

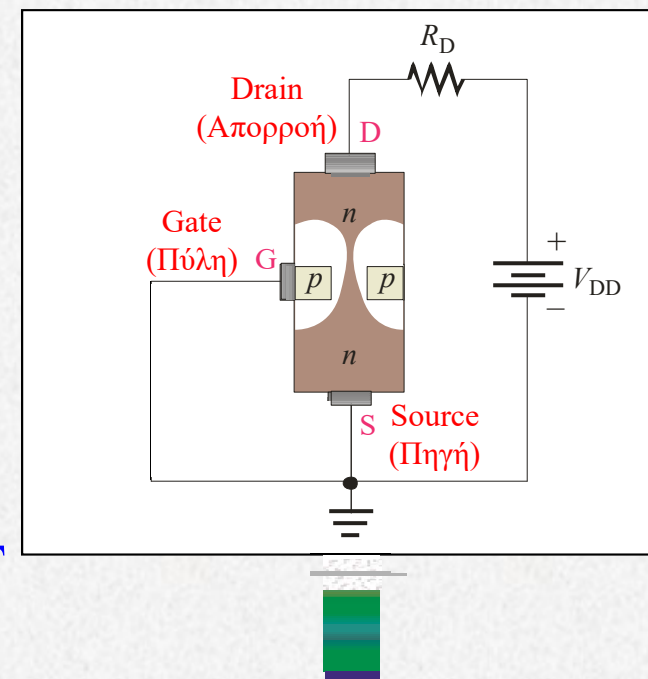
# Τρανζίστορ Επιδράσεως Πεδίου Field-Effect Transistors (FETs)

# Το JFET

Το JFET (ή Junction Field Effect Transistor) είναι συνήθως συσκευή ON. Για τη συσκευή n-channel που απεικονίζεται, όταν η απορροή είναι θετική σε σχέση με την πηγή και δεν υπάρχει τάση πύλης - πηγής, υπάρχει ρεύμα στο κανάλι.

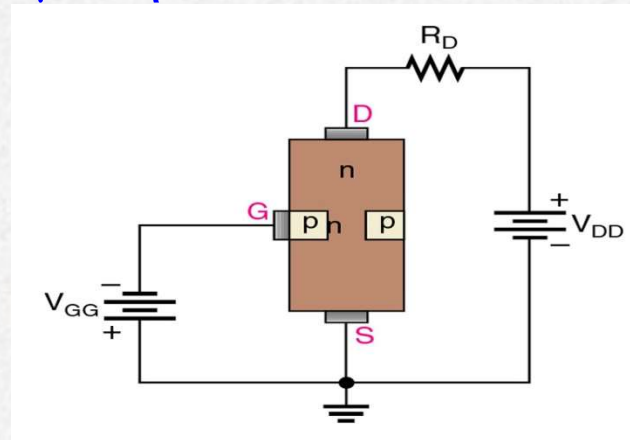
Όταν εφαρμόζεται αρνητική τάση πύλης στο FET, το ηλεκτρικό πεδίο περιορίζει το κανάλι, γεγονός που με τη σειρά του προκαλεί μείωση του ρεύματος.

Τα FET ελέγχουν το ρεύμα με τάση που εφαρμόζεται στην πύλη. Το κύριο πλεονέκτημα των FET έναντι των BJT είναι η υψηλή αντίσταση εισόδου.



# Το JFET

- Το ρεύμα ελέγχεται από ένα πεδίο που αναπτύσσεται από την ανάστροφη πόλωση πύλης – πηγής (η πύλη συνδέεται και στις δύο πλευρές).
- Με περισσότερη  $V_{GG}$  (ανάστροφη πόλωση) το πεδίο (σε λευκό) μεγαλώνει.
- Αυτό το πεδίο ή η αντίσταση περιορίζει την ποσότητα ροής ρεύματος μέσω της  $R_D$ . Με χαμηλή ή καθόλου  $V_{GG}$  η ροή ρεύματος είναι μέγιστη.

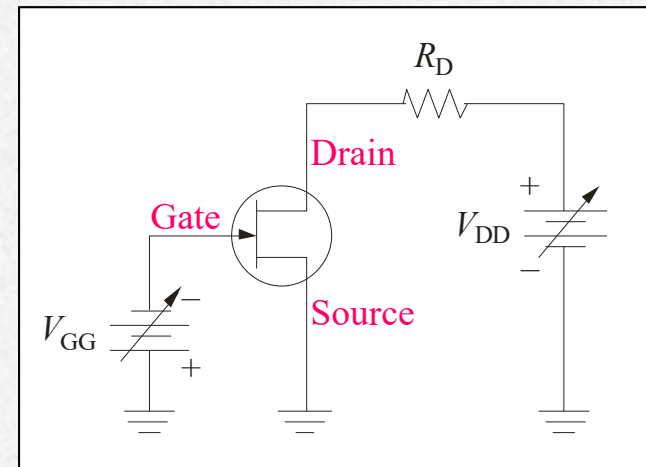


# Το JFET

Όπως και στα διπολικά τρανζίστορ (που είναι τύπου  $pnp$  ή  $npn$ ), υπάρχουν δύο τύποι JFET: καναλιού- $n$  και καναλιού- $p$ . Οι dc τάσεις είναι αντίθετης πολικότητας για κάθε τύπο.

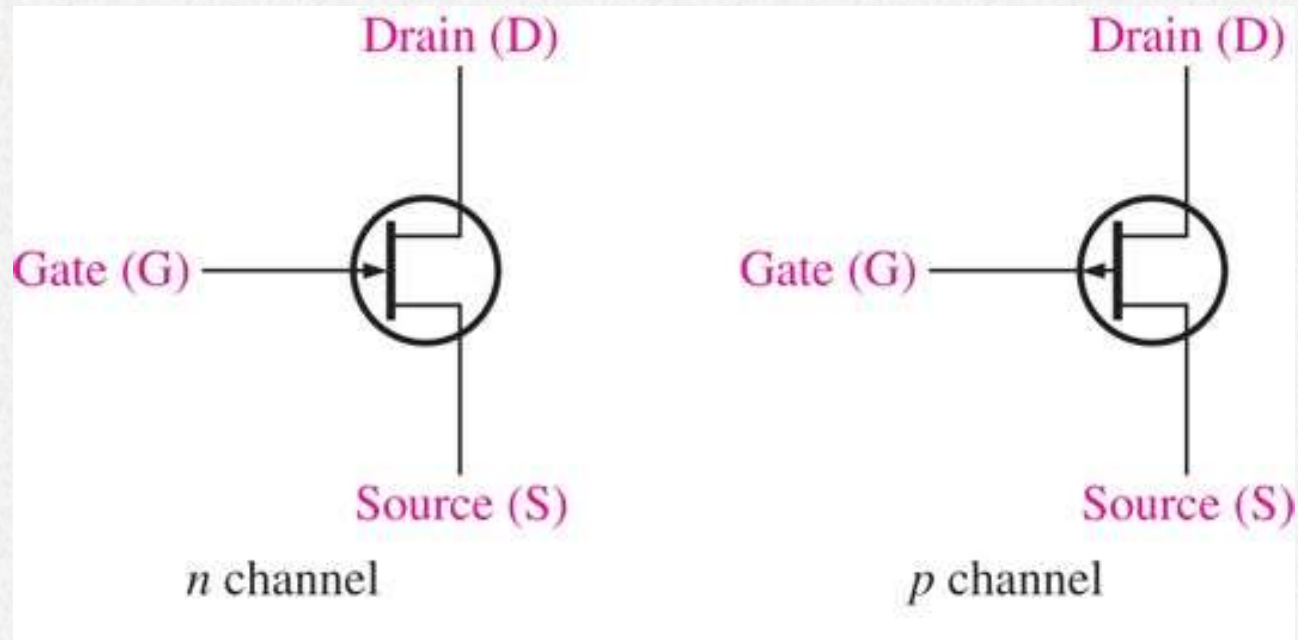
Εμφανίζεται το σύμβολο για ένα JFET καναλιού- $n$ , μαζί με τις κατάλληλες πολικότητες των εφαρμοζόμενων τάσεων dc. Για ένα FET καναλιού- $n$ , η πύλη λειτουργεί πάντα με αρνητική (ή μηδενική) τάση σε σχέση με την πηγή.

**Το JFET λειτουργεί πάντα με ανάστροφη πόλωση της ένωσης  $p$ - $n$  πύλης-πηγής**



# Το JFET

## Σύμβολο JFET



Το βελάκι “προς την πύλη” για καναλιού- $n$  και “εκτός της πύλης” για καναλιού- $p$

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

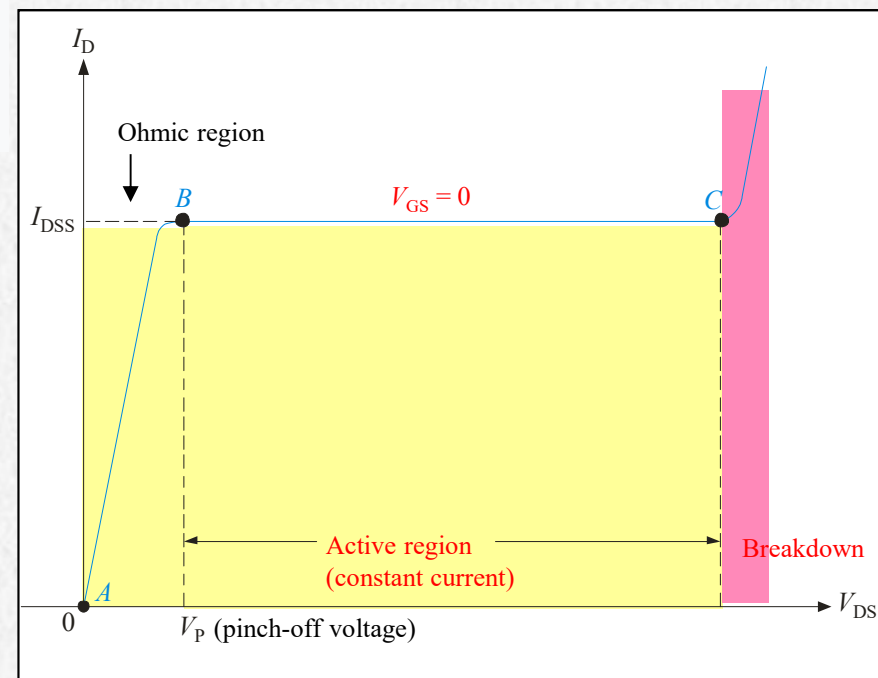
Υπάρχουν τρεις περιοχές στη χαρακτηριστική καμπύλη για ένα JFET, όπως φαίνεται στην περίπτωση όταν  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ .

Μεταξύ A και B βρίσκεται η **ωμική περιοχή**, όπου το ρεύμα και η τάση σχετίζονται με το νόμο του Ohm. Η τάση  $V_{DS}$  στο σημείο B ονομάζεται **τάση φραγής ( $V_P$ )**.

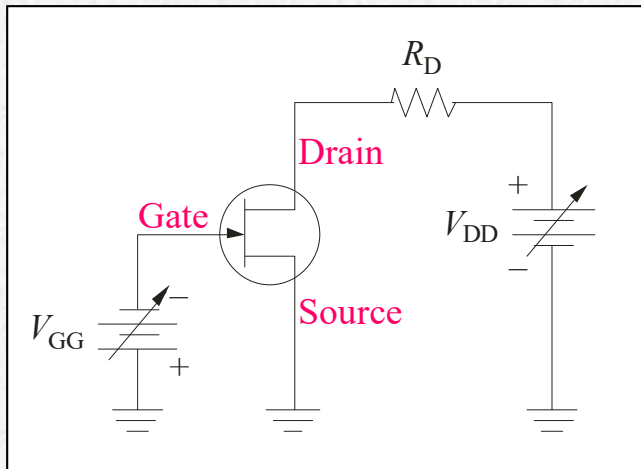
Μεταξύ B και C είναι η **ενεργός (ή σταθερού ρεύματος) περιοχή** όπου το ρεύμα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο από την  $V_{DS}$ .

Μετά το C είναι η **περιοχή κατάρρευσης**. Η λειτουργία σε αυτή την περιοχή μπορεί να καταστρέψει το FET.

Το  $I_{DSS}$  είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει από το JFET και προκύπτει όταν  $V_{GS}=0$ .



