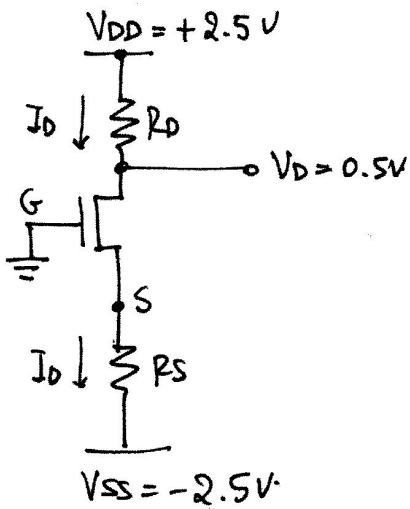


Παραδείγματα ανάλυσης κυκλωμάτων με τρανζίστορ

Παράδειγμα 1.

Για το παρακάτω κύκλωμα θα ζητείται να βρείτε τη τιμή των αντιστάσεων R_S ή R_D ώστε το κύκλωμα όταν λειτουργεί να παρέχει $I_D = 0,4 \text{mA}$ και $V_D = +0,5 \text{V}$.
 Για το NMOS τρανζίστορ μας δίνεται ότι $\mu_n C_{ox} = 100 \text{mA/V}^2$, $W = 32 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$ και $V_T = 0,7 \text{V}$.



Το ρεύμα I_D διαρρέει την αντίσταση R_D , των R_S και το τρανζίστορ. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης R_D είναι

$$V_{DD} - V_D = I_D \cdot R_D \Rightarrow R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{2,5\text{V} - 0,5\text{V}}{0,4\text{mA}}$$

$\Rightarrow R_D = 5 \text{k}\Omega$

Για να βρούμε την απαιτούμενη αντίσταση R_S πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε την τάση V_S που καταρρένει να έχει το τρανζίστορ στο ρεύμα I_D . Εφόσον το τρανζίστορ αζει σημαίνει ότι $V_{GS} \geq V_T$. Εφόσον $V_G = 0 \text{V}$ τότε βίγουμε η V_S είναι αρνητική.

Επίσης θα πρέπει να αποφασίσουμε αν το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού ή στην γραμμική περιοχή. Θα δουλέυε δυνατά αν $V_{DS} \geq V_{DSAT}$ όπου $V_{DSAT} = V_{GS} - V_T \Rightarrow V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \Rightarrow V_{DS} - V_{GS} \geq -V_T \Rightarrow V_D - V_S - V_G + V_S \geq -V_T \Rightarrow \underline{\underline{V_D - V_G \geq -V_T}}$

Εφόσον $V_D = 0,5 \text{V}$ ή $V_G = 0 \text{V}$ τότε $V_D - V_G > 0$ επομένως βίγουμε α μεγαλύτερο του $-V_T$. Άρα $V_{DS} \geq V_{DSAT}$ και το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού. Τότε το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ είναι $I_D = I_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$

Γνωρίζουμε ότι $I_D = 0.4 \text{ mA}$ επομένως το $V_{GS} - V_T$ που προκαλείται το ρεύμα αυτό είναι $V_{GS} - V_T = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} \Rightarrow V_{GS} - V_T = 0.5 \text{ V}$

Από εδώ προκύπτει ότι $V_{GS} = 0.5 \text{ V} + V_T = 1.2 \text{ V} \Rightarrow V_G - V_S = 1.2 \text{ V} \mid \Rightarrow V_S = -1.2 \text{ V}$
 $V_G = 0 \text{ V}$

Για τον έλεγχο έχουμε $V_{DS} = V_D - V_S = 0.5 \text{ V} - (-1.2 \text{ V}) = 1.7 \text{ V} > V_{DSAT} = 0.5 \text{ V}$.

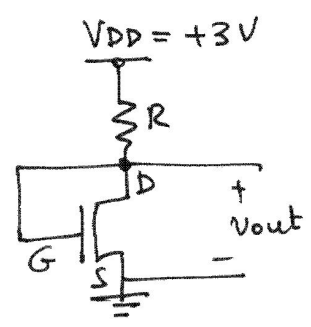
Αρα βεβαιώ το τρανζίστορ στο saturation. Έτσι η τιμή της R_S που προκύπτει αυτή των πρώτων τριών πρέπει να είναι $V_S - V_{SS} = I_D \cdot R_S \Rightarrow$

$$\rightarrow R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = \frac{-1.2 \text{ V} - (-2.5 \text{ V})}{0.4 \text{ mA}} = \underline{\underline{3.25 \text{ k}\Omega}}$$

Παράδειγμα 2

Για το παρακάτω κύκλωμα βρείτε την τιμή της αντίστασης R ώστε να διαρροήσεται από ένα ρεύμα $I_D = 80 \mu\text{A}$. Ποια είναι η τάση εξόδου στην περίπτωση.

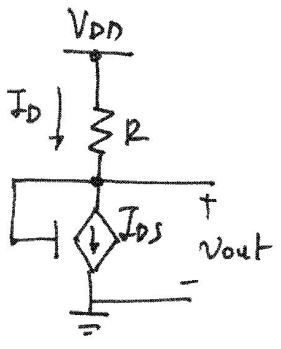
Για το τρανζίστορ δίνονται $W = 4 \mu\text{m}$, $L = 0.8 \mu\text{m}$, $V_T = 0.6 \text{ V}$ και $\mu_n C_{ox} = 200 \mu\text{A}/\text{V}^2$.



Υποθέτουμε πως το τρανζίστορ είναι στην $V_{GS} \gg V_T$.
 Ας δούμε αρχικά σε ποια περιοχή λειτουργεί το τρανζίστορ. Λόγω συνδεσμολογίας ο ακροδέκτης Drain (D) του τρανζίστορ είναι συνδεδεμένος με το Gate (G).
 Έτσι πάντα $V_D = V_G$. Για να λειτουργεί το τρανζίστορ στην περιοχή του κορεσμού πρέπει $V_{DS} \geq V_{DSAT} \mid \Rightarrow V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

Εφόσον $V_{DS} = V_G$ τότε $V_{DSAT} = V_{GS} - V_T$
 Εφόσον $V_{DS} = V_G$ τότε πάντα $V_{DS} = V_{GS}$ άρα πάντα $V_{DS} \geq V_{DSAT}$

Γεδομένα κυκλώματος στην περιοχή του κορεσμού



$$\text{Τότε } I_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

Εφόσον δεφύεται $I_D = I_{DS} = 80 \mu\text{A}$ πρέπει

$$V_{GS} - V_T = \sqrt{\frac{2I_{DS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = 0.4 \text{ V} \text{ ή}$$

Δηλαδή το τρανζίστορ να είναι παρωμένο σε $V_{GS} = 0.4V + V_T = 1V$

η οποία λόγω απελευθέρωσης βολτ του Drain η του Gate είναι η η

$V_{out} = V_{DS} = 1V$. Έτσι η τιμή του αντιστάτη R που χρειαζόμαστε

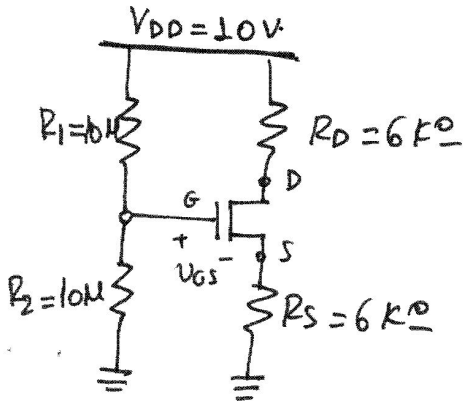
$$I_D = 80\mu A \text{ και } V_{out} = 1V \text{ είναι } V_{DD} - V_{out} = I_D R \Rightarrow R = \frac{V_{DD} - V_{out}}{I_D}$$

$$= \frac{3V - 1V}{80\mu A} = \underline{\underline{25k\Omega}}$$

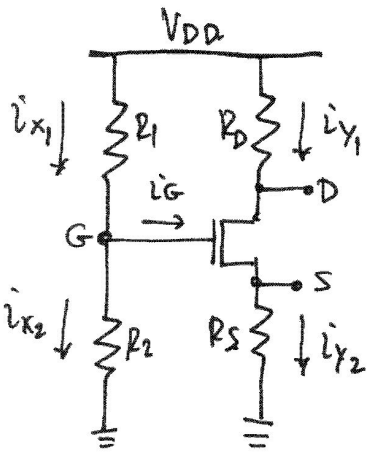
Επομένως η αρχική υπόθεση ότι το τρανζίστορ έχει ήταν σωστή $V_{GS} \geq V_T$

