

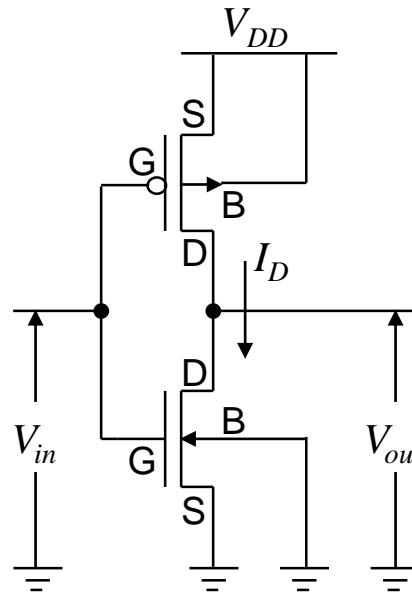
Στατική ηλεκτρική ανάλυση του αντιστροφέα CMOS

Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική

Στατική (DC) ηλεκτρική ανάλυση του αντιστροφέα CMOS

- Θα εξάγουμε τη χαρακτηριστική τάσης $V_{out} = f(V_{in})$ (καθώς και τη χαρακτηριστική ρεύματος $I_D = f(V_{in})$) του αντιστροφέα CMOS σε συνθήκες σταθερής λειτουργίας

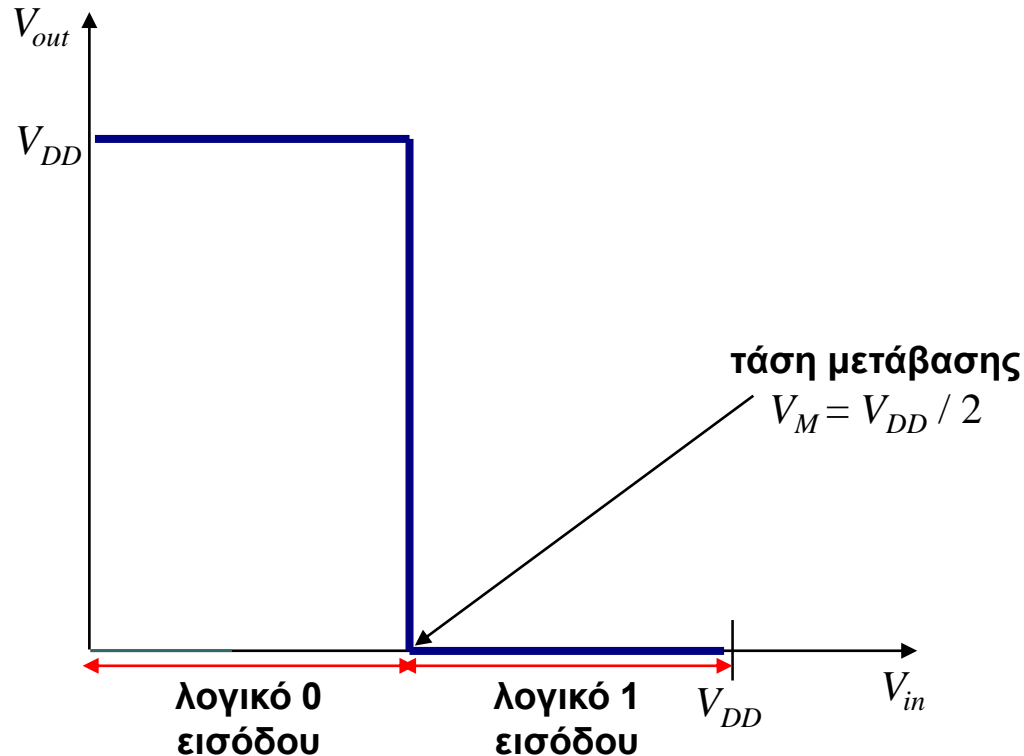
$$V_{GSn} = V_{in}$$
$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$



$$I_{Dn} = I_{Dp}$$

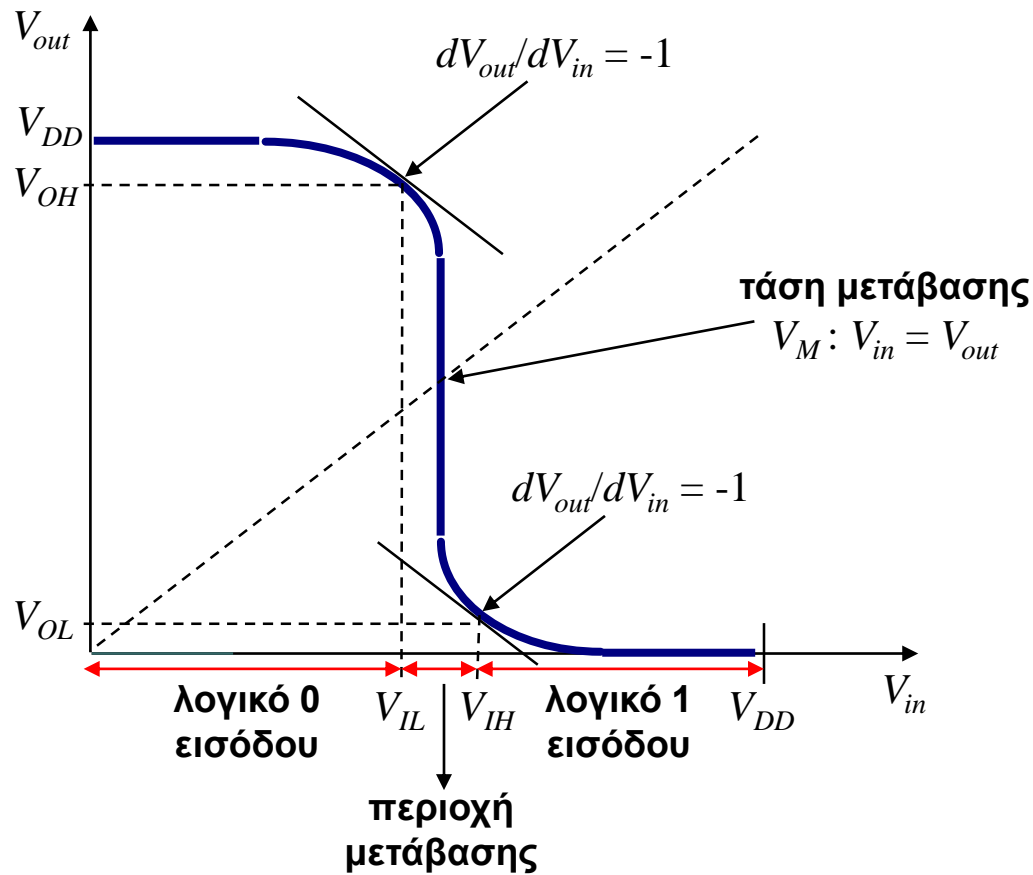
$$V_{DSn} = V_{out}$$
$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

Χαρακτηριστική DC ενός ιδανικού αντιστροφέα



- Η χαρακτηριστική DC ενός πραγματικού αντιστροφέα έχει μη μηδενικό εύρος και πεπερασμένη κλίση στην περιοχή της μετάβασης μεταξύ των δύο λογικών καταστάσεων

Χαρακτηριστική DC του αντιστροφέα CMOS



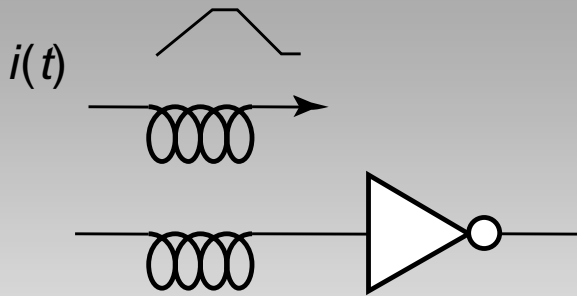
Βασικά σημεία της χαρακτηριστικής DC

- Οι τάσεις εξόδου V_{OH} και V_{OL} που αντιστοιχούν στις λογικές τιμές 0 και 1 πρακτικά συμπίπτουν με τις ιδανικές τάσεις V_{DD} και $0V$
- Η ελάχιστη τάση εισόδου που αναγνωρίζεται από το κύκλωμα ως λογικό 1 (και οδηγεί την έξοδο σε λογικό 0) αναφέρεται ως V_{IH}
- Η μέγιστη τάση εισόδου που αναγνωρίζεται από το κύκλωμα ως λογικό 0 (και οδηγεί την έξοδο σε λογικό 1) αναφέρεται ως V_{IL}
- Οι τάσεις V_{IH} και V_{IL} ορίζονται ως τα σημεία *μοναδιαίου κέρδους* της χαρακτηριστικής DC όπου η κλίση της καμπύλης είναι -1:

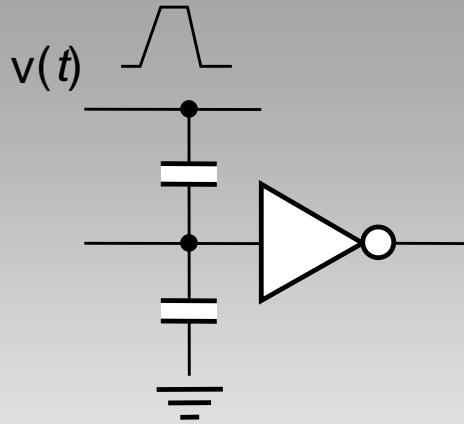
$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -1$$

- Το εύρος περιοχής μετάβασης είναι $V_{IH} - V_{IL}$
- Η τάση μετάβασης V_M του αντιστροφέα (όπου πραγματοποιείται η μετάβαση της εξόδου από 0 σε 1) ορίζεται ως το σημείο όπου η τάση εξόδου συμπίπτει με την τάση εισόδου, δηλαδή $V_{in} = V_{out}$

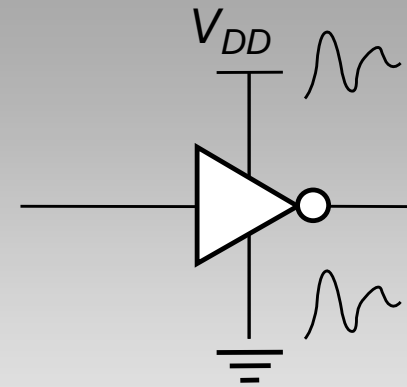
Πηγές θορύβου



Επαγωγική σύζευξη



Χωρητική σύζευξη



Θόρυβος τροφοδοσίας και γείωσης

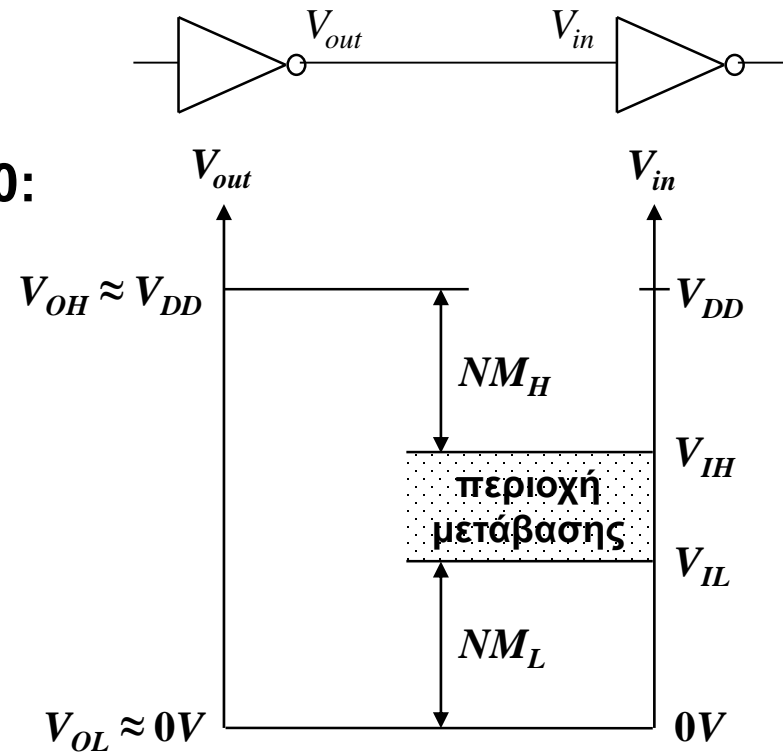
Περιθώρια θορύβου

- Περιθώριο θορύβου λογικού 1:

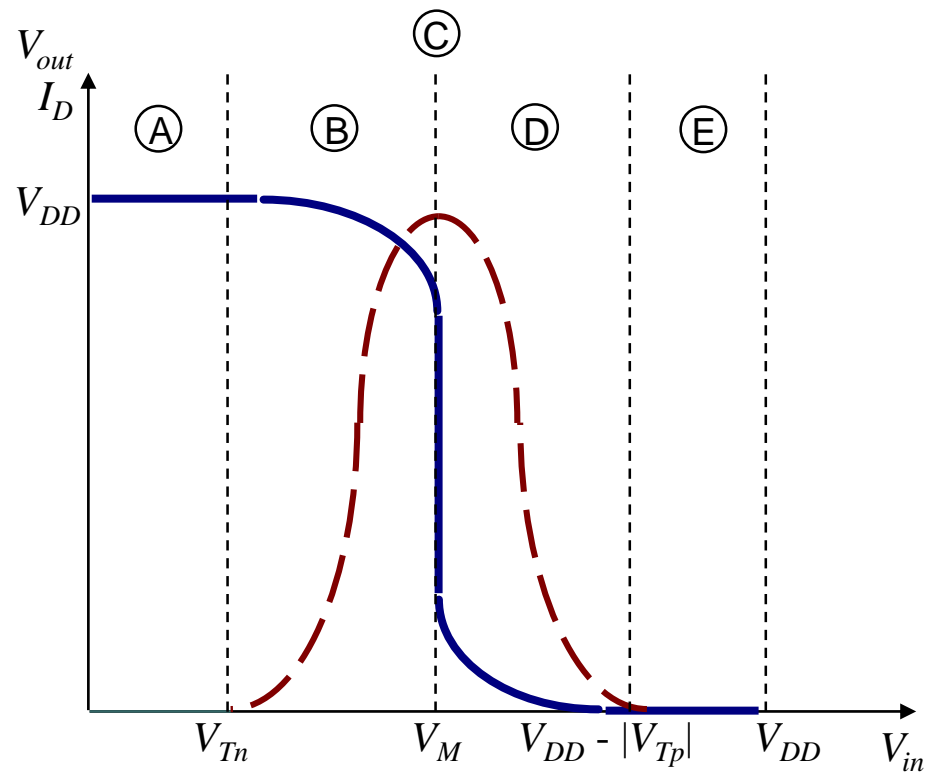
$$NM_H = V_{OH} - V_{IH}$$
$$\approx V_{DD} - V_{IH}$$

- Περιθώριο θορύβου λογικού 0:

$$NM_L = V_{IL} - V_{OL}$$
$$\approx V_{IL}$$

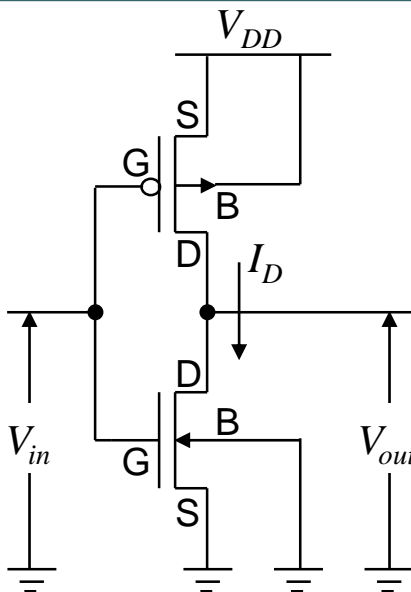


Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC



Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

$$V_{GSn} = V_{in}$$
$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$



$$I_{Dn} = I_{Dp}$$

$$V_{DSn} = V_{out}$$

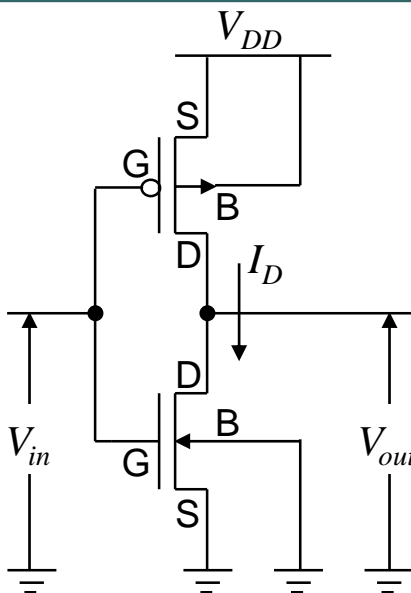
$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

- Περιοχή A: $0 \leq V_{in} < V_{Tn}$
- Περιοχή λειτουργίας nMOS τρανζίστορ: **ΑΠΟΚΟΠΗ**
- Περιοχή λειτουργίας pMOS τρανζίστορ: **ΓΡΑΜΜΙΚΗ**
- Ρεύμα υποδοχής pMOS τρανζίστορ $I_{Dp} = I_{Dn} = 0 \Rightarrow V_{SDp} = 0$
- Τάση εξόδου: $V_{out} = V_{DD}$

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

$$V_{GSn} = V_{in}$$

$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$



$$I_{Dn} = I_{Dp}$$

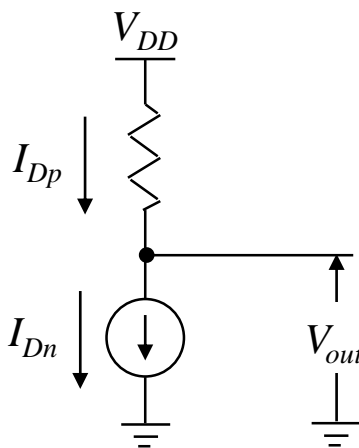
$$V_{DSn} = V_{out}$$

$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

- Περιοχή Β: $V_{Tn} \leq V_{in} < V_M$ ($V_{in} = V_{out}$)
 $V_{out} \geq V_{in} - V_{Tn} \Rightarrow V_{in} - V_{Tn} \leq V_{out}$
 $V_{DD} - V_{out} < V_{DD} - V_{in} - |V_{Tp}| \Rightarrow V_{in} + |V_{Tp}| < V_{out}$
- Περιοχή λειτουργίας nMOS τρανζίστορ: **ΚΟΡΟΣ**
- Περιοχή λειτουργίας pMOS τρανζίστορ: **ΓΡΑΜΜΙΚΗ**

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

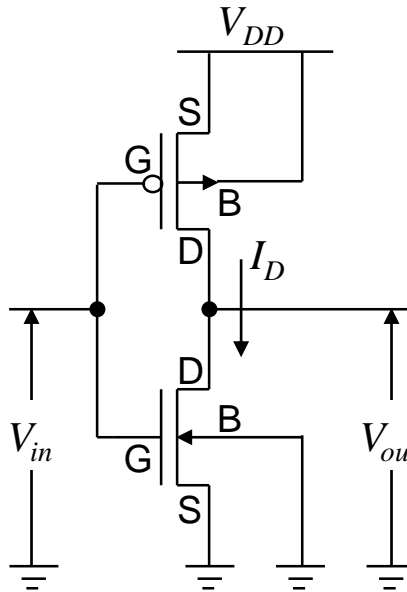
- Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα στην περιοχή B της χαρακτηριστικής:



- Ρεύμα υποδοχής nMOS τρανζίστορ: $I_{Dn} = k_n (V_{in} - V_{Tn})^2 / 2$
- Ρεύμα υποδοχής pMOS τρανζίστορ:
$$I_{Dp} = k_p \left((V_{DD} - V_{in} - |V_{Tp}|)(V_{DD} - V_{out}) - (V_{DD} - V_{out})^2 / 2 \right)$$
- Λύνοντας τη $I_{Dn} = I_{Dp}$ προκύπτει η έκφραση $V_{out} = f(V_{in})$ της χαρακτηριστικής στην περιοχή B

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

$$V_{GSn} = V_{in}$$
$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$



$$I_{Dn} = I_{Dp}$$

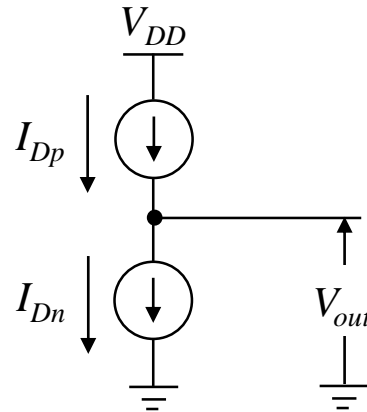
$$V_{DSn} = V_{out}$$

$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

- Περιοχή C: $V_{in} = V_M$ $V_M - V_{Tn} \leq V_{out} \leq V_M + |V_{Tp}|$
(Η περιοχή αυτή υφίσταται μόνο για μια τιμή της τάσης εισόδου)
- Περιοχή λειτουργίας nMOS τρανζίστορ: ΚΟΡΟΣ
- Περιοχή λειτουργίας pMOS τρανζίστορ: ΚΟΡΟΣ

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

- Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα στην περιοχή C της χαρακτηριστικής:



- Στην περιοχή αυτή (δηλαδή στο σημείο $V_{in} = V_M$) παρατηρείται η μέγιστη τιμή του ρεύματος του αντιστροφέα (χαρακτηριστική $I_D = f(V_{in})$)

- Ρεύμα υποδοχής nMOS τρανζίστορ: $I_{Dn} = k_n (V_M - V_{Tn})^2 / 2$

- Ρεύμα υποδοχής pMOS τρανζίστορ: $I_{Dp} = k_p (V_{DD} - V_M - |V_{Tp}|)^2 / 2$

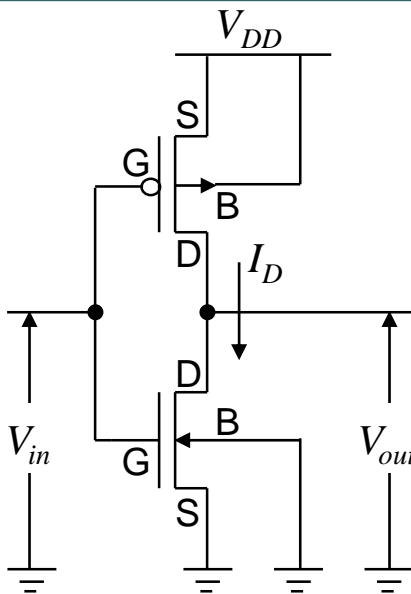
- Λύνοντας τη $I_{Dn} = I_{Dp}$ έχουμε:
[Sedra/Smith – εξ. (14.39)]

$$V_M = \left(V_{DD} - |V_{Tp}| + V_{Tn} \sqrt{\frac{k_n}{k_p}} \right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{k_n}{k_p}} \right)^{-1}$$

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

$$V_{GSn} = V_{in}$$

$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$



$$I_{Dn} = I_{Dp}$$

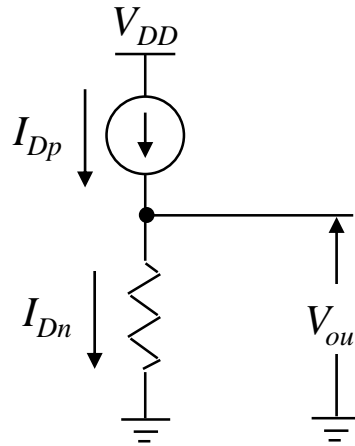
$$V_{DSn} = V_{out}$$

$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

- Περιοχή D: $V_M < V_{in} \leq V_{DD} - |V_{Tp}|$
 $V_{out} < V_{in} - V_{Tn}$
 $V_{DD} - V_{out} \geq V_{DD} - V_{in} - |V_{Tp}| \Rightarrow V_{out} \leq V_{in} + |V_{Tp}|$
- Περιοχή λειτουργίας nMOS τρανζίστορ: ΓΡΑΜΜΙΚΗ
- Περιοχή λειτουργίας pMOS τρανζίστορ: ΚΟΡΟΣ

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

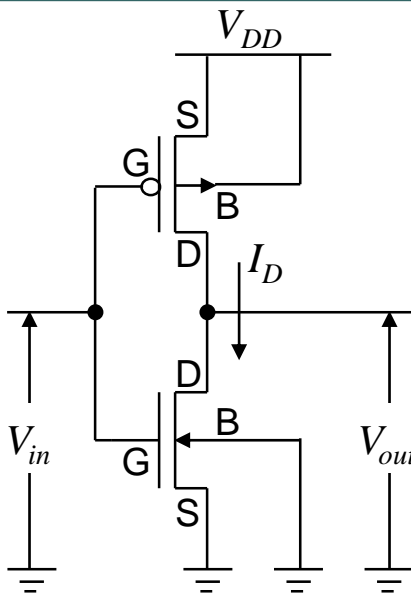
- Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα στην περιοχή D της χαρακτηριστικής:



- Ρεύμα υποδοχής nMOS τρανζίστορ: $I_{Dn} = k_n \left((V_{in} - V_{Tn})V_{out} - V_{out}^2 / 2 \right)$
- Ρεύμα υποδοχής pMOS τρανζίστορ: $I_{Dp} = k_p \left(V_{DD} - V_{in} - |V_{Tp}| \right)^2 / 2$
- Λύνοντας τη $I_{Dn} = I_{Dp}$ προκύπτει η έκφραση $V_{out} = f(V_{in})$ της χαρακτηριστικής στην περιοχή D

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC

$$V_{GSn} = V_{in}$$
$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$



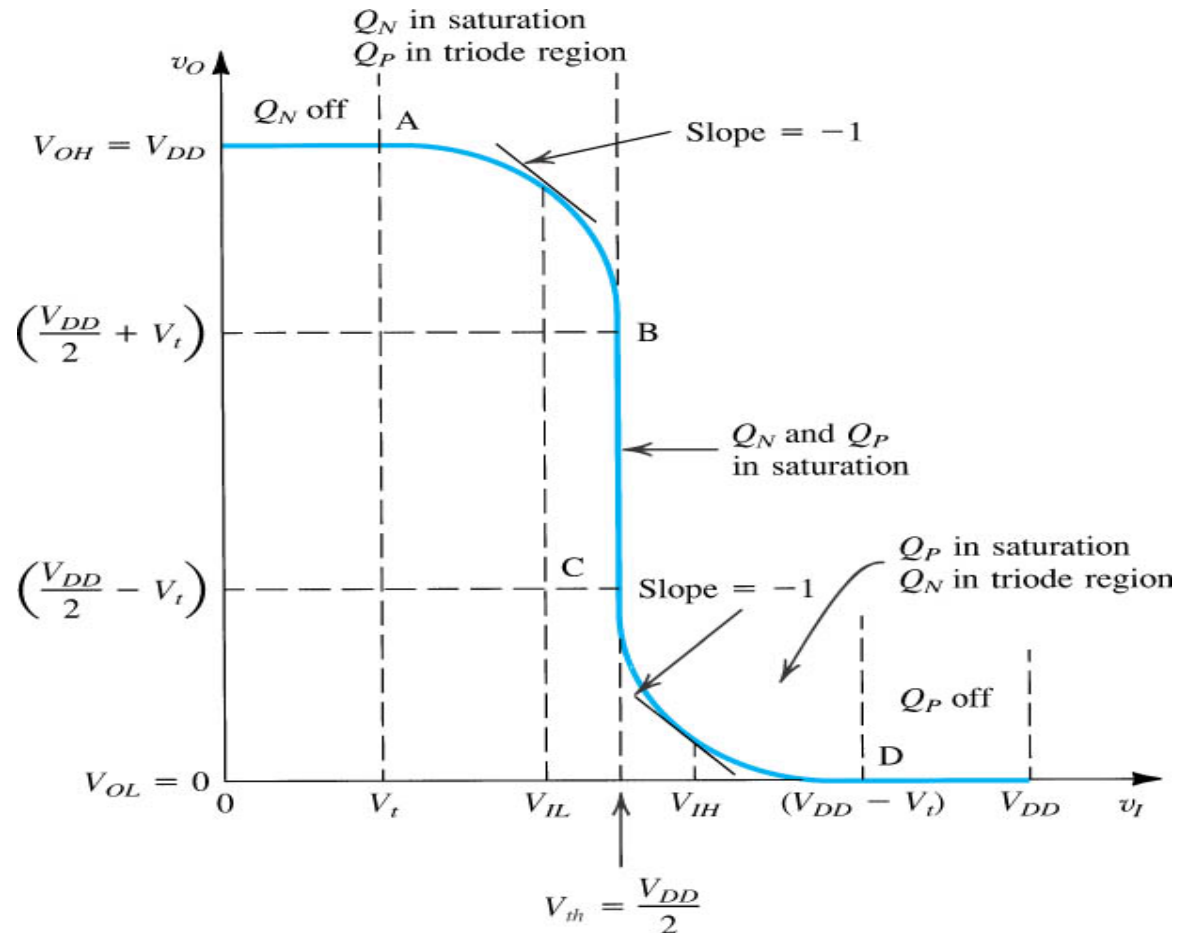
$$I_{Dn} = I_{Dp}$$

$$V_{DSn} = V_{out}$$

$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

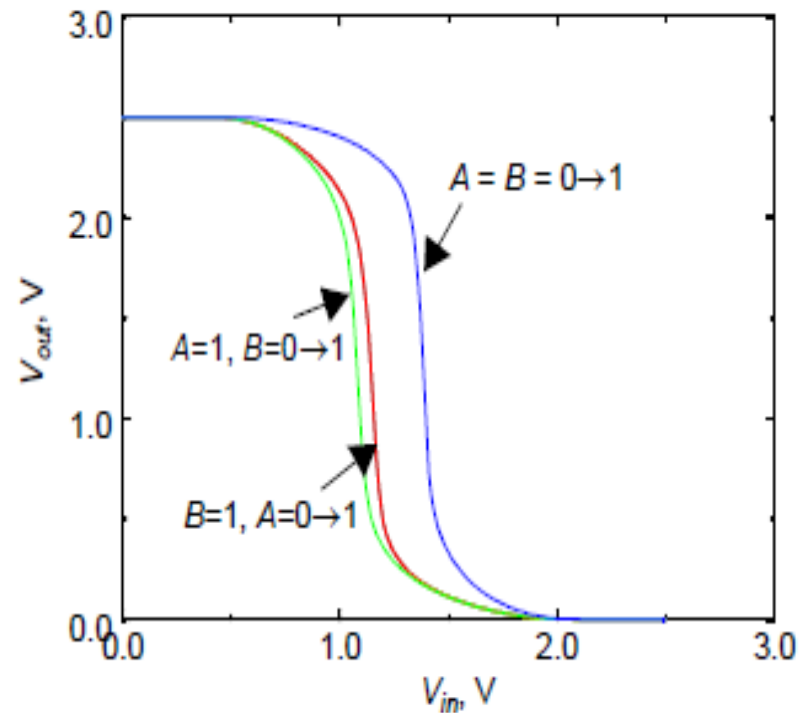
- Περιοχή Ε: $V_{DD} - |V_{Tp}| < V_{in} \leq V_{DD}$
- Περιοχή λειτουργίας nMOS τρανζίστορ: **ΓΡΑΜΜΙΚΗ**
- Περιοχή λειτουργίας pMOS τρανζίστορ: **ΑΠΟΚΟΠΗ**
- Ρεύμα υποδοχής nMOS τρανζίστορ $I_{Dn} = I_{Dp} = 0 \Rightarrow V_{DSn} = 0$
- Τάση εξόδου: $V_{out} = 0$

Αναλυτικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής DC



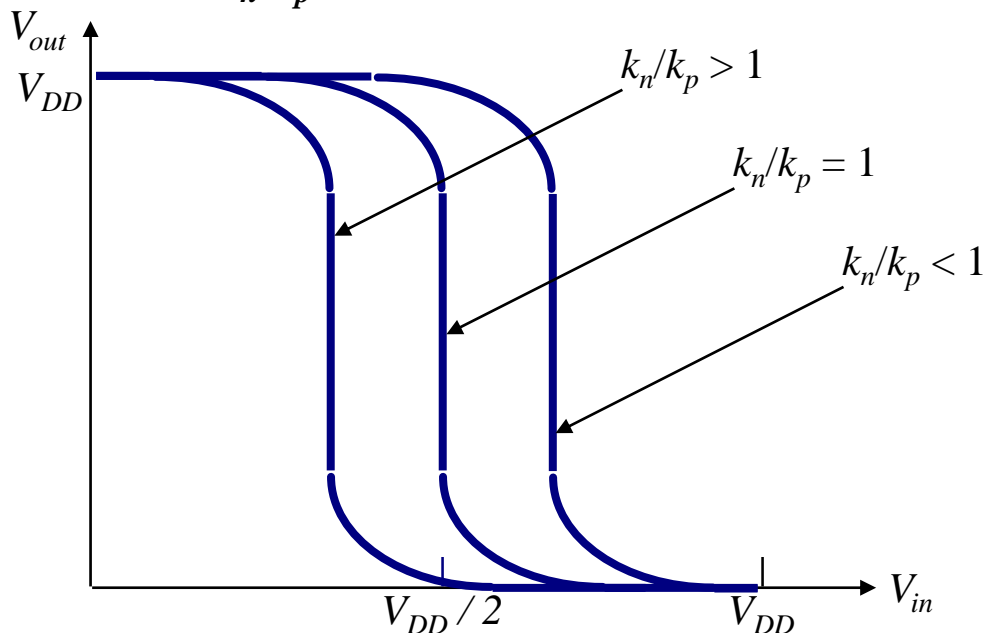
Χαρακτηριστική DC γενικών πυλών CMOS

- Η χαρακτηριστική DC (καθώς και τα βασικά σημεία της V_{IH} , V_{IL} και V_M) για μια γενική πύλη CMOS εξαρτάται από τις συγκεκριμένες εισόδους της πύλης
- Μια ενδεικτική χαρακτηριστική DC για γενικές πύλες CMOS μπορεί να εξαχθεί με κατασκευή ενός *ισοδύναμου αντιστροφέα* (βλ. αντίστοιχο εδάφιο καθυστέρησης γενικών πυλών)



Σχεδίαση αντιστροφέα με βάση τη χαρακτηριστική DC

- Η βασική παράμετρος σχεδίασης του αντιστροφέα ως προς τη χαρακτηριστική DC είναι η τάση μετάβασης V_M
- Με δεδομένη την τάση τροφοδοσίας V_{DD} και τις τάσεις κατωφλίου των τρανζίστορ V_{Tn} και $|V_{Tp}|$, η V_M καθορίζεται από την τιμή του λόγου k_n/k_p (λόγος διαγωγιμοτήτων)
- Επίδραση του λόγου k_n/k_p στη θέση της χαρακτηριστικής DC:



Σχεδίαση αντιστροφέα με βάση τη χαρακτηριστική DC

- Εάν είναι $V_{Tn} = |V_{Tp}|$ τότε για $k_n/k_p = 1$ προκύπτει ότι η V_M θα βρίσκεται ακριβώς στο ήμισυ της τάσης τροφοδοσίας (όπως στη χαρακτηριστική του ιδανικού αντιστροφέα), δηλαδή $V_M = V_{DD}/2$
- Καθώς η κινητικότητα των φορέων ηλεκτρονίων είναι *μεγαλύτερη* σε σχέση με εκείνη των οπών, δηλαδή $\mu_n/\mu_p = k_n'/k_p' \equiv r > 1$, θα πρέπει $W_p/L_p = r(W_n/L_n)$ προκειμένου να είναι συνολικά $k_n/k_p = 1$
- Τα μήκη L_n και L_p κατασκευάζονται στην *ελάχιστη* διάσταση που επιτρέπεται από τη δοσμένη τεχνολογία, οπότε ο μοναδικός βαθμός ελευθερίας στη σχεδίαση των τρανζίστορ είναι τα πλάτη W_n και W_p
 \Rightarrow θα πρέπει επομένως $W_p = rW_n$ ώστε $k_n/k_p = 1$

Σχεδίαση αντιστροφέα με βάση τη χαρακτηριστική DC

- Με δεδομένο λόγο W_p/W_n , οι τάσεις V_{IL} και V_{IH} υπολογίζονται με παραγωγή της $V_{out} = f(V_{in})$ (ή της $I_{Dn} = I_{Dp}$) σε κάθε μια από τις δύο περιοχές B και D όπου εμφανίζονται αντίστοιχα, και κατόπιν με ανάθεση $dV_{out}/dV_{in} = -1$
- Ειδικά για $W_p = rW_n$ (δηλ. $k_n/k_p = 1$) και $V_{Tn} = |V_{Tp}| \equiv V_T$ η διαδικασία αυτή δίνει:

$$V_{IL} = \frac{1}{8}(3V_{DD} + 2V_T) \qquad V_{IH} = \frac{1}{8}(5V_{DD} - 2V_T)$$

[Sedra/Smith – εξ. (14.35), (14.36)]