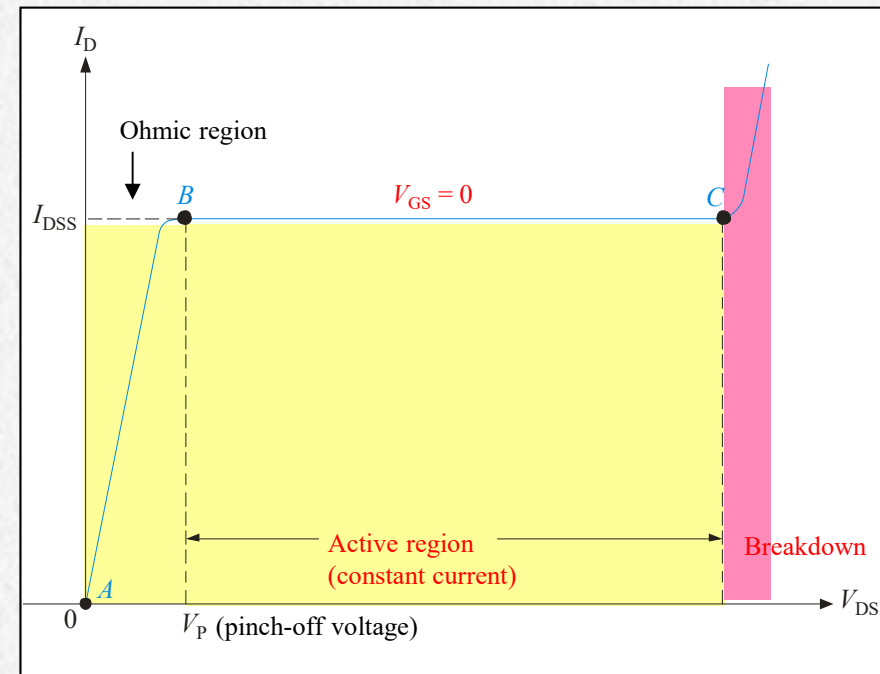
# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET



Στην **ωμική περιοχή**, το JFET συμπεριφέρεται σαν **αντίσταση**.

$$R_{DS} = \frac{V_P}{I_{DS}}$$

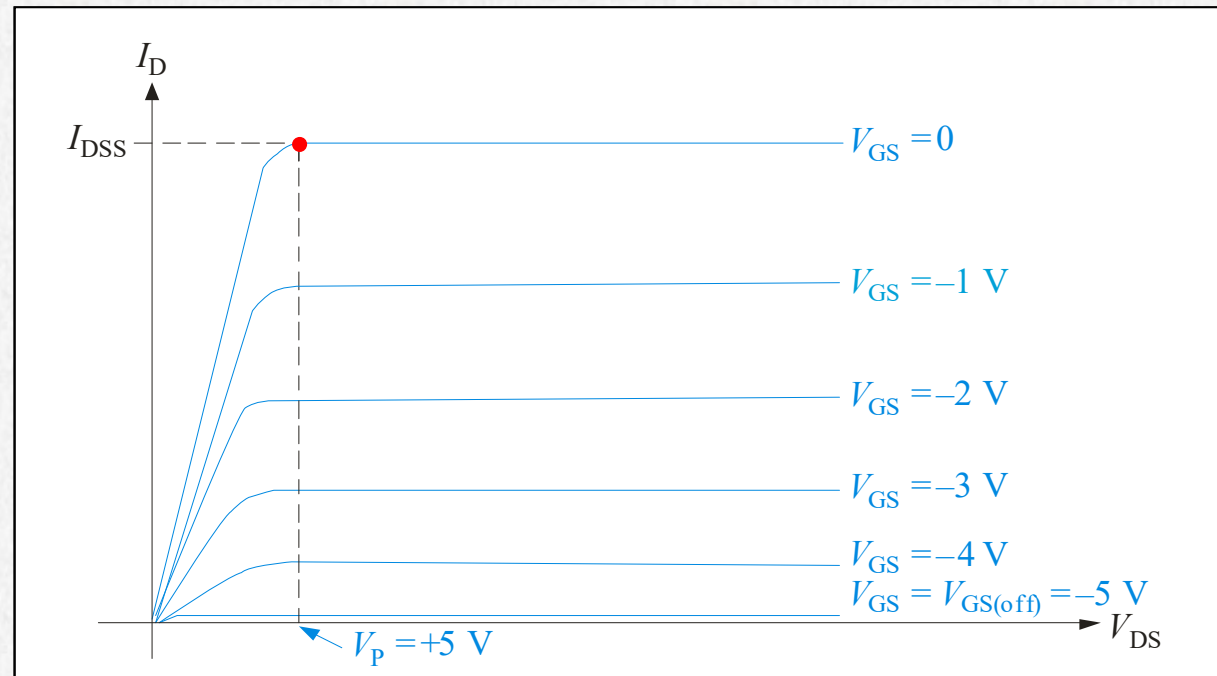
Στην **ενεργό περιοχή** το JFET συμπεριφέρεται σαν **πηγή ρεύματος**.



# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

Όταν η  $V_{GS}$  μεταβάλλεται, η σχέση μεταξύ  $V_{DS}$  and  $I_D$  δημιουργεί μια οικογένεια χαρακτηριστικών καμπυλών του FET.

Φαίνεται η χαρακτηριστική FET καναλιού-  
n. Η τάση φραγής  $V_p$  είναι θετική και έχει την ίδια απόλυτη τιμή με την  $V_{GS(off)}$ .

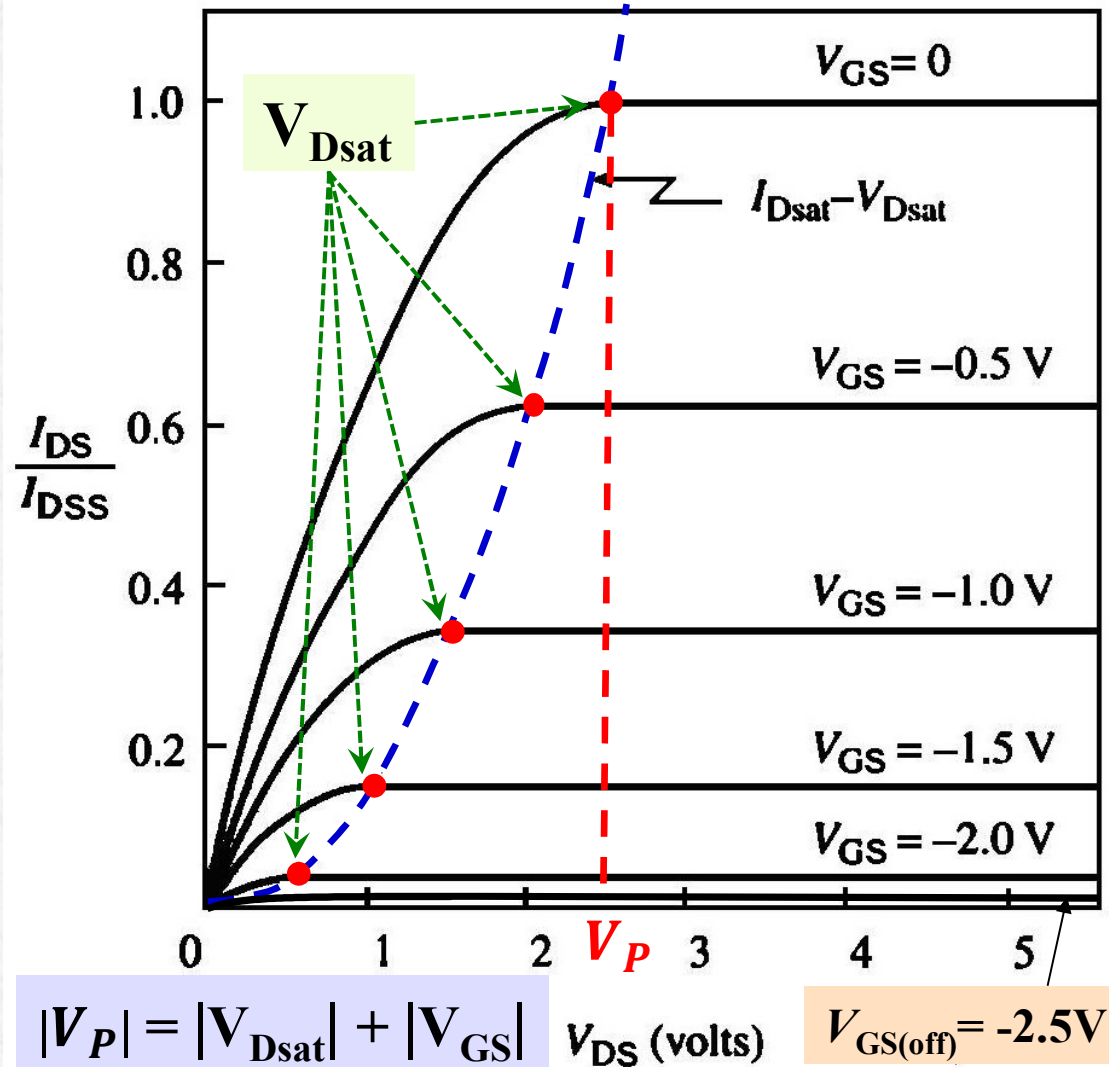


$$V_{GS(off)} = -V_P$$



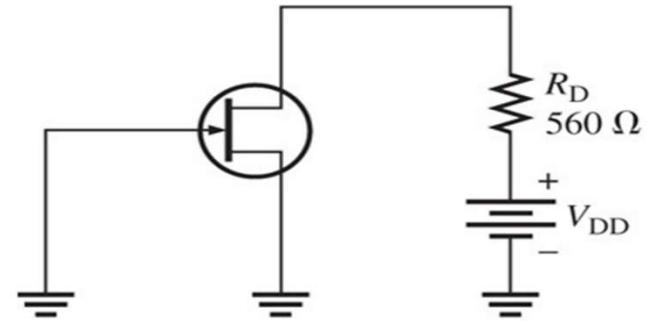
# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

Υπάρχει διαφορά αλλά και σχέση ανάμεσα στην τάση φραγής και την τάση αποκοπής. Η τάση φραγής  $V_p$  είναι η τιμή της  $V_{DS}$  στην οποία το ρεύμα απορροής γίνεται σταθερό και ίσο με  $I_{DSS}$  και ορίζεται πάντα για  $V_{GS} = 0V$ . Όμως, η φραγή, συμβαίνει για τιμές τάσης  $V_{DS}$  μικρότερες από την  $V_p$  εάν η  $V_{GS}$  είναι μη μηδενική. Έτσι, αν και η  $V_p$  είναι σταθερή, η ελάχιστη τιμή τάσης  $V_{DS}$  στην οποία το ρεύμα  $I_D$  σταθεροποιείται μεταβάλλεται με την  $V_{GS}$ . Η  $V_{GS(off)}$  και η  $V_p$  είναι πάντα ίσες σε μέγεθος αλλά αντίθετες σε πρόσημο. Για παράδειγμα, εάν  $V_{GS(off)} = -2.5V$ , τότε  $V_p = +2.5V$ .



# Παράδειγμα

Για το JFET που φαίνεται,  $V_{GS(off)} = -4V$ ,  $I_{DSS} = 12mA$ . Βρείτε την ελάχιστη τιμή της  $V_{DD}$  που απαιτείται για να είναι το FET στην περιοχή κόρου (σταθερού ρεύματος) όταν  $V_{GS} = 0V$ .



Since  $V_{GS(off)} = -4V$ ,  $V_P = 4V$ . The minimum value of  $V_{DS}$  for the JFET to be in its constant-current region is

$$V_{DS} = V_P = 4V$$

In the constant-current region with  $V_{GS} = 0V$ ,

$$I_D = I_{DSS} = 12mA$$

The drop across the drain resistor is

$$V_{R_D} = I_D R_D = (12mA)(560\Omega) = 6.72V$$

Apply Kirchhoff's law around the drain circuit.

$$V_{DD} = V_{DS} + V_{R_D} = 4V + 6.72V = \mathbf{10.7V}$$

This is the value of  $V_{DD}$  to make  $V_{DS} = V_P$  and put the device in the constant-current region.

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

Χαρακτηριστική ρεύματος απορροής ( $I_D$ ) συναρτήσει της τάσης εισόδου.