Παράδειγμα 3

Αναλύστε το παρακάτω κύκλωμα βρίσκοντας τα ρεύματα σε όλους τους κλάδους και τη τάση σε όλους τους κόμβους. Δίνεται ότι $V_T = 1V$ και $K \cdot (W/L) = 1mA/V^2$.



Αρχικά θα αναθέσουμε ρεύματα στους κλάδους. Θυμόμαστε ότι ο ακροδέκτης Gate του τρανζίστορ είναι "αποφορτισμένος" από το source και το drain. Έτσι δεν υπάρχει καίριο ρεύμα που ξεκινά από το gate και κινά προς το drain ή το source. Έτσι $I_G = 0$.



Έτσι από τον KCL στον κόμβο G: $I_{X1} = I_{X2}$

Επίσης εφόσον η R_D, R_S και το Drain η Source του τρανζίστορ βρίσκονται στον ίδιο κλάδο διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα $I_{Y1} = I_{Y2} = I_{DS}$.

Η τάση V_G υπολογίζεται από το διαίτημα τάσης που σχηματίζουν η R_1 και R_2 . Έτσι $V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD}$ $\Rightarrow V_G = \frac{V_{DD}}{2} = 5V$. $R_1 = R_2$

Αρχικά θα διαπιστώσουμε αν το τρανζίστορ αχτεί. Ας υποθέσουμε πως όχι. Τότε το τρανζίστορ θα συμπεριφέρεται σαν ανοικτό κύκλωμα & οι αντιστάσεις R_D και R_S δε θα διαρρέονται από ρεύμα. Άρα θα βρούμε ότι η διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_S θα είναι 0. Δηλαδή $V_S = 0V$. Τότε το V_{GS} που θα είχαμε θα ήταν $V_{GS} = V_G - V_S = 5V$ > $V_T = 1V$ άρα το τρανζίστορ αχτεί γιατί $V_{GS} > V_T$. Επομένως είναι αδύνατο να μην αχτεί το τρανζίστορ. Άρα που μένει να διαπιστώσουμε είναι σε ποια περιοχή λειτουργεί βρίσκεται (κορφοτός ή γραμμική περιοχή). Αν το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ είναι I_D τότε $V_S = I_D \cdot R_S$ Επομένως

$V_{GS} = V_G - V_S = 5 - 6I_D$. Επίσης η πώση τάσης στα άκρα της R_D είναι $V_{DD} - V_D = I_D \cdot R_D$ ή $V_{GS} = 10 - V_S$

$$\left. \begin{aligned} V_{DD} - V_D &= I_D \cdot R_D \\ V_S &= I_D \cdot R_S \Rightarrow I_D = \frac{V_S}{R_S} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} V_{DD} - V_D &= \frac{V_S}{R_S} \cdot R_D \\ R_S &= R_D = 6k\Omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{DD} - V_D = V_S \Rightarrow \underline{V_D = 10 - V_S}$$

Ας υποθέσουμε πως το τρανζίστορ είναι στη γραμμική περιοχή. Τότε $V_{DS} < V_{DSAT}$

δηλαδή $V_{DS} < V_{GS} - V_T$

$$\left. \begin{aligned} V_D &= 10 - V_S \Rightarrow V_{DS} = 10 - 2V_S \\ V_{GS} &= 5 - V_S \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} 10 - 2V_S &< 5 - V_S - V_T \\ V_T &= 1V \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$5 - V_S < -1 \Rightarrow V_S > 6V$$

Αντί 16V > 70V $V_{GS} = V_G - V_S$ $V_G = 5V$

$\rightarrow V_{GS} < 0$ άρα αδύνατον το τρανζίστορ να αχτεί. Άρα όμως αποδείχθηκε ότι δε μπορεί να βιβεί.

Άρα είμαστε και πάλι $V_{DS} > V_{DSAT}$ δηλαδή το τρανζίστορ είναι στην περιοχή του κορφοτού & $I_{DS} = \frac{1}{2} k \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GS} - V_T)^2$

$$V_{GS} = 5 - 6 I_D$$

$$\rightarrow I_D = \frac{1}{2} \mu_n (W/L) (V_{GS} - V_T)^2 \rightarrow I_D = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (5 - 6 I_D - 1)^2 \rightarrow$$

$$\Rightarrow 18 I_D^2 - 25 I_D + 8 = 0 \Rightarrow \left. \begin{array}{l} I_D = 0.89 \text{ mA} \\ I_D = 0.5 \text{ mA} \end{array} \right\}$$

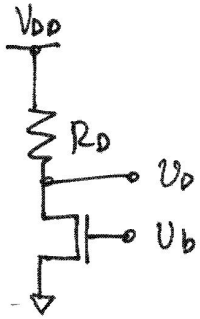
Αν ισχύει η πρώτη λύση τότε $V_S = I_D \cdot R_S = 5.34 \text{ V}$ που είναι αδύνατον γιατί η πηγή θα οδηγούσε σε $V_{GS} = V_G - V_S < 0$. Η σωστή τιμή του ρεύματος είναι $I_D = 0.5 \text{ mA}$. Έτσι $V_S = I_D \cdot R_S = 0.5 \text{ mA} \times 6 \text{ k}\Omega = 3 \text{ Volt}$

$$V_D = 10 - V_S = 7 \text{ Volt.}$$

$V_{GS} = 2 \text{ Volt}$, $V_{DS} = 4 \text{ Volt}$ (Επιβεβαίωση για τον κορφό $V_{DS} \gg V_{GS} - V_T$)

Παράδειγμα 4

Για το παρακάτω κύκλωμα βρείτε τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του R_D ώστε το τρανζίστορ να παραμείνει στον κορφό. Για το τρανζίστορ $\mu_n C_{ox} = 100 \mu\text{A/V}^2$, $V_T = 0.5 \text{ V}$, $V_{DD} = 1.8 \text{ V}$ και $\frac{W}{L} = 50$. Κατά τη διάρκεια του κορφού δίδουμε το ρεύμα που θα διαρρέει το τρανζίστορ να είναι $I_D = 0.5 \text{ mA}$. Μην σας απασχολήσει η επιλογή του V_b .



Εφόσον δίδουμε το τρανζίστορ να είναι στον κορφό τότε το ρεύμα που θα διαρρέει θα είναι ίσο με

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = 0.947 \text{ V}$$

$$\text{Εφόσον δίδουμε } I_{DS} = I_D = 0.5 \text{ mA} \left. \begin{array}{l} V_S = 0 \text{ V} \rightarrow V_G = 0.947 \text{ V} \end{array} \right\}$$

Επομένως για να είμαστε στον κορφό για αυτή την τιμή του V_{GS} πρέπει

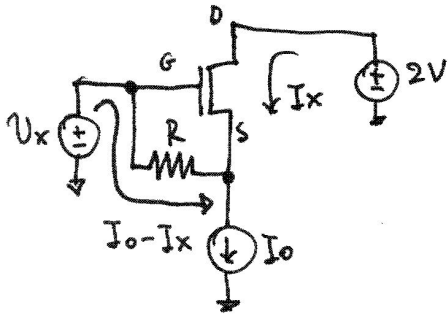
$$V_{DS} \gg V_{DSAT} \Rightarrow V_{DS} \gg V_{GS} - V_T \Rightarrow V_D - V_S \gg V_G - V_S - V_T \Rightarrow V_D \gg V_G - V_T$$

$$V_D \gg 0.947 - 0.5 \Rightarrow V_D \gg 0.447$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Η πάνω τάση στα άκρα ως } R_D \text{ είναι } V_{DD} - V_D = I_D \cdot R_D \\ V_D \gg 0.447 \\ I_D = 0.5 \text{ mA} \\ V_{DD} = 1.8 \text{ V} \end{array} \right\} \rightarrow R_D \leq 2.71 \text{ k}\Omega$$

Παράδειγμα 5

Δώστε το διαγράμμα του ρεύματος I_x ως συνάρτηση της τάσης V_x . $V_x > 0$



Από τον KCL στον κόμβο S προκύπτει ότι το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R είναι ίσο με $I_0 - I_x$. Θυμίζουμε πως η πύλη του τρανζίστορ (gate) έχει βέβαιον "αίτητη" αντίσταση και δεν "κλέβει" μέρος του ρεύματος ($i_G = 0$).

