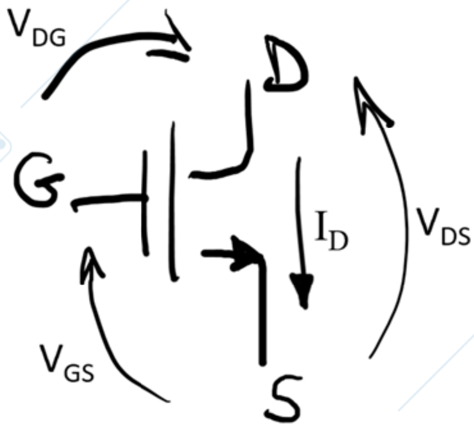
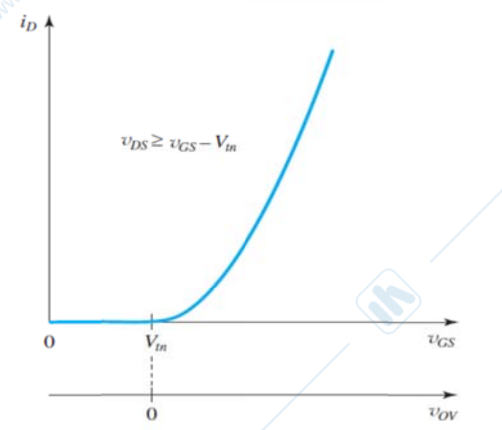
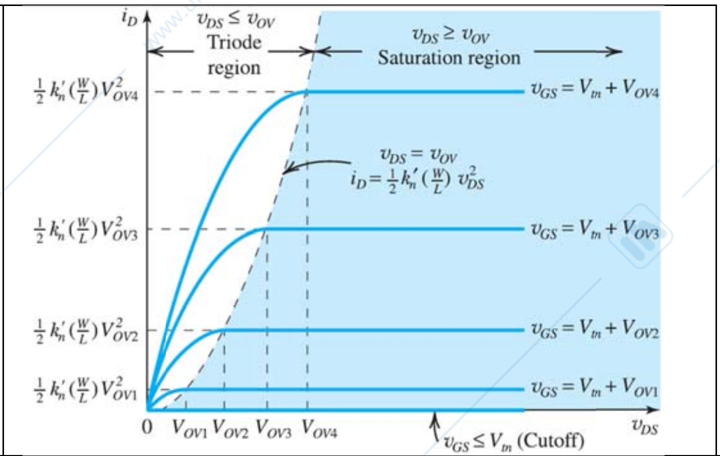
NMOS





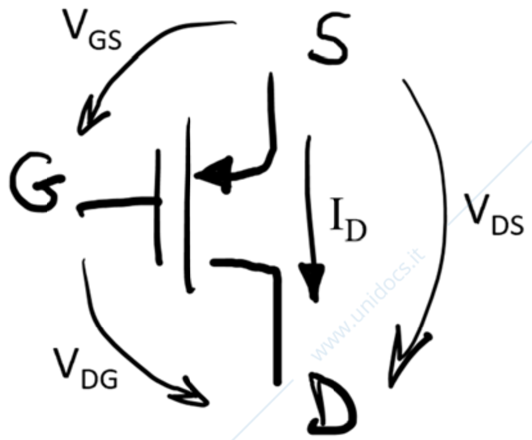


Zona di funzionamento	*Condizioni*	*Corrente di drain*
INTERDIZIONE	$V_{GS} < V_{tn}$	$I_D = 0$
TRIODO	$V_{GS} > V_{tn}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{tn}$	$I_D = \mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}[(V_{GS} - V_{tn})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2]$ $= 2k_n[(V_{GS} - V_{tn})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2]$
(approx. ohmica)	$V_{GS} > V_{tn}$ $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{tn}$	$I_D \cong \mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}[(V_{GS} - V_{tn}) \cdot V_{DS}] = \frac{1}{R_{ds}}V_{DS},$ $R_{ds} = \dfrac{1}{\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn})} = \dfrac{1}{2k_n(V_{GS} - V_{tn})}$
SATURAZIONE	$V_{GS} > V_{tn}$ $V_{DS} > V_{GS} - V_{tn}$	$I_D = \frac{1}{2}\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn})^2 = k_n(V_{GS} - V_{tn})^2$

Con $k_n = \frac{1}{2}\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}$

NB: Nel testo “Circuiti per la microelettronica”, *A. Sedra, K. Smith,* da cui sono presi i due grafici, si usa la notazione $k_n = \mu_n C'_{ox} \frac{W}{L}$, mentre noi useremo sempre la notazione $k_n = \frac{1}{2}\mu_n C'_{ox} \frac{W}{L}$ per rendere piu’ compatta l’espressione della corrente in saturazione. Prestate attenzione alla notazione preferita dagli autori nella consultazione di testi in riferimento.

PMOS



Zona di funzionamento	*Condizioni*	*Corrente di drain*
INTERDIZIONE	$V_{GS} > V_{tp}$	$I_D = 0$
TRIODO	$V_{GS} < V_{tp}$ $V_{DS} > V_{GS} - V_{tp}$	$I_D = \mu_p C'_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{tp}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2]$ $= 2k_p [(V_{GS} - V_{tp}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2]$
(approx. ohmica)	$V_{GS} < V_{tp}$ $V_{DS} >> V_{GS} - V_{tp}$	$I_D \cong \mu_p C'_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{tp}) \cdot V_{DS}] = \frac{1}{Rds} V_{DS}$, $R_{ds} = \frac{1}{\mu_p C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tp})} = \frac{1}{2k_p (V_{GS} - V_{tp})}$
SATURAZIONE	$V_{GS} < V_{tp}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{tp}$	$I_D = \frac{1}{2} \mu_p C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tp})^2 = k_p (V_{GS} - V_{tn})^2$

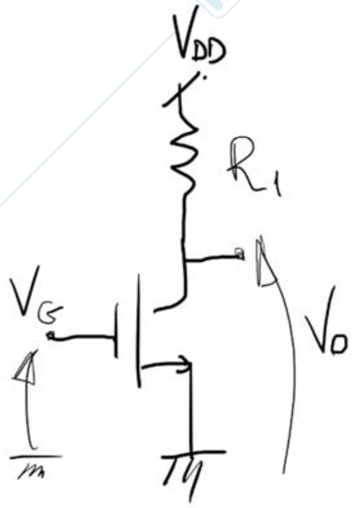
Con $k_p = \frac{1}{2}\mu_p C'_{ox} \frac{W}{L}$

Fondamenti di Elettronica per Ingegneria dell'Automazione

Esercitazione 3

Ing. Pietro King

1)



Vdd = 12 V

R1= 10 kΩ

Vt= 2 V

$$k_n = \frac{1}{2}\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L} = 1\frac{mA}{V^2}$$

a) Determinare Vout nel caso di Vg= 1V, 2.5V, 4V.

Vg = 1 V

$$V_{GS} < V_t$$

La tensione gate-source è inferiore alla tensione di soglia Vt. Quindi il nel caso in cui Vg=1V il MOS si trova in INTERDIZIONE

Quindi ho

$$I_D = 0\ A$$

$$V_{out} = V_{DD} = 12\ V$$

Vg = 2.5 V

$$V_{GS} = 2.5\ V > 2\ V = V_t$$

La tensione gate-source è superiore alla soglia Vt. Supponiamo che il MOS si trovi in saturazione:

$$Hp\colon\ V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = \frac{1}{2}\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS} - V_t)^2 = k\,V_{ov}^2 = 1\frac{mA}{V^2}\,0.5^2\,V^2 = \ 0.25\ mA$$

$$V_{R1} = I_D R1 = 0.25\ mA *\ 10\ k\Omega = 2.5\ V$$

$$V_{out} = V_{DS} = V_{DD} - V_{R1} = 12\,V - 2.5\,V = 9.5\,V$$

$$V_{DS} = 9.5\,V > 0.5\,V = V_{GS} - V_t$$

L'ipotesi che il MOS fosse in SATURAZIONE è verificata. Quindi i calcoli svolti finora sono corretti, Vout = 9.5V