Στην ενεργό περιοχή, η σχέση που δίνει το ρεύμα εξόδου (απορροής) είναι:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

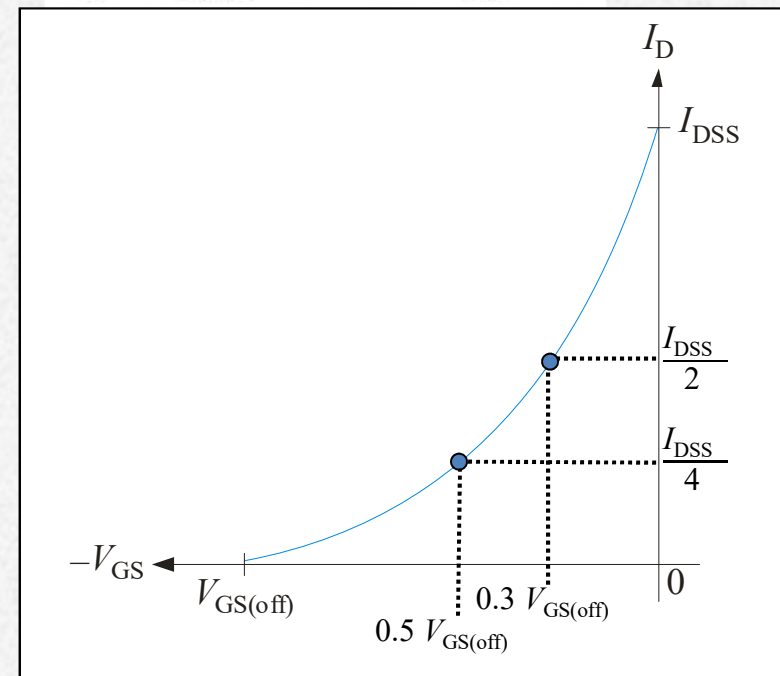
όπου  $I_{DSS}$  (Drain to Source current with Gate Shorted) είναι το μέγιστο ρεύμα απορροής όταν  $V_{GS} = 0$ .

$$I_D = 0 \quad \text{when } V_{GS} = V_{GS(off)}$$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{4} \quad \text{when } V_{GS} = 0.5 V_{GS(off)}$$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{2} \quad \text{when } V_{GS} = 0.3 V_{GS(off)}$$

$$I_D = I_{DSS} \quad \text{when } V_{GS} = 0$$



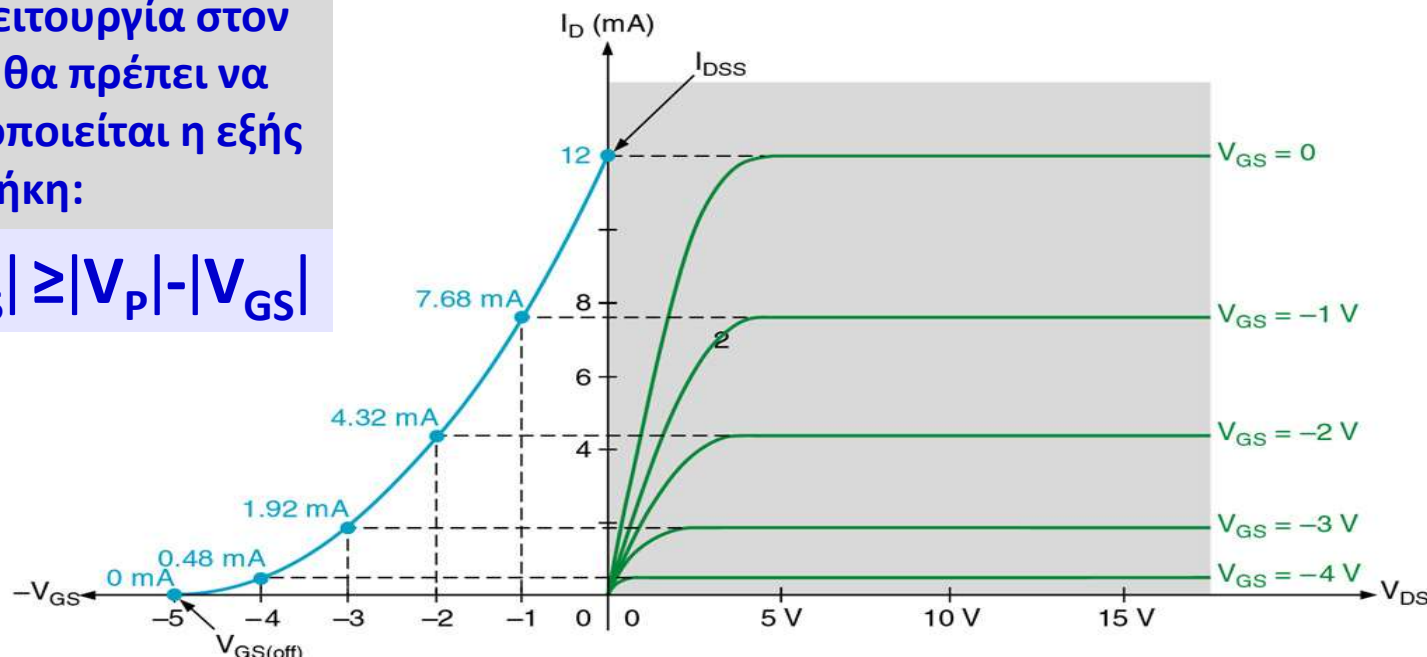
# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

- Η χαρακτηριστική εξόδου δείχνει τον έλεγχο που ασκεί η  $V_{GS}$  στο  $I_D$  από την αποκοπή ( $V_{GS(off)}$ ) έως τη φραγή ( $V_P$ ).
- Η καμπύλη είναι παραβολική και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_D \cong I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

Για λειτουργία στον κόρο θα πρέπει να ικανοποιείται η εξής συνθήκη:

$$|V_{DS}| \geq |V_P| - |V_{GS}|$$



# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

## BJT συναρτήσει JFET

BJT transistor	FET transistor
Bipolar	Unipolar
Emitter (E)	Source (S)
Base (B)	Gate (G)
Collector (C)	Drain (D)
$I_C = \beta I_B$	$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$
$I_C \cong I_E$	$I_D = I_S$
$V_{BE} \cong 0.7 \text{ V}$	$I_G \cong 0$

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

## Παράδειγμα:

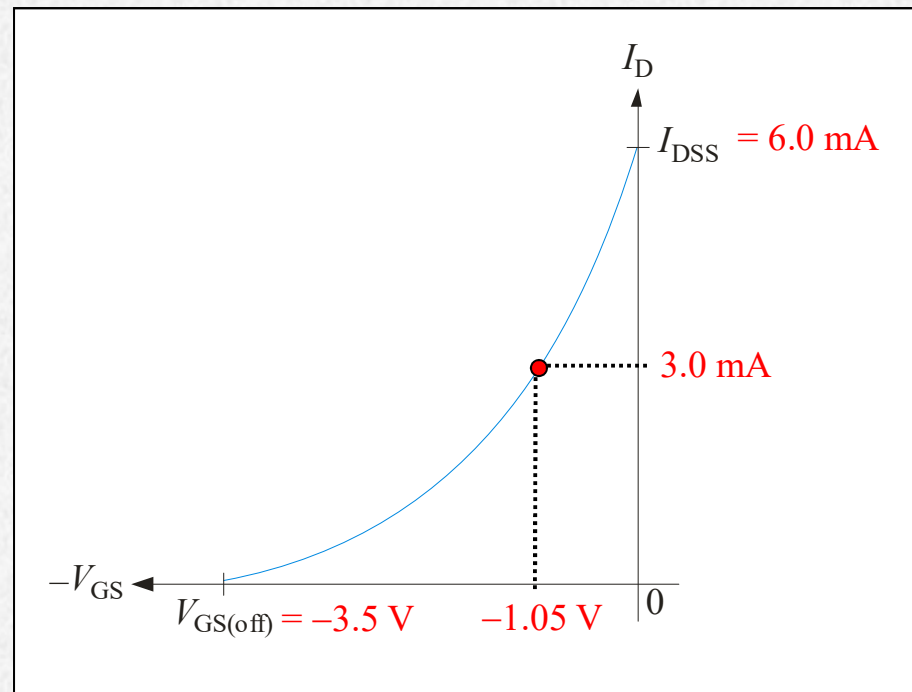
Το FET 2N5458 έχει  $I_{DSS} = 6.0 \text{ mA}$  και  $V_{GS(off)} = -3.5 \text{ V}$ .

(a) Δείξτε αυτές τις τιμές πάνω στη χαρακτηριστική.

(b) Δείξτε το σημείο που αντιστοιχεί στο  $I_D = 3.0 \text{ mA}$ .

## Λύση:

(b) Όταν  $I_D = \frac{1}{2} I_{DSS}$ ,  $V_{GS} = 0.3 V_{GS(off)}$ . Επομένως,  
 $V_{GS} = -1.05 \text{ V}$



# Παράδειγμα

- Το φύλλο κατασκευαστή ενός JFET δίνει  $I_{DSS} = 9\text{mA}$  και  $V_{GS(off)} = -8\text{V}$  (maximum). Βρείτε το ρεύμα απορροής για  $V_{GS} = 0\text{V}$ ,  $-1\text{V}$ , and  $-4\text{V}$ .

For  $V_{GS} = 0\text{V}$ ,

$$I_D = I_{DSS} = \mathbf{9\text{mA}}$$

For  $V_{GS} = -1\text{V}$ , use Equation 8-1.

$$\begin{aligned} I_D &\cong I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 = (9\text{mA}) \left( 1 - \frac{-1\text{V}}{-8\text{V}} \right)^2 \\ &= (9\text{mA})(1 - 0.125)^2 = (9\text{mA})(0.766) = \mathbf{6.89\text{mA}} \end{aligned}$$

For  $V_{GS} = -4\text{V}$ ,

$$I_D \cong (9\text{mA}) \left( 1 - \frac{-4\text{V}}{-8\text{V}} \right)^2 = (9\text{mA})(1 - 0.5)^2 = (9\text{mA})(0.25) = \mathbf{2.25\text{mA}}$$

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

## Διαγωγιμότητα JFET

Η διαγωγιμότητα  $g_m$  είναι ο λόγος της μεταβολής του ρεύματος εξόδου ( $\Delta I_D$ ) προς τη μεταβολή της τάσης εισόδου ( $\Delta V_{GS}$ ).

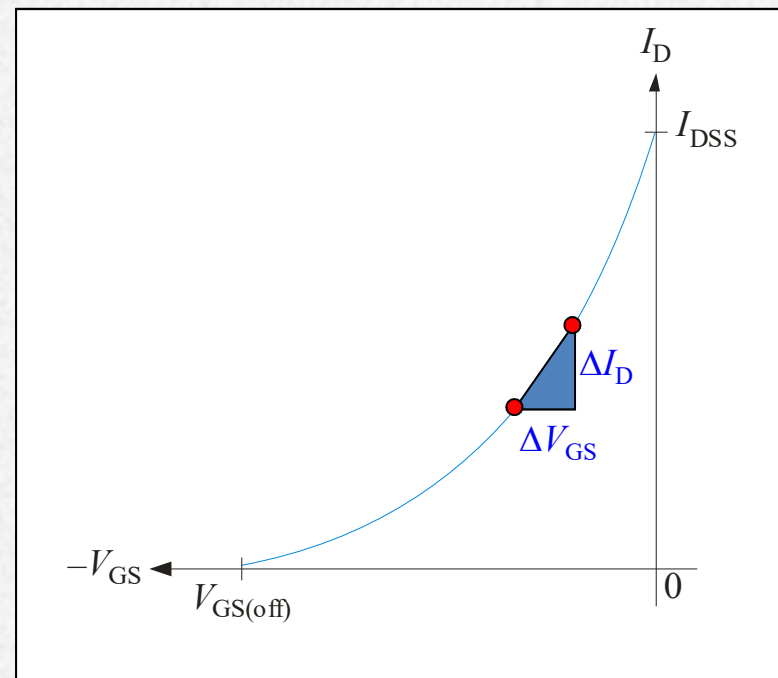
Ορισμός: 
$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

Χρησιμοποιείται και η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της  $g_m$ .

$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) \quad \text{S or } \overline{\Omega}$$

where

$$g_{m0} = g_{m(max)} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|}$$





# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

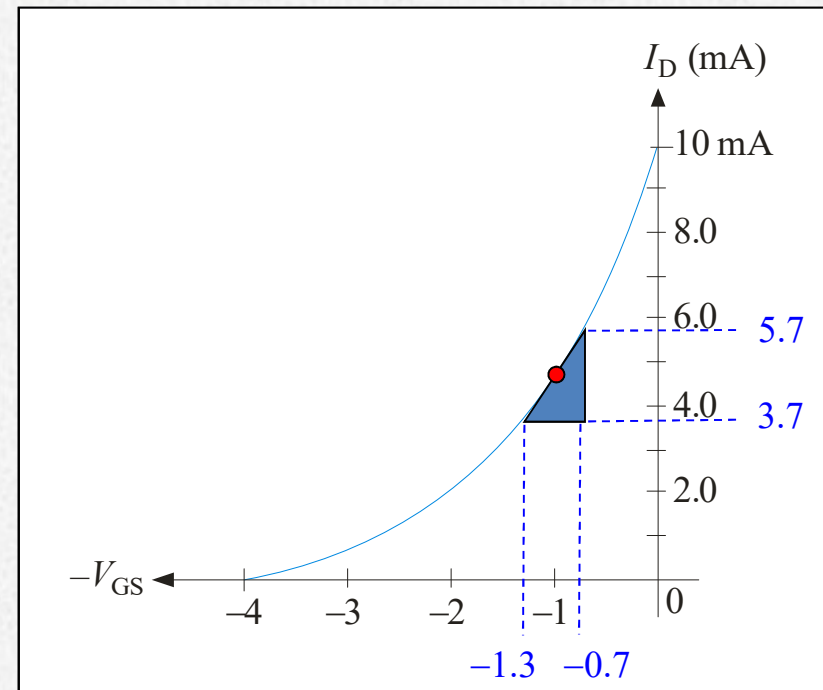
Επειδή η κλίση μεταβάλλεται κατά μήκος της χαρακτηριστικής, η διαγωγιμότητα δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το σημείο μετρησης.

**Παράδειγμα:**

Ποια είναι η διαγωγιμότητα του JFET στο σημείο που φαίνεται?

**Λύση:**

$$\begin{aligned}g_m &= \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{5.7 \text{ mA} - 3.7 \text{ mA}}{-0.7 \text{ V} - (-1.3 \text{ V})} \\ &= \frac{2.0 \text{ mA}}{0.6 \text{ V}} = 3.33 \text{ mS}\end{aligned}$$



# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

## Εσωτερική αντίσταση απορροής - πηγής

Η αντίσταση αυτή βρίσκεται από το λόγο μεταβολών της  $V_{DS}$  συναρτήσει του  $I_D$ . Ο λόγος μεταβολών είναι η ac-αντίσταση του τρανζίστορ μεταξύ απορροής-πηγής

$$r'_{ds} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D}$$

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι JFET

## Αντίσταση εισόδου JFET

Η αντίσταση εισόδου ενός JFET δίνεται από:  $R_{IN} = \left| \frac{V_{GS}}{I_{GSS}} \right|$

όπου  $I_{GSS}$  είναι το ρεύμα εισόδου της ανάστροφα πολωμένης πύλης.

Τα JFETs έχουν πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, η οποία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

### Παράδειγμα:

Συγκρίνετε την αντίσταση εισόδου του 2N5485 στους 25 °C και στους 100 °C. Το φύλλο κατασκευαστή δίνει ότι για  $V_{GS} = -20$  V,  $I_{GSS} = -1$  nA στους 25 °C και  $-0.2$  μA στους 100 °C.

**Λύση:** Σε 25 °C,  $R_{IN} = \left| \frac{V_{GS}}{I_{GSS}} \right| = \left| \frac{20 \text{ V}}{1 \text{ nA}} \right| = 20 \text{ G}\Omega!$

Σε 100 °C,  $R_{IN} = \left| \frac{V_{GS}}{I_{GSS}} \right| = \left| \frac{20 \text{ V}}{0.2 \text{ }\mu\text{A}} \right| = 100 \text{ M}\Omega$

# Πόλωση JFET

## Αυτο-πόλωση

Η αυτο-πόλωση είναι απλή και αποτελεσματική, και η πλέον κοινή μέθοδος πόλωσης των JFETs. Στην αυτο-πόλωση η πύλη είναι σε  $0\text{ V}$ .

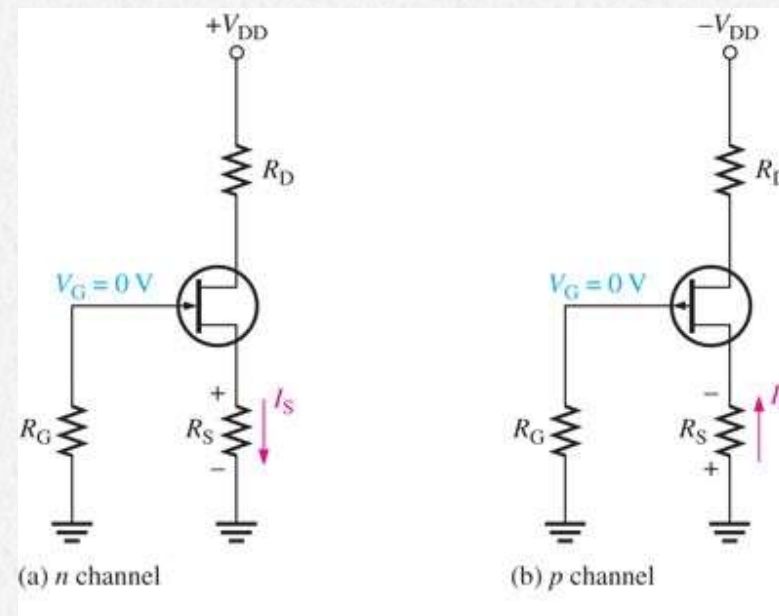
Το ρεύμα στην  $R_S$  αναπτύσσει την αναγκαία ανάστροφη πόλωση στην πύλη.

$$V_{GS} = V_G - V_S = -I_D R_S$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_S = I_D R_S$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$



# Αυτό-πόλωση JFET

## Αυτο-πόλωση

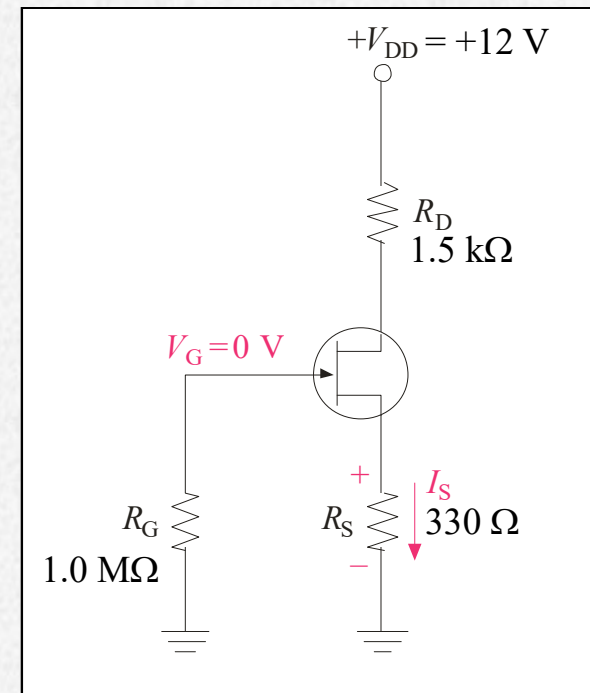
### Παράδειγμα:

Θεωρήστε ότι το ρεύμα απορροής είναι 3.0 mA. Πόση είναι η  $V_{GS}$ ?

### Λύση:

$$V_G = 0 \text{ V}; V_S = (3.0 \text{ mA})(330 \Omega) = 0.99 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 0 - 0.99 \text{ V} = -0.99 \text{ V}$$



# Αυτό-πόλωση JFET - Παράδειγμα

Υπολογίστε την απαιτούμενη τιμή της  $R_S$  για την αυτο-πόλωση ενός JFET καναλιού-p με τιμές  $I_{DSS} = 25 \text{ mA}$  και  $V_{GS(off)} = 15 \text{ V}$ . Η  $V_{GS}$  είναι  $5 \text{ V}$ .

*Solution* Use Equation 8–1 to calculate  $I_D$ .

$$\begin{aligned} I_D &\cong I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 = (25 \text{ mA}) \left( 1 - \frac{5 \text{ V}}{15 \text{ V}} \right)^2 \\ &= (25 \text{ mA})(1 - 0.333)^2 = 11.1 \text{ mA} \end{aligned}$$

Now, determine  $R_S$ .

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right| = \frac{5 \text{ V}}{11.1 \text{ mA}} = 450 \Omega$$

# Αυτό-πόλωση JFET

## Αυτο-πόλωση

Από τη χαρακτηριστική μεταφοράς μπορείτε να υπολογίσετε την τιμή της αντίστασης πηγής.

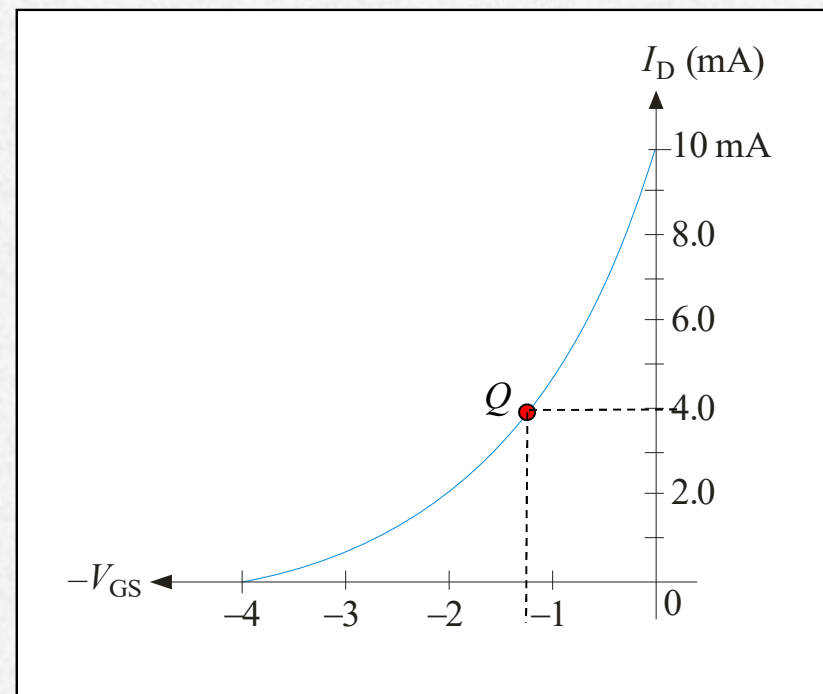
### Παράδειγμα:

Ποια τιμή της  $R_S$  θα δώσει το σημείο  $Q$  που φαίνεται?

### Λύση:

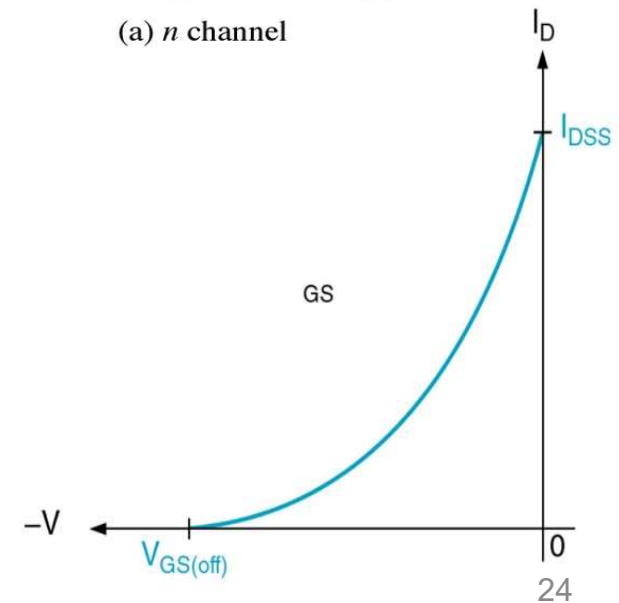
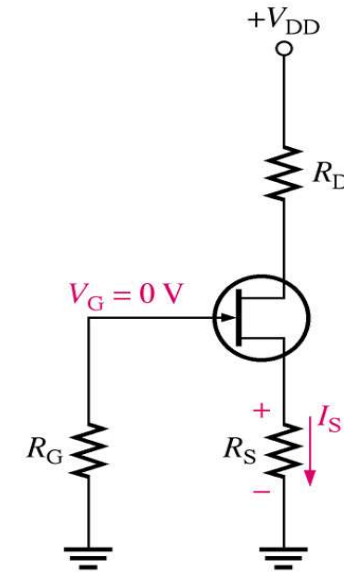
Το σημείο  $Q$  είναι περίπου στο  $I_D = 4.0 \text{ mA}$  και  $V_{GS} = -1.25 \text{ V}$ .

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right| = \frac{1.25 \text{ V}}{4.0 \text{ mA}} = 312.5 \Omega$$



# Αυτό-πόλωση JFET

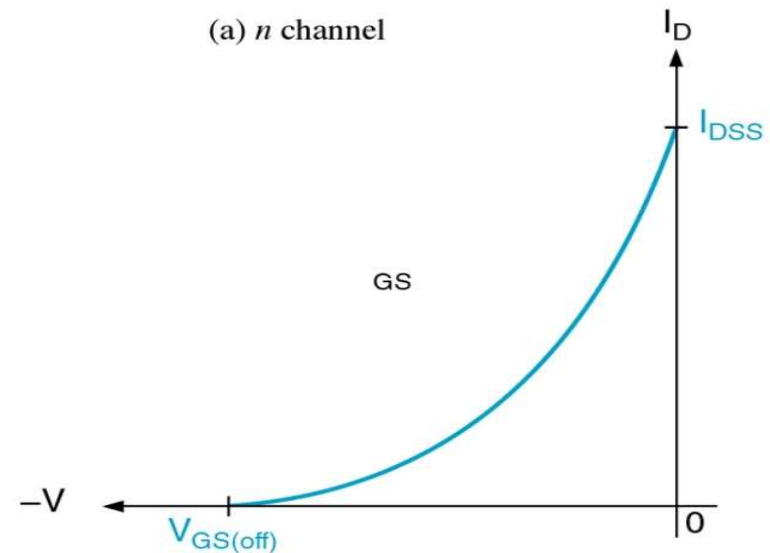
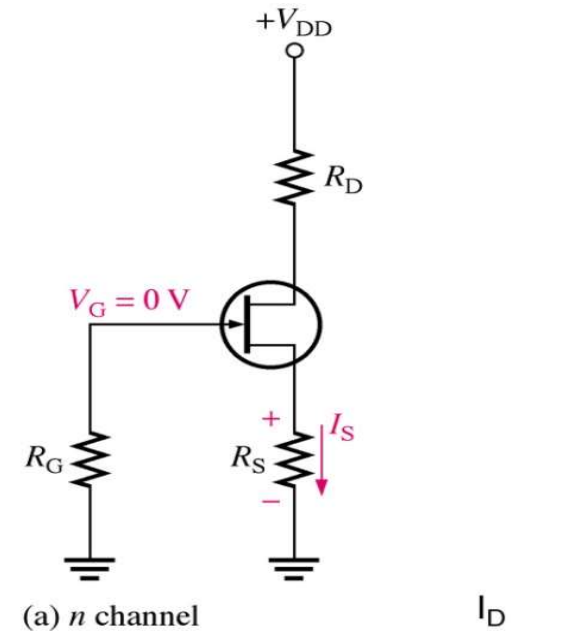
- Για να ορίσουμε το σημείο πόλωσης Q πρέπει να ορίσουμε την τιμή της  $R_S$  η οποία θα δώσει τα επιθυμητά  $I_D$  και  $V_{GS}$ . Η σχέση είναι:
- $R_S = |V_{GS}/I_D|$
- Θα πρέπει να προσδιορίσουμε τα  $V_{GS}$  and  $I_D$  είτε από τη χαρακτηριστική μεταφοράς ή από τη σχέση του ρεύματος εξόδου. Το φύλλο κατασκευαστή μας δίνει τα  $I_{DSS}$  και  $V_{GS(off)}$ .  $V_{GS}$  είναι η επιθυμητή τάση πόλωσης.
- $I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_{GS(off)})^2$





# Αυτό-πόλωση JFET

- Εφόσον η πόλωση στη μεσαία τιμή είναι πλέον συνήθης, ας δούμε πώς υπολογίζεται. Οι τιμές των  $R_S$  και  $R_D$  καθορίζουν το προσεγγιστικό σημείο μέσης πόλωσης. Το  $I_D$  θα είναι το μισό του  $I_{DSS}$ . Η  $V_{GS}$  που αντιστοιχεί είναι:
- $V_{GS} \cong V_{GS(off)}/3.4$



# Αυτό-πόλωση JFET

Για το JFET 2N5457 με  $I_{DSS} = 1\text{ mA}$ ,  $V_{GS(off)} = -0.5\text{ V}$ , υπολογίστε τις τιμές των  $R_S$  και  $R_D$  για να επιτύχετε πόλωση στη μεσαία τιμή. Η  $V_D$  να είναι ίση με  $6\text{ V}$ .

For midpoint bias,

$$I_D \cong \frac{I_{DSS}}{2} = \frac{1.0\text{ mA}}{2} = 0.5\text{ mA}$$

and

$$V_{GS} \cong \frac{V_{GS(off)}}{3.4} = \frac{-0.5\text{ V}}{3.4} = -147\text{ mV}$$

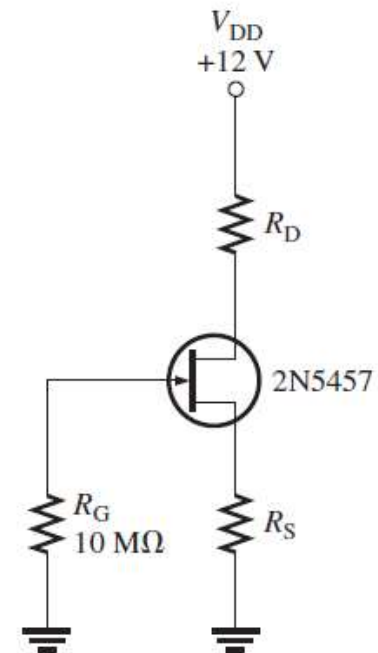
Then

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right| = \frac{147\text{ mV}}{0.5\text{ mA}} = 294\ \Omega$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$I_D R_D = V_{DD} - V_D$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{12\text{ V} - 6\text{ V}}{0.5\text{ mA}} = 12\text{ k}\Omega$$



# Πόλωση JFET

## Πόλωση με διαιρέτη τάσης

Η πόλωση με διαιρέτη τάσης είναι συνδυασμός ενός διαιρέτη τάσης και μιας αντίστασης πηγής για να διατηρείται η πηγή σε υψηλότερο δυναμικό από την πύλη.

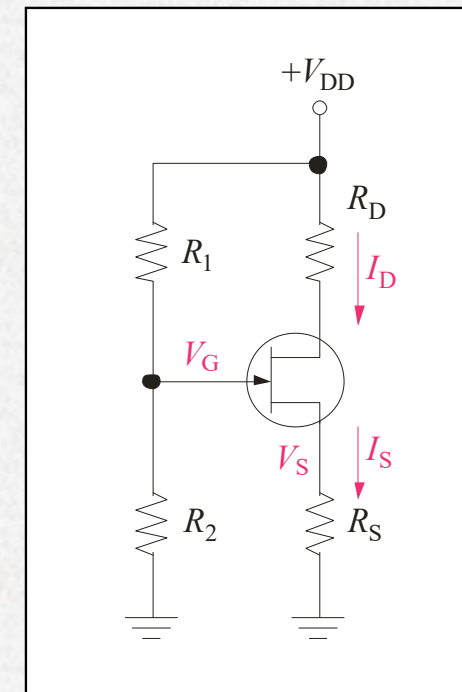
Η  $V_G$  καθορίζεται από τον διαιρέτη τάσης και είναι ανεξάρτητη από την  $V_S$ . Η  $V_S$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την  $V_G$  για να κρατάει την πύλη σε αρνητικό δυναμικό ως προς την πηγή.

Η πόλωση του διαιρέτη τάσης σταθεροποιεί την τροφοδοσία έναντι διαφορών μεταξύ τρανζίστορ.

$$V_G = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD}$$

$$I_D = \frac{V_S}{R_S} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S}$$

**Εξίσωση ευθείας φορτίου**



# Πόλωση JFET - Παράδειγμα

## Πόλωση με διαιρέτη τάσης

Υπολογίστε το  $I_D$  και την  $V_{GS}$ , εάν οι τιμές των αντιστάσεων είναι τέτοιες που  $V_D = 7V$ .

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R_D} = \frac{12\text{ V} - 7\text{ V}}{3.3\text{ k}\Omega} = \frac{5\text{ V}}{3.3\text{ k}\Omega} = 1.52\text{ mA}$$

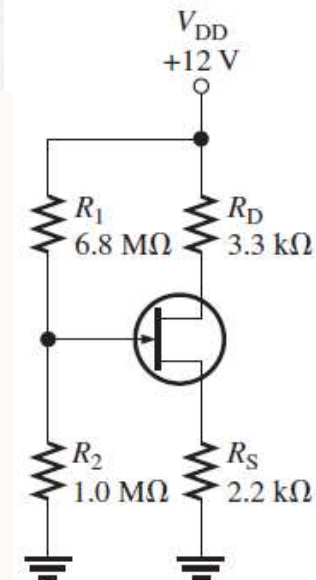
Calculate the gate-to-source voltage as follows:

$$V_S = I_D R_S = (1.52\text{ mA})(2.2\text{ k}\Omega) = 3.34\text{ V}$$

$$V_G = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} = \left( \frac{1.0\text{ M}\Omega}{7.8\text{ M}\Omega} \right) 12\text{ V} = 1.54\text{ V}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 1.54\text{ V} - 3.34\text{ V} = -1.8\text{ V}$$

If  $V_D$  had not been given in this example, the Q-point values could not have been found without the transfer characteristic curve.

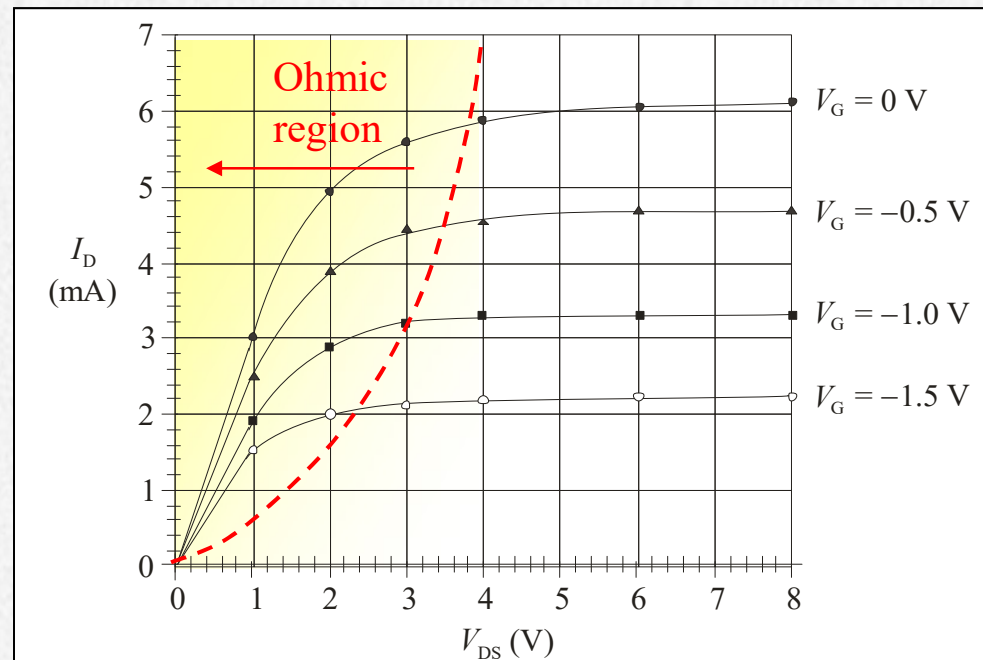


# Ωμική περιοχή του JFET

Η ωμική περιοχή είναι μεταξύ της αρχής των αξόνων και της ενεργού περιοχής. Όταν το JFET λειτουργεί σε αυτή την περιοχή συμπεριφέρεται σαν μεταβλητή αντίσταση.

**Δεδομένα από πραγματικό**

**FET:** Οι κλίσεις (που αντιπροσωπεύουν αγωγιμότητα) διαδοχικών καμπυλών  $V_{GS}$  διαφέρουν στην ωμική περιοχή. Τη διαφορά αυτή εκμεταλλευόμαστε για να χρησιμοποιούμε το FET σαν αντίσταση ελεγχόμενη από τάση.



# Ενισχυτές FET

Οι ενισχυτές FET είναι παρόμοιοι με τους ενισχυτές BJT σε λειτουργία.

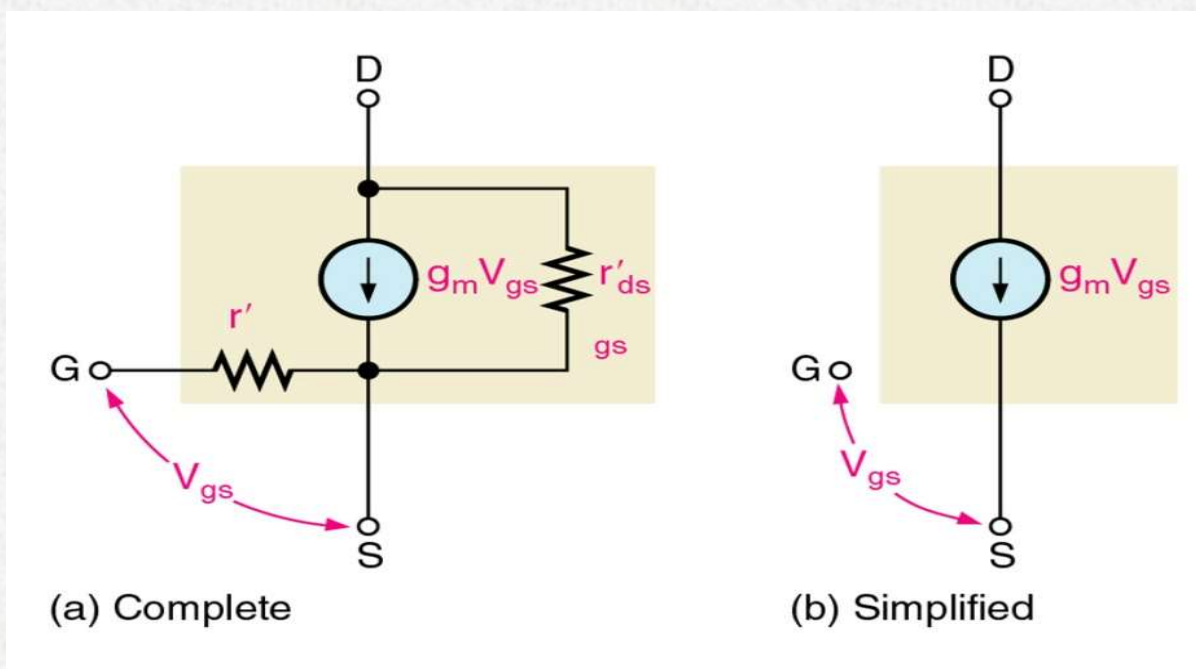
Ο σκοπός του ενισχυτή είναι ο ίδιος τόσο για τους ενισχυτές FET όσο και για τους ενισχυτές BJT. Οι ενισχυτές FET έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των ενισχυτών BJT, όπως **υψηλή αντίσταση εισόδου**. Το BJT έχει συνήθως υψηλότερο κέρδος τάσης.

Υπάρχουν επίσης ομοιότητες στις τρεις τοπολογίες ενισχυτή FET και BJT:

**Common-source (emitter), common-drain (συλλέκτης) και common-gate (βάση)** είναι οι τρεις τοπολογίες ενισχυτή FET.

# Ενισχυτές FET

Το ισοδύναμο κύκλωμα του FET είναι βασικά μια **πηγή ρεύματος** που ελέγχεται από την  $V_{GS}$ . Η αντίσταση μεταξύ πύλης και πηγής αμελείται διότι είναι πολύ μεγάλη και στις περισσότερες περιπτώσεις και η αντίσταση απορροής - πηγής ( $r_{ds}$ ) μπορεί επίσης να αμεληθεί.



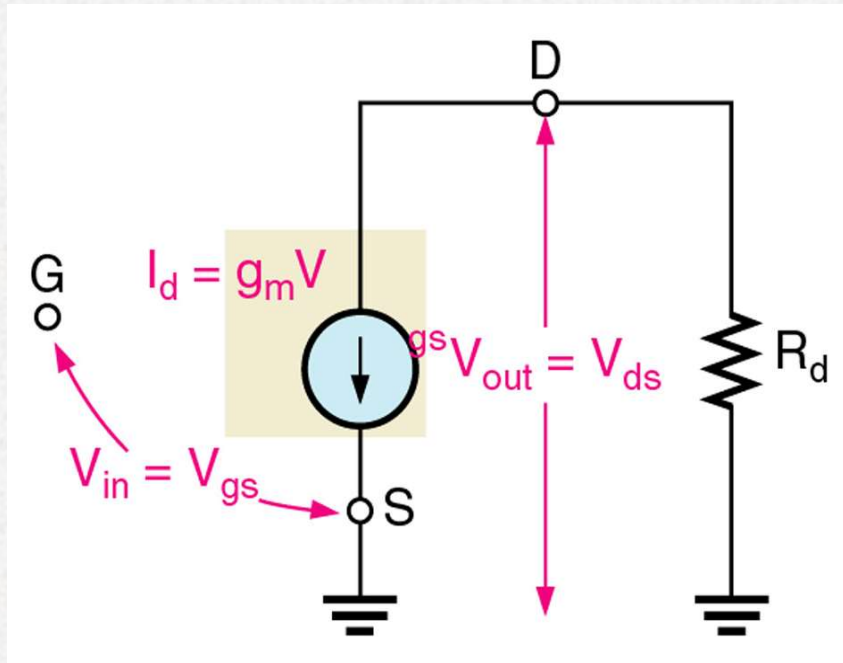
$$I_D = g_m V_{GS} \text{ (} g_m \text{ είναι το σύμβολο της διαγωγιμότητας)}$$

# Ενισχυτές FET

Το κέρδος τάσης ( $A_V$ )  
δίνεται από τη σχέση  $A_V =$   
 $V_{out}/V_{in}$  και στην περίπτωση  
του ενισχυτή FET από την,  
 $A_V = V_{ds}/V_{gs}$ .

Το κέρδος  $A_V$   
προσδιορίζεται επίσης από  
τη διαγωγιμότητα και την  
αντίσταση απορροής από τη  
σχέση:

$$A_V = g_m R_D$$



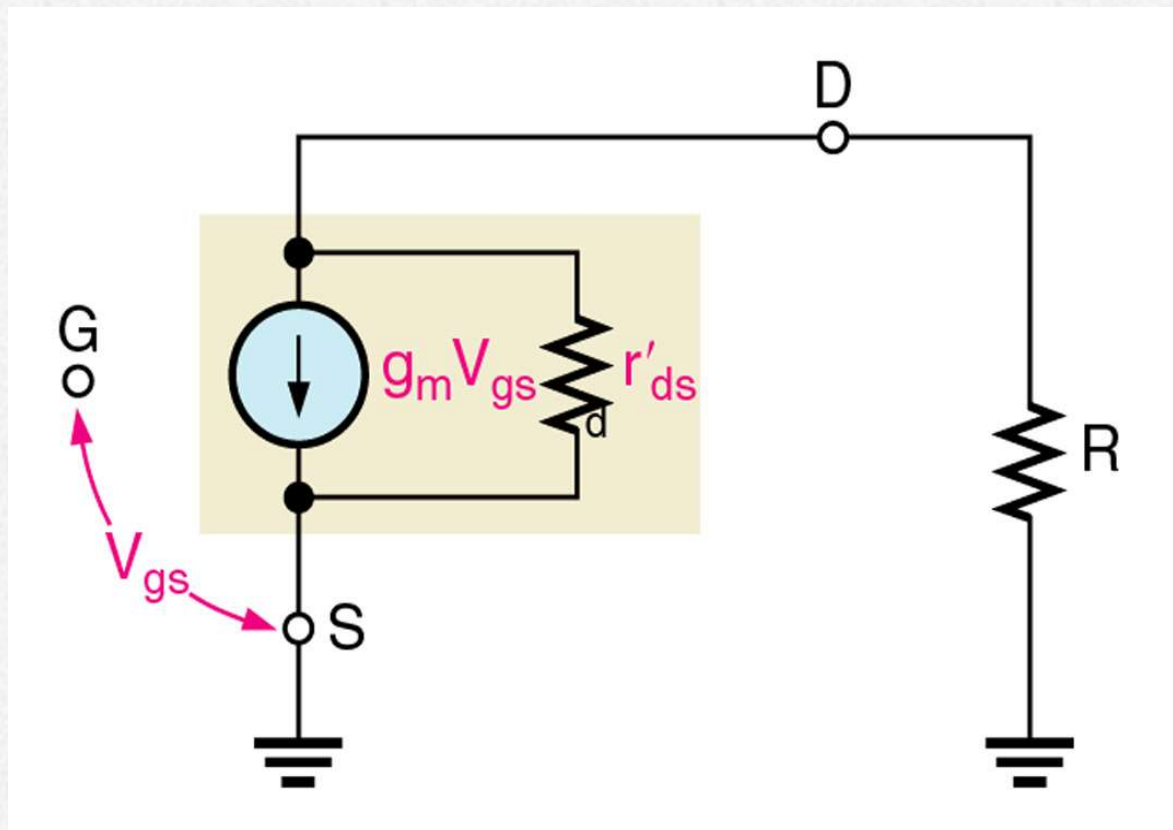
$$I_D = g_m V_{GS}$$

$$V_{ds} = I_d R_d$$



# Ενισχυτές FET

Η  $r_{ds}$  μπορεί να μειώσει το κέρδος εάν δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $R_D$  διότι συνδέεται παράλληλα.

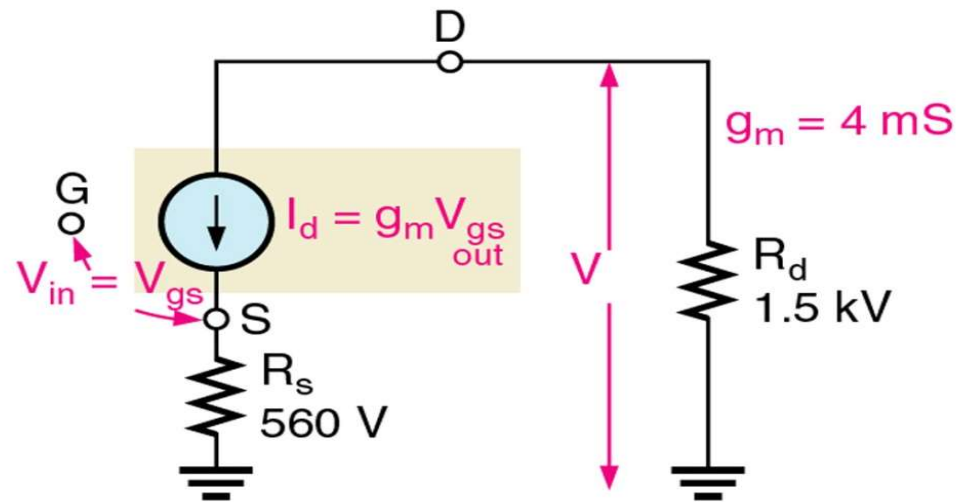


# Ενισχυτές FET

Η  $R_S$  επίσης επηρεάζει το κέρδος. Το κέρδος μειώνεται για μεγάλες τιμές της  $R_S$  και αυξάνεται με μικρές τιμές της  $R_S$ .

Η επόμενη σχέση δείχνει αυτή την εξάρτηση:

$$A_v = V_{out}/V_{in} = V_{out}/(V_{gs} + V_s) = g_m R_D / (1 + g_m R_S)$$



## Ενισχυτές FET - Παράδειγμα

- Ένα JFET έχει  $g_m = 4\text{mS}$ . Εάν η ac αντίσταση απορροής είναι  $1.5\text{k}\Omega$ , ποιο είναι το κέρδος ρεύματος?

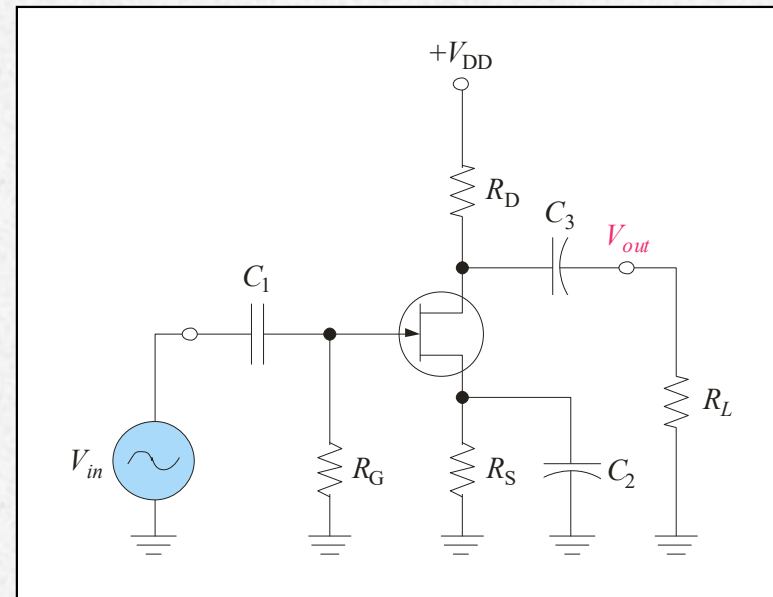
$$A_V = g_m R_D = 4\text{mS} \cdot 1.5\text{k}\Omega = 6$$

# Ενισχυτές FET

## Ενισχυτής Κοινής-Πηγής

Στον ενισχυτή κοινής-πηγής (CS), το σήμα εισόδου εφαρμόζεται στην πύλη και το σήμα εξόδου λαμβάνεται στην απορροή. Ο ενισχυτής έχει μεγαλύτερη αντίσταση εισόδου και μικρότερο κέρδος από τον αντίστοιχο ενισχυτή κοινού εκπομπού.

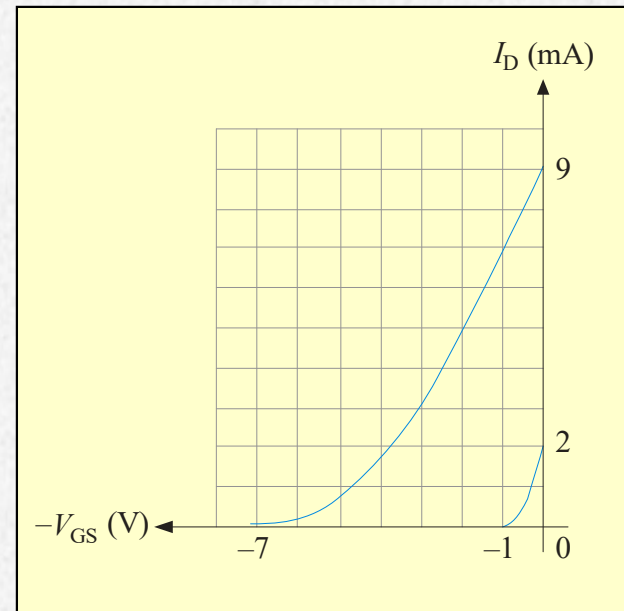
Το κέρδος τάσης δίνεται από την:  $A_v = g_m R_d$ .



# Ενισχυτές FET

## Ενισχυτής Κοινής-Πηγής

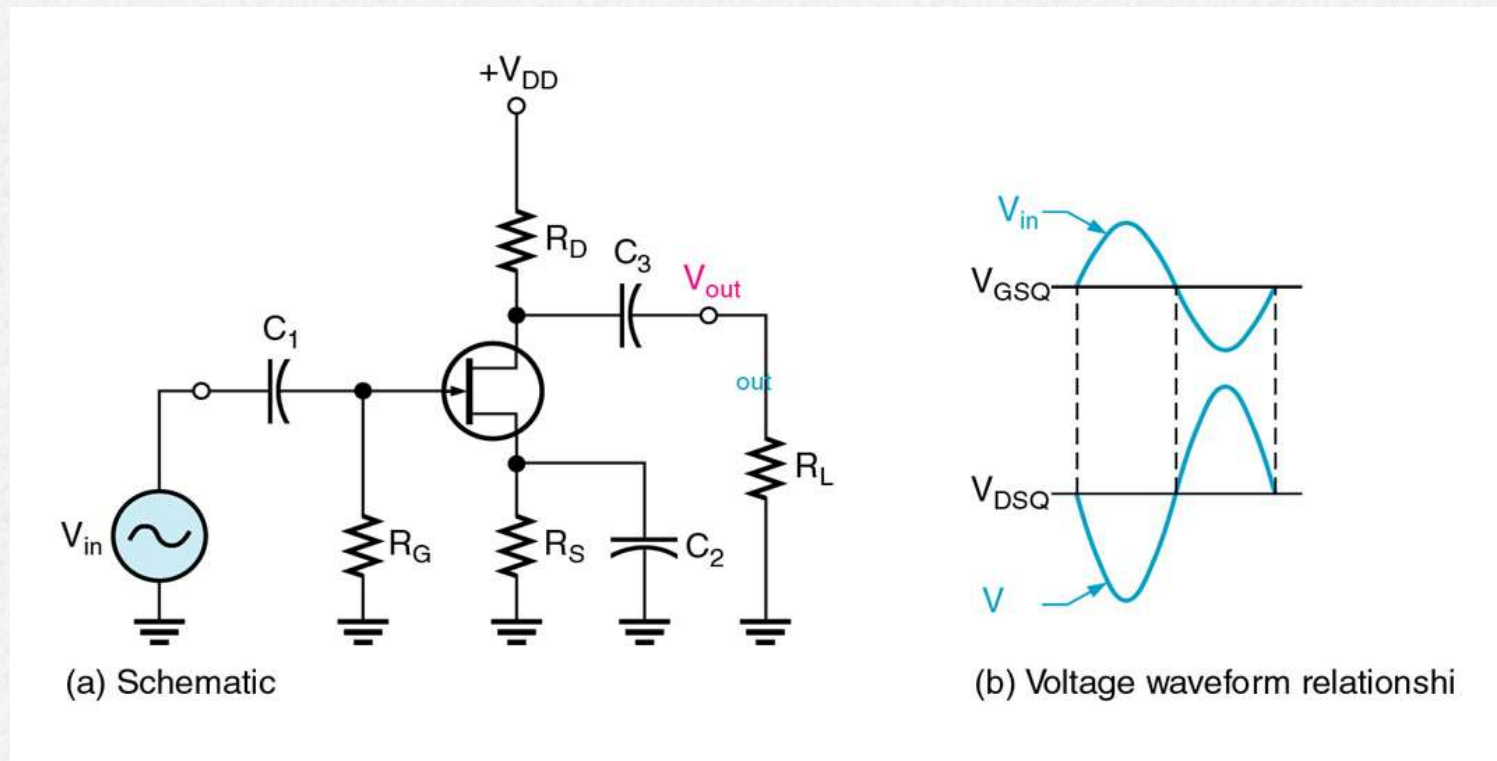
Γενικά, παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός JFET στο φύλλο κατασκευαστή. Για παράδειγμα, δίνεται η διακύμανση τιμών ενός 2N5458 JFET.



OFF CHARACTERISTICS		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Gate-Source Cutoff Voltage ( $V_{DS} = 15$ Vdc, $i_D = 10$ nA dc)	2N5457	$V_{GS(off)}$	-0.5	-	-6.0	Vdc
	2N5458		-1.0	-	-7.0	
ON CHARACTERISTICS		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Zero Gate-Source Drain Current ( $V_{DS} = 15$ Vdc, $V_{GS} = 0$ )	2N5457	$I_{DSS}$	1.0	3.0	5.0	mA dc
	2N5458		2.0	6.0	9.0	

# Ενισχυτές Κοινής Πηγής

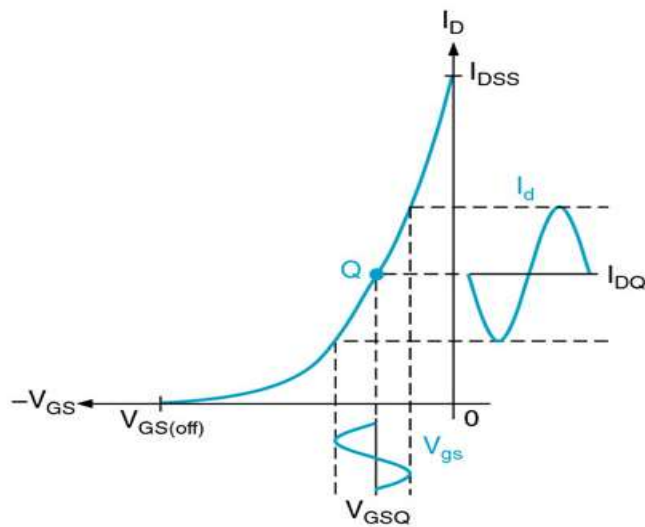
Ο ενισχυτής κοινής-πηγής πολώνεται έτσι ώστε να παραμένει πάντα στη γραμμική περιοχή λειτουργίας.



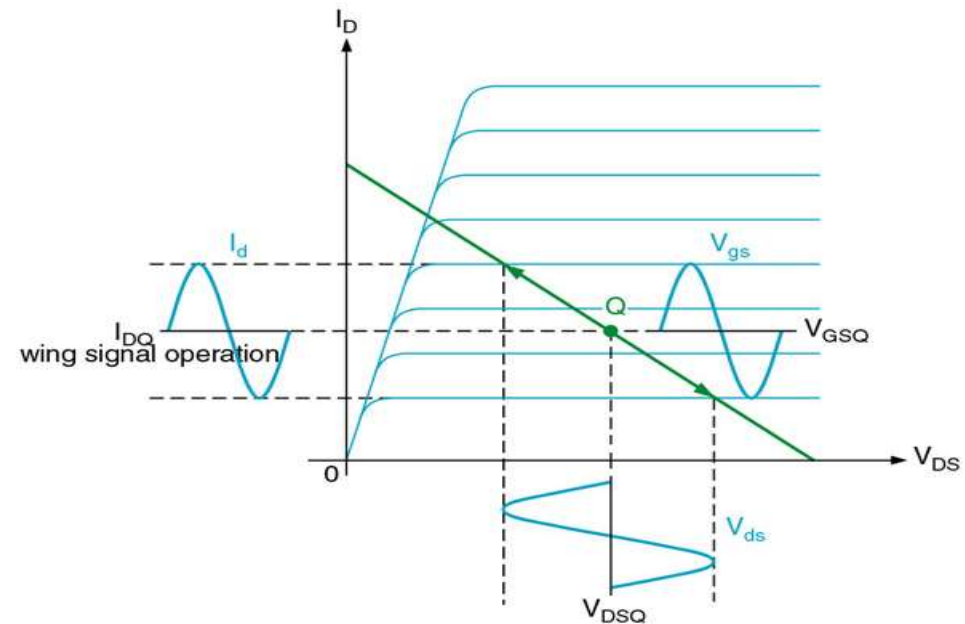
Ενισχυτής κοινής πηγής με αυτό-πόλωση. Η πηγή γειώνεται στο ac μέσω του  $C_2$ .

# Ενισχυτές Κοινής Πηγής

Η χαρακτηριστική μεταφοράς και οι καμπύλες απορροής με την ευθεία φορτίου δίνουν μια γραφική αναπαράσταση του πώς το σήμα εισόδου επηρεάζει το ρεύμα απορροής σε σχέση με το σημείο  $Q$ .



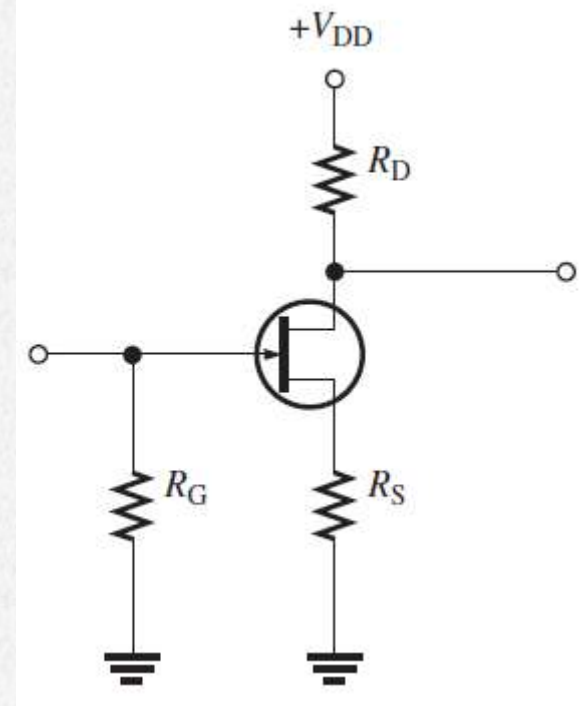
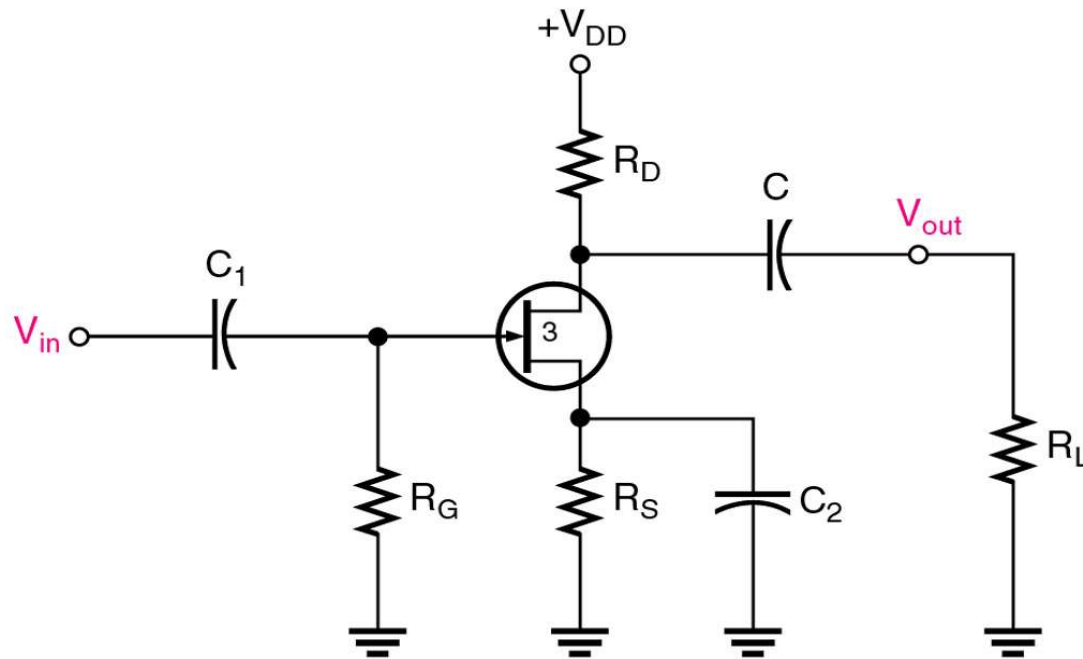
(a) JFET (n-channel) transfer characteristic curve showing signal operation



(b) JFET (n-channel) drain curves showing signal operation

# Ενισχυτές Κοινής Πηγής

Η DC ανάλυση του ενισχυτή κοινής πηγής επιβάλλει τον υπολογισμό του  $I_D$ . Συνηθίζεται η πόλωση στη μεσαία τιμή ώστε το  $I_D$  να είναι το μισό του  $I_{DSS}$ . Οι πυκνωτές είναι ανοικτοκυκλώματα στο dc.

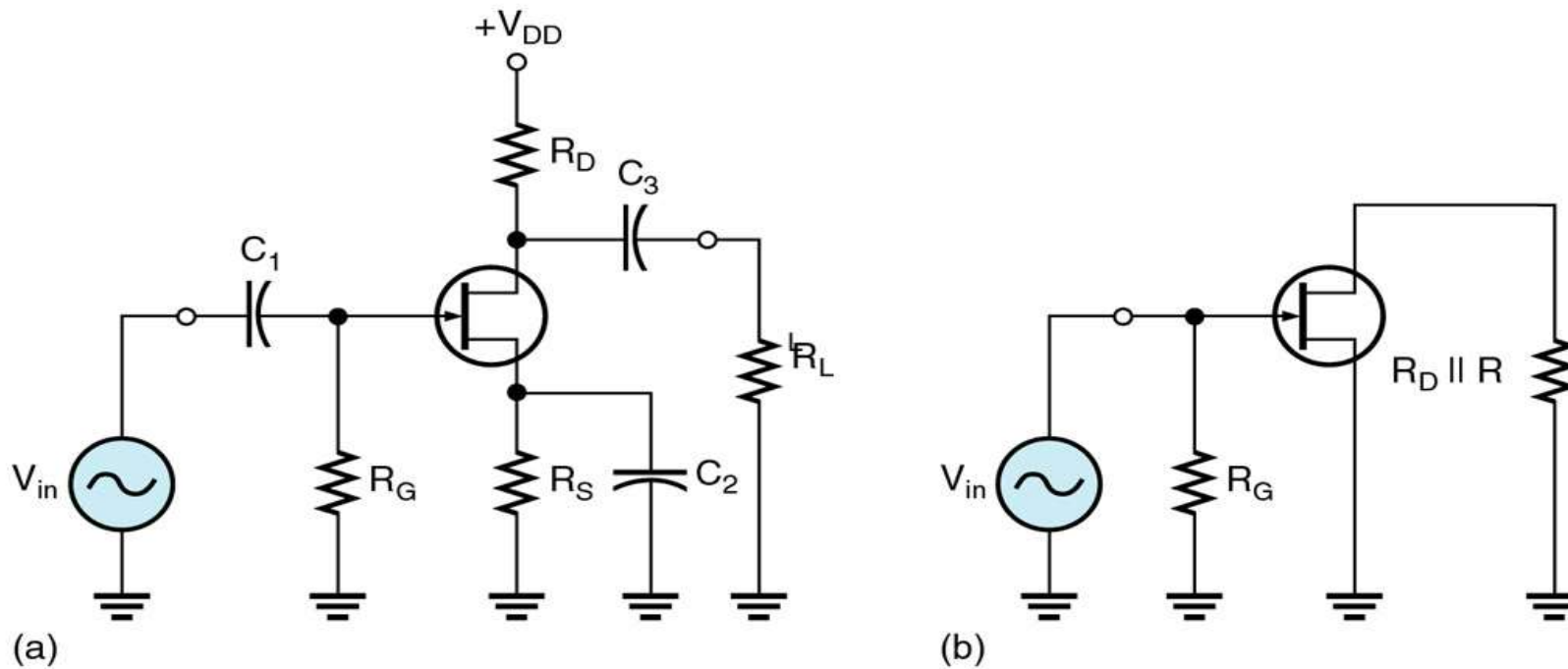


**Ισοδύναμο DC**



# Ενισχυτές Κοινής Πηγής

Στο ac ισοδύναμο κύκλωμα οι πυκνωτές βραχυκυκλώνονται. Οι  $R_D$  και  $R_L$  παραλληλίζονται.

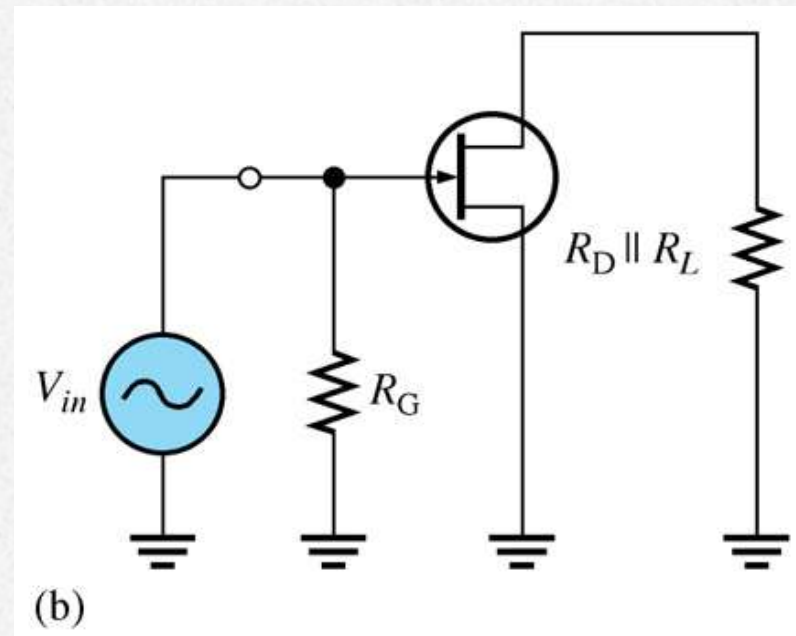


# Ενισχυτές Κοινής Πηγής

Στο ισοδύναμο ac κύκλωμα συμπεριλαμβάνεται το φορτίο ( $R_L$ ) το οποίο παραλληλίζεται με την ( $R_D$ ). Αυτό μειώνει το κέρδος διότι μειώνεται η συνολική αντίσταση  $R_d$ .

Το κέρδος δίνεται από την:

$$A_v = g_m R_d$$



# Ενισχυτές FET

## Ενισχυτής Κοινής-Πηγής

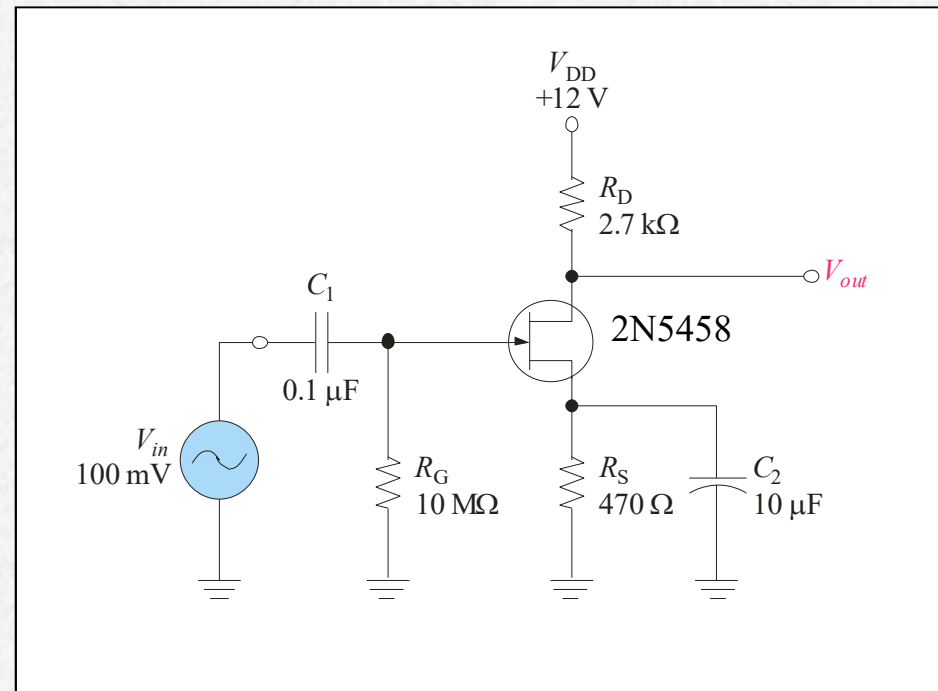
Για να αναλύσουμε τον ενισχυτή CS, ξεκινάμε με DC ανάλυση. Θα υπολογίσουμε το  $I_D$  από τις δοσμένες τιμές του κυκλώματος.

### Παράδειγμα:

Ποιο είναι το ρεύμα απορροής για το FET 2N5458?

### Λύση:

Από το φύλλο κατασκευαστή, δίνεται ότι  $I_{DSS} = 6.0 \text{ mA}$  και  $V_{GS(off)} = -4 \text{ V}$ .



# Ενισχυτές FET

## Ενισχυτής Κοινής-Πηγής

**Λύση:** (συνέχεια)

Από την εξίσωση  $I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{I_D R_S}{V_{GS(off)}} \right)^2$  έχουμε:

Λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση βρίσκουμε  $I_D = 2.75\text{mA}$ .

```
ID=IDSS*(1-(-ID*RS/VG...  
ID= .0027494671581759  
IDSS= .006  
RS= 470  
VGSOFF= 4.0  
bound=(-1E99,1E99)
```

enter absolute  
value

```
GRAPH RANGE ZOOM TRACE SOLVE
```

press **F5**

# Ενισχυτές FET

## Ενισχυτής Κοινής-Πηγής

**Παράδειγμα:** Έστω  $I_{DSS} = 6.0 \text{ mA}$ ,  $V_{GS(off)} = -4 \text{ V}$ , και  $V_{GS} = -1.3 \text{ V}$ .  
Υπολογίστε το κέρδος τάσης.

**Λύση:**

