

Ανασφαλαιώνουμε τις περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ MOS

Περιοχή τριόδου (NMOS) $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ (V_{th} : Τάση κατωφλίου)
(PMOS) $V_{SD} < V_{SG} - |V_{th}|$

Περιοχή κορεσμού: $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ (NMOS)
 $V_{SD} > V_{SG} - |V_{th}|$ (PMOS)

Περιοχή αθροιστικής ανατροφοδότησης: $V_{GS} < V_{th} - 100 \text{ mV}$

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (\eta - 1) \left(\frac{kT}{q_e} \right)^2 e^{\frac{V_{GS} - V_{th}}{\eta kT/q_e} \cdot (1 - e^{-\frac{V_{DS}}{\eta kT/q_e}})} \quad \eta \approx 1.2 - 1.6$$

Περιοχή μέτριας ανατροφοδότησης: $V_{th} - 100 \text{ mV} < V_{GS} < V_{th} + 200 \text{ mV}$
δεν υπάρχει αληθής αναλυτικός τύπος

Περιοχή ισχυρής ανατροφοδότησης $V_{GS} \geq V_{th} + 200 \text{ mV}$

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) = \beta \left[2(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - V_{DS}^2 \right] \quad \begin{array}{l} \text{για την τριόδο} \\ V_{DS} < V_{GS} - V_{th} \end{array}$$

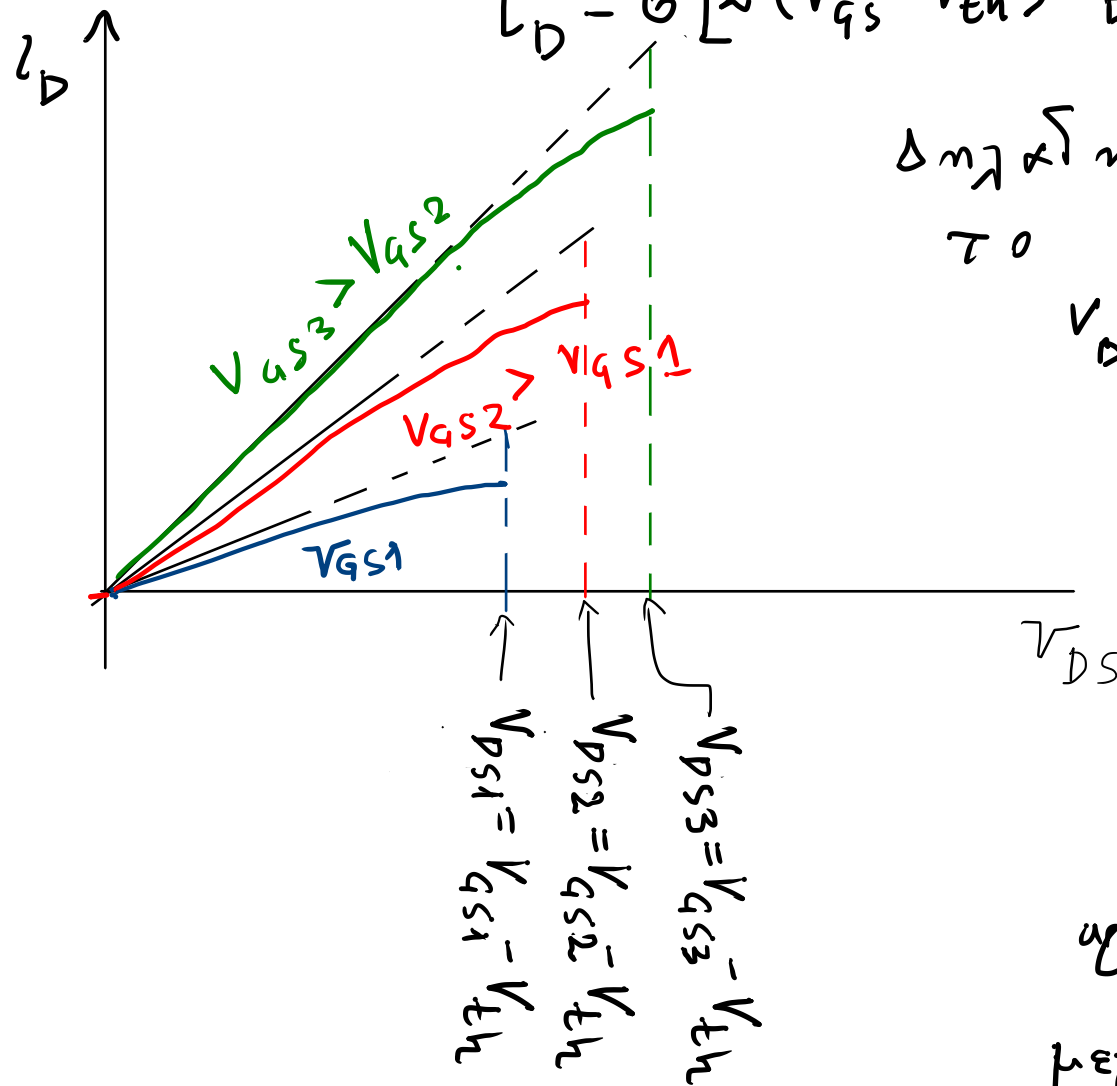
$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) = \beta \cdot (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad \begin{array}{l} \text{για την περιοχή} \\ \text{κορεσμού} \end{array}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} \quad \begin{array}{l} \mu: \text{επιμεταγωγή} \\ C_{ox}: \frac{\text{χωρητικότητα}}{\text{επιφάνεια}} \text{ πυλινού} \end{array} \quad \begin{array}{l} W: \text{πλάτος καναλιού} \\ L: \text{μήκος καναλιού} \end{array}$$

Θα δούμε πάλι την γραμμική παράσταση του ρεύματος I_D στην ισχυρή αναρροή δηλ. για $V_{GS} \geq V_{th} + 200mV$

Όταν το V_{DS} είναι μικρότερο από το $(V_{GS} - V_{th})$ που είναι $\geq 200mV$ τότε η σχέση

$$I_D = \beta \cdot [2(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2] \text{ έχει γραμμική παράσταση}$$



Δηλαδή όταν το V_{DS} είναι αρκετά μικρότερο από το $V_{GS} - V_{th}$ (π.χ. $200mV = 0.2V$) τότε το V_{DS}^2 είναι πολύ μικρό (π.χ. για $V_{DS} = 100mV$ το $V_{DS}^2 = 10(mV)^2$)

Έτσι η σχέση $I_D = f(V_{DS})$ για συχνηστεμένο

$$V_{GS} \text{ είναι σχεδόν γραμμική με}$$

$$\text{υγιών } \beta \cdot 2 \cdot (V_{GS} - V_{th}) = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{DS}}$$

Όσο το V_{DS} πλησιάζει το $V_{GS} - V_{th}$, ο όρος $\frac{V_{DS}^2}{2}$ μεγαλώνει και έτσι η γραμμική παράσταση να μειώνεται.

Δηλαδή στην τριόδο περιοχή & στην ισχυρή αλδδζροψη το MOS τρανζίστορ λειτουργεί ως μια αντίσταση

$$r_{on} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_{DS}} = \frac{1}{2\beta(V_{GS} - V_{th})}$$

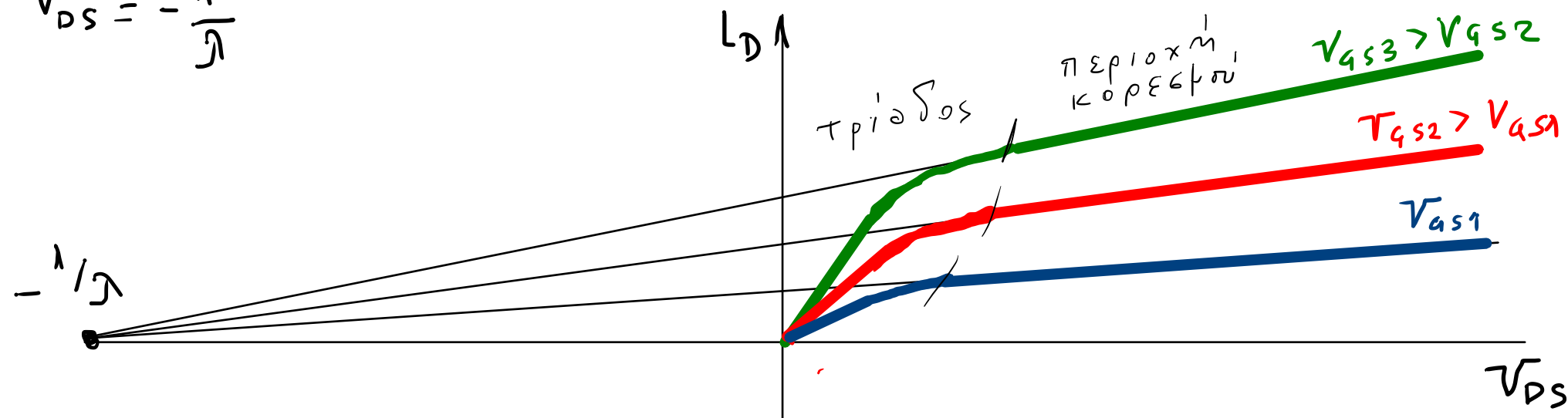
της οποίας η τιμή ρυθμίζεται από την τάση V_{GS} .

Όσο μεγαλύτερο είναι το V_{GS} τόσο μικρότερη είναι η αντίσταση.

Αυτή την ιδιότητα την χρησιμοποιούμε ως διακόπτες

Όταν το $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ το τρανζίστορ περνάει στην περιοχή κορεσμού όπου

$I_D = \beta(V_{GS} - V_{th})^2(1 + \lambda V_{DS})$. Για σταθερό V_{GS} , η μορφή της γραμμικής παρέξτασης γίνεται ευθεία $y = k(1 + \lambda V_{DS}) = k + k\lambda V_{DS}$. Η ευθεία αυτή έχει $y=0$ για $V_{DS} = -\frac{1}{\lambda}$



Παραδείγματα για την περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ. (Θεωρούμε ότι όταν $V_{GS} < V_{th}$ τότε $I_D = 0$ και ξέρουμε ότι αυτό δεν ισχύει 100%.)

Παράδειγμα 1

Ένα NMOS έχει $V_{th} = 2V$. Η πύλη G έχει $+3V$. Η πηγή S είναι γειωμένη. Να βρείτε τις περιοχές λειτουργίας για (α) $V_D = 0.5V$, (β) $V_D = 1V$, (γ) $V_D = 2V$

Λύση: $V_{GS} = V_G - V_S = 3V - 0V = 3V$. $V_{GS} - V_{th} = 3V - 2V = 1V$

(α) $V_D = 0.5V$ και $V_{DS} = V_D - V_S = 0.5 - 0 = 0.5V$ δηλ. $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ άρα το τρανζίστορ είναι στην Τριόδο

(β) για $V_{DS} = 1V$ $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ άρα το τρανζίστορ είναι στο όριο μεταξυ Τριόδου και κορεσμού

(γ) για $V_{DS} = 2V$ $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ άρα περιοχή κορεσμού

Παράδειγμα 2

Ένα PMOS έχει $V_{th} = -2V$ Η πύλη G είναι γειωμένη. Η πηγή S είναι στα $+5V$. Ποιό είναι το μέγιστο V_D για το οποίο το PMOS θα παραμείνει στην περιοχή κορεσμού;

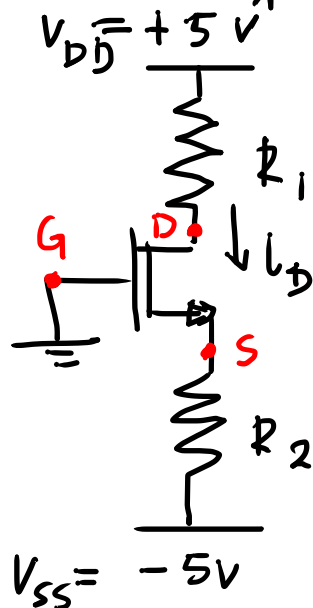
Λύση: $V_G = 0V$, $V_S = +5V$ άρα $V_{SG} = 5 - 0 = 5V$ και $V_{SG} - |V_{th}| = 5 - 2 = 3V$

Για να έχουμε περιοχή κορεσμού πρέπει $V_{SD} > V_{SG} - |V_{th}| \Rightarrow V_{SD} > 3V$ δηλαδή

$$V_S - V_D > 3V \quad 5V - V_D > 3V \Leftrightarrow 5V - 3V > V_D \Rightarrow V_D < 2V$$

Παράδειγμα :

Στο κύκλωμα:



Να βρεθούν οι τιμές των αντιστάσεων έτσι ώστε

$$I_D = 0.4 \text{ mA} \quad \text{και} \quad V_D = 1 \text{ V} \quad \text{Δίνεται} \quad V_{th} = 2 \text{ V}, \quad \theta = 0.4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, \quad \lambda \approx 0$$

Λύση: Η τιμή της R_1 προκύπτει από την σχέση

$$R_1 = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{5 \text{ V} - 1 \text{ V}}{0.4 \text{ mA}} = \frac{4 \text{ V}}{0.4 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\text{Η } R_2 = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = \frac{V_S - (-5 \text{ V})}{0.4 \text{ mA}} = \frac{V_S + 5 \text{ V}}{0.4 \text{ mA}} \quad \text{Αρα πρέπει να βρεθεί το } R_2$$

Θεωρώ ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στον κορεσμό. Επομένως

$$I_D = \theta (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \approx \theta (V_{GS} - V_{th})^2 \quad \text{Έτσι} \quad |V_{GS} - V_{th}| = \sqrt{\frac{I_D}{\theta}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0.4 \text{ mA}}{0.4 \text{ mA/V}^2}} = 1 \text{ V}$$

$$\text{Άρα} \quad |V_{GS} - 2| = 1 \Leftrightarrow \begin{cases} V_{GS} - 2 = 1 \Rightarrow V_{GS} = 3 \\ -(V_{GS} - 2) = 1 \Rightarrow V_{GS} = 1 \end{cases}$$

Απορρίπτεται γιατί

για $V_{GS} < V_{th}$ το $I_D \approx 0$ (το τρανζίστορ δεν έχει)

$$\text{Άρα} \quad V_{GS} = 3 \text{ V} \Rightarrow V_G - V_S = 3 \text{ V} \Rightarrow 0 - V_S = 3 \text{ V} \Rightarrow V_S = -3 \text{ V}$$

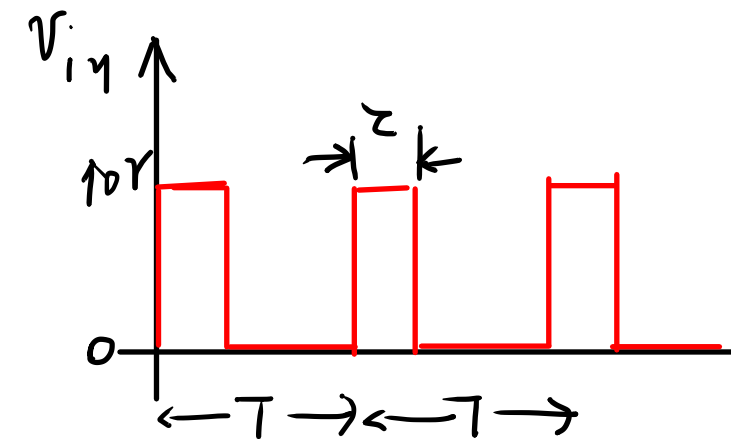
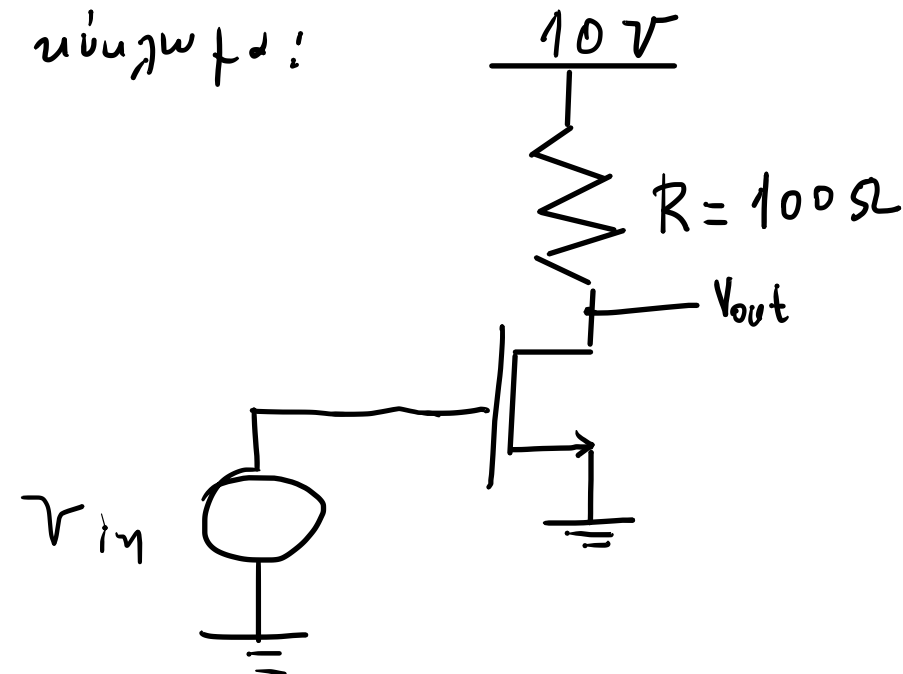
$$\text{Επομένως} \quad R_2 = \frac{-3 + 5}{0.4 \text{ mA}} = \frac{2 \text{ V}}{0.4 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega$$

Επιβεβαιώνεται ότι το τρανζίστορ είναι στην περιοχή κορεσμού, γιατί $V_{DS} = 1 \text{ V} - (-3 \text{ V}) = 4 \text{ V} > V_{GS} - V_{th} = 3 \text{ V} - 2 \text{ V} = 1 \text{ V}$

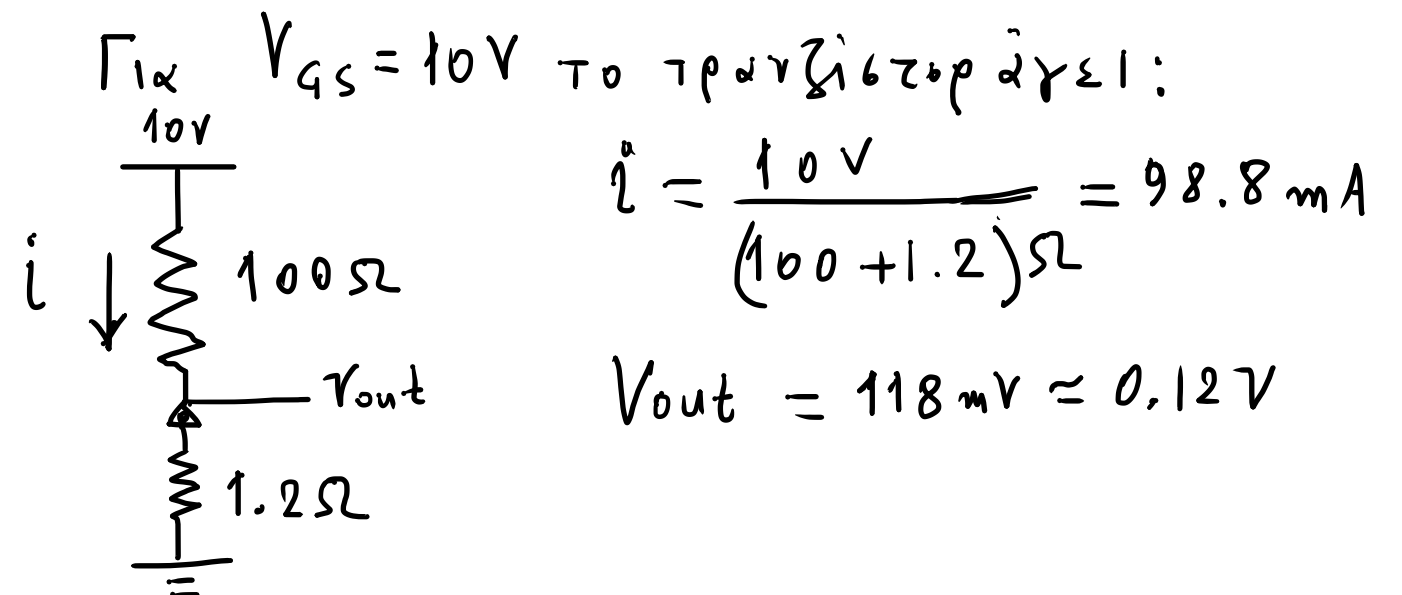
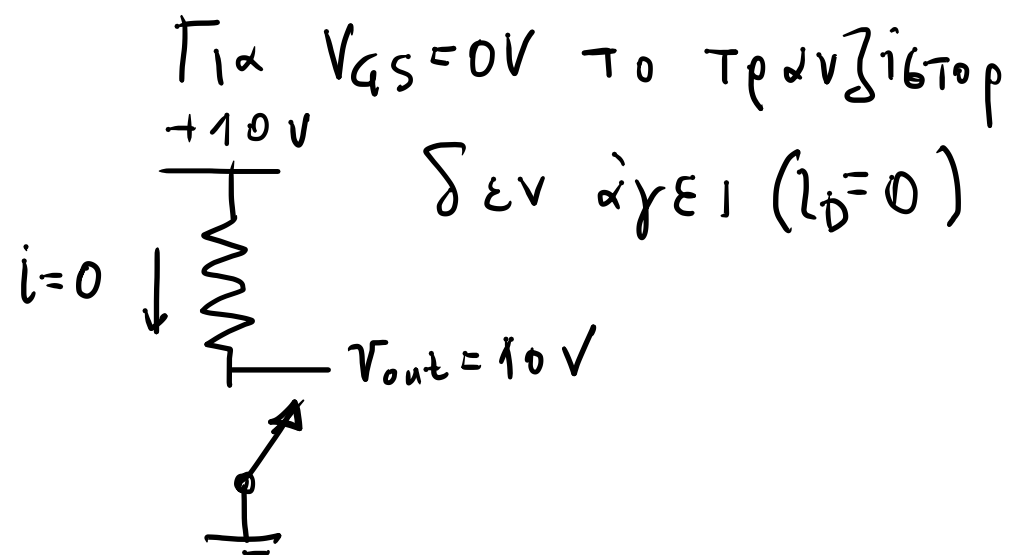
Το MOS ως διακόπτης : Ας πάρουμε το NMOS BS170 (που θα χρησιμοποιήσουμε 620

εργαζόμενο) Αυτό έχει $V_{th} = 2.1V$ και $r_{ds(on)} = 1.2\Omega$ για $V_{gs} = 10V$

Έχουμε το κύκλωμα:



Κύκλος
δράσης
 $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{3}$



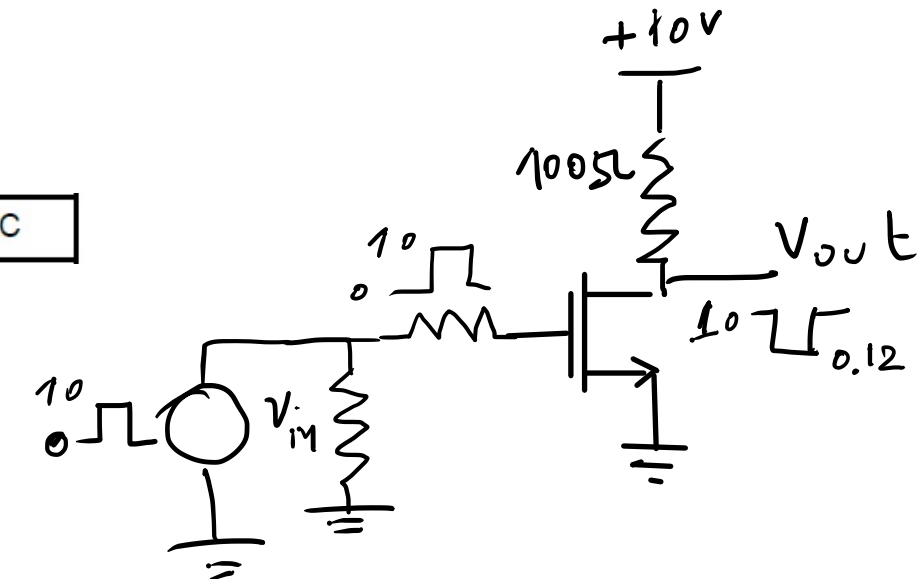
Βρίσκουμε στο φυλλάδιο προδιαγραφών τα παρακάτω:

T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	- 55 to 150	°C
----------------	---	-------------	----

THERMAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	BS170	MMBF170	Unit
P_D	Maximum Power Dissipation Derate above 25°C	830 6.6	300 2.4	mW mW/°C
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	150	417	°C/W

$R_{DS(ON)}$	Static Drain-Source On-Resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 200\text{ mA}$	All	-	1.2	5	Ω
--------------	-----------------------------------	---	-----	---	-----	---	----------



και βρίσκουμε ότι
για $V_{in} = 10\text{ V}$ το $I_D = 98,8\text{ mA}$
ήρα η ισχύς που καταναλώνεται είναι
στο BS170 είναι $I_D^2 R_{DS,ON} = (98,8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,2\ \Omega =$
 $= 117\text{ mW}$

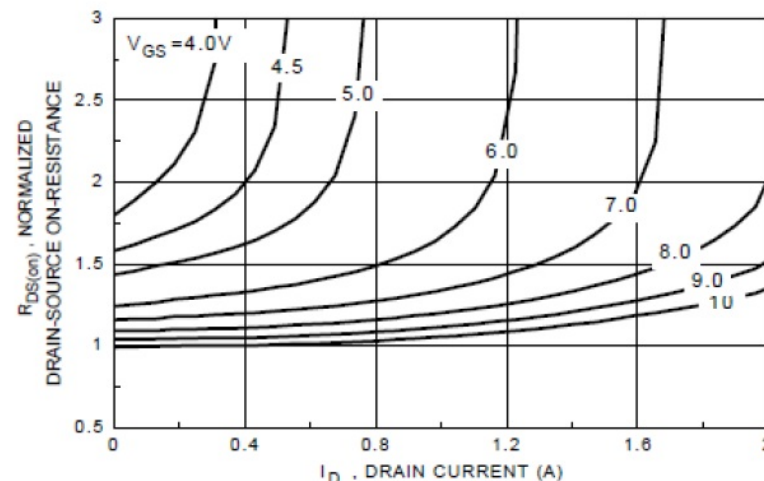


Figure 2. On-Resistance Variation with Gate Voltage and Drain Current

Αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 25°C
τότε η ισχύς των 117 mW θα ρυθμίσει
θερμοκρασία του τρανζίστορ $25^\circ\text{C} + 117\text{ mW} \cdot R_{\theta JA} =$
 $= 25^\circ\text{C} + 0,117\text{ W} \cdot 150^\circ\text{C/W} = 25^\circ\text{C} + 17,55^\circ\text{C} =$
 $42,55^\circ\text{C}$

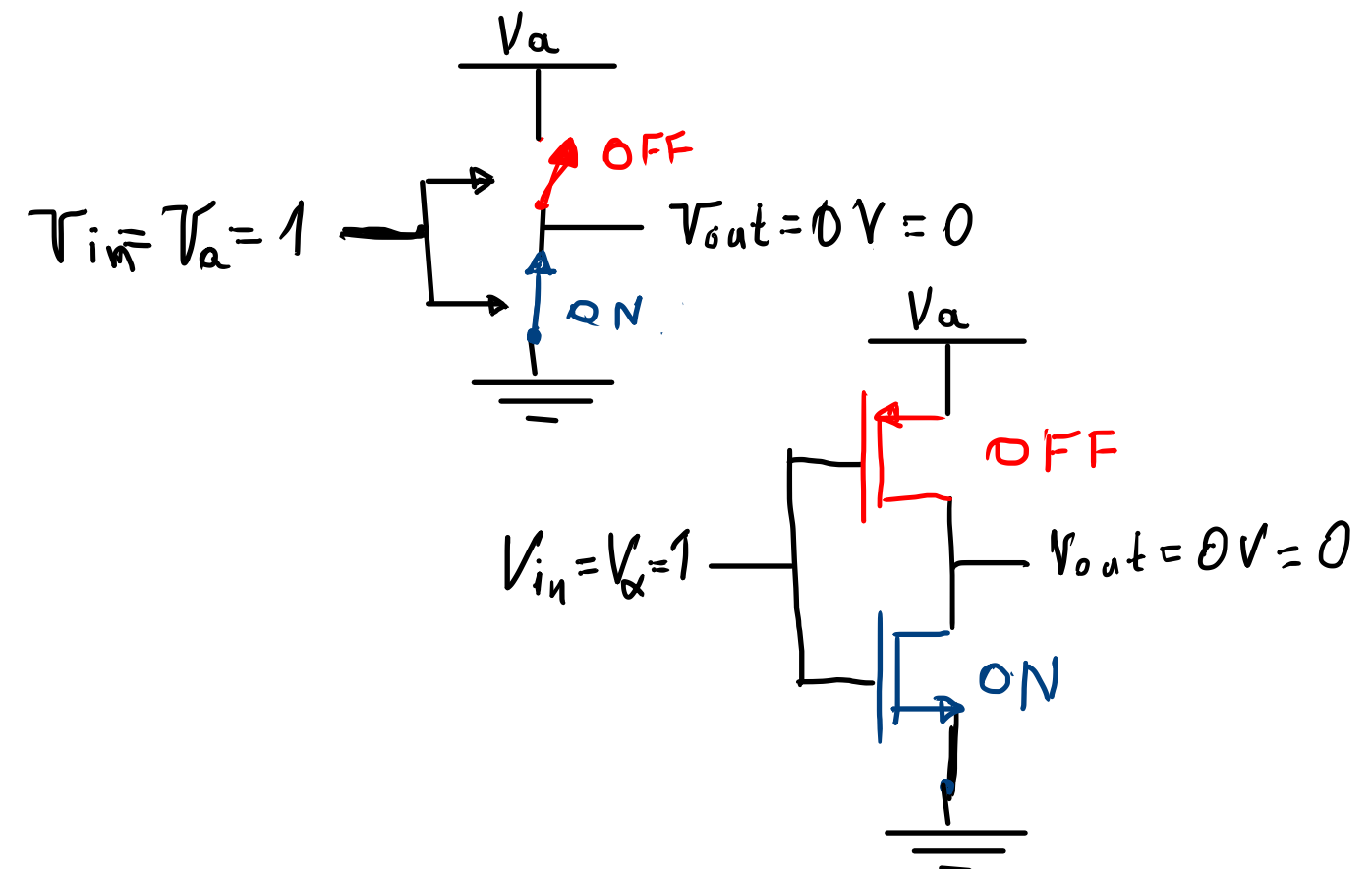
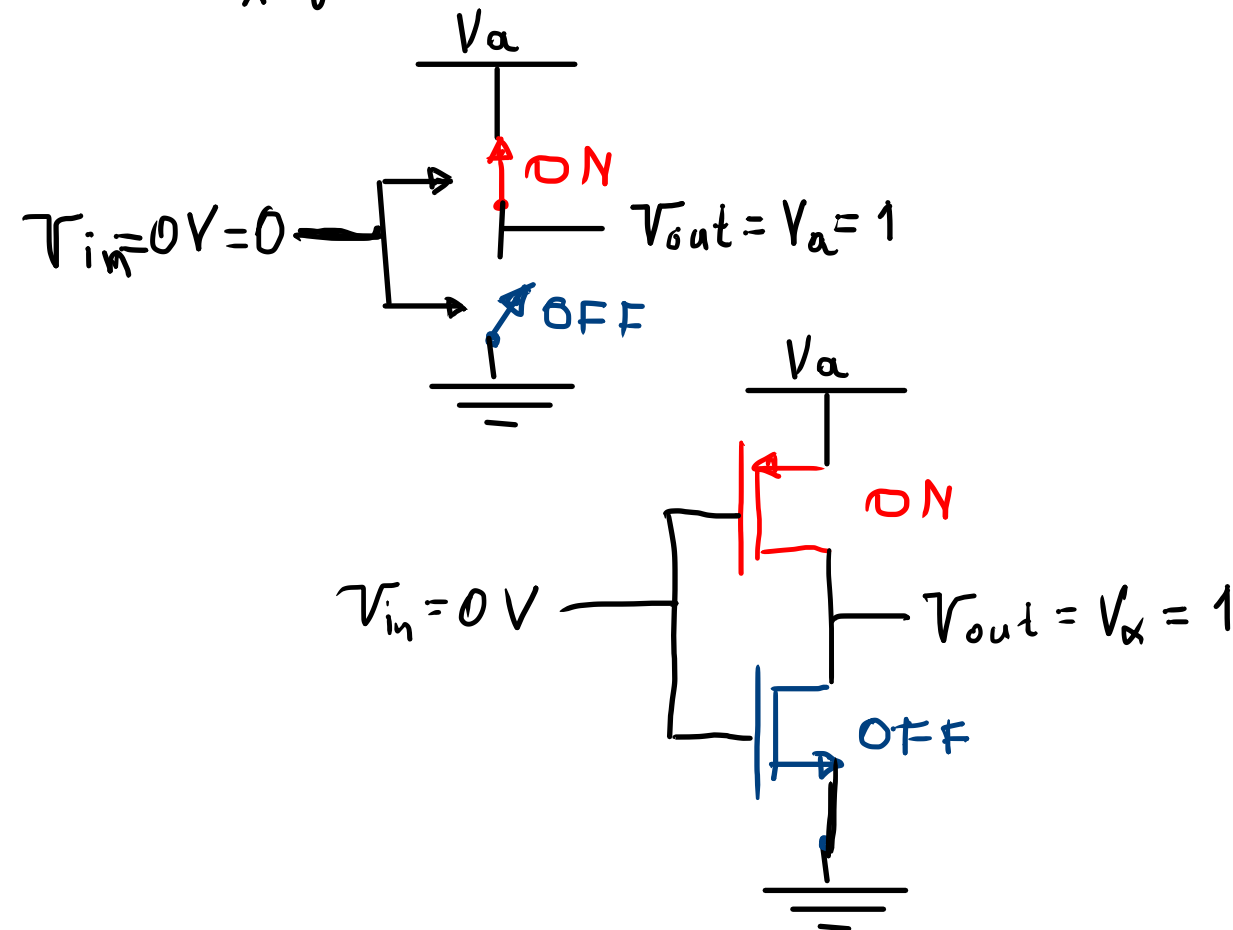
αφού η πιο παθητική από των μέγιστων θερμοκρασιών
 $T_J = 150^\circ\text{C}$

Το MOS τρανζίστορ είναι πολύ καλός διακόπτης. Μπορεί γρήγορα να πάει από ON σε OFF και αντίστροφα και μπορεί να έχει πολύ μικρή αντίσταση.

Χρησιμοποιείται για να ανοίγει και να κλείνει ηλεκτρικές μηχανές, για τα παθητικά τροφοδοτικά, για τα φίλτρα διακοπόμενων πυκνωτών και για τα λογικά υψηλότερα.

Ας δούμε την χρήση του ως διακόπτη στα λογικά υψηλότερα:

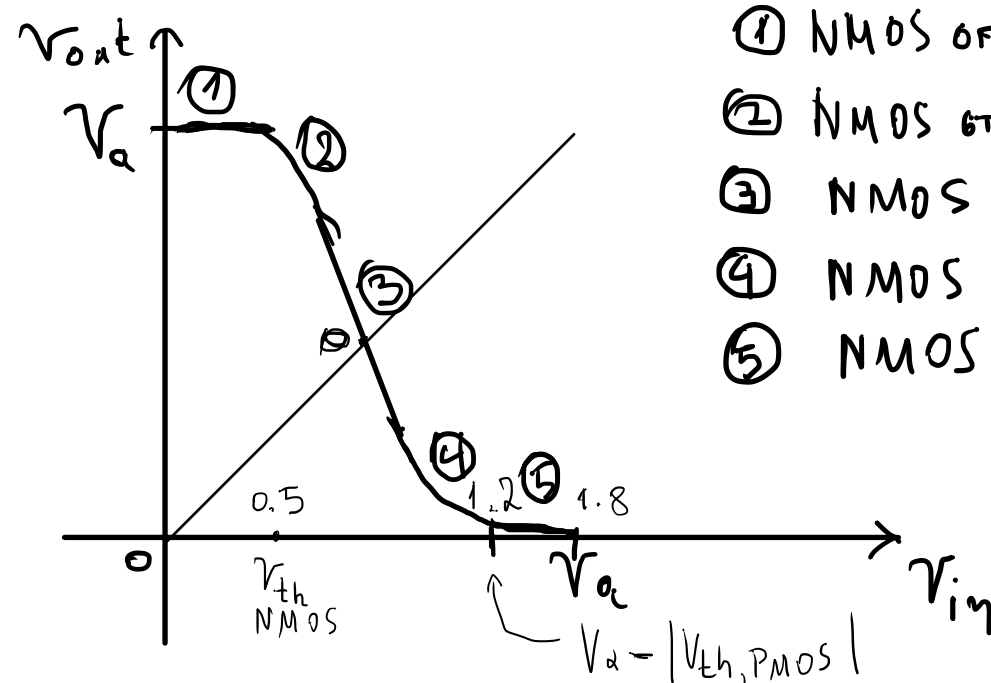
Υλοποίηση πύλης NOT με διακόπτες: Το λογικό 0 αντιστοιχεί σε 0 Volts και το λογικό 1 αντιστοιχεί σε V_a Volts



Έστω ότι το NMOS έχει $V_{th} = 0.5V$ και το PMOS έχει $V_{th} = -0.6V$. ενώ $V_a = 1.8V$
 Όταν $V_{in} = 0V$ τότε το PMOS έχει $V_{SG} = 1.8V - 0V = 1.8V$ και $V_{SG} - |V_{th}| = 1.8V - 0.6V = 1.2V$. Άρα το PMOS είναι ON και στην περιοχή της ισχυρής ανάβρωσης.

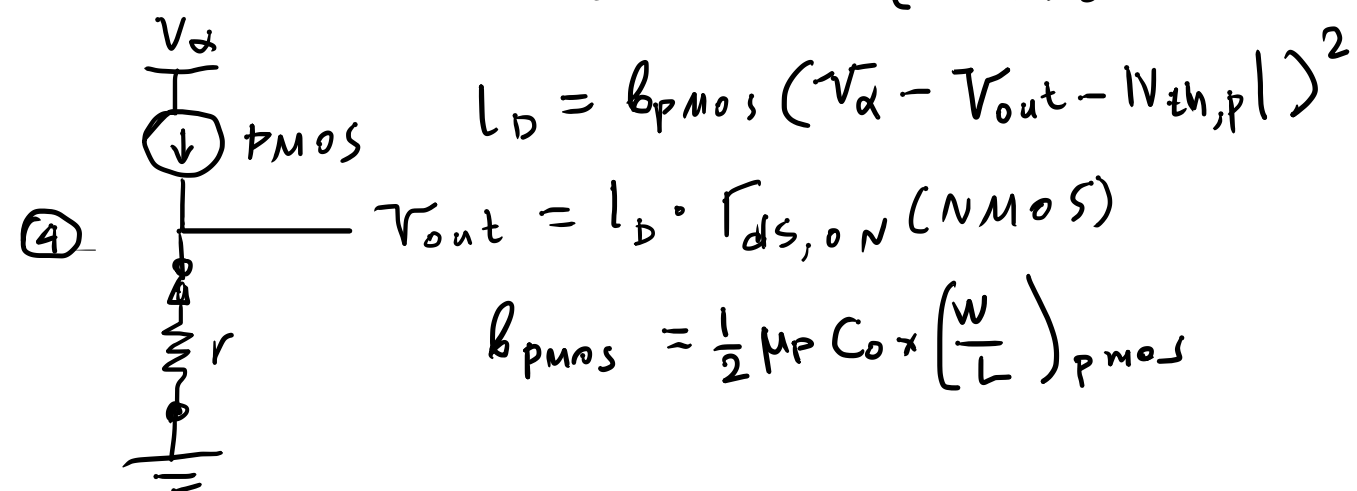
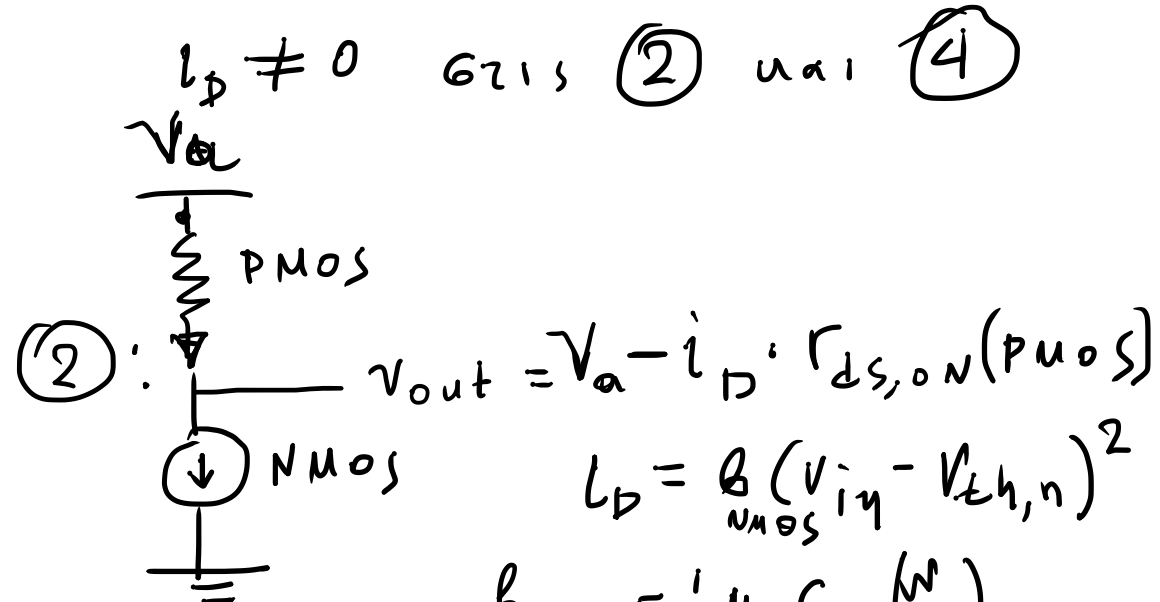
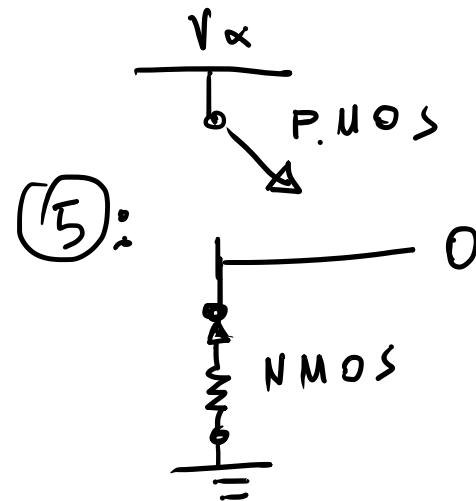
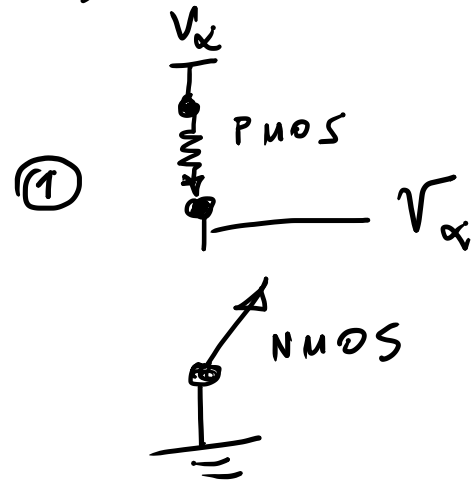
Το NMOS έχει $V_{GS} = 0V - 0V = 0V$, άρα είναι στην κατάσταση (OFF). Αφού το NMOS έχει $I_D = 0$ και το PMOS που είναι GE γειρά με το NMOS έχει $I_D = 0$. Το PMOS είναι ON με $V_{SD} = 0 = V_a - V_{out} \Rightarrow V_{out} = V_a = 1.8V$

Όταν $V_{in} = V_a$ τότε το PMOS έχει $V_{SG} = V_a - V_a = 0V$ άρα είναι OFF
 Το NMOS έχει $V_{GS} = V_a - 0 = V_a$ και $V_{GS} - V_{th} = 1.8V - 0.5V = 1.3V$ Άρα είναι ON και στην ισχυρή ανάβρωση. Σημειώνω το $I_D = 0$ το V_{DS} του NMOS είναι 0 άρα $V_{out} = 0V$



- ① NMOS OFF PMOS στην τριόδο
- ② NMOS στη υποεξέλιξη PMOS στην τριόδο
- ③ NMOS και PMOS GE υποεξέλιξη
- ④ NMOS στην τριόδο PMOS GE υποεξέλιξη
- ⑤ NMOS στην τριόδο PMOS OFF

$I_D = 0$ στην περιοχή (1) και στην περιοχή (5)



$$I_D = \beta_{NMOS} (V_{in} - V_{th, n})^2$$

$$\beta_{NMOS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_{NMOS}$$

$$I_D = \beta_{PMOS} (V_a - V_{out} - |V_{th, p}|)^2$$

$$\beta_{PMOS} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_{PMOS}$$

Στην περιοχή (3) και συγκεριμένα εκεί που $V_{in} = V_{out} = V$

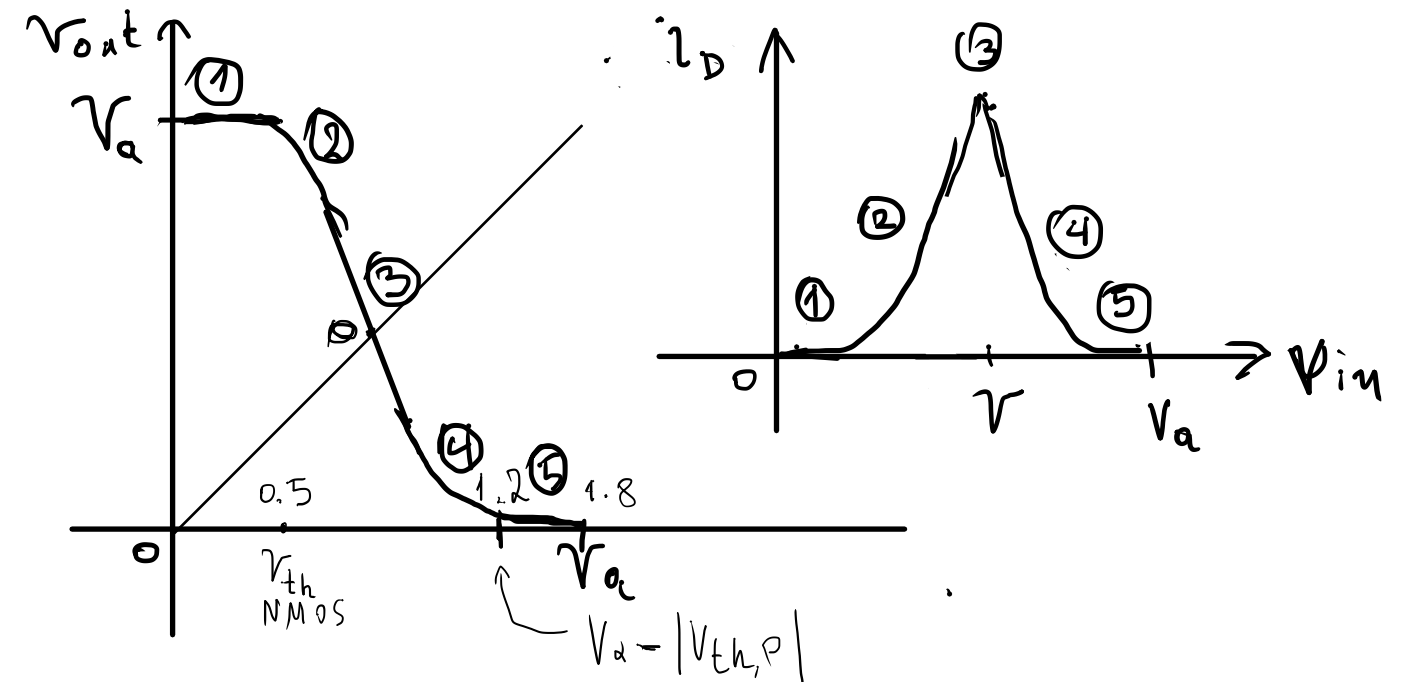
$$I_D = \beta_{NMOS} (V - V_{th, n})^2 = \beta_{PMOS} (V_a - V - |V_{th, p}|)^2$$

Ενώ το $V = V_{out} (= V_{in})$ δίνεται από την:

$$\sqrt{\beta_{NMOS}} \cdot (V - V_{th, n}) = \sqrt{\beta_{PMOS}} (V_a - V - |V_{th, p}|) \Leftrightarrow$$

$$(\sqrt{\beta_{NMOS}} + \sqrt{\beta_{PMOS}}) V = \sqrt{\beta_{PMOS}} (V_a - |V_{th, p}|) + \sqrt{\beta_{NMOS}} V_{th, n}$$

άρα $V = \frac{\sqrt{\beta_{PMOS}} (V_a - |V_{th, p}|) + \sqrt{\beta_{NMOS}} V_{th, n}}{\sqrt{\beta_{NMOS}} + \sqrt{\beta_{PMOS}}}$



Χρησιμοποιώντας PMOS και NMOS τρανζίστορς μπορούμε να φτιάξουμε συνδυασμούς από διακόπτες και επομένως όλες τις λογικές πύλες

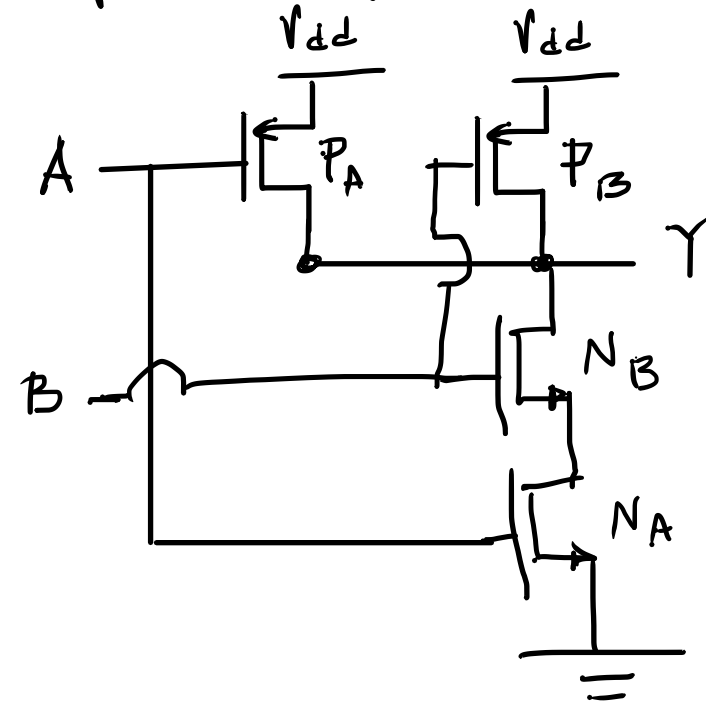
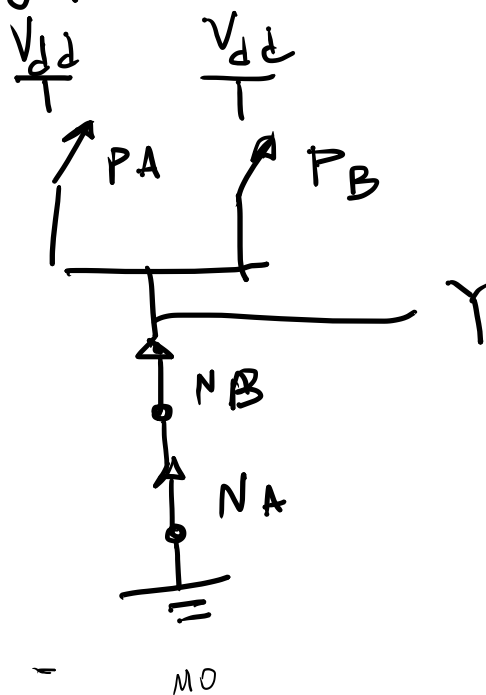
Δηλ: Πύλη NAND 2 εισόδων:

- 1 εμφανίζει $V_{DD} V$
- 0 εμφανίζει $0 V$
- P_A (PMOS με είσοδο A)
- N_A (NMOS με είσοδο A)
- κ.λ.π.

$A=1$: P_A OFF, N_A ON

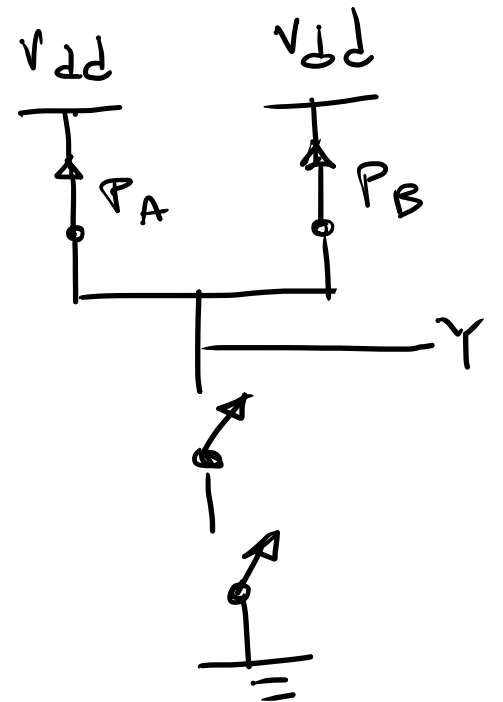
$B=1$: P_B OFF, N_B ON
 άρα $Y=0 V$

άρα:



$A=0$: P_A ON, N_A OFF
 $B=0$: P_B ON, N_B OFF

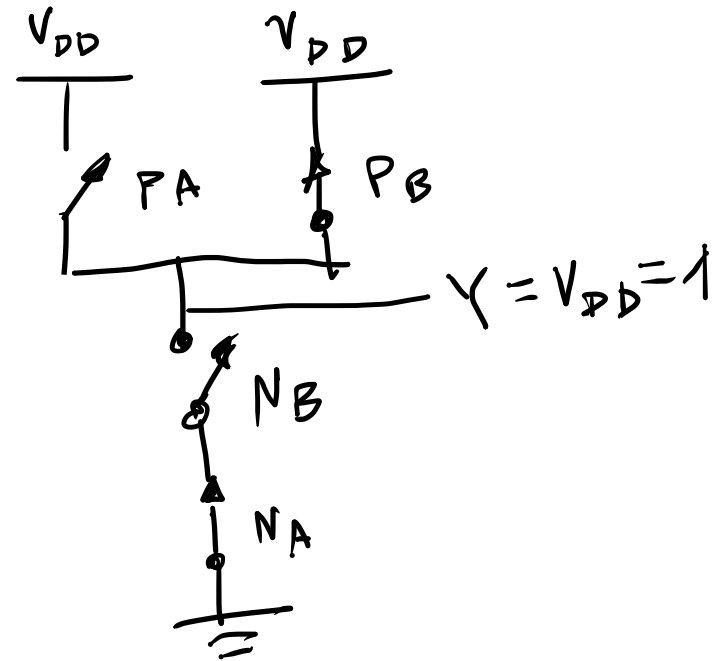
Άρα $Y = V_{DD}$ δηλ 1



$A = 1$ σύμφωνα V_{DD} : $P_A = OFF$, $N_A = ON$

$B = 0$ σύμφωνα $0V$: $P_B = ON$, $N_B = OFF$

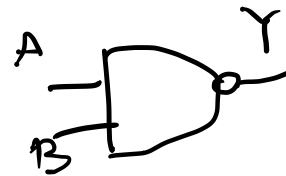
οπότε $Y = 1$



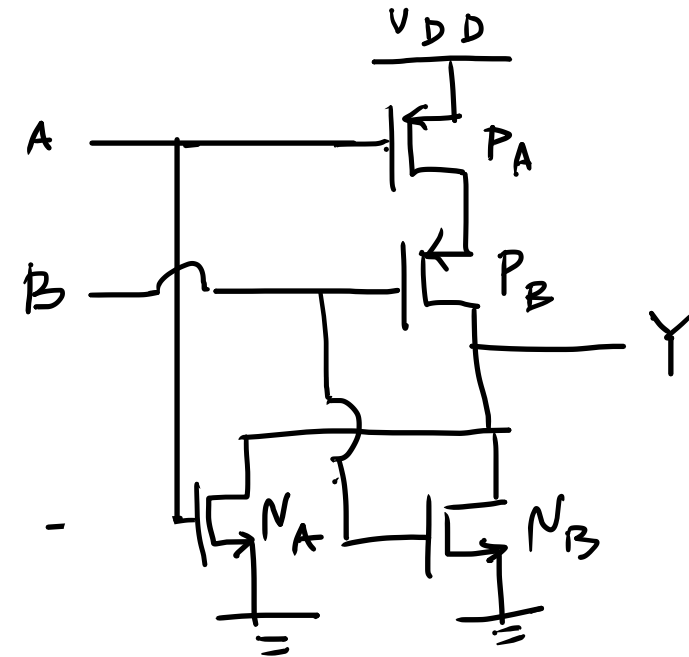
Το ίδιο θα συμβεί και αν
 $A = 0$ και $B = 1$

Τελευταία

A	B	Y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1



Πύλη NOR στο ελεγχόμενο:

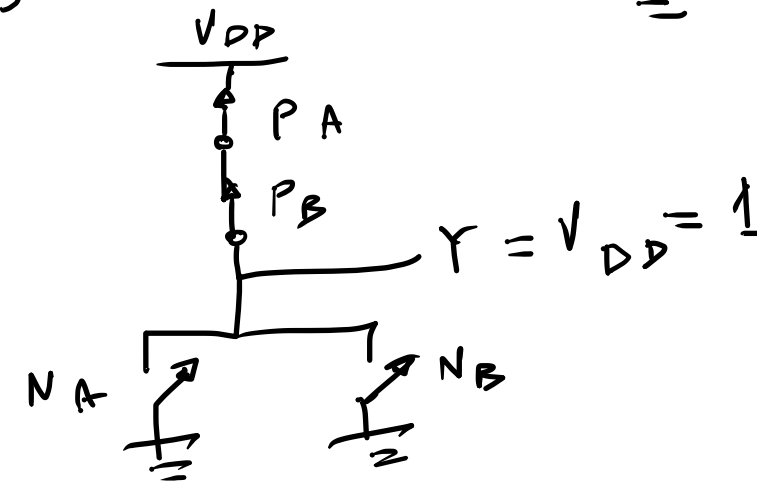
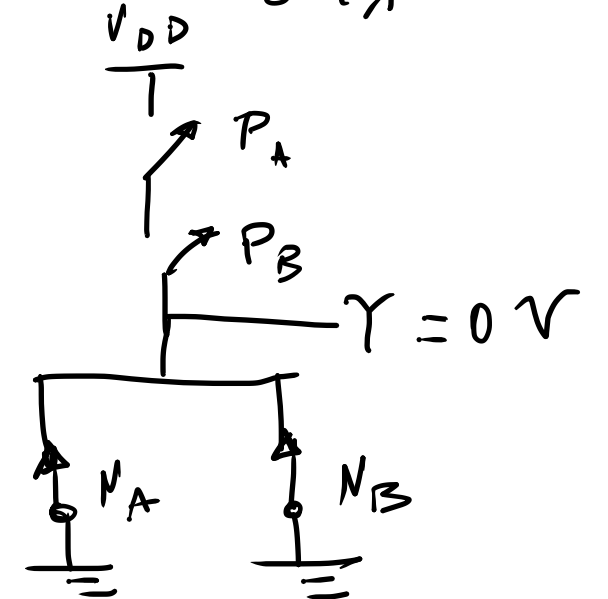


Αν $A = 1$ σύμφωνα V_{DD} έχουμε
 $P_A = OFF$, $N_A = ON$

Αν $B = 1$ έχουμε
 $P_B = OFF$, $N_B = ON$

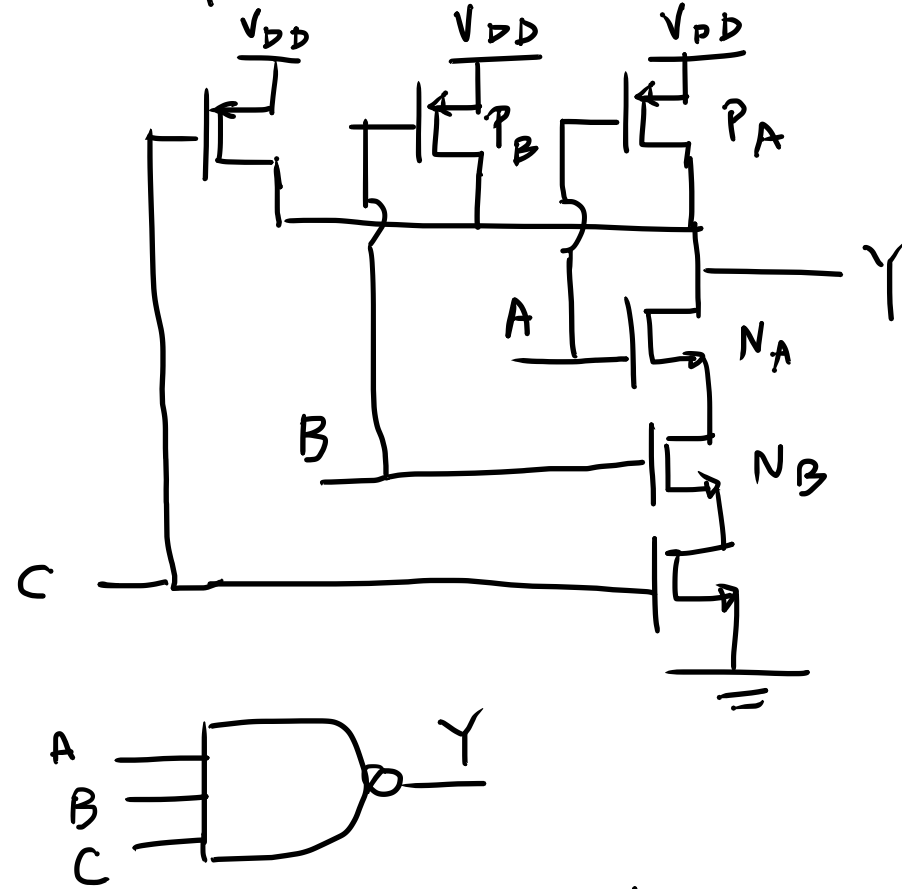
Αν $A = 0$
 $P_A = ON$, $N_A = OFF$

Αν $B = 0$
 $P_B = ON$, $N_B = OFF$



κ.ο.κ.

Μπορούμε να έχουμε πύλες
π.χ. τριών εισόδων:

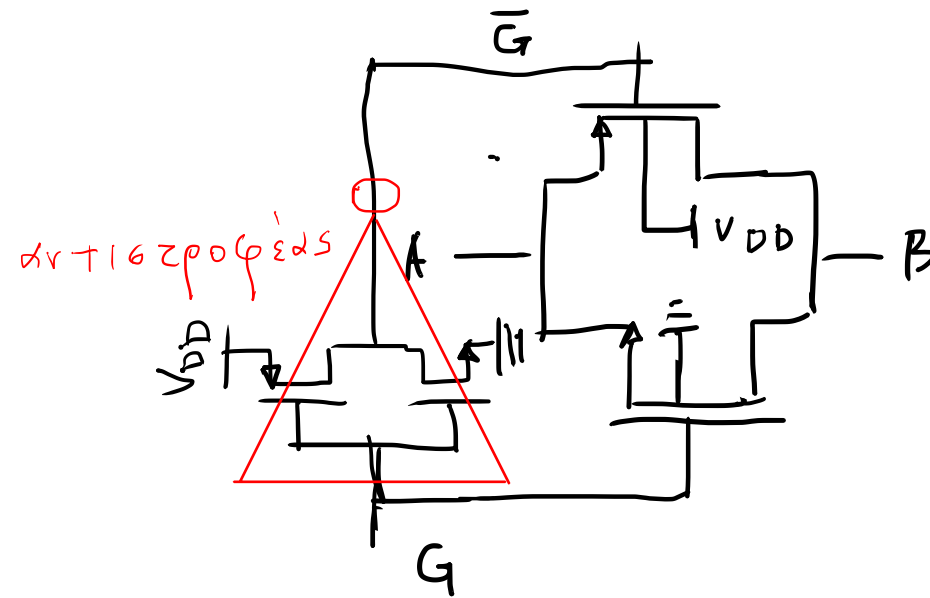


NAND 3 εισόδων

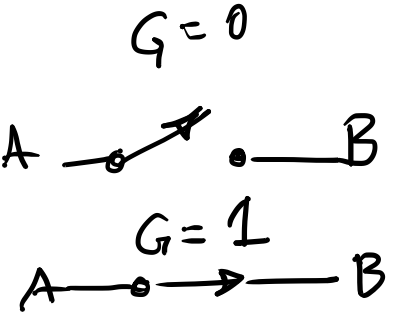
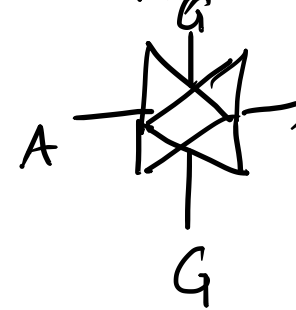
ή και πιο σύνθετη λογική

Θα δείξουμε ένα άλλο αλγό ή παράδειγμα:

έναν πολυπλέκτη χρησιμοποιώντας για την
υλοποίησή του τις λεγόμενες πύλες διέλευσης
(transmission - gates)



Σύμβολο



Πολυπλέκτης:

