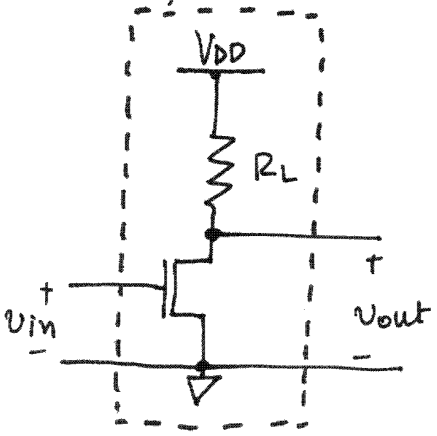


Εισαγωγή στους ενισχυτές με τρανζίστορ

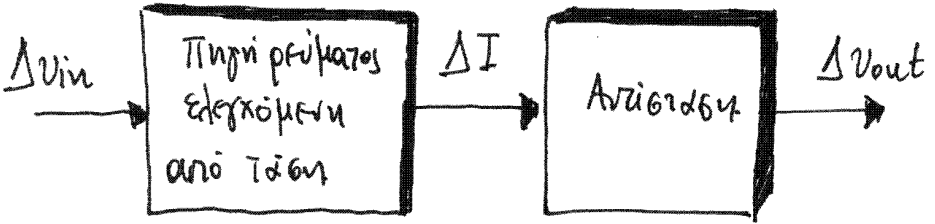
Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τη σχεδίαση απλών ενισχυτών με τρανζίστορ, θα αναλύσουμε τη συμπεριφορά τους και θα μελετήσουμε τους περιορισμούς που επιβάλλει η σχεδίαση τους. Ο ενισχυτής με τον οποίο θα ασχοληθούμε έχει την εξής δομή (θυμίζω τον ΝΜΟΣ αντιστροφέα που σχεδιάσαμε στα ψηφιακά κυκλώματα):



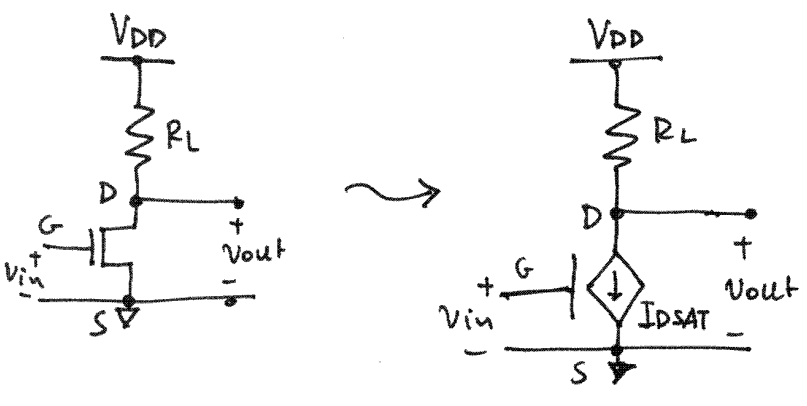
Ο εκπομπός του ενισχυτή είναι ως ενισχυτής των τάσεων του σημερινού είσοδου  $v_{in}$  χωρίς να αλλάξω τη μορφή του. Στην εισαγωγική αυτή ενότητα δεν θα ασχοληθούμε με ενισχυση σημάτων υψηλής συχνότητας και θα δειχθεί πως τα σημάδια εισόδου μεταβάλλονται γρήγορα, ανεξάρτητα του χρόνου.

Ουσιαστικά η βασική αρχή στην οποία βασίζονται η λειτουργία του απλού ενισχυτή που σχεδιάσαμε είναι η εξής:

- 1. Μετέτρεψε την τάση εισόδου σε ρεύμα χρησιμοποιώντας μια εξαρτημένη πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση. (Τη λειτουργία αυτή περιμένουμε να την εκτελέσει το τρανζίστορ μόλις όταν βρούμε την περιοχή του κορεσμού.)
- 2. Μετέτρεψε το ρεύμα που πήρε από το πρώτο βήμα πίσω σε τάση χρησιμοποιώντας μια αντίσταση. (Η  $R_L$  για το δικό μας ενισχυτή)
- 3. Το κέρδος τάσης που θα επιτύχει ο ενισχυτής είναι  $\frac{\Delta v_{out}}{\Delta v_{in}}$



κοιτώντας τις τρεις βασικές αρχές διαπιστώνουμε πως το πρώτο βήμα που πρέπει να εμβαρδιώσουμε είναι το τρανζίστορ μας να λειτουργεί σαν μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση. Για να συμβεί αυτό πρέπει το NMOS



τρανζίστορ να λειτουργεί σωστά στην περιοχή του κορεσμού. Αν το τρανζίστορ φύγει από αυτή την περιοχή τότε είτε θα είναι κλειστό αλλά δεν θα έχουμε ρεύμα και επομένως ούτε είσοδο της εξόδου,

είτε θα λειτουργεί στη γραμμική περιοχή και θα συμπεριφέρεται σαν μια μη-γραμμική αντίσταση. Για να είναι λοιπόν το τρανζίστορ στο κορεσμό πρέπει να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα δύο συνθήκες.

- ⊙  $V_{GS} \gg V_T$  ώστε το τρανζίστορ να αχθεί
- ⊙  $V_{DS} \gg V_{DSAT} \Rightarrow V_{DS} \gg V_{GS} - V_T$  ώστε να είμαστε στην περιοχή του κορεσμού.

Παρατηρώντας το κύκλωμα μας έχουμε  $V_{in} = V_{GS}$  και  $V_{out} = V_{DS}$ . Έτσι προκύπτουν δύο πολύ σημαντικές συνθήκες για την ορθή λειτουργία του ενισχυτή.

$$V_{in} \gg V_T$$

$$V_{out} \gg V_{in} - V_T$$

Έχοντας υπόψη μας αυτούς τους περιορισμούς ας ξεκινήσουμε την ανάλυση του κυκλώματος. Στην περιοχή του κορεσμού το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ και κατά συνέπεια την αντίσταση  $R_L$  είναι το εξής:

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

Το ρεύμα αυτό προκαλεί μια πτώση τάσης στα άκρα της  $R_L$  η οποία είναι ίση με:

$$\Delta V_{RL} = I_{DSAT} \cdot R_L \Rightarrow V_{DD} - V_{out} = I_{DSAT} \cdot R_L \Rightarrow \underline{V_{out} = V_{DD} - I_{DSAT} \cdot R_L}$$

Οι σχέσεις που προέκυψαν για το ρεύμα  $I$  την τάση εξόδου αμέσως αποκαθάρσιν τους περιορισμούς ώστε το τρανζίστορ να λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού. Για παράδειγμα οποιαδήποτε αύξηση του  $v_{in}$  πέρα των  $V_T$  οδηγεί σε τετραγωνική αύξηση του ρεύματος  $I_{DSAT}$  το οποίο με τη σειρά του προκαλεί τη μείωση της τάσης εξόδου  $v_{out}$ .

Έτσι όσο πιο πολύ αυξηθεί το  $v_{in}$  τόσο πιο πολύ μειώνεται η  $v_{out}$  δυνάμεινται των ικανοποιήσιν της βασικής συνθήκης πως  $v_{out} \geq v_{in} - V_T$ .

Έτσι, αυτό που πρώτα θα ήταν καλό να ανακαλύψουμε είναι ποια είναι η μεγαλύτερη και ποια η μικρότερη τιμή του  $v_{in}$  που επιτρέπει το τρανζίστορ να λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού.

Ξέρουμε την μικρότερη τιμή των  $v_{in}$  έχουμε ήδη. Πρέπει  $v_{in} \geq V_T$  αλλιώς το τρανζίστορ δεν θα αγει. Τώρα μένει να ανακαλύψουμε το πάνω όριο.

Γνωρίζουμε ότι σε όλη τη περίπτωση πρέπει  $v_{out} \geq v_{in} - V_T$ . Η ακραία τιμή που επιτρέπει κάτι τέτοιο (μικρότερη τιμή του  $v_{in}$ ) είναι  $v_{in} = v_{out} + V_T$ .

Εφόσον  $v_{out} = V_{DD} - I_{DSAT} \cdot R_L = V_{DD} - \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (v_{in} - V_T)^2 \cdot R_L$  προκύπτει η εξίσωση

$$\frac{1}{2} R_L k \cdot (v_{in} - V_T)^2 + (v_{in} - V_T) - V_{DD} = 0$$

όπου θεωρώντας πως η γεωμετρία του τρανζίστορ είναι βραδερή  $k = \frac{W}{L} \mu \cdot C_{ox}$ .

Από την λύση της εξίσωσης προκύπτει ότι  $v_{in} - V_T = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2V_{DD} \cdot R_L \cdot k}}{R_L \cdot k}$

δηλαδή  $v_{in(max)} = V_T + \frac{-1 + \sqrt{1 + 2V_{DD} \cdot R_L \cdot k}}{R_L \cdot k}$

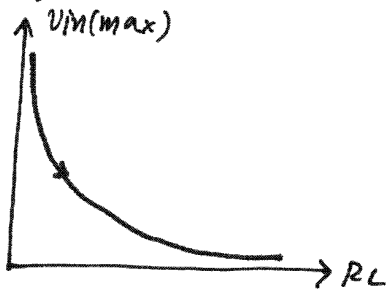
• Αν το  $v_{in}$  πάρει μεγαλύτερη τιμή τότε το τρανζίστορ περνάει στην γραμμική περιοχή λειτουργίας.

Έτσι σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει

$$V_T \leq V_{in} \leq V_T + \frac{\sqrt{1 + 2V_{DD}R_Lk}}{R_Lk} - \frac{1}{R_Lk}$$

● Παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλη η τάση τροφοδοσίας  $V_{DD}$  τόσο μεγαλύτερο  $\Rightarrow$  το πάνω όριο για το  $V_{in}$ . Αυτό είναι λογικό γιατί η αύξηση του  $V_{DD}$  δίνει ούτως ή άλλως μεγαλύτερο "χώρο" για ενίσχυση.

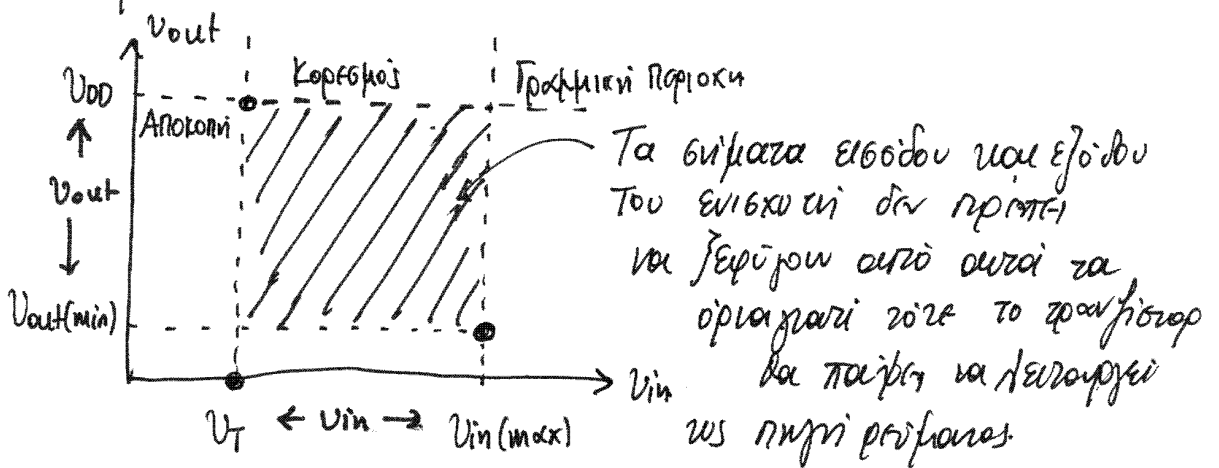
● Αντίθετα όσο αυξάνουμε την αντίσταση  $R_L$  τόσο μειώνουμε το πάνω όριο του  $V_{in}$ .



Τα όρια  $V_{in(min)}$  και  $V_{in(max)}$  για την τάση εισόδου φράσσουν αυστηρώς και τις δυνατές τιμές για την τάση εξόδου. Η μέγιστη τιμή της εξόδου επιτυγχάνεται όταν  $V_{in} = V_T$  (μόδις που έχει ανοίξει το τρανζίστορ) ενώ η ελάχιστη όταν  $V_{in} = V_{in(max)}$  (Για ίδια που το τρανζίστορ παραμένει στον κορεσμό). Έτσι τα όρια για την τάση  $V_{out}$  είναι τα εξής.

$$V_{DD} \geq V_{out} \geq \frac{\sqrt{1 + 2V_{DD}R_Lk}}{R_Lk} - \frac{1}{R_Lk}$$

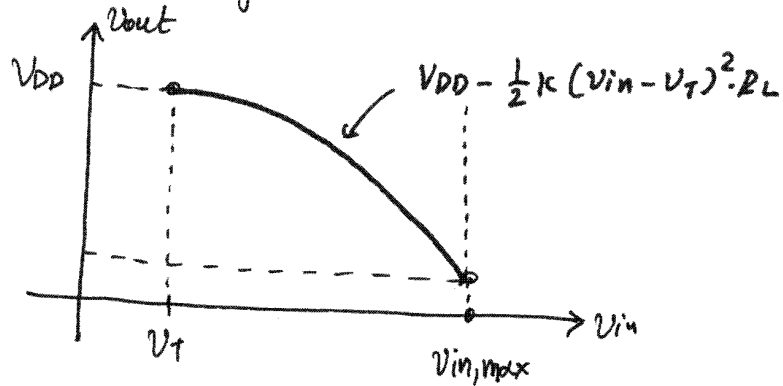
Ας ζωγραφίσουμε σε ένα κοινό διάγραμμα τα όρια του  $V_{in}$  και  $V_{out}$  θα προκύψει το εξής αποτέλεσμα:



Τυπώσουμε ότι για  $v_{in} \geq v_T$  ή  $v_{in} \leq v_{in,max}$  ότι

$$v_{out} = V_{DD} - \frac{1}{2} k \cdot (v_{in} - v_T)^2 \cdot R_L$$

εξόδου εξόδου θα έχει την εξής μορφή.



Έχοντας μια εικόνα των ορίων εισόδου-εξόδου και της σχεδύμενης μεταβολής του αμ. μελετήσουμε τη σημαντικότερη παράμετρο του κυκλώματος, διαφορά των εντάσεων. Αν υπολογίσουμε το λόγο  $\frac{v_{out}}{v_{in}}$  προκύπτει ότι

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{V_{DD}}{v_{in}} - \frac{1}{2} k \cdot R_L \frac{(v_{in} - v_T)^2}{v_{in}}$$

Για τη περιοχή που μας ενδιαφέρουν

ο λόγος  $\frac{v_{out}}{v_{in}} > 1$  πράγμα που σημαίνει ότι δηλαδή η έξοδος είναι μια ενισχυμένη τιμή της εισόδου. Ας δούμε ένα παράδειγμα.  $V_{DD} = 10V$   $k = 1 \mu A/V^2$   $R_L = 10k\Omega$  και  $v_T = 1V$ . Τότε προκύπτει ότι  $v_{out} = 10 - 5(v_{in} - 1)^2$

$v_{in}$	$v_{out}$
1	10
1.4	9.2
1.5	8.8
1.6	8.2
1.7	7.55
1.8	6.8
1.9	5.95
2	5
2.1	3.95
2.2	2.8
2.3	1.55
2.32	1.28
2.35	0.8875
2.4	0.2

Η έξοδος σε μια περιοχή τιμών της  $v_{in}$  είναι όπως ενισχυμένη. Για παράδειγμα η αλλαγή κατά  $0.1V$  στην είσοδο από  $1.9V \rightarrow 2V$  οδηγεί σε μια αλλαγή στην έξοδο από  $5.95 \rightarrow 5V$  :  $\Delta v_{out} = 0.95V$   
 Άρα  $\frac{\Delta v_{out}}{\Delta v_{in}} = 9.5$

Αντίστοιχα όταν η είσοδος κινείται γύρω από το  $1.5V$  με εύρος  $\pm 100mV = \pm 0.1V$  τότε η έξοδος αυξομικτώνεται κατά  $\pm 600mV$ . Έτσι το κέρδος τείνει βέβαια στην περιοχή είναι  $\frac{\Delta v_{out}}{\Delta v_{in}} = 6$

Παρατηρώμε έτσι πως αντιστοιχεί σε ποια περιοχή κινείται το σήμα εισόδου τόσο μεταβάλλεται και το κέρδος που παίρνουμε. Επίσης, αν η είσοδος της επιτρέπεται να έχει μεγάλες διακυμάνσεις, δηλαδή να μπορεί να παίρνει τιμές από 1 Volt έως και 2 Volt εναρτύσει του χρόνου τότε το κέρδος της θα άλλαζε μη-γραμμικά με το χρόνο. Δηλαδή για τιμές κοντά στο 1 Volt το κέρδος θα ήταν μεταξύ 4 & 5 ενώ κοντά στα 2 Volt το κέρδος θα ήταν περίπου ίσο με 10. Τέλος μια επιπλέον παρατήρηση είναι πως το σήμα εισόδου δεν μπορεί να κινηθεί έξω από τα όρια του 1 Volt και περίπου 2-3V

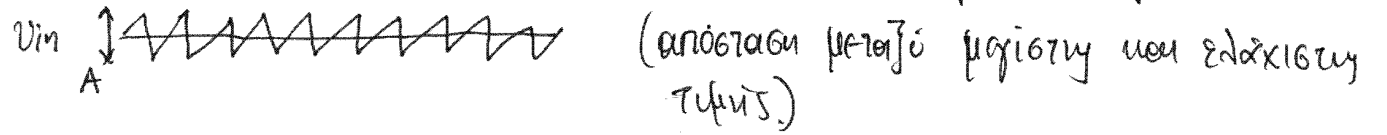
Έτσι, στα ερωτήματα που καθορίζουμε να απαντήσουμε στη συνέχεια είναι δυο:

- Πως θα εξασφαλίσουμε ότι τα σήματα εισόδου θα κινούνται στη σωστή περιοχή λειτουργίας του ενισχυτή (operating point.)
- Πως θα εξασφαλίσουμε ότι το κέρδος του ενισχυτή είναι σχεδόν γραμμικό για όλη τη επιτρεπόμενη τιμή του σήματος εισόδου.

Το πρώτο ερώτημα θα το απαντήσουμε στη συνέχεια ενώ το δεύτερο θα το αναλύσουμε στο επόμενο σετ σημειώσεων που αφορούν την ανάλυση μικρού σήματος των ενισχυτών.

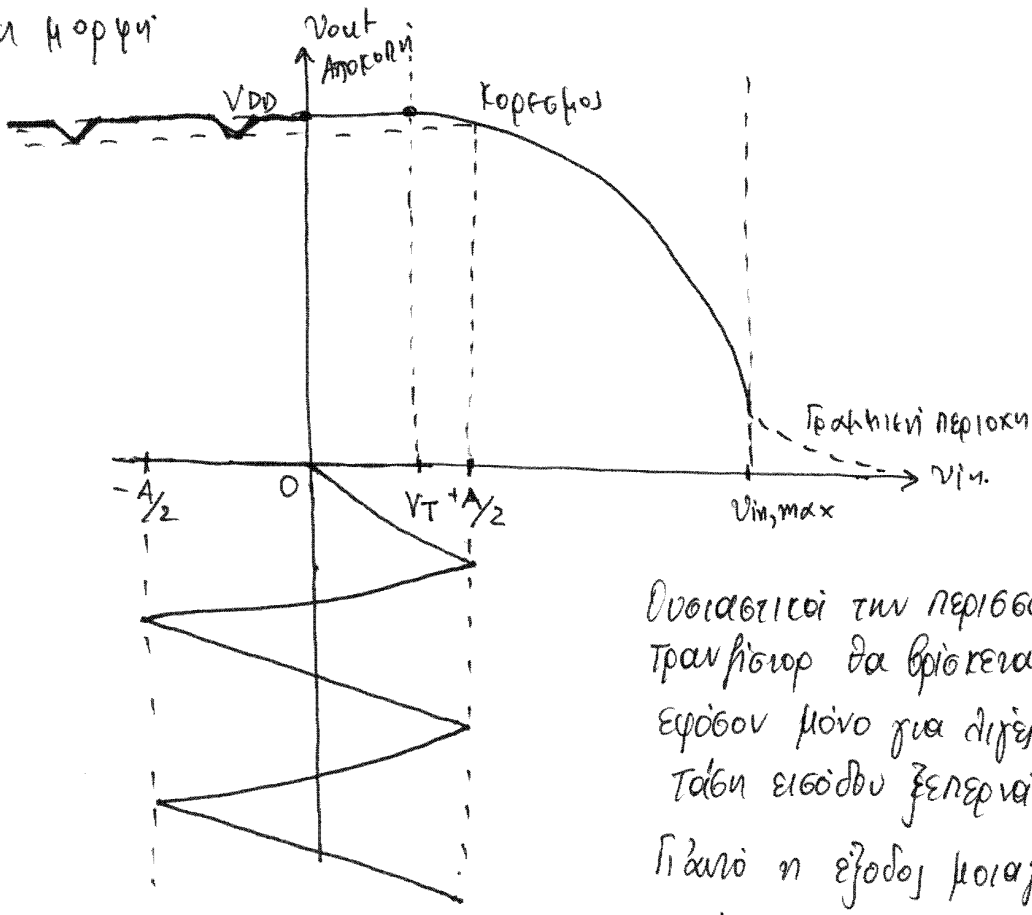
Επιλογή σημείου λειτουργίας (πρόβλεψη του ενισχυτή.)

Για να εξασφαλίσουμε ότι ο ενισχυτής θα λειτουργεί στη περιοχή που μόλις υποδείξαμε πρέπει να "μετασχηματίσουμε" το σήμα εισόδου. Ο λόγος γι' αυτό είναι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι το τρανζίστορ να παραμένει στον κορεστικό ανεξάρτητα από τη θετική ή αρνητική μεταβίβαση του σήματος εισόδου. Υποθέστε για τα παρακάτω παραδείγματα πως το σήμα εισόδου είναι μια τριγωνική ωμικτομορφή η οποία διακυμαίνεται από τάση peak-to-peak 4 Volts



Αν η τριγωνική ακολουθία κινούναι γύρω από τα 0 Volts δηλαδή επηρεάζει τιμές μεταξύ  $+\frac{A}{2}$  και  $-\frac{A}{2}$  τότε η συμπεριφορά του ενισχυτή δεν θα έμοιαζε σε τίποτα από αυτό που περιμέναμε. Θα ποεί ότι  $A/2 > V_T$  επιζήμιους

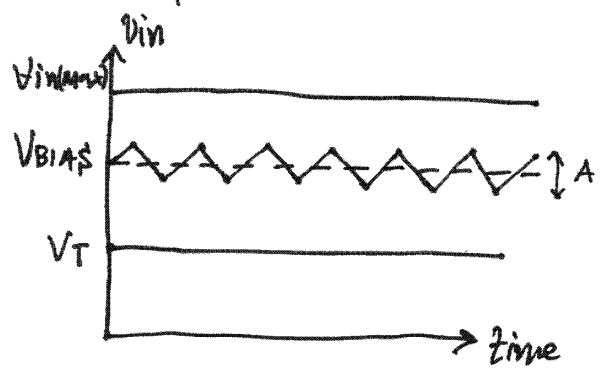
στο τρανζίστορ να αρά. Τότε η έξοδος του ενισχυτή θα είχε μία περίεργη μορφή



Ουσιαστικά την περιβάλλει η ώρα το τρανζίστορ θα βρίσκεται στην αποκοπή εφόσον μόνο για λίγες στιγμές η τάση εισόδου ξεπερνάει το  $V_T$ . Γι' αυτό η έξοδος μοιάζει να είναι συνεχής στο  $V_{DD}$  εκτός από τη λίγη στιγμή που  $V_{in} \geq V_T$ .

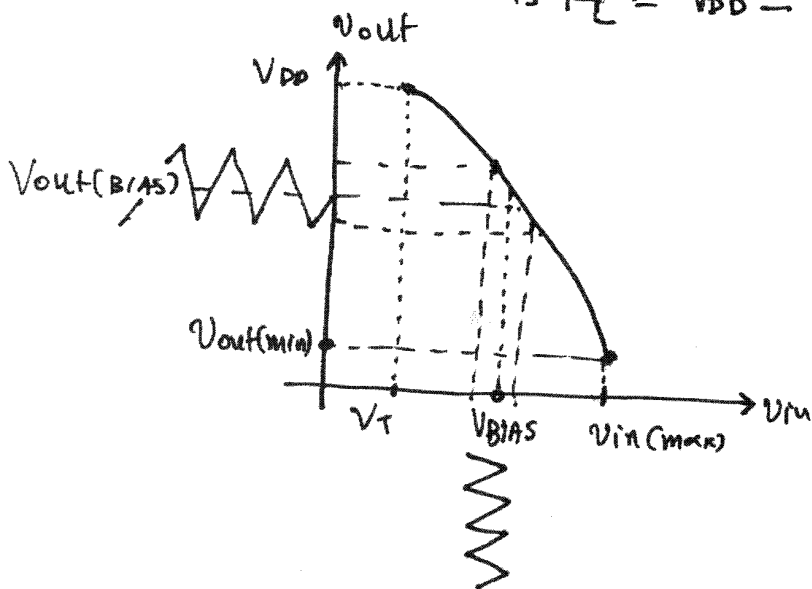
Στην αντίθετη περίπτωση που η είσοδος δεν ξεπερνάει το  $V_T$  του τρανζίστορ τότε η έξοδος θα είναι μόνιμα στο  $V_{DD}$  αφού το τρανζίστορ θα βρίσκεται στην περιοχή της αποκοπής μη επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος.

Έτσι για να καταφέρουμε το τρανζίστορ να λειτουργεί στην περιοχή του κορφέου περικλείοντας τη ζητούμενη ενίσχυση θα έπρεπε με κάποιο τρόπο να μεταφέρουμε το σήμα εισόδου γύρω από μια σταθερή τιμή  $V_{bias}$  έτσι ώστε οι τιμές  $V_{bias} - \frac{A}{2}$  και  $V_{bias} + \frac{A}{2}$  να παρέμειναν μέσα στο  $V_T$  και  $V_{in(max)}$  για το σήμα εισόδου.



Το σήμα εισόδου παύει εντός των απαιτούμενων ορίων με αποτέλεσμα το τρανζίστορ να παραμένει στον κορφέο.

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου σημείου λειτουργίας για το βήμα εισόδου (DC bias point) γύρω από το οποίο παρατηρούμε τη αλλαγή της εισόδου, καθορίζει ένα σταθερό σημείο λειτουργίας για την έξοδο γύρω από την οποία παρατηρούμε τη ενισχυμένη αλλαγή της εξόδου. Το ίδιο συμβαίνει και για τη ασυμπίεση του ρεύματος. Για παράδειγμα αν η είσοδος που μεταβαλλεται στο χρόνο "μεταφερθεί" γύρω από το σημείο  $V_{bias}$  τότε το ρεύμα που θα διαρρέει το κύκλωμα ακόβη και όταν δεν υπάρχει βήμα εισόδου θα είναι  $I_{BIAS} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{bias} - V_T)^2$ . Το ρεύμα αυτό καθορίζει και το σημείο λειτουργίας της εξόδου μέσω της σχέσης  $V_{out}(bias) = V_{DD} - I_{BIAS} \cdot R_L = V_{DD} - \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{bias} - V_T)^2 R_L$ .



Η επιλογή του καλύτερου  $V_{BIAS}$  εξαρτάται από πολλές παραμέτρους.

- Η επιλογή του σημείου λειτουργίας καθορίζει πόσο μεγάλη διακύμανση επιτρέπεται στο βήμα εισόδου, ώστε, ούτε η μέγιστη τιμή  $V_{BIAS} + \frac{A}{2}$  να μην ξεπερνάει το επιτρεπτό  $V_{in}(max)$ , αλλά, ούτε και η ελάχιστη τιμή της εισόδου  $V_{BIAS} - \frac{A}{2}$  να μην γίνεται μικρότερη από  $V_T$ . Για να πετύχουμε τη μέγιστη δυνατή διακύμανση θα επιλέγαμε το  $V_{BIAS}$  να είναι στο μέσο μεταξύ  $V_T$  και  $V_{in}(max)$ .
- Όπως είδαμε νωρίτερα όσο η είσοδος πλησιάζει το  $V_{in}(max)$  τόσο μικραίνει το κέρδος που μπορούμε να πετύχουμε. Με άλλα λόγια δε θα διαλέγαμε ένα  $V_{BIAS}$  ποσό κοντά στο  $V_{in}(max)$ . Η σχέση του κέρδου με το σημείο

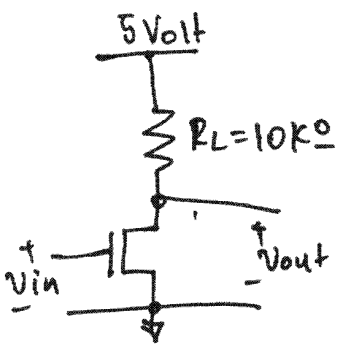


Λειτουργία θα αναλυθεί στο επόμενο σετ βηματώσεων.

● Επίσης η επιλογή του βημίου λειτουργίας μπορεί να περιοριστεί από την καταπόνηση ισχύος του ενισχυτή. Αυτό αυτόματα φράσσει το ρατζά λειτουργίας του ενισχυτή επιβάλλοντας μια συγκεκριμένη τιμή για το  $V_{BIAS}$  μέσω του  $I_{BIAS} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{BIAS} - V_T)^2$

● Τέλος μια άλλη παράμετρος που μπορεί να καθορίσει την επιλογή του βημίου λειτουργίας είναι η μέγιστη επιτρεπτή διακύμανση της εξόδου. Για παράδειγμα σε κάποιες εφαρμογές μπορεί να θέλουμε το  $v_{out}$  να είναι πάντα μεγαλύτερο μιας συγκεκριμένης τιμής. Έτσι εφόσον το ενισχυτήσ βήμα της εξόδου θα κινείται γύρω από το  $v_{out}(BIAS)$  θα πρέπει αυτίγνωικα να καθορίσουμε το  $V_{BIAS}$  ώστε το  $v_{out}(BIAS) = V_{DD} - I_{BIAS} R_L = V_{DD} - \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{BIAS} - V_T)^2 \cdot R_L$  να σέβεται τα όρια που θέλουμε.

Για παράδειγμα θεωρήστε τον παρακάτω ενισχυτή:



Για το τρανζίστορ  $k = \mu C_{ox} \frac{W}{L} = 1 \text{ mA/V}^2$

και  $V_T = 1 \text{ Volt}$ .

Οι έγκυρες τιμές της εισόδου είναι  $v_{in(min)} = V_T = 1 \text{ Volt}$

και  $v_{in(max)} = V_T + \frac{\sqrt{1 + 2V_{DD} \cdot R_L \cdot k}}{R_L k} = 1.9 \text{ Volt}$

Άρα  $1 \leq v_{in} \leq 1.9$ . Το βήμα εισόδου μπορεί να κινηθεί μόνο μέσα β' αυτήν την περιοχή ώστε το τρανζίστορ να είναι στον κορεσμό. Έτσι αν θέλαμε να μεγιστοποιήσουμε την δυνατή διακύμανση της εισόδου θα ήσαν καλό να διαλέξουμε για  $V_{BIAS}$  το μέσο του διαστήματος,  $V_{BIAS} = 1.45 \text{ Volt}$

Η επιλογή αυτή καθορίζει πως το ρεύμα πόρωσης  $I_{BIAS}$  που θα διαρρέει τον ενισχυτή ανεξάρτητα της εισόδου θα είναι  $I_{BIAS} = \frac{1}{2} k (V_{BIAS} - V_T)^2 = 0.4 \text{ mA}$

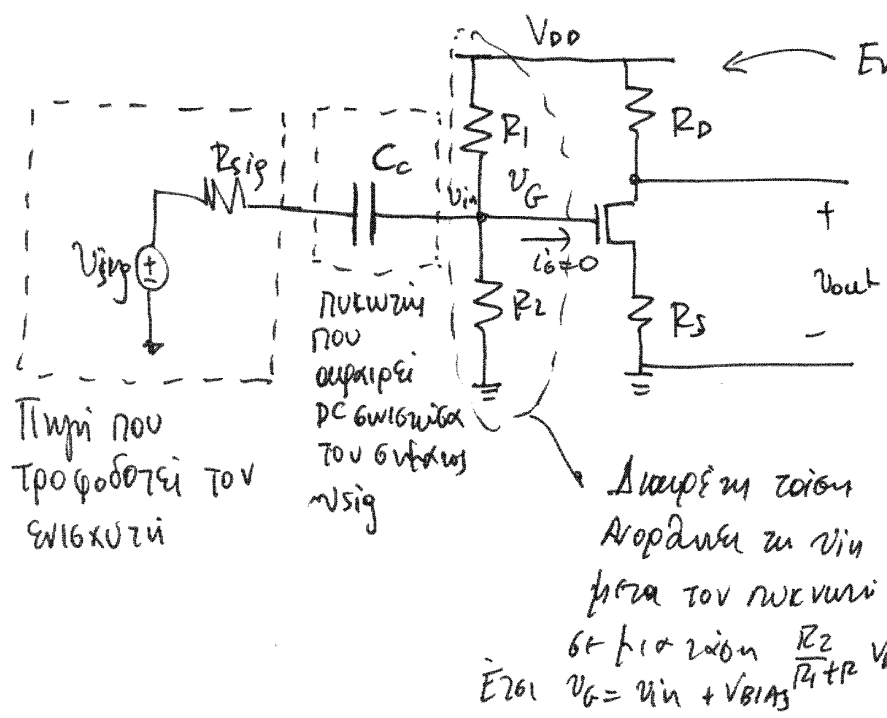
(Φυσικά κατά τη λειτουργία το ρεύμα θα μεταβαρύνεται ακολουθώντας τις αναλλοίσιμες της εισόδου γύρω από το  $V_{BIAS}$ )

Το ρεύμα αυτό θα δημιουργήσει μια συγκεκριμένη πτώση τάσης στην  $R_L$ .  
 Οδηγώντας το  $V_{out}$  να κινείται γύρω από το  $V_{out(BIAS)} = V_{DD} - I_{BIAS} \cdot R_L =$   
 $= 5 - 0.1 \cdot 10 = 4 \text{ Volt}$ .

Αν η είσοδος επιτρέπεται να χρησιμοποιεί όλο το δυναμικό από το  $1 \text{ Volt} \leftrightarrow 1.45 \text{ V}$  και από το  $1.45 \text{ V} \leftrightarrow 1.9 \text{ Volt}$  τότε το εύρος της εξόδου θα είναι  $V_{out(max)} = 5 \text{ Volt}$  και  $V_{out(min)} = 0.9 \text{ Volt}$ . Παρατηρούμε, ότι αν και το σήμα είσοδος είναι συμμετρικό γύρω από το  $V_{BIAS} = 1.45 \text{ V}$  με μέγιστη διακύμανση τα  $\pm 0.45 \text{ Volt}$ , αντίθετα το σήμα εξόδου κινείται  $+1 \text{ Volt}$  πάνω από το  $V_{BIAS(out)} = 4 \text{ Volt}$  έως και  $-3.1 \text{ Volt}$ . Αυτή η ασυμμετρία στη συμπεριφορά του σήματος εξόδου οφείλεται στα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά του ενισχυτή. Ο τρόπος επίβασης της γραμμικής συμπεριφοράς στον ενισχυτή θα συζητηθεί στην επόμενη ενότητα.

Τρόπος πόλησης του ενισχυτή

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε εν συντομία έναν τρόπο πόλησης του ενισχυτή με μια τάση  $V_{BIAS}$  που θα εμβαρύνει πως το τρανζίστορ θα είναι συνεχώς στον κορφοτό. Η γενική δομή ενός ενισχυτή μαζί με το κύκλωμα πόλησης φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Ενισχυτής με μια επιπλέον αντίσταση  $R_S$  στο source του τρανζίστορ

Πηγή που τροφοδοτεί τον ενισχυτή

Πυκνωτή που αφαιρεί DC σιγνώδα του σήματος  $v_{sig}$

Διαφορική τάση Ανορθώνει τα  $v_{in}$  μέσα τον πυκνωτή με μια τάση  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = V_{BIAS}$   
 Έτσι  $v_G = v_{in} + V_{BIAS}$

Η αντίσταση  $R_s$  βοηθάει στο να παρεμφέρι η πτώση του ενισχυτή σταθερή παρόλο που μπορεί να υποβεί καίτοις αλλαγές λόγω δρόνου, αλλαγής θερμοκρασίας και άλλων εξωτερικών παραγόντων. Στο κύκλωμα σε όμοια τη περίπτωση  $V_G = V_{GS} + R_s \cdot I_D$  όπου  $R_s \cdot I_D = V_s$ . Έτσι αν για κάποιο λόγο το  $I_D$  αυξηθεί και έρθουν το  $V_G$  σταθερό λόγω του διαμετρητικού τότε πρέπει το  $V_{GS}$  να μειωθεί ώστε να ισορροπήσει την αύξηση του  $I_D$  για να παραμείνει το  $V_G$  σταθερό. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του  $I_D$ . Αντίθετα δηλαδή με την αρχική μας υπόθεση.

Ο πυκνωτής χρησιμοποιείται ώστε να εξαλείφει οποιαδήποτε DC συνιστώσα του σήματος εισόδου. Η τιμή του  $C_c$  πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μοιάζει με βραχυκύκλωμα για τη συχνότητα του  $v_{in}$ . Έτσι το  $v_{in}$  (μετά τον πυκνωτή κλείνει γύρω από το 0) μπορεί χωρίς πρόβλημα να "αυξομειωθεί" στην τάση  $\frac{R_2}{R_1+R_2} V_{DD}$  που δίνει το διαμετρητικό τάση.

