 1k\Omega,$

$k_n = 0.8mA \cdot V^{-2}, V_{TN} = 2V,$

$V_{DD} = 10V$

1) Polarizzazione del MOSFET

$$\boxed{V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 5\ V}$$

Partitore di tensione
(il gate del MOSFET non assorbe corrente)

Supponiamo il MOSFET in saturazione:

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 3.6 \cdot mA}$$

Legge di kirchhoff: $\boxed{V_{DS} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS} = 6.4\ V}$ superiore a $V_{GS} - V_{TN} = 3\ V$,
quindi il MOSFET è in saturazione

2) Ricalcolare le resistenze R_2 e R_D in modo che $I_{DS} = 0.4mA$ **e** $V_{DS} = \frac{V_{DD}}{2}$

Supponiamo che il MOSFET lavori in saturazione (da verificare a posteriori):

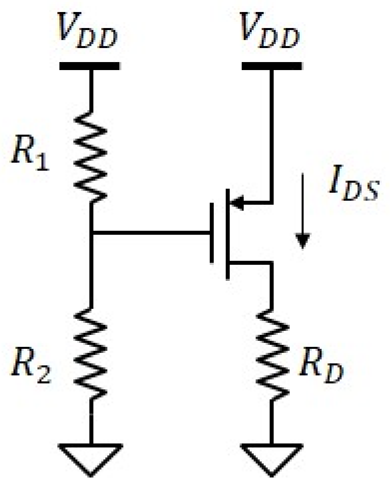
Invertendo la formula della corrente in saturazione del MOSFET: $V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_n}} = 3\ V$

$V_{GS} - V_{TN} = 1\ V$ minore della V_{DS} richiesta, quindi l'ipotesi di saturazione è soddisfatta.

Invertendo la formula del partitore di tensione: $\boxed{R_2 = \frac{V_{GS}}{V_{DD} - V_{GS}} \cdot R_1 = 30 \cdot k\Omega}$

Dalla legge di ohm: $\boxed{R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_{DS}} = 12.5 \cdot k\Omega}$

Esercizio 10



DATI: $R_1 = 50k\Omega, R_2 = 100k\Omega, R_D = 500\Omega,$

$k_p = 1.5mA \cdot V^{-2}, V_{TP} = -1V, V_{DD} = 15V$

1) Polarizzazione del MOSFET

$$\boxed{V_{GS} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = -5\ V}$$

Partitore di tensione
(il gate del MOSFET non assorbe corrente)

Supponiamo il MOSFET in saturazione:

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = 12 \cdot mA}$$

Legge di kirchhoff: $\boxed{V_{DS} = -(V_{DD} - R_D \cdot I_{DS}) = -9\ V}$

in modulo, superiore a $|V_{GS} - V_{TP}| = 4\ V$, quindi il MOSFET è in saturazione

2) Ricalcolare le resistenze R_2 e R_D in modo che $I_{DS} = 3mA$ **e** $V_{DS} = -\frac{V_{DD}}{2}$

Supponiamo che il MOSFET lavori in saturazione (da verificare a posteriori):

Invertendo la formula della corrente in saturazione del MOSFET: $V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = -3\ V$

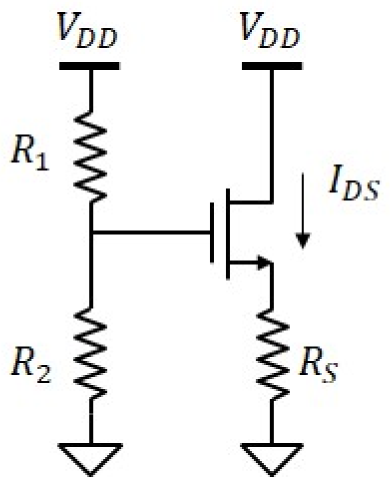
$|V_{GS} - V_{TP}| = 2\ V$ minore del modulo di V_{DS} richiesta, quindi l'ipotesi di saturazione è soddisfatta.

Invertendo la formula del partitore di tensione: $\boxed{R_2 = R_1 \cdot \frac{V_{DD} + V_{GS}}{-V_{GS}} = 200 \cdot k\Omega}$

Dalla legge di ohm: $\boxed{R_D = \frac{V_{DD} + V_{DS}}{I_{DS}} = 2.5 \cdot k\Omega}$

Esercizio 11

DATI: $R_1 = 60k\Omega, R_2 = 180k\Omega,\ R_S = 1k\Omega,\ k_n = 2mA\cdot V^{-2},\ V_{TN} = 1.5V,$
$V_{DD} = 10V$



1) Polarizzazione del MOSFET

Potenziale di gate (partitore di tensione): $V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\cdot V_{DD} = 7.5\,V$

Il potenziale del drain è $V_D = V_{DD} = 10\,V$

il MOSFET è sicuramente in saturazione

Scriviamo la legge di kirchhoff:

$$\frac{k_n}{2}\cdot\left(V_G - V_S - V_{TN}\right)^2 = \frac{V_S}{R_S}$$

poniamo $x = V_{GS} - V_{TN}$

$V_S = V_G - V_{GS} = V_G - V_{TN} - x$

$$x^2 + \frac{2}{k_n\cdot R_S}\cdot x - \frac{2\cdot\left(V_G - V_{TN}\right)}{k_n\cdot R_S} = 0$$

Otteniamo l'equazione di secondo grado: $x^2 + b\cdot x + c = 0$ con: $b = \frac{2}{k_n\cdot R_S} = 1\,V$ $\quad c = -\frac{2\cdot\left(V_G - V_{TN}\right)}{k_n\cdot R_S} = -6\,V^2$

Soluzioni:

$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 2\,V$ accettabile $\qquad \boxed{V_{GS} = x_1 + V_{TN} = 3.5\,V}$

$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -3\,V$ non accettabile perchè il MOSFET è spento

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_n}{2}\cdot\left(V_{GS} - V_{TN}\right)^2 = 4\cdot mA}$$

$$\boxed{V_{DS} = V_{DD} - R_S\cdot I_{DS} = 6\,V}$$

2) Che valore deve assumere R_S se vogliamo $I_{DS} = 0.25mA$?

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

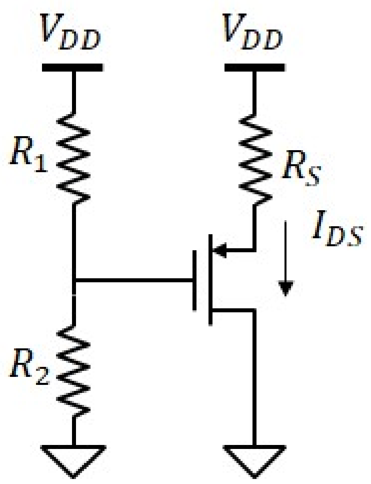
$$V_S = V_G - V_{GS} = 5.5\,V$$

$$\boxed{R_S = \frac{V_S}{I_{DS}} = 22\cdot k\Omega}$$

3) Ricalcolare la polarizzazione del MOSFET con il valore di R_S trovato al punto precedente

$\boxed{V_{DS} = V_{DD} - R_S\cdot I_{DS} = 4.5\,V}$ $\qquad \boxed{V_{GS} = 2\,V}$ $\qquad \boxed{I_{DS} = 0.25\cdot mA}$

Esercizio 12



DATI: $R_1 = 70k\Omega$, $R_2 = 30k\Omega$, $R_S = 1k\Omega$,

$k_p = 0.5mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -0.5V$, $V_{DD} = 5V$

1) Polarizzazione del MOSFET

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 1.5\,V$$

Il MOSFET funziona in saturazione poichè $V_D = 0 < V_G$

Legge di kirchhoff:

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

Poniamo $x = V_{GS} - V_{TP}$. Quindi $V_S = V_G - V_{GS} = V_G - V_{TP} - x$

ATTENZIONE: x deve essere negativa affinchè il MOSFET sia acceso

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

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

$x^2 + bx + c = 0$ con: $b = -\frac{2}{k_p \cdot R_S} = -4\,V$ $c = -\frac{2 \cdot (V_{DD} - V_G + V_{TP})}{k_p \cdot R_S} = -12\,V^2$

$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -2\,V$ Accettabile $\boxed{V_{GS} = V_{TP} + x_1 = -2.5\,V}$ $V_S = V_G - V_{GS} = 4\,V$

$x_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 6\,V$ Non accettabile

$$\boxed{V_{DS} = 0 - V_S = -4\,V}$$

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = 1 \cdot mA}$$

2) Che valore deve assumere R_2 se vogliamo $I_{DS} = 0.25mA$?

$$V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = -1.5\,V$$

$$V_S = V_{DD} - R_S \cdot I_{DS} = 4.75\,V$$

$$V_G = V_S + V_{GS} = 3.25\,V$$

$$\boxed{R_2 = \frac{V_G}{V_{DD} - V_G} \cdot R_1 = 130 \cdot k\Omega}$$

3) Ricalcolare la polarizzazione del MOSFET con il valore di R_S trovato al punto precedente

$\boxed{V_{GS} = -1.5\,V}$ $\boxed{I_{DS} = 0.25 \cdot mA}$ $\boxed{V_{DS} = 0 - V_S = -4.75\,V}$

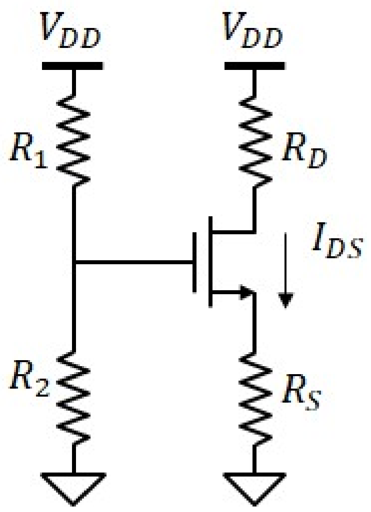
Esercizio 13

DATI:

$k_n = 1.5mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 2V$,

$R_1 = 130k\Omega$, $R_2 = 110k\Omega$, $R_D = 1.5k\Omega$, $R_S = 500\Omega$,

$V_{DD} = 12V$



Partitore di tensione: $$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 5.5\,V$$

Legge di kirchhoff alla maglia gate-source:

$$\frac{k_n}{2} \cdot (V_G - V_S - V_{TN})^2 = \frac{V_S}{R_S}$$

poniamo $x = V_{GS} - V_{TN}$

$$V_S = V_G - V_{GS} = V_G - V_{TN} - x$$

$$x^2 + \frac{2}{k_n \cdot R_S} \cdot x - \frac{2 \cdot (V_G - V_{TN})}{k_n \cdot R_S} = 0$$

Otteniamo l'equazione di secondo grado: $x^2 + b \cdot x + c = 0$ con: $b = \frac{2}{k_n \cdot R_S} = 2.667\,V$

$$c = -\frac{2 \cdot (V_G - V_{TN})}{k_n \cdot R_S} = -9.333\,V^2$$

Soluzioni:

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 2\,V$$ accettabile $\boxed{V_{GS} = x_1 + V_{TN} = 4\,V}$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -4.667\,V$$ non accettabile perchè il MOSFET è spento

$$V_S = V_G - V_{GS} = 1.5\,V$$

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2 = 3 \cdot mA}$$

$$\boxed{V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_{DS} = 6\,V}$$

Verifica della regione di funzionamento del MOSFET: $V_{GS} - V_{TN} = 2\,V$

$V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$ OK!

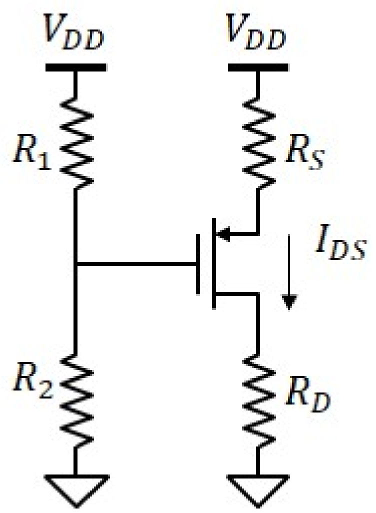
Esercizio 14

DATI:

$k_p = 0.8 mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -1V$,

$R_1 = 68k\Omega$, $R_2 = 52k\Omega$, $R_D = 1k\Omega$, $R_S = 2k\Omega$

$V_{DD} = 15V$



Partitore di tensione: $V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 6.5\,V$

Il MOSFET funziona in saturazione poichè $V_D = 0 < V_G$

Legge di kirchhoff:

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

Poniamo $x = V_{GS} - V_{TP}$. Quindi $V_S = V_G - V_{GS} = V_G - V_{TP} - x$

ATTENZIONE: x deve essere negativa affinchè il MOSFET sia acceso

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

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

$x^2 + bx + c = 0$ con: $b = -\frac{2}{k_p \cdot R_S} = -1.25\,V$ $c = -\frac{2 \cdot (V_{DD} - V_G + V_{TP})}{k_p \cdot R_S} = -9.375\,V^2$

$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -2.5\,V$ Accettabile $\boxed{V_{GS} = V_{TP} + x_1 = -3.5\,V}$ $V_S = V_G - V_{GS} = 10\,V$

$x_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 3.75\,V$ Non accettabile

$$\boxed{I_{DS} = \frac{k_p}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TP})^2 = 2.5 \cdot mA}$$

$$\boxed{V_{DS} = R_D \cdot I_{DS} - (V_{DD} - R_S \cdot I_{DS}) = -7.5 \cdot V}$$

Verifica della regione di funzionamento del MOSFET: $V_{GS} - V_{TP} = -2.5\,V$

$V_{DS} < V_{GS} - V_{TP}$ OK!

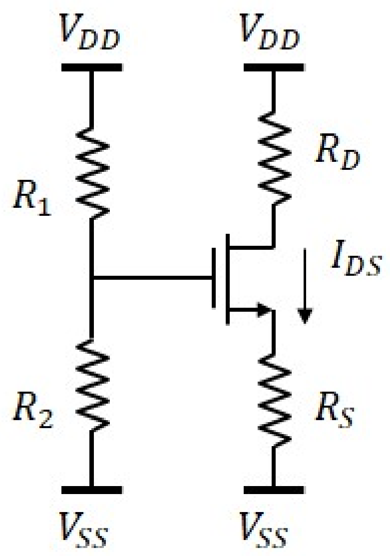
Esercizio 15

DATI:

$k_n = 3mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1.5V$, $R_1 = 260k\Omega$, $R_2 = 140k\Omega$.

$V_{DD} = 8V$, $V_{SS} = -8V$

$I_{DS} = 6mA$, $V_D = 2V$



$$V_G = V_{SS} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (V_{DD} - V_{SS}) = -2.4\,V$$

$$V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_n}} = 3.5\,V$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = -5.9\,V$$

$$\boxed{R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_{DS}} = 350\,\Omega}$$

$$\boxed{R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_{DS}} = 1 \cdot k\Omega}$$

Esercizio 16

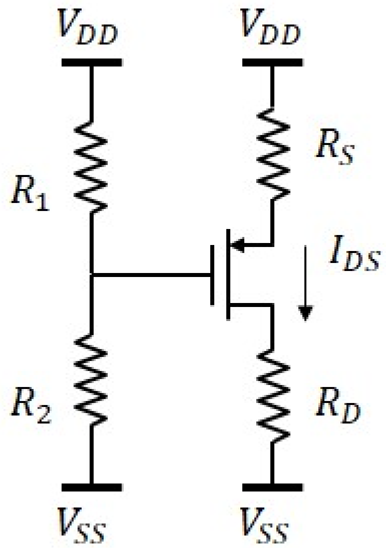
DATI:

$k_p = 4mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -1.4V$,

$R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 300k\Omega$,

$V_{DD} = 15V$, $V_{SS} = -5V$

$I_{DS} = 2mA$, $V_D = 0V$



$$V_G = V_{SS} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (V_{DD} - V_{SS}) = 10\,V$$

$$V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS}}{k_p}} = -2.4\,V$$

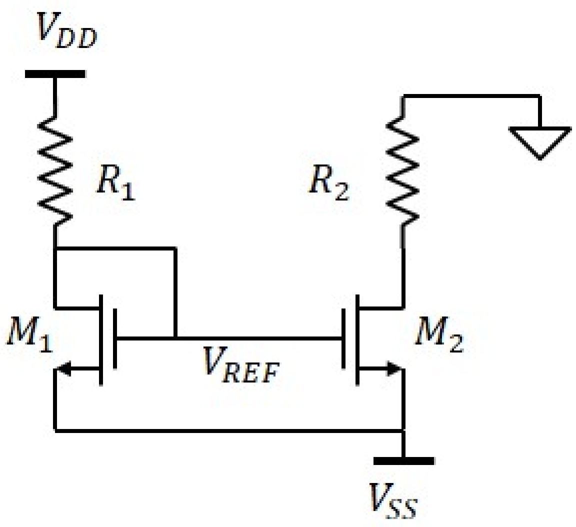
$$V_S = V_G - V_{GS} = 12.4\,V$$

$$\boxed{R_S = \frac{V_{DD} - V_S}{I_{DS}} = 1.3 \cdot k\Omega}$$

$$\boxed{R_D = \frac{V_D - V_{SS}}{I_{DS}} = 2.5 \cdot k\Omega}$$

Esercizio 17

DATI: $k_{n1} = 1\mathrm{mA}\cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 4\mathrm{mA}\cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$,
$R_1 = 36k\Omega$, $R_2 = 3k\Omega$, $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = -10V$



1) Potenziale V_{REF}

Legge di kirchhoff al nodo V_{REF}

$$\frac{V_{DD} - V_{SS} - V_{GS}}{R_1} = \frac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS} - V_{TN}\right)^2$$

$$\left(V_{GS} - V_{TN}\right)^2 + 2\cdot\frac{V_{GS} - V_{DD} + V_{SS}}{k_{n1}\cdot R_1} = 0$$

$$V_{GS} = V_{TN} + \frac{-1}{k_{n1}\cdot R_1} + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{n1}\cdot R_1}\right)^2 - \frac{2\cdot\left(V_{TN} - V_{DD} + V_{SS}\right)}{k_{n1}\cdot R_1}} = 2\ V$$

$$\boxed{V_{REF} = V_{SS} + V_{GS} = -8\ V}$$

2) Corrente erogata da M_2

Assumendo M_2 in saturazione:

$$\boxed{I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2}\cdot\left(V_{GS} - V_{TN}\right)^2 = 2\cdot mA}$$

oppure

$$I_{DS1} = \frac{V_{DD} - V_{REF}}{R_1} = 0.5\cdot mA$$

$$\boxed{I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{k_{n1}} I_{DS1} = 2\cdot mA}$$

Verifica della regione di funzionamento di M_2:

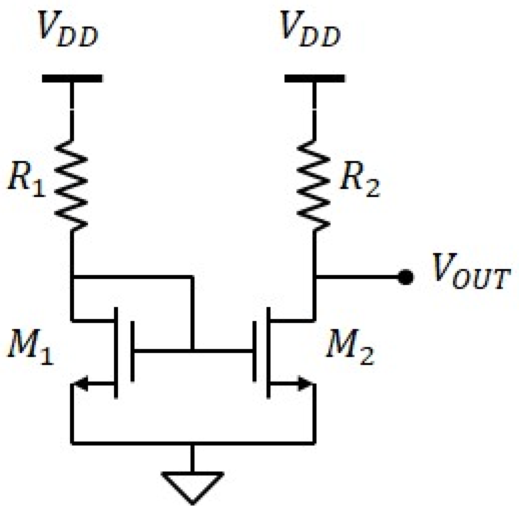
$V_{DS2} = 0 - V_{SS} - R_2\cdot I_{DS2} = 4\ V$ $\qquad V_{GS} - V_{TN} = 1\ V$ $\qquad$ M_2 è in saturazione

3) Valore massimo di R_2 tale da mantenere M_2 in saturazione

Il minimo valore di V_{DS} per M_2 è V_{GS}-V_{TN}.

$$\boxed{R_{2MAX} = \frac{0 - V_{SS} - \left(V_{GS} - V_{TN}\right)}{I_{DS2}} = 4.5\cdot k\Omega}$$

Esercizio 18



DATI: $k_{n1} = 1\text{mA}\cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 2.5\text{mA}\cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$,
$R_2 = 1k\Omega$, $V_{DD} = 10V$, $V_{OUT} = 5V$

$$I_{DS2} = \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{R_2} = 5\cdot \text{mA}$$

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

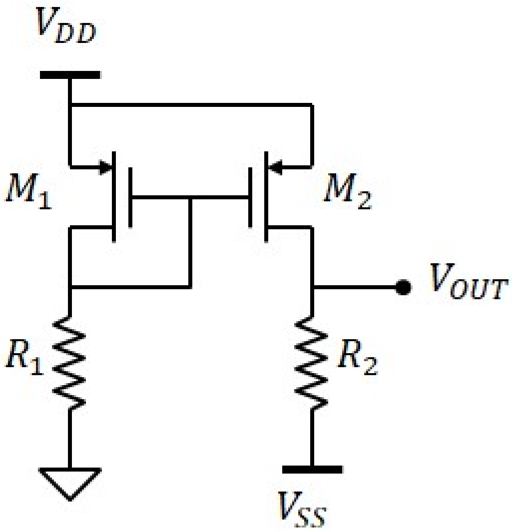
$$V_{DS2} = V_{DD} - V_{OUT} = 5\text{ V}$$

(M_2 è in saturazione)

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{k_{n2}}\cdot I_{DS2} = 2\cdot \text{mA}$$

$$\boxed{R_1 = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{I_{DS1}} = 3.5\cdot k\Omega}$$