Vg = 4 V

$$V_{GS} = 4\,V > 2\,V = V_t$$

La tensione gate-source è superiore alla soglia Vt. Supponiamo che il MOS si trovi in saturazione:

$$Hp\!: \; V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = \frac{1}{2}\,\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS} - V_t)^2 = k\,V_{ov}^2 = 1\frac{mA}{V^2}\,2^2\,V^2 = 4\,mA$$

$$V_{R1} = I_D R1 = 4\,mA\;10\,k\Omega = 40\,V$$

$$V_{out} = V_{DS} = V_{DD} - V_{R1} = 12\,V - 40\,V = -28\,V$$

$$V_{DS} = -28\,V < 2\,V = V_{GS} - V_t$$

L'ipotesi che il MOS fosse in saturazione NON è verificata.

Quindi il MOS è in ZONA TRIODO

$$V_{DS} < V_{GS} - V_t$$

$$I_D = \mu C'_{ox}\frac{W}{L}[(V_{GS} - V_t)V_{DS} - \;({V_{DS}}^2/2\,)] = k[2(V_{GS} - Vt)V_{DS} - {V_{DS}}^2]$$

$$= k\;[4\,V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Inoltre, la corrente Id è la stessa che scorre su R1

$$I_D = (V_{DD} - V_{DS})/R1 = (12\,V - V_{DS})/\;10\,k\Omega$$

Eguagliando le due equazioni

$$k\;[4\,V_{DS} - V_{DS}^2] = \frac{12\,V - V_{DS}}{10\,k\Omega}$$

$$V_{DS}^2 - 4.1\,V_{DS} + 1.2 = 0$$

$$V'_{DS} = 0.32\,V \quad ; \quad V''_{DS} = 3.8\,V$$

Ricordando che il MOS è in zona triodo, l'ipotesi iniziale era $V_{DS} < V_{GS} - V_t$, quindi la soluzione corretta è

$$V_{DS} = V_{out} = 0.32\,V$$

b) Determinare l'errore che si ottiene utilizzando l'approssimazione ohmica nel caso Vgs=4V

Nel caso Vgs= 4V, il MOS si trova in zona triodo e abbiamo ottenuto

$$V_{DS} = 0.32\ V \ll V_{GS} - V_t = 2V.$$

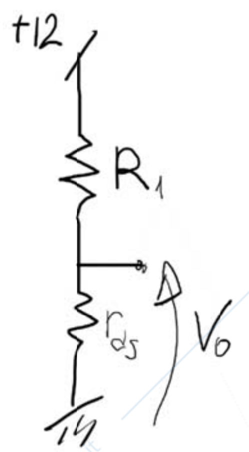
Quando V_{DS} e' molto minore della tensione di overdrive $V_{ov} = V_{GS} - V_t$, e' possibile utilizzare l'approssimazione ohmica del MOS.

Ovvero si puo' approssimare il MOS come una resistenza $R_{ds,on} = \frac{1}{\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS}-V_{tn})} = \frac{1}{2k_n(V_{GS}-V_{tn})}$

e la corrente di diodo e' rappresentata da $I_d = \frac{V_{DS}}{R_{DS,on}}$

Nel caso sotto esame

$$R_{ds} = \frac{1}{\mu_n C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS}-V_{tn})} = \frac{1}{2k_n(V_{GS}-V_{tn})} = \frac{1}{2 * 1\frac{mA}{V^2} * 2\ V} = 250\ \Omega$$



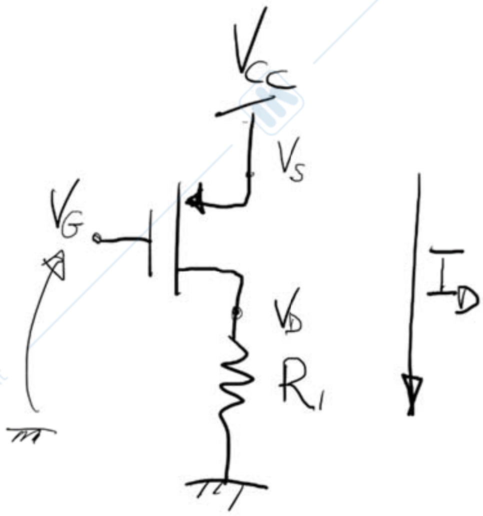
Quindi

$$Vout = +12\ V\frac{R_{ds}}{R_{ds}+R1} = 12\ V\frac{250\Omega}{250\Omega + 10k\Omega} = 0.293\ V$$

Usando l'approssimazione ohmica otteniamo 0.293 V rispetto a 0.32 V.

Quindi in questo caso otteniamo un errore di circa 9% tra l'approssimazione ohmica e l'equazione estesa della zona triodo.

2)



Vcc = 3.3 V

R1= 1 kΩ

Vt= - 1 V

$$k = \frac{1}{2}\mu C'_{ox}\frac{W}{L} = 2\frac{mA}{V^2}$$

a) Determinare Vout nel caso di Vg= 3.3 V, 0V.

Vg = 3.3 V

Nel circuito sotto esame abbiamo un PMOS.

$$V_{GS} = 3.3\,V - 3.3\,V = 0\,V$$

$$V_{GS} = 0\,V > V_t = -1\,V$$

Il MOS è in INTERDIZIONE

Vout= 0 V

Vg = 0 V

$$V_{GS} = 0\,V - 3.3\,V = -3.3\,V$$

$$V_{GS} = -3.3\,V < V_t = -1\,V$$

Supponiamo Saturazione

$$Hp:\ V_{DS} < V_{GS} - V_t$$

$$I_D = \frac{1}{2}\mu C'_{ox}\frac{W}{L}(V_{GS} - V_t)^2 = k\,V_{ov}^2 = 2\frac{mA}{V^2}(-3.3 - (-1))^2\,V^2 = 10.6\,mA$$

$$V_{R1} = I_D R1 = 10.6\,mA\ 1\,k\Omega = 10.6\,V$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 10.6\,V - 3.3\,V = 7.3\,V$$

L'ipotesi di saturazione non è verificata.

Quindi il MOS è in zona triodo

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_D = \mu C'_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_t)V_{DS} - ({V_{DS}}^2/2)] = k[2(V_{GS} - Vt)V_{DS} - {V_{DS}}^2]$$

$$= k\,[-4.6\,V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Inoltre la corrente Id è la stessa che scorre su R1:

$$I_D = (V_{OUT})/R1 = (\,V_{DS} + 3.3\,V)/\,1\,k\Omega$$

Eguagliando le due equazioni

$$k\,[-4.6\,V_{DS} - V_{DS}^2] = \frac{V_{DS} + 3.3V}{1\,k\Omega}$$

$$V_{DS}^2 + 5.1\,V_{DS} + 1.65 = 0$$

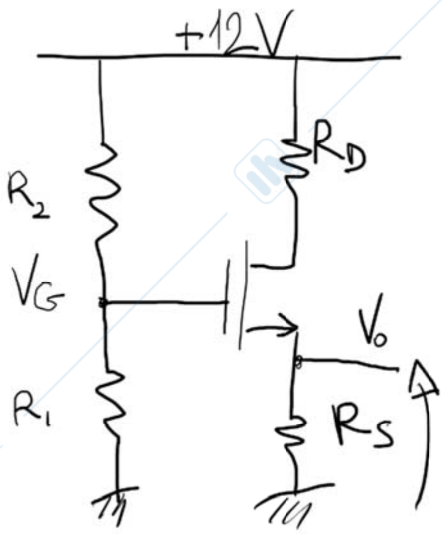
$$V'_{DS} = -4.75\,V \quad ; \quad V''_{DS} = -0.35\,V$$

Per essere triodo $V_{DS} > V_{GS} - V_t$, quindi

$$V_{DS} = -0.35\,V$$

$$V_{out} = V_{DS} + 3.3\,V = 2.95\,V$$

3)



R1= 10 kΩ

R2= 10 kΩ

RD= 1 kΩ

RS= 1 kΩ

Vt= + 1 V

$$\boldsymbol{k_n = 4\frac{mA}{V^2}}$$

a) Determinare Vout.

Prima di tutto bisogna determinare la tensione Vg.

Il gate di un MOS ha impedenza infinita, non scorre corrente verso il gate di M1. Quindi la tensione Vg si può calcolare come partitore di R1 ed R2

$$V_G = 12\frac{R1}{R1+R2} = 6\,V$$

Quindi

$$V_{GS} = V_G - V_{out} = 6\,V - R_s I_D$$

$$I_D = \frac{6V - V_{GS}}{R_s}$$

Supponiamo che il MOS sia in saturazione

$$Hp1:\ V_{GS} > V_t$$

$$Hp2:\ V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

1° Metodologia risolutiva

$I_D = k_n\, V_{ov}^2 = k_n(V_{GS} - V_t)^2$ eq. NMOS in Saturazione

$I_D = \frac{6V - V_{GS}}{R_s}$ Eq. ottenuta Kirchhoff alla maglia

$$\frac{6V - V_{GS}}{R_s} = k_n(V_{GS} - V_t)^2$$

$$6\,V - V_t - x = R_s k_n (x)^2; \qquad x = V_{GS} - V_t$$

$$4x^2 + x - 5 = 0$$

$$x' = +1V\,;\, x'' = -\frac{5}{4}V$$

$$(V_{GS} - V_t)' = +1V\,; \quad (V_{GS} - V_t)'' = -\frac{5}{4}V$$

La seconda soluzione si puo' scartare in quanto contravviene all'ipotesi 1 (Vgs – Vt >0)

Quindi Vgs -Vt =1V

$$\text{Vgs} = 2\text{V}$$

$$I_D = \frac{6V - V_{GS}}{R_s} = \frac{4V}{1k\Omega} = 4\,mA$$

$$V_S = R_S I_D = 4V$$

$$V_D = 12\,V - R_D I_D = 8\,V$$

$$V_{DS} = 4\,V > 1\,V = V_{GS} - V_t$$

In questo modo abbiamo confermato anche l'ipotesi 2. Quindi l'ipotesi di saturazione e' corretta.

$$V_{out} = V_S = R_S I_D = 4V$$

2° Metodologia risolutiva

Nel primo metodo abbiamo introdotto l'incognita x=$V_{GS} - V_t$. Questa e' particolarmente efficace in quanto permette immediatamente di verificare la prima ipotesi. Avreste potuto anche usare V_{GS} al posto di x=$V_{GS} - V_t$ con uguale efficacia nel selezionare la radice corretta.

La scelta di un'altra incognita porta allo stesso risultato matematico, ma operativamente puo' essere meno conveniente.

Ad esempio, la scelta di Id come incognita e' quella meno conveniente perche' - dopo aver trovato le due radici dell'equazione - bisogna fare un passaggio aggiuntivo per verificare quale delle due confermi l'ipotesi di MOS saturo, e in questo passaggio bisogna fare attenzione ai decimali significativi.

Di seguito la risoluzione per Id che porta, ovviamente, agli stessi risultati.

$$I_D = k_n\,V_{ov}^2 = k_n(V_{GS} - V_t)^2 = \ k_n(6\,V - R_s I_D - V_t)^2$$

$$\frac{I_D}{k_n} = (5 - 1000\,I_D)^2$$

$$I_D' = 4mA \quad ; \quad I_D'' = 6.25mA$$

Per $I_D'' = 6.25mA,\ V_{GS} = 6\,V - R_s I_D = -0.25\,V$. Questo è in contrasto con Hp1, quindi impossibile.

Per $I'_D = 4\,mA$, $V_{GS} = 6\,V - R_s I_D = 2\,V$. Questo non viola Hp1, bisogna testare Hp2.

$$V_S = R_S I_D = 4V$$

$$V_D = 12\,V - R_D I_D = 8\,V$$

$$V_{DS} = 4\,V > 1\,V = V_{GS} - V_t$$

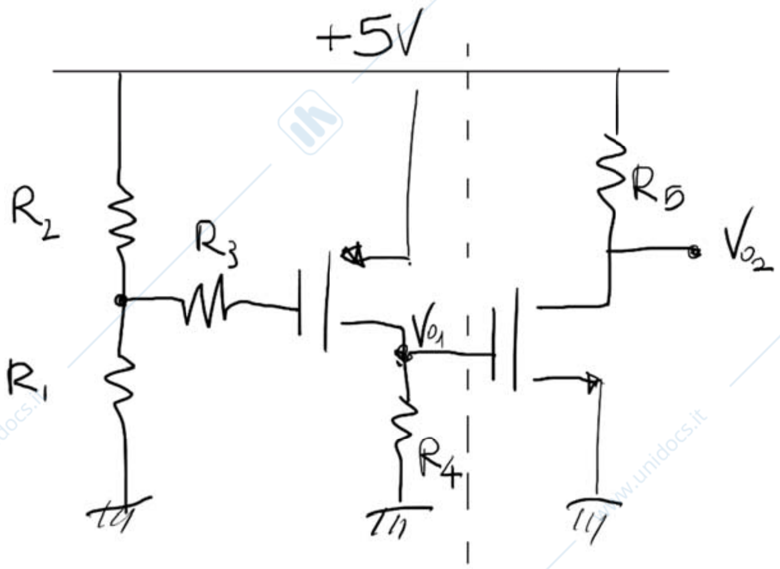
Quindi l'ipotesi 2 è confermata e il MOS è polarizzato in SATURAZIONE come ipotizzato precedentemente.

$$V_{out} = V_S = R_S I_D = 4V$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

4)



R1= 88 kΩ

R2= 22 kΩ

R3= 50 kΩ

R4= 1 kΩ

R5= 2 kΩ

Vt_p= - 0.5 V

Vt_n= + 0.7 V

$$\boldsymbol{k_p = 6\frac{mA}{V^2}}$$

$$\boldsymbol{k_n = 2.5\frac{mA}{V^2}}$$

a) Determinare Vout1. b) determinare Vout2.

$$V_{G_p} = 5\,V\frac{R1}{R1+R2} = 4\,V$$

$$V_{GS_p} = V_G - V_S = 4 - (+5) = -1\,V$$

Essendo M1 un PMOS, Vgs risulta minore della tensione di soglia Vtp, quindi il MOS non si trova in interdizione.

Supponiamo Saturazione

$$Hp\!: \boldsymbol{V_{DSp}} < V_{GSp} - V_{tp}$$

$$I_{Dp} = \frac{1}{2}\,\mu C'_{ox}\frac{W}{L}\left(V_{GSp} - V_{tp}\right)^2 = kp\,V_{ov}^2 = 6\frac{mA}{V^2}\,\left(-1\ -(-0.5)\right)^2\,V^2\ =\ 1.5\ mA$$

$$V_{Sp} = 5\,V$$

$$V_{Dp} = R_4 I_{Dp} = 1.5\,V$$

$$V_{DSp} = 1.5\,V - 5V\ =\ -3.5\,V$$

L'ipotesi di saturazione è verificata, $V_{DSp} < V_{GSp} - V_{tp}$, quindi

$$V_{out1} = V_D = 1.5\,V$$

b)

$$V_{GSn} = 1.5\,V > V_{tn}$$

Il MOS M2 non è in interdizione.

Supponiamo SATURAZIONE

$$Hp\colon\ V_{DSn} > V_{GSn} - V_{tn}$$

$$I_{Dn} = k_n\,V_{ov}^2 = k_n(V_{GS} - V_t)^2 = k_n(1.5\,V - 0.7\,V)^2 = 1.6\,mA$$

$$V_{Dn} = 5\,V - R5\,I_{Dn} = 1.8\,V = Vout$$

$$V_{DSn} = 1.8\,V > 0.8\,V = V_{GSn} - V_{tn}\ \ OK$$

c) Per quale valori di resistenza R5 il MOS M2 sarebbe stato in zona triodo?

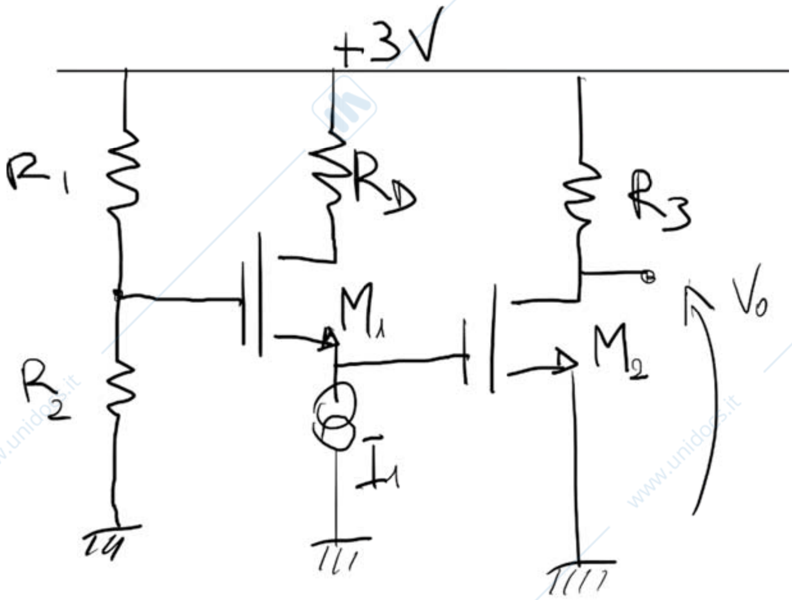
La condizione di zona triodo è che $V_{DSn} < 0.8\,V = V_{GSn} - V_{tn}$

$$V_{DSn} = 5V - R5\,I_{Dn}$$

$$5\,V - R5\,I_{Dn} < 0.8\,V$$

$$R5 > 2.6\,k\Omega$$

5)



R1= 10 kΩ

R2= 50 kΩ

RD= 700 Ω

R3= 1.1 kΩ

Vt= + 0.5 V

$\boldsymbol{I1 = 1\,mA}$

$\boldsymbol{\frac{1}{2}\mu C'_{ox} = 100\frac{uA}{V^2}}$

$\boldsymbol{\left(\frac{W}{L}\right)_2 = 100}$

a) Dimensionare $\left(\frac{W}{L}\right)_1$ *tale che Vg2= 1 V b) determinare Vout*

$$V_{G1} = 3\frac{R2}{R1+R2} = 2.5\,V$$

Dalla consegna della domanda a) ricaviamo l'informazione che $V_{S1} = V_{G2} = 1V$

$$V_{GS1} = 1.5\,V > Vt$$

Il MOS non è in interdizione.

$$V_{RD} = I_1 R_D = 0.7\,V$$

$$V_{D1} = 3V - 0.7\,V = 2.3\,V$$

$$V_{DS1} = 2.3\,V - 1\,V = 1.3V$$

$$V_{DS1} > V_{GS1} - Vt = 1\,V$$

Il MOS è in SATURAZIONE.

$$I_D = I_1 = \frac{1}{2}\mu C'_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS1} - V_t)^2$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{I_1}{\frac{1}{2}u\,C'_{OX}}\frac{1}{(1.5\,V - 0.5\,V)^2} = 10$$

b)

$$V_{GS2} = 1V > Vt$$

$$V_{DS2} = 3 - I_{D2}R3$$

Supponiamo Saturazione

$$I_{DS2} = k\,V_{ov}^2 = 2.5mA$$

$$V_{DS2} = 3 - I_{D2}R3 = 0.25\,V$$

$$V_{DS2} < V_{gs2} - Vt$$

L'ipotesi di saturazione non è verificata.

M2 si trova in zona triodo.

$$I_{D2} = \mu C'_{ox}\frac{W}{L}[(V_{GS} - V_t)V_{DS} - \ ({V_{DS}}^2/2\,)] = k[2(V_{GS} - Vt)V_{DS} - {V_{DS}}^2]$$

$$I_{D2} = k\left[2\left(\frac{1}{2}\,V_{DS2}\right) - \ V_{DS2}^2\right] \qquad (1)$$

$$V_{DS2} = 3 - I_{D2}R3 \qquad (2)$$

Eguagliando le due equazioni e risolvendo l'equazione di secondo grado per Vds abbiamo che

$$V_{DS_2} = 0.393\,V = Vout$$