Λόγω της ύπαρξης της πηγής ρεύματος I_0 μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε πως το τρανζίστορ αγει & διαρρέεται από ρεύμα. Ας δούμε σε ποια περιοχή λειτουργεί. Από το κύκλωμα $V_{DS} = 2 - V_S$ και $V_{GS} = V_x - V_S$. Έτσι το τρανζίστορ είναι στον κορεσμό όταν $V_{DS} \gg V_{DSAT} \Rightarrow V_{DS} \gg V_{GS} - V_T \Rightarrow 2 - V_S \gg V_x - V_S - V_T \Rightarrow \underline{V_x \leq V_T + 2}$

Επομένως το τρανζίστορ είναι κορεσμένο όταν $0 \leq V_x \leq 2 + V_T$. Επίσης όταν $V_x > 2 + V_T$ το τρανζίστορ εισέρχεται στη γραμμική περιοχή.

⊙ Για $0 < V_x < 2 + V_T$: Τρανζίστορ στον κορεσμό. Έτσι.

$$I_{DS} = I_x = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

Όμως $V_{GS} = \underbrace{V_x - V_S}_{\text{Διαφορά δυναμικού στα άκρα της R}} = (I_0 - I_x) \cdot R$

$$\Rightarrow I_x = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \cdot ((I_0 - I_x)R - V_T)^2$$

Μια εξίσωση με μόνο αγνώστο το I_x

Όταν λυθεί θα προκύψει μια λύση. Έτσι το ρεύμα στα άκρα & ανεξάρτητο του V_x . Έστω η λύση I_{x0}

⊙ Για $V_x > 2 + V_T$: Το τρανζίστορ στην γραμμική περιοχή

$$\text{Τότε } I_{DS} = I_x = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \cdot \left[V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}$$

$$V_{GS} = (I_0 - I_x) \cdot R$$

$$V_{DS} = 2 - V_S$$

Από τα άκρα της R

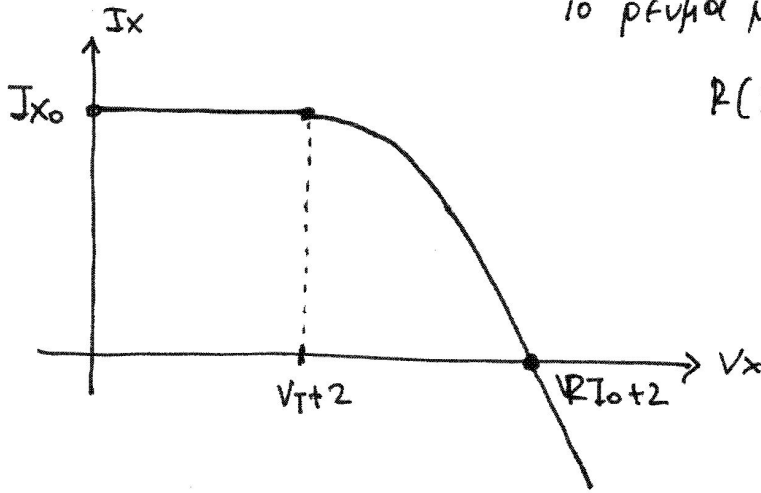
$$V_x - V_S = (I_0 - I_x)R$$

$$\Rightarrow V_{DS} = 2 - V_x - (I_0 - I_x)R$$

Επίσης το πρώτο είναι τίτλος από πράξη

$$I_x = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(R(I_0 - I_x) - V_T)^2 - (V_x - 2 - V_T)^2 \right]$$

Το I_x μικραίνει όσο αυξάνει το V_x . Για μεγάλα V_x η προκύπτουσα του I_x αλληλεξάρτησης.



Το πρώτο μηδενίζεται όταν

$$\left. \begin{aligned} R(I_0 - I_x) - V_T &= V_x - 2 - V_T \\ I_x &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$V_x = 2 + R I_0$$