Esercizio 19



DATI: $k_{p1} = 1\mathrm{mA}\cdot V^{-2}$, $k_{p2} = 5\mathrm{mA}\cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -1.5\mathrm{V}$,
$R_2 = 500\Omega$, $V_{DD} = 5\mathrm{V}$, $V_{SS} = -5\mathrm{V}$, $V_{OUT} = 0\mathrm{V}$

$$I_{DS2} = \frac{V_{OUT} - V_{SS}}{R_2} = 10\cdot\mathrm{mA}$$

$$V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2\cdot I_{DS2}}{k_{p2}}} = -3.5\,\mathrm{V}$$

$$V_{DS2} = V_{DD} - V_{OUT} = 5\,\mathrm{V}$$
(M_2 è in saturazione)

$$I_{DS1} = \frac{k_{p1}}{k_{p2}}\cdot I_{DS2} = 2\cdot\mathrm{mA}$$

$$V_G = V_{DD} + V_{GS} = 1.5\,\mathrm{V}$$

$$\boxed{R_1 = \frac{V_G}{I_{DS1}} = 750\cdot\Omega}$$

Esercizio 20

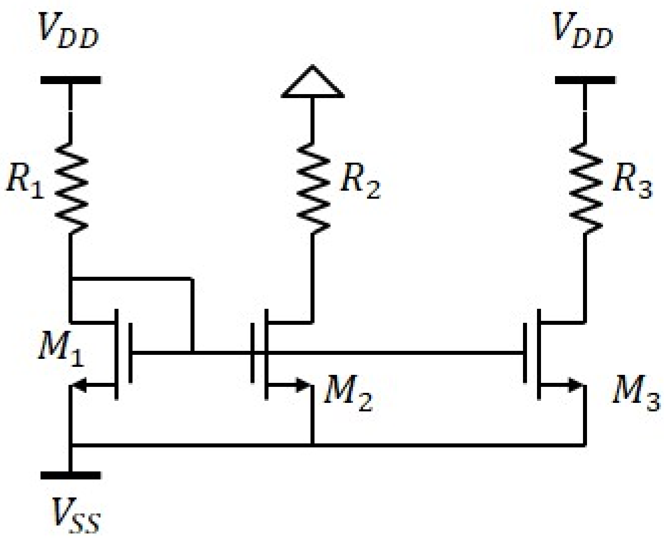
DATI:

$k_{n1} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 2mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 4mA \cdot V^{-2}$

$V_{TN} = 2V,$

$R_2 = 500\Omega,\ R_3 = 2k\Omega$

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



1) Il valore della resistenza R_2 affinché la corrente su M_2 sia $I_{DS2} = 4mA$

$$V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n2}}} = 4\ V$$

$$V_{DS2} = 0 - V_{SS} - R_2 \cdot I_{DS2} = 8\ V$$ OK, M2 è in saturazione

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{k_{n2}} \cdot I_{DS2} = 2 \cdot mA$$

$$V_G = V_{SS} + V_{GS} = -6\ V$$

$$\boxed{R_1 = \frac{V_{DD} - V_G}{I_{DS1}} = 8 \cdot k\Omega}$$

2) Potenza dissipata su R_3

$$I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{k_{n1}} \cdot I_{DS1} = 8 \cdot mA$$

Verifica della saturazione di M3:

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

$$V_{DS3} = V_{DD} - R_3 \cdot I_{DS3} - V_{SS} = 4\ V$$

$$\boxed{P_3 = R_3 \cdot I_{DS3}^2 = 0.128\ W}$$

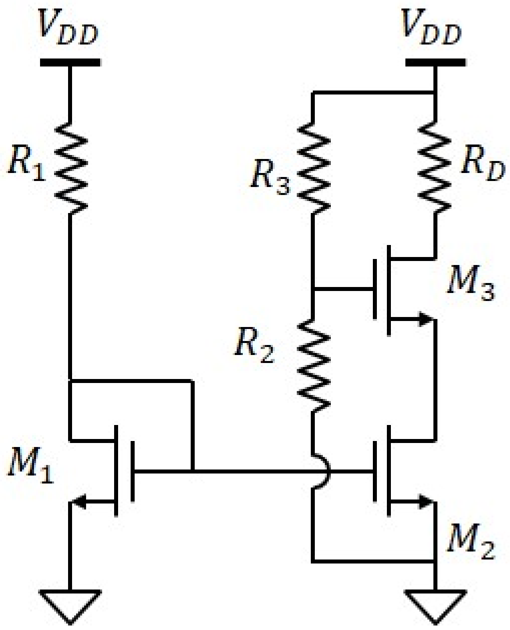
Esercizio 21

DATI:

$k_{n1} = 10mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 4mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1.5V$

$R_1 = 1.5k\Omega$, $R_2 = 40k\Omega$, $R_3 = 60k\Omega$, $R_D = 10k\Omega$

$V_{DD} = 10V$,



Legge di kirchhoff al tra M_1 e R_1:

$$\frac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS1}-V_{TN}\right)^2 = \frac{V_{DD}-V_{GS1}}{R_1}$$

$\boxed{V_{GS1} = 2.5V}$ $\boxed{V_{DS1} = V_{GS1} = 2.5\,V}$

Corrente su M_1 (risolvendo l'equazione di secondo grado):

$$\boxed{I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS1}-V_{TN}\right)^2 = 5\cdot mA}$$

oppure: $I_{DS1} = \dfrac{V_{DD}-V_{GS1}}{R_1} = 5\cdot mA$

Corrente e tensione V_{GS} su M_2 (assumendolo in saturazione e verificando a posteriori):

$$\boxed{I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{k_{n1}}\cdot I_{DS1} = 0.5\cdot mA} \qquad \boxed{V_{GS2} = V_{GS1} = 2.5\,V}$$

Corrente e tensione V_{GS} su M_3 (assumendolo in saturazione e verificando a posteriori):

$$\boxed{I_{DS3} = I_{DS2}} \qquad \boxed{V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_{DS3}}{k_{n3}}} = 2\,V}$$

$$V_{G3} = \frac{R_2}{R_2+R_3}\cdot V_{DD} = 4\,V \qquad V_{S3} = V_{G3} - V_{GS3} = 2\,V$$

$$V_{D3} = V_{DD} - R_D \cdot I_{DS3} = 5\,V$$

$$V_{D2} = V_{S3}$$

$\boxed{V_{DS2} = V_{D2} - 0 = 2\,V}$ $V_{GS2} - V_{TN} = 1\,V$ Il M_2 è effettivamente in saturazione

$\boxed{V_{DS3} = V_{D3} - V_{S3} = 3\,V}$ $V_{GS3} - V_{TN} = 0.5\,V$ Il M_3 è effettivamente in saturazione

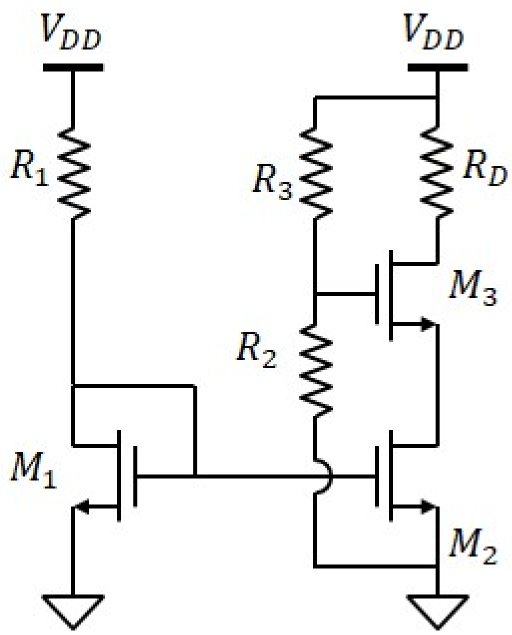
Esercizio 22

DATI:

$k_{n1} = 5mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 4mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$

$R_2 = 60k\Omega$, $R_3 = 40k\Omega$

$V_{DD} = 10V$,



1a) Calcolo di R_1 per avere $I_{DS3} = 2mA$

$$I_{DS2} = I_{DS3} = 2 \cdot mA$$

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{k_{n2}} \cdot I_{DS2} = 10 \cdot mA$$

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

$$\boxed{R_1 = \frac{V_{DD} - V_{GS1}}{I_{DS1}} = 700\,\Omega}$$

1b) Calcolo di R_D per avere $V_{D3} = 7V$

$$\boxed{R_D = \frac{V_{DD} - V_{D3}}{I_{DS3}} = 1.5 \cdot k\Omega}$$

2) Calcolo (e verifica) della polarizzazione di tutti i MOSFET

M1: $\boxed{V_{GS1} = 3\,V}$ $\boxed{V_{DS1} = V_{GS1}}$ Saturazione $\boxed{I_{DS1} = 10 \cdot mA}$

M2: $\boxed{V_{GS2} = V_{GS1}}$

$V_{G3} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot V_{DD} = 6\,V$ $V_{S3} = V_{G3} - V_{GS3}$ $V_{D2} = V_{S3}$

$\boxed{V_{DS2} = V_{D2} - 0 = 4\,V}$ $V_{GS2} - V_{TN} = 2\,V$ Saturazione $\boxed{I_{DS2} = 2 \cdot mA}$

M3: $\boxed{V_{GS3} = 2\,V}$ $\boxed{V_{DS3} = V_{D3} - V_{S3} = 3\,V}$ $V_{GS3} - V_{TN} = 1\,V$ Saturazione $\boxed{I_{DS3} = 2 \cdot mA}$

Esercizio 23

DATI:

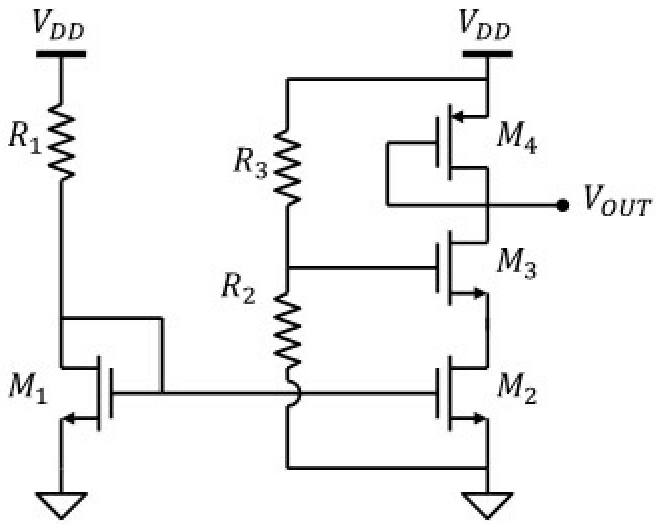
$k_{n1} = 5mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$

$k_{n2} = 0.5mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 8mA \cdot V^{-2}$

$k_{p4} = 0.08mA \cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -1V$

$R_2 = 50k\Omega$, $R_3 = 70k\Omega$

$V_{DD} = 12V$



1) Resistenza R_1 affinché la corrente attraverso M_3 sia $I_{DS3} = 1mA$

$$I_{DS2} = I_{DS3} \qquad I_{DS1} = I_{DS2} \cdot \frac{k_{n1}}{k_{n2}} = 10 \cdot mA \qquad V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 3\,V$$

$$\boxed{R_1 = \frac{V_{DD} - V_{GS1}}{I_{DS1}} = 900\,\Omega}$$

2) Tensione V_{OUT} del circuito.

$$V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{n3}}} = 1.5\,V$$

Caduta di tensione sul PMOSFET M_4: $I_{DS4} = I_{DS3}$ $\qquad V_{GS4} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS4}}{k_{p4}}} = -6\,V$

$$\boxed{V_{OUT} = V_{DD} + V_{GS4} = 6\,V}$$

3) Polarizzazione di tutti i MOSFET, verificandone la condizione di saturazione

M1: $\boxed{V_{GS1} = 3\,V}$ $\boxed{V_{DS1} = V_{GS1} = 3\,V}$ Saturazione con: $\boxed{I_{DS1} = 10 \cdot mA}$

M2: $V_{G3} = \frac{R_2}{R_3 + R_2} \cdot V_{DD} = 5\,V$ $\qquad V_{S3} = V_{G3} - V_{GS3} = 3.5\,V$ $\qquad V_{D2} = V_{S3}$

$\boxed{V_{GS2} = V_{GS1} = 3\,V}$ $\boxed{V_{DS2} = V_{D2} - 0 = 3.5\,V}$ Saturazione con: $\boxed{I_{DS2} = 1 \cdot mA}$

M3: $\boxed{V_{GS3} = 1.5\,V}$ $\boxed{V_{DS3} = V_{OUT} - V_{S3} = 2.5\,V}$ Saturazione con: $\boxed{I_{DS3} = 1 \cdot mA}$

M4: $\boxed{V_{GS4} = -6\,V}$ $\boxed{V_{DS4} = V_{GS4} = -6\,V}$ Saturazione con: $\boxed{I_{DS4} = 1 \cdot mA}$

Esercizio 24

DATI:

$R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$,

$V_{DD} = 10V$,

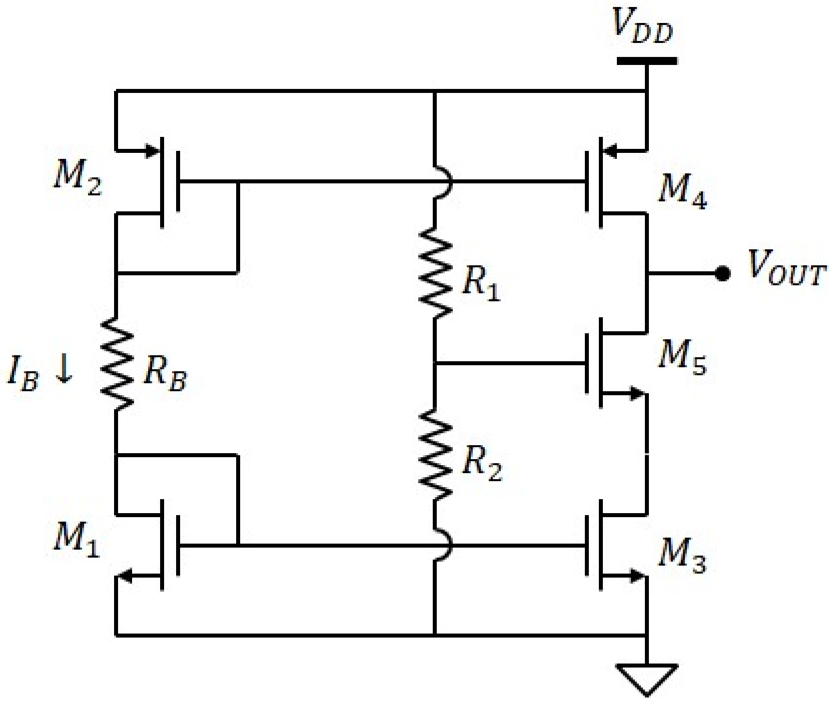
$k_{n1} = 2mA\cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 0.5mA\cdot V^{-2}$.

$k_{n5} = 2mA\cdot V^{-2}$,

$V_{TN} = 1V$, $\lambda_n = 0.01V^{-1}$,

$k_{p2} = 2mA\cdot V^{-2}$, $k_{p4} = 0.5mA\cdot V^{-2}$,

$V_{TP} = -1V$, $\lambda_p = 0.01V^{-1}$



Calcolo di R_B per avere $I_B = 1mA$

Legge di kirchhoff alle maglie:

$$V_{DD} = V_{GS1} + I_B\cdot R_B - V_{GS2}$$

Nota I_B calcoliamo: $V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_B}{k_{n1}}} = 2\ V$

$$V_{GS2} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2\cdot I_B}{k_{p2}}} = -2\ V$$

Nel calcolo di V_{GS} in M_1 e M_2 possiamo trascurare la modulazione della lunghezza di canale, per evitare di risolvere l'equazione di terzo grado:

$$\frac{k}{2}\cdot\left(V_{GS} - V_T\right)^2\cdot\left(1 + \lambda V_{GS}\right) = I_B$$

Ad esempio, con il valore V_{GS} calcolato, la correte che attravresa M_1 sarebbe:

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS1} - V_{TN}\right)^2\cdot\left(1 + \lambda_n\cdot V_{GS1}\right) = 1.02\cdot mA$$

Risolvendo l'equazione di terzo grado si otterrebbe $V_{GS} = 1.99V$

$$\boxed{R_B = \frac{V_{DD} - V_{GS1} + V_{GS2}}{I_B} = 6\cdot k\Omega}$$

La corrente che attraversa M1 e M2 è pari a IB per entrambi: $I_{DS1} = I_B$ $\quad I_{DS2} = I_B$

Calcolo della tensione V_{OUT}

Assumendo tutti i MOSFET in saturazione (condizione da verificare a posteriori), calcoliamo la corrente attraverso la serie di M3, M4, M5:

M_3 specchia la corrente di M_1: $I_{DS3} = \frac{k_{n3}}{k_{n1}}\cdot I_{DS1} = 0.25\cdot mA$

M_4 specchia la corrente di M_2: $$I_{DS4} = \frac{k_{p4}}{k_{p2}} \cdot I_{DS2} = 0.25 \cdot mA$$

Osserviamo che gli specchi M_1-M_3 e M_2-M_4 hanno lo stesso rapporto di specchio. La corrente su M5 è la stessa forzata da M_3 e M_4.

$$I_{DS5} = I_{DS3} = 0.25 \cdot mA$$

Calcoliamo le tensioni V_{GS} di M_3, M_4 e M_5

$$V_{GS3} = V_{GS1} = 2\,V$$

$$V_{GS4} = V_{GS2} = -2\,V$$

$$V_{GS5} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS5}}{k_{n5}}} = 1.5\,V$$

Polarizzazione del MOSFET M_3:

$$V_{G5} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 5\,V$$

$$V_{S5} = V_{G5} - V_{GS5} = 3.5\,V \qquad V_{D3} = V_{S5}$$

$$V_{DS3} = V_{D3} - 0 = 3.5\,V \qquad V_{GS3} - V_{TN} = 1\,V$$ OK, è in saturazione

Polarizzazione del MOSFET M_4 e M_5:

Trascurando la modulazione della lunghezza di canale, le correnti I_{DS4} e I_{DS5} sono uguali indipendentemente dalla tensione V_{DS4} e V_{DS5} ai capi di M_4 e M_5.
Per fare il conto è necessario considerare anche la modulazione della lunghezza di canale.

Corrente (completa) di M_4 e M_5:

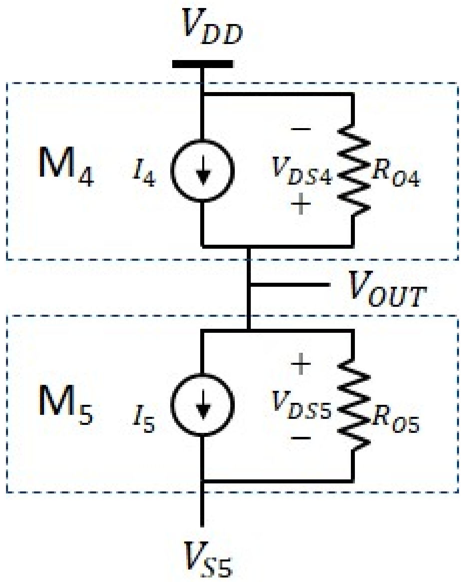
$$I_{DS4} = \frac{k_{p4}}{2} \cdot \left(V_{GS4} - V_{TP}\right)^2 \cdot \left(1 - \lambda_p \cdot V_{DS4}\right) = I_4 - \frac{V_{DS4}}{R_{O4}}$$

$$I_{DS5} = \frac{k_{n5}}{2} \cdot \left(V_{GS5} - V_{TN}\right)^2 \cdot \left(1 + \lambda_n \cdot V_{DS5}\right) = I_5 + \frac{V_{DS5}}{R_{O5}}$$

$$I_4 = I_{DS4}(IDEALE) = \frac{k_{p4}}{2} \cdot \left(V_{GS4} - V_{TP}\right)^2 \qquad R_{O4} = \frac{1}{\lambda_p \cdot I_{DS4}(IDEALE)}$$

$$I_5 = I_{DS5}(IDEALE) = \frac{k_{n5}}{2} \cdot \left(V_{GS5} - V_{TN}\right)^2 \qquad R_{O5} = \frac{1}{\lambda_n \cdot I_{DS5}(IDEALE)}$$

Il circuito elettrico equivalente è rappresentato in figura.
I generatori di corrente:



$$I_4 = \frac{k_{p4}}{2}\cdot\left(V_{GS4} - V_{TP}\right)^2 = 0.25\cdot mA$$

$$I_5 = \frac{k_{n5}}{2}\cdot\left(V_{GS5} - V_{TN}\right)^2 = 0.25\cdot mA$$

Rappresentano la corrente ideale dei MOSFET (senza la modulazione della lunghezza di canale). Entrambi erogano la stessa corrente calcolata in precedenza trascurando λ.
Le due resistenze:

$$R_{O4} = \frac{1}{\lambda_p\cdot I_4} = 400\cdot k\Omega$$

$$R_{O5} = \frac{1}{\lambda_n\cdot I_5} = 400\cdot k\Omega$$

Rappresentano il contributo della modulazione di lunghezza di canale.

Imponiamo la legge di kirchhoff al nodo V_{OUT}:

$$I_4 + \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{R_{O4}} = I_5 + \frac{V_{OUT} - V_{S5}}{R_{O5}}$$

$$\boxed{V_{OUT} = V_{S5} + \left(V_{DD} - V_{S5}\right)\cdot\frac{R_{O5}}{R_{O5} + R_{O4}} = 6.75\,V}$$

Perchè è necessario considerare λ per il calcolo di V_{OUT}?
La relazione I_{DS}-V_{DS} reale del transistor in zona di saturazione è:

$$I_{DS} = \frac{k}{2}\cdot\left(V_{GS} - V_T\right)^2\cdot\left(1 + \lambda V_{DS}\right)$$

Poichè λ è piccolo, abbiamo deciso di trascurarlo nel calcolo di I_{DS}. Questa è una buona approssimazione. Ad esempio M_5 ha una corrente ideale:

$$I_{IDEALE} = \frac{k_{n5}}{2}\cdot\left(V_{GS5} - V_{TN}\right)^2 = 0.25\cdot mA$$

e una corrente reale:

$$I_{REALE} = \frac{k_{n5}}{2}\cdot\left(V_{GS5} - V_{TN}\right)^2\cdot\left[1 + \lambda_n\cdot\left(V_{OUT} - V_{S5}\right)\right] = 0.258\cdot mA$$

che è formato dalla somma della corrente ideale e un termine dipendente dalla tensione V_{DS5}=V_{OUT}-V_{S5}. Questo secondo termine porta un contributo di soli 0.008mA. La differenza sta nella terza cifra decimale. Ciò conferma che nel calcolo della polarizzazione λ è trascurabile in prima approssimazione.
Tuttavia, nell'imporre la legge di kirchhoff tra M_5 e M_4 scriviamo:

$$I_4 + \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{R_{O4}} = I_5 + \frac{V_{OUT} - V_{S5}}{R_{O5}}$$

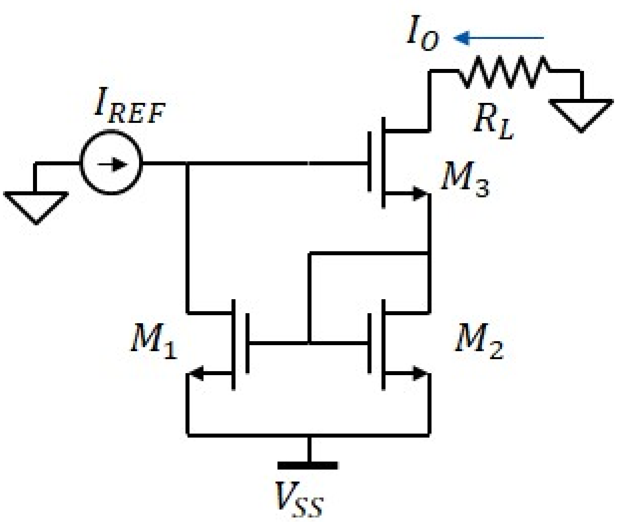
I due termini ideali (I_4 e I_5) sono uguali e si annullano a vicenda. Pertanto i due contributi di modulazione di lunghezza di canale sono i termini dominanti e non possono più essere trascurati.

Esercizio 25

DATI: $I_{REF} = 2mA$

$k_{n1} = 1mA \cdot V^{-2}$; $k_{n2} = 0.5mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 2mA \cdot V^{-2}$; $V_{TN} = 1V$

$V_{SS} = -10V$,



1. Trovare il valore di I_O nell'ipotesi che tutti i MOSFET siano in saturazione

$$V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{REF}}{k_{n1}}} \qquad V_{GS2} = V_{GS1} = 3\ V$$

$$I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TN})^2 \qquad I_{DS3} = I_{DS2} = 1 \cdot mA$$

$$\boxed{I_O = I_{DS2} = 1 \cdot mA}$$

2. il valore massimo di R_L tale per cui tutti i MOS sono in saturazione

M2 è sempre in saturazione con: $V_{DS2} = V_{GS2} = 3\ V$

M3: $V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{n3}}} = 2\ V$ $\qquad V_{S3} = V_{SS} + V_{GS2} = -7\ V \qquad V_{D3} = 0 - R_L \cdot I_O$

$$V_{G3} = V_{SS} + V_{GS2} + V_{GS3} = -5\ V$$

$$V_{DS3} = V_{D3} - V_{S3} = -R_L \cdot I_O - V_{S3} > V_{GS3} - V_{TN}$$

$$R_L > -\frac{V_{SS} + V_{GS2} + V_{GS3} - V_{TN}}{I_O}$$

$$\boxed{R_{LMAX} = -\frac{V_{SS} + V_{GS2} + V_{GS3} - V_{TN}}{I_O} = 6 \cdot k\Omega}$$

M1: $V_{DS1} = V_{GS2} + V_{GS3} = 5\ V \qquad V_{GS1} - V_{TN} = 2\ V$

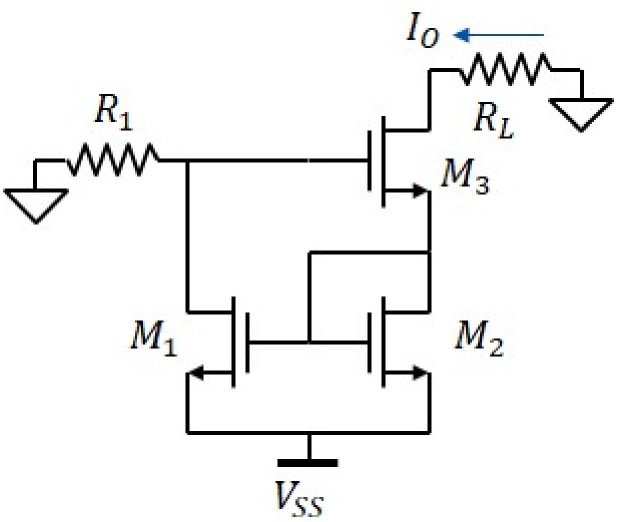
Esercizio 26

DATI: $R_1 = 17.5k\Omega$, $R_L = 5k\Omega$

$k_{n1} = 0.5mA\cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 1.25mA\cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 5mA\cdot V^{-2}$

$V_{TN} = 0.5V$

$V_{SS} = -5V$



1. Calcolare la corrente I_O e la polarizzazione di tutti i MOS

$I_O = I_{DS3} = I_{DS2}$ $\qquad \frac{I_{DS1}}{I_{DS2}} = \frac{k_{n1}}{k_{n2}}$ $\qquad I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{k_{n2}}\cdot I_O$

$V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_O}{k_{n2}}}$ $\qquad V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_O}{k_{n3}}}$

$I_{DS1}\cdot R_1 + V_{GS2} + V_{GS3} = 0 - V_{SS}$

$$\frac{k_{n1}}{k_{n2}}\cdot I_O\cdot R_1 + V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_O}{k_{n2}}} + V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_O}{k_{n3}}} = 0 - V_{SS}$$

Poniamo $x = \sqrt{I_O}$

$$\frac{k_{n1}}{k_{n2}}\cdot R_1\cdot x^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{k_{n2}}} + \sqrt{\frac{2}{k_{n3}}}\right)\cdot x + 2V_{TN} + V_{SS} = 0$$

$a = \frac{k_{n1}}{k_{n2}}\cdot R_1 = 7\cdot k\Omega$ $\qquad b = \left(\sqrt{\frac{2}{k_{n2}}} + \sqrt{\frac{2}{k_{n3}}}\right) = 60\cdot\Omega\cdot\sqrt{A}$

$c = 2V_{TN} + V_{SS} = -4\,V$

$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4\cdot a\cdot c}}{2a} = 0.02\cdot\sqrt{A}$ $\qquad \boxed{I_O = x_1^2 = 0.4\cdot mA}$

$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4\cdot a\cdot c}}{2a} = -0.029\cdot\sqrt{A}$ $\qquad$ non accettabile

Polarizzazione dei MOSFET:

$\boxed{V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_O}{k_{n2}}} = 1.3\,V}$ $\qquad \boxed{V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2\cdot I_O}{k_{n3}}} = 0.9\,V}$ $\qquad \boxed{V_{GS1} = V_{GS2} = 1.3\,V}$

$\boxed{V_{DS2} = V_{GS2} = 1.3\,V}$ $\qquad \boxed{V_{DS3} = (0 - R_L\cdot I_O) - (V_{SS} + V_{GS2}) = 1.7\,V}$ $\qquad \boxed{V_{DS1} = V_{GS2} + V_{GS3} = 2.2\,V}$

2. Calcolare il valore i R_1 per ottenere $I_O = 0.1\text{mA}$

Assumiamo tutti i MOS in saturazione:

$$V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_O}{k_{n3}}} = 0.7\,V \qquad V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_O}{k_{n2}}} = 0.9\,V$$

$$V_{DS1} = V_{GS2} + V_{GS3} \qquad V_{GS1} = V_{GS2} \qquad I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} \cdot \left(V_{GS1} - V_{TN}\right)^2 = 40 \cdot \mu A$$

$$V_{R1} = 0 - \left(V_{SS} + V_{DS1}\right) = 3.4\,V \qquad \boxed{R_1 = \frac{V_{R1}}{I_{DS1}} = 85 \cdot k\Omega}$$

Verifica delle condizioni di polarizzazione:

M1: $V_{GS1} = 0.9\,V$ $\quad V_{DS1} = 1.6\,V$ $\quad$ Saturazione

M2: $V_{GS2} = 0.9\,V$ $\quad V_{DS2} = V_{GS2}$ $\quad$ Saturazione

M3: $V_{GS3} = 0.7\,V$ $\quad V_{S3} = V_{SS} + V_{GS2} = -4.1\,V$ $\quad V_{D3} = 0 - R_L \cdot I_O = -0.5\,V$ $\quad V_{DS3} = V_{D3} - V_{S3} = 3.6\,V$

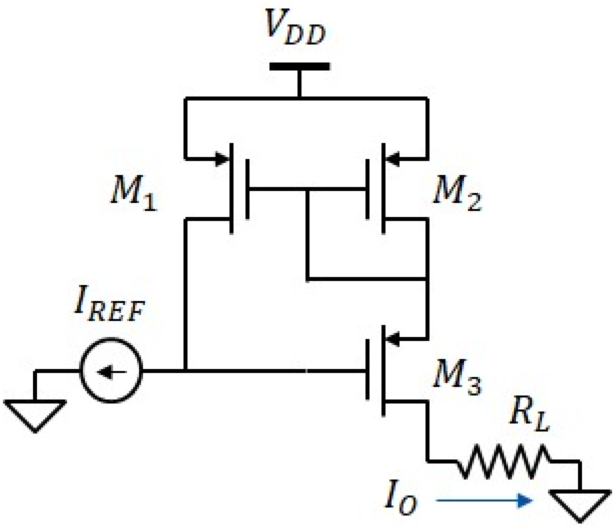
Saturazione

Esercizio 27

DATI: $I_{REF} = 0.5mA$

$k_{p1} = 1mA \cdot V^{-2}$; $k_{p2} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{p3} = 4mA \cdot V^{-2}$; $V_{TP} = -0.5V$

$V_{DD} = 5V$,



1. Trovare il valore di I_O nell'ipotesi che tutti i MOSFET siano in saturazione

$$V_{GS1} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{REF}}{k_{p1}}} \qquad V_{GS2} = V_{GS1} = -1.5\,V$$

$$I_{DS2} = \frac{k_{p2}}{2} \cdot (V_{GS2} - V_{TP})^2 \qquad I_{DS3} = I_{DS2} = 0.5 \cdot mA$$

$$\boxed{I_O = I_{DS2} = 0.5 \cdot mA}$$

2. il valore massimo di R_L tale per cui tutti i MOS sono in saturazione

M2 è sempre in saturazione con: $V_{DS2} = V_{GS2} = -1.5\,V$

M3: $V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{p3}}} = -1\,V$ $\qquad V_{S3} = V_{DD} + V_{GS2} = 3.5\,V \qquad V_{D3} = R_L \cdot I_O$

$V_{G3} = V_{S3} + V_{GS3} = 2.5\,V$

$$V_{DS3} = V_{D3} - V_{S3} = R_L \cdot I_O - V_{S3} < V_{GS3} - V_{TP}$$

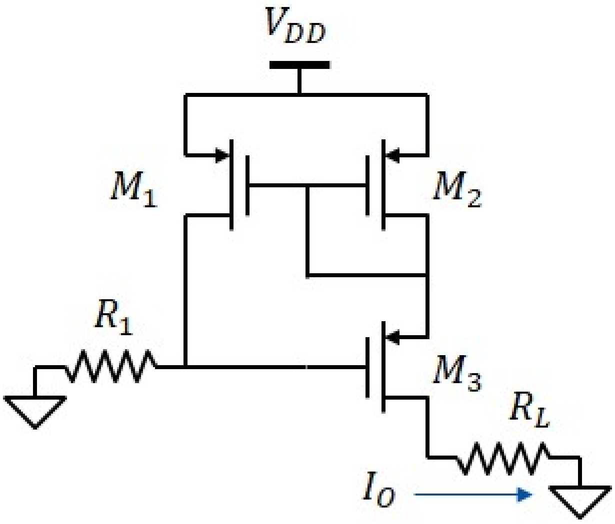
$$R_L < \frac{V_{G3} - V_{TP}}{I_O}$$

$$\boxed{R_{LMAX} = \frac{V_{G3} - V_{TP}}{I_O} = 6 \cdot k\Omega}$$

M1: $V_{DS1} = V_{GS2} + V_{GS3} = -2.5\,V \quad V_{GS1} - V_{TP} = -1\,V$

Esercizio 28

DATI: $k_{p1} = 0.8mA \cdot V^{-2}$, $k_{p2} = 8mA \cdot V^{-2}$, $k_{p3} = 8mA \cdot V^{-2}$
$V_{DD} = 7V$, $V_{TP} = -1V$, $R_L = 500\Omega$,



Sapendo che la tensione drain-source di M_1 è
$V_{DS1} = -3V$, **calcolare la corrente I_O e il valore di R_1**

Assumiamo tutti i MOSFET in saturazione:

$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS3}$ (M2 e M3 sono in serie e hanno lo stesso k)

$V_{GS1} + V_{GS2} = 2V_{GS2} = V_{DS1}$

$$V_{GS2} = \frac{V_{DS1}}{2} = -1.5\,V \qquad I_{DS2} = \frac{k_{p2}}{2}\cdot\left(V_{GS2} - V_{TP}\right)^2 = 1\cdot mA \qquad V_{DS2} = V_{GS2} = -1.5\,V$$

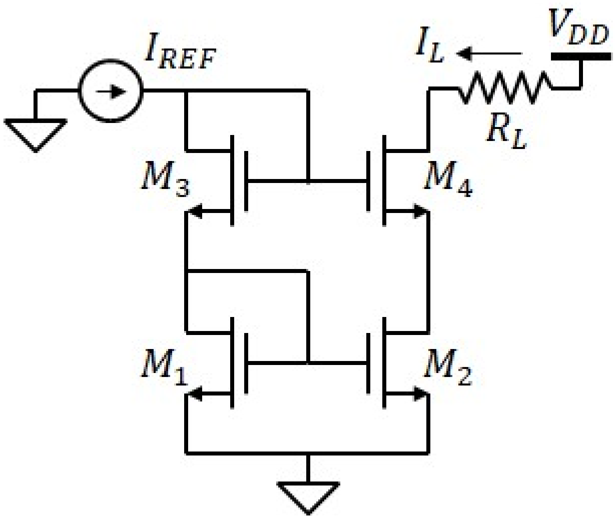
$$V_{GS1} = V_{GS2} = -1.5\,V \qquad I_{DS1} = \frac{k_{p1}}{2}\cdot\left(V_{GS1} - V_{TP}\right)^2 = 0.1\cdot mA$$

$$V_{GS3} = V_{GS2} = -1.5\,V \qquad I_{DS3} = \frac{k_{p3}}{2}\cdot\left(V_{GS3} - V_{TP}\right)^2 = 1\cdot mA \qquad V_{DS3} = I_{DS2}\cdot R_L - \left(V_{DD} + V_{DS2}\right) = -5\,V$$

$$\boxed{I_O = I_{DS2} = 1\cdot mA}$$

$$\boxed{R_1 = \frac{V_{DD} + V_{DS1}}{I_{DS1}} = 40\cdot k\Omega}$$

Esercizio 29



DATI: $k_{n1} = 2mA \cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 2mA \cdot V^{-2}$,

$k_{n2} = 6mA \cdot V^{-2}$, $k_{n4} = 6mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 1V$,

$I_{REF} = 0.25mA$, $V_{DD} = 11V$

1. Calcolare la corrente I_L nell'ipotesi che tutti i MOS siano in saturazione

$$V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{REF}}{k_{n3}}} = 1.5\,V$$

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

$$V_{GS2} = V_{GS1} = 1.5\,V \qquad I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot \left(V_{GS2} - V_{TN}\right)^2 = 0.75 \cdot mA$$

$$I_{DS4} = I_{DS2} \qquad V_{GS4} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS4}}{k_{n4}}} = 1.5\,V \qquad \boxed{I_L = I_{DS2} = 0.75 \cdot mA}$$

2. Calcolare il massimo valore di R_L che garantisce il funzionamento dei MOS in saturazione

$V_{DS3} = V_{GS3} = 1.5\,V$ Saturazione

$V_{DS1} = V_{GS1} = 1.5\,V$ Saturazione

$V_{S4} = V_{GS1} + V_{GS3} - V_{GS4} = 1.5\,V$ $\qquad V_{DS2} = V_{S4} - 0V = 1.5\,V$ Saturazione

$$V_{DS4} = V_{DD} - R_L \cdot I_{DS4} - V_{S4}$$

In saturazione se:

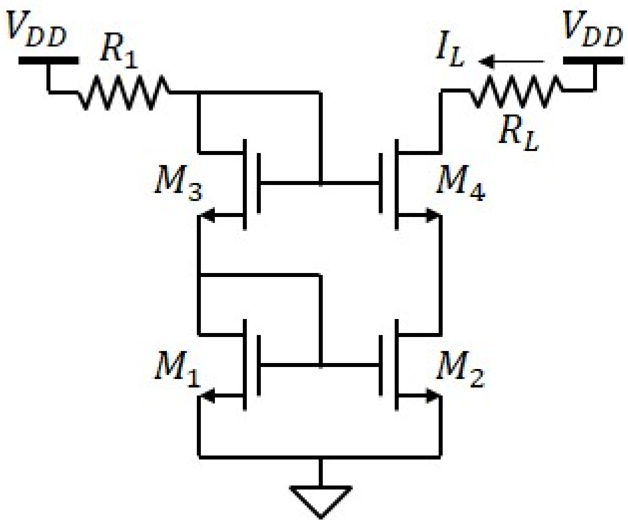
$$V_{DD} - R_L \cdot I_{DS4} - V_{S4} > V_{GS4} - V_{TN}$$

$$V_{DD} - R_L \cdot I_{DS4} - \left(V_{GS1} + V_{GS3} - V_{GS4}\right) > V_{GS4} - V_{TN}$$

$$R_L < \frac{V_{DD} - \left(V_{GS1} + V_{GS3}\right) + V_{TN}}{I_{DS4}}$$

$$\boxed{R_{LMAX} = \frac{V_{DD} - \left(V_{GS1} + V_{GS3}\right) + V_{TN}}{I_{DS4}} = 12 \cdot k\Omega}$$

Esercizio 30



DATI: $k_{n1} = 1mA\cdot V^{-2}$, $k_{n3} = 1mA\cdot V^{-2}$,

$k_{n2} = 5mA\cdot V^{-2}$, $k_{n4} = 5mA\cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 0.5V$,

$R_1 = 24k\Omega$, $V_{DD} = 5V$, $R_L = 4k\Omega$

Calcolare la corrente I_L e la polarizzazione di tutti i MOS

$V_{GS1} = V_{GS3}$ $\quad I_{DS1} = I_{DS}$

$$\frac{V_{DD} - 2\cdot V_{GS1}}{R_1} = \frac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS1} - V_{TN}\right)^2$$

$$2\cdot\frac{V_{DD} - 2\cdot V_{GS1}}{k_{n1}\cdot R_1} = \left(V_{GS1} - V_{TN}\right)^2$$

poniamo $x = V_{GS1} - V_{TN}$

$$x^2 + 2\cdot\frac{2x}{k_{n1}\cdot R_1} + 2\cdot\frac{2\cdot V_{TN} - V_{DD}}{k_{n1}\cdot R_1} = 0 \qquad b = 2\cdot\frac{2}{k_{n1}\cdot R_1} = 0.167\,V \quad c = 2\cdot\frac{2\cdot V_{TN} - V_{DD}}{k_{n1}\cdot R_1} = -0.333\,V^2$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = 0.5\,V$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} = -0.667\,V \qquad \text{non accettabile}$$

$\boxed{V_{GS1} = x_1 + V_{TN} = 1\,V}$ $\quad\boxed{V_{GS3} = V_{GS1} = 1\,V}$ $\quad\boxed{V_{GS2} = V_{GS1} = 1\,V}$ $\quad\boxed{V_{GS4} = V_{GS2} = 1\,V}$

$$I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2}\cdot\left(V_{GS2} - V_{TN}\right)^2 \qquad I_{DS4} = I_{DS2} = 625\cdot\mu A \qquad \boxed{I_L = I_{DS4} = 625\cdot\mu A}$$

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS1} - V_{TN}\right)^2 \qquad I_{DS3} = I_{DS1} = 125\cdot\mu A$$

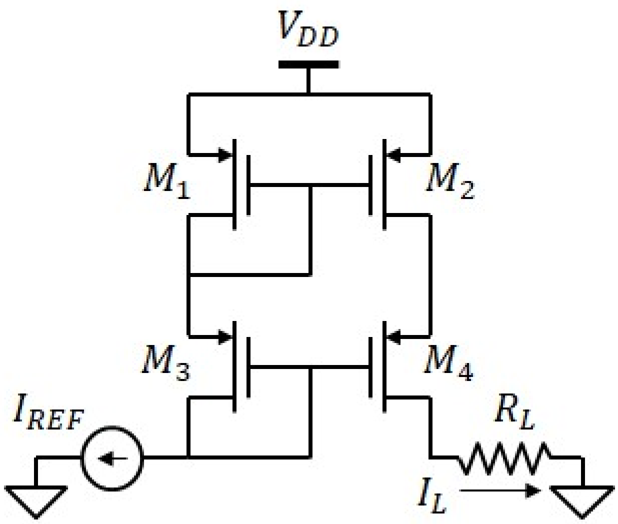
$\boxed{V_{DS2} = V_{GS1} + V_{GS3} - V_{GS4} = 1\,V}$ saturazione

$\boxed{V_{DS3} = V_{GS3} = 1\,V}$ saturazione

$\boxed{V_{DS1} = V_{GS1} = 1\,V}$ saturazione

$\boxed{V_{DS4} = \left(V_{DD} - R_L\cdot I_L\right) - V_{DS2} = 1.5\,V}$ saturazione

Esercizio 31



DATI: $k_p = 3\text{mA}\cdot V^{-2}$, $V_{TP} = -1V$,
$I_{REF} = 1.5\text{mA}$, $V_{DD} = 12V$, $R_L = 3k\Omega$

1. Calcolare la corrente I_L e la caduta di tensione nel carico R_L.

Tutti i MOS hanno: $V_{GS} = V_{TP} - \sqrt{\dfrac{2\cdot I_{REF}}{k_p}} = -2\text{ V}$

e corrente: $I_{DS} = I_{REF} = 1.5\cdot\text{mA}$

Corrente sul carico: $\boxed{I_L = I_{REF} = 1.5\cdot\text{mA}}$

Tensione dul carico: $\boxed{V_L = R_L\cdot I_L = 4.5\text{ V}}$

Verifica della polarizzazione:

M1 e M3: $V_{DS1} = V_{GS} = -2\text{ V}$ $V_{DS3} = V_{GS} = -2\text{ V}$

M2: $V_{DS2} = V_{GS} + V_{GS} - V_{GS} = -2\text{ V}$

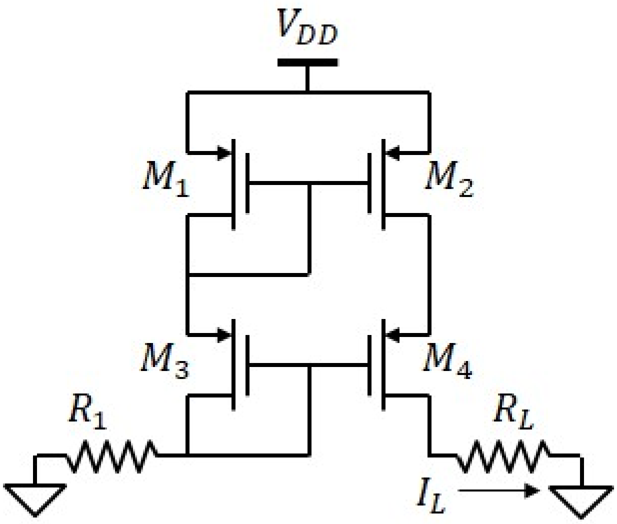
M4: $V_{DS4} = -\left[V_{DD} - \left(-V_{DS2}\right) - V_L\right] = -5.5\text{ V}$

2. Calcolare il massimo valore di R_L che garantisce la regione di saturazione per tutti i MOS

La minima tensione drain-source di M4 è: $V_{DS4} = V_{GS} - V_{TP} = -1\text{ V}$

La massima tensione sul carico è: $V_L = V_{DD} + V_{DS2} + V_{DS4} = 9\text{ V}$ $\boxed{R_{LMAX} = \dfrac{V_L}{I_L} = 6\cdot k\Omega}$

Esercizio 32



DATI: $k_{p1} = 0.8\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-2}$, $k_{p3} = 0.8\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-2}$,
$k_{p2} = 4\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-2}$, $k_{p4} = 4\mathrm{mA}\cdot\mathrm{V}^{-2}$, $V_{TP} = -1.5\mathrm{V}$,
$V_{DD} = 15\mathrm{V}$, $R_L = 1\mathrm{k}\Omega$

Calcolare la resistenza R_1 affinchè $I_L = 4.5\mathrm{mA}$

$$V_{GS2} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2\cdot I_L}{k_{p2}}} = -3\text{ V} \qquad V_{GS4} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2\cdot I_L}{k_{p4}}} = -3\text{ V}$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} \qquad V_{GS3} = V_{GS1} = -3\text{ V}$$

$$V_{DS1} = V_{GS1} \qquad V_{DS3} = V_{GS3} = -3\text{ V}$$

$$I_{DS1} = \frac{k_{p1}}{2}\cdot\left(V_{GS1} - V_{TP}\right)^2 = 0.9\cdot\text{mA}$$

$$V_{R1} = V_{DD} + V_{DS1} + V_{DS3} = 9\text{ V} \qquad \boxed{R_1 = \frac{V_{R1}}{I_{DS1}} = 10\cdot\text{k}\Omega}$$

Verifica delle condizioni di polarizzazione:

$$V_{G4} = V_{R1} = 9\text{ V} \qquad V_{D4} = I_L\cdot R_L = 4.5\text{ V} \qquad V_{S4} = V_{G4} - V_{GS4} = 12\text{ V} \qquad V_{DS4} = V_{D4} - V_{S4} = -7.5\text{ V}$$

$$V_{DS2} = V_{S4} - V_{DD} = -3\text{ V}$$

Esercizio 33

DATI: $k_{n1} = 2mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 8mA \cdot V^{-2}$

$V_{TN} = 1V$,

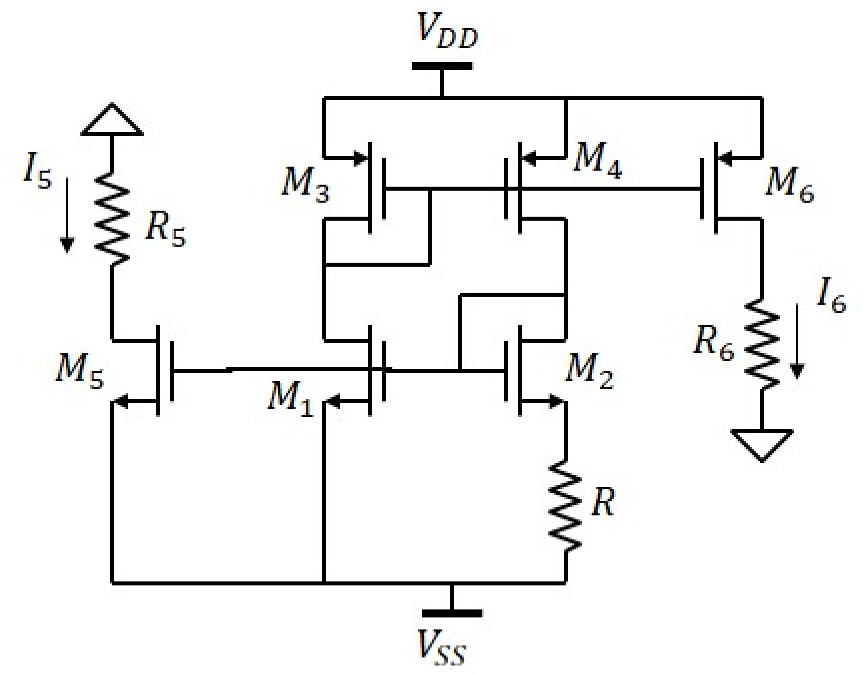
$k_{p3} = 2mA \cdot V^{-2}$, $k_{p4} = 2mA \cdot V^{-2}$,

$V_{TP} = -1V$

$k_{n5} = 4mA \cdot V^{-2}$, $k_{p6} = 3mA \cdot V^{-2}$

$R_5 = 200\Omega$, $R_6 = 600\Omega$

$V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $R = 500\Omega$



Calcolare I_5 e I_6 e il punto di polarizzazione di tutti i MOS

$$I_{DS1} = I_{DS3} = I_{DS4} = I_{DS2} = I_R \qquad V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_R}{k_{n1}}} \qquad V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_R}{k_{n2}}}$$

$$I_R = \frac{V_{GS1} - V_{GS2}}{R} = \frac{V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_R}{k_{n1}}} - \left(V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_R}{k_{n2}}}\right)}{R} = \frac{\sqrt{\frac{2I_R}{k_{n1}}} - \sqrt{\frac{2I_R}{k_{n2}}}}{R}$$

$$\sqrt{I_R} = \frac{\sqrt{\frac{2}{k_{n1}}} - \sqrt{\frac{2}{k_{n2}}}}{R} \qquad I_R = \left(\frac{\sqrt{\frac{2}{k_{n1}}} - \sqrt{\frac{2}{k_{n2}}}}{R}\right)^2 = 1 \cdot mA \qquad V_R = R \cdot I_R = 0.5\,V$$

$$\boxed{V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_R}{k_{p3}}} = -2\,V} \qquad \boxed{V_{DS3} = V_{GS3} = -2\,V}$$ Saturazione

$$\boxed{V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_R}{k_{n1}}} = 2\,V} \qquad \boxed{V_{DS1} = V_{DD} - V_{SS} + V_{GS3} = 8\,V}$$ Saturazione

$$\boxed{V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_R}{k_{n2}}} = 1.5\,V} \qquad \boxed{V_{DS2} = V_{GS2} = 1.5\,V}$$ Saturazione

$$\boxed{V_{GS4} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_R}{k_{p4}}} = -2\,V} \qquad \boxed{V_{DS4} = -\left(V_{DD} - V_{SS} - V_{DS2} - V_R\right) = -8\,V}$$ Saturazione

$$\boxed{V_{GS5} = V_{GS1} = 2\,V} \quad \boxed{I_5 = \frac{k_{n5}}{2}\left(V_{GS5} - V_{TN}\right)^2 = 2 \cdot mA} \quad V_{R5} = R_5 \cdot I_5 = 0.4\,V \quad \boxed{V_{DS5} = 0 - V_{SS} - V_{R5} = 4.6\,V}$$ Saturazione

$$\boxed{V_{GS6} = V_{GS4} = -2\,V} \quad \boxed{I_6 = \frac{k_{p6}}{2}\left(V_{GS6} - V_{TP}\right)^2 = 1.5 \cdot mA} \quad V_{R6} = R_6 \cdot I_6 = 0.9\,V \quad \boxed{V_{DS6} = -\left(V_{DD} - V_{R6}\right) = -4.1\,V}$$ Saturazione

Andrea Cester

Esercizio 34

DATI: $k_{n1} = 0.8\text{mA}\cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 5\text{mA}\cdot V^{-2}$

$V_{TN} = 1V$,

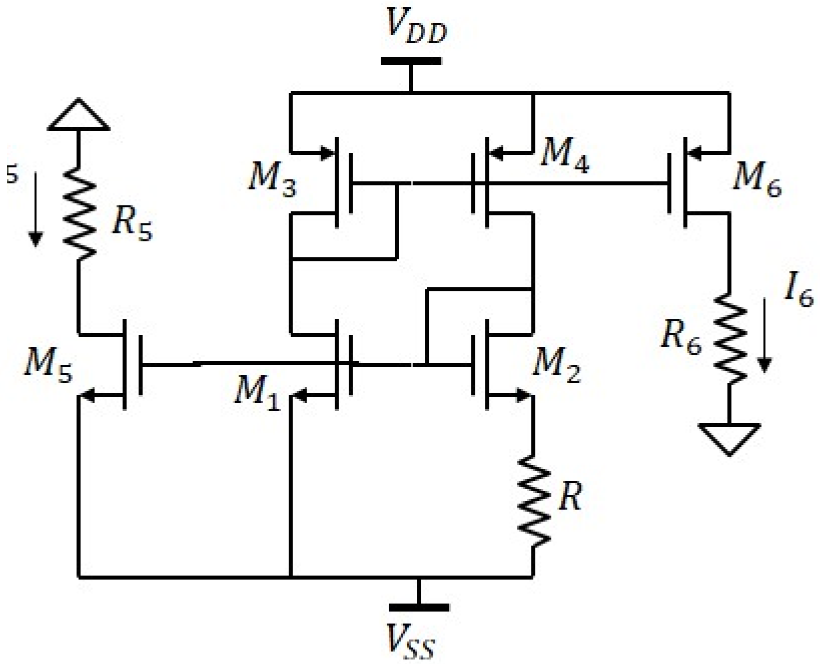
$k_{p3} = 3.2\text{mA}\cdot V^{-2}$, $k_{p4} = 3.2\text{mA}\cdot V^{-2}$,

$V_{TP} = -1V$

$k_{n5} = 0.9\text{mA}\cdot V^{-2}$, $k_{p6} = 1.6\text{mA}\cdot V^{-2}$

$R_5 = 4k\Omega$, $R_6 = 10k\Omega$

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



1. Calcolare il valore della resistenza R per ottenere $I_5 = 0.45\text{mA}$

$V_{GS5} = V_{TN} + \sqrt{\dfrac{2\cdot I_5}{k_{n5}}} = 2\,V$ $\quad V_{DS5} = 0 - V_{SS} - R_5\cdot I_5 = 3.2\,V$ M5 Saturazione

$V_{GS1} = V_{GS5} = 2\,V$ $\quad I_{DS1} = \dfrac{k_{n1}}{2}\cdot\left(V_{GS1} - V_{TN}\right)^2 = 0.4\cdot\text{mA}$

$I_{DS3} = I_{DS1} = 0.4\cdot\text{mA}$ $\quad V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\dfrac{2I_{DS3}}{k_{p3}}} = -1.5\,V$ $\quad V_{DS3} = V_{GS3}$ M3 Saturazione

$V_{DS1} = V_{DD} - V_{SS} - \left(-V_{DS3}\right) = 8.5\,V$ M1 Saturazione

$V_{GS4} = V_{GS3} = -1.5\,V$ $\quad I_{DS4} = \dfrac{k_{p4}}{2}\cdot\left(V_{GS4} - V_{TP}\right)^2 = 0.4\cdot\text{mA}$

$I_{DS2} = I_{DS4} = 0.4\cdot\text{mA}$ $\quad V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\dfrac{2I_{DS2}}{k_{n2}}} = 1.4\,V$ $\quad V_{DS2} = V_{GS2}$ M2 Saturazione

$V_{DS4} = V_{SS} + V_{GS1} - V_{DD} = -8\,V$ M4 Saturazione

Caduta di tensione su R: $V_R = V_{GS1} - V_{GS2} = 0.6\,V$

Corrente attracerso R: $I_R = I_{DS2} = 0.4\cdot\text{mA}$

$$\boxed{R = \frac{V_R}{I_R} = 1.5\cdot k\Omega}$$

2. Calcolare la corrente I_6

$V_{GS6} = V_{GS4} = -1.5\,V$ $\quad \boxed{I_6 = \dfrac{k_{p6}}{2}\cdot\left(V_{GS6} - V_{TP}\right)^2 = 0.2\cdot\text{mA}}$ $\quad V_{DS6} = R_6\cdot I_6 - V_{DD} = -3\,V$ M6 Saturazione

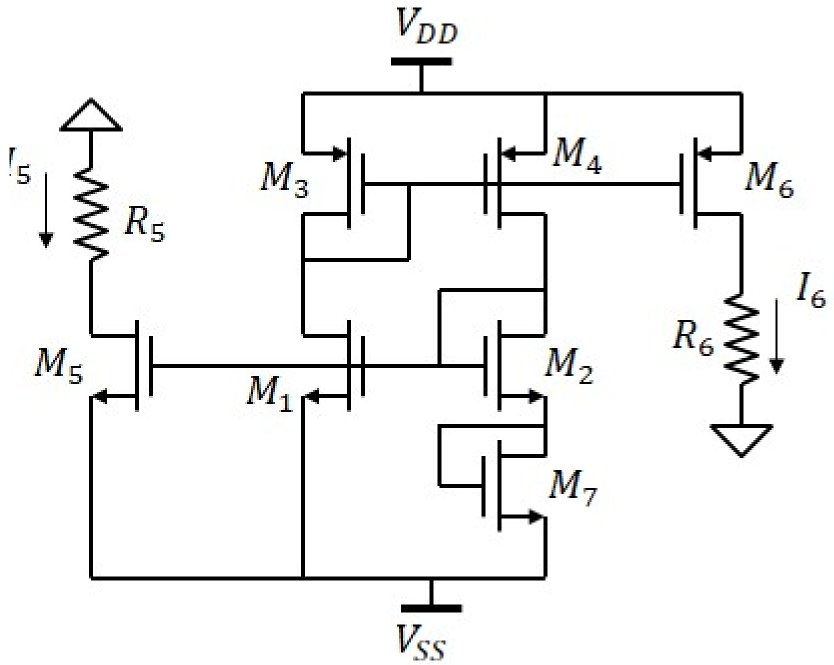
Esercizio 35

DATI: $k_{n1} = 0.8 mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 7.2 mA \cdot V^{-2}$,

$k_{n7} = 7.2 mA \cdot V^{-2}$, $V_{TN} = 0.5V$

$k_{p3} = 0.8 mA \cdot V^{-2}$, $k_{p4} = 0.8 mA \cdot V^{-2}$,
$V_{TP} = -0.5V$

$k_{n5} = 4 mA \cdot V^{-2}$, $k_{p6} = 0.8 mA \cdot V^{-2}$
$R_5 = 400\Omega$, $R_6 = 2k\Omega$
$V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$



Calcolare I_5 e I_6 e il punto di polarizzazione di tutti i MOS

$I_{DS1} = I_{DS3} = I_{DS4} = I_{DS2} = I$ $\qquad V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I}{k_{n1}}}$ $\qquad V_{GS2} = V_{GS7} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I}{k_{n2}}}$

$$V_{GS1} = 2 \cdot V_{GS2}$$

$$V_{TN} + \sqrt{\frac{2I}{k_{n1}}} = 2 \cdot V_{TN} + 2\sqrt{\frac{2I}{k_{n2}}}$$

$$\sqrt{\frac{2I}{k_{n1}}} - 2\sqrt{\frac{2I}{k_{n2}}} = V_{TN} \qquad I = \left(\frac{V_{TN}}{\sqrt{\frac{2}{k_{n1}}} - 2\sqrt{\frac{2}{k_{n2}}}} \right)^2 = 0.9 \cdot mA$$

$\boxed{V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I}{k_{n1}}} = 2\ V}$

$V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I}{k_{n2}}}$ $\qquad V_{GS7} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I}{k_{n7}}}$ $\qquad \boxed{V_{DS2} = V_{GS2} = 1\ V}$ $\qquad \boxed{V_{DS7} = V_{GS7} = 1\ V}$

$V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2I}{k_{p3}}}$ $\qquad \boxed{V_{DS3} = V_{GS3} = -2\ V}$ $\qquad \boxed{V_{DS1} = V_{DD} + V_{GS3} - V_{SS} = 8\ V}$

$\boxed{V_{GS4} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2I}{k_{p4}}} = -2\ V}$ $\qquad \boxed{V_{DS4} = V_{SS} + V_{DS2} + V_{DS7} - V_{DD} = -8\ V}$

$\boxed{V_{GS5} = V_{GS1} = 2\ V}$ $\qquad \boxed{I_5 = \frac{k_{n5}}{2} \cdot (V_{GS1} - V_{TN})^2 = 4.5 \cdot mA}$ $\qquad \boxed{V_{DS5} = -R_5 \cdot I_5 - V_{SS} = 3.2\ V}$

$\boxed{V_{GS6} = V_{GS4} = -2\ V}$ $\qquad \boxed{I_6 = \frac{k_{p6}}{2} \cdot (V_{GS6} - V_{TP})^2 = 0.9 \cdot mA}$ $\qquad \boxed{V_{DS6} = R_6 \cdot I_6 - V_{DD} = -3.2\ V}$

Esercizio 36

DATI: $k_{n1} = 1mA \cdot V^{-2}$, $k_{n2} = 1mA \cdot V^{-2}$

$V_{TN} = 0.5V$,

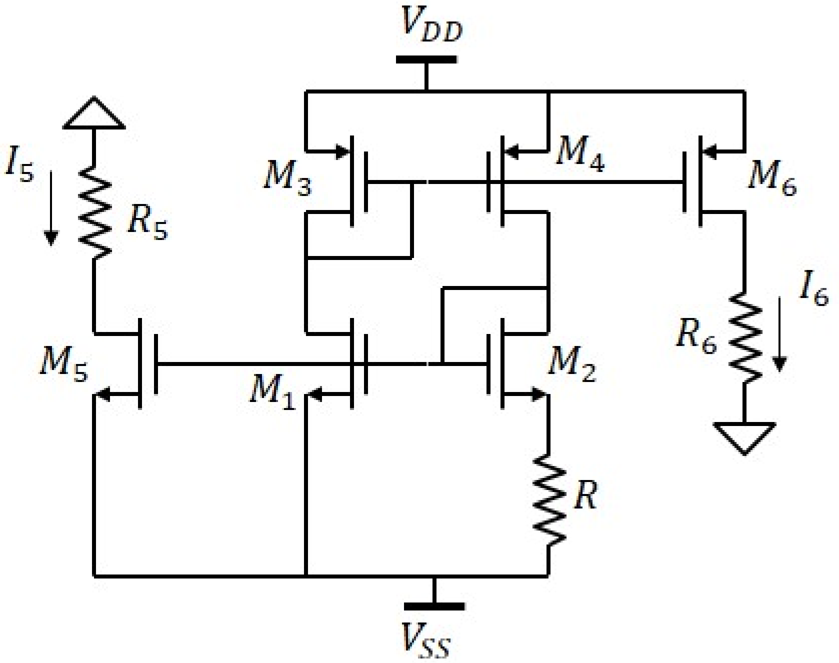
$k_{p3} = 4mA \cdot V^{-2}$, $k_{p4} = 1mA \cdot V^{-2}$,

$V_{TP} = -0.5V$

$k_{n5} = 5mA \cdot V^{-2}$, $k_{p6} = 6mA \cdot V^{-2}$

$R_5 = 1k\Omega$, $R_6 = 2k\Omega$

$V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $R = 4k\Omega$



Calcolare I_5 e I_6 e il punto di polarizzazione di tutti i MOS

Chiamiamo I_R la corrente attravreso la resistenza R $\qquad I_{DS2} = I_{DS4} = I_R \qquad I_{DS3} = I_{DS1} = \frac{k_{p3}}{k_{p4}} \cdot I_R$

$$I_R = \frac{V_{GS1} - V_{GS2}}{R} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} - \left(V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n2}}} \right)$$

$$I_R = \frac{1}{R} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \frac{k_{p3}}{k_{p4}} \cdot I_R}{k_{n1}}} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_R}{k_{n2}}} \right) \qquad I_R = \left[\frac{1}{R} \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot \frac{k_{p3}}{k_{p4}}}{k_{n1}}} - \sqrt{\frac{2}{k_{n2}}} \right) \right]^2 = 125 \cdot \mu A$$

$I_{DS1} = \frac{k_{p3}}{k_{p4}} \cdot I_R = 500 \cdot \mu A \qquad \boxed{V_{GS1} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS1}}{k_{n1}}} = 1.5\,V}$

$I_{DS2} = I_R = 125 \cdot \mu A \qquad \boxed{V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS2}}{k_{n2}}} = 1\,V} \qquad \boxed{V_{DS2} = V_{GS2} = 1\,V}$

$\boxed{V_{DS1} = V_{DD} + V_{GS3} - V_{SS} = 8\,V}$

$I_{DS3} = I_{DS1} = 0.5 \cdot mA \qquad \boxed{V_{GS3} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS3}}{k_{p3}}} = -1\,V} \qquad \boxed{V_{DS3} = V_{GS3} = -1\,V}$

$I_{DS4} = I_{DS2} = 0.125 \cdot mA \qquad \boxed{V_{GS4} = V_{TP} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{DS4}}{k_{p4}}} = -1\,V} \qquad \boxed{V_{DS4} = V_{SS} + V_{GS1} - V_{DD} = -8.5\,V}$

$\boxed{V_{GS5} = V_{GS1} = 1.5\,V} \qquad \boxed{I_5 = \frac{k_{n5}}{2} \cdot (V_{GS5} - V_{TN})^2 = 2.5 \cdot mA} \qquad \boxed{V_{DS5} = -V_{SS} - R_5 \cdot I_5 = 2.5\,V}$

$\boxed{V_{GS6} = V_{GS4} = -1\,V} \qquad \boxed{I_6 = \frac{k_{p6}}{2} \cdot (V_{GS6} - V_{TP})^2 = 0.75 \cdot mA} \qquad \boxed{V_{DS6} = R_6 \cdot I_6 - V_{DD} = -3.5\,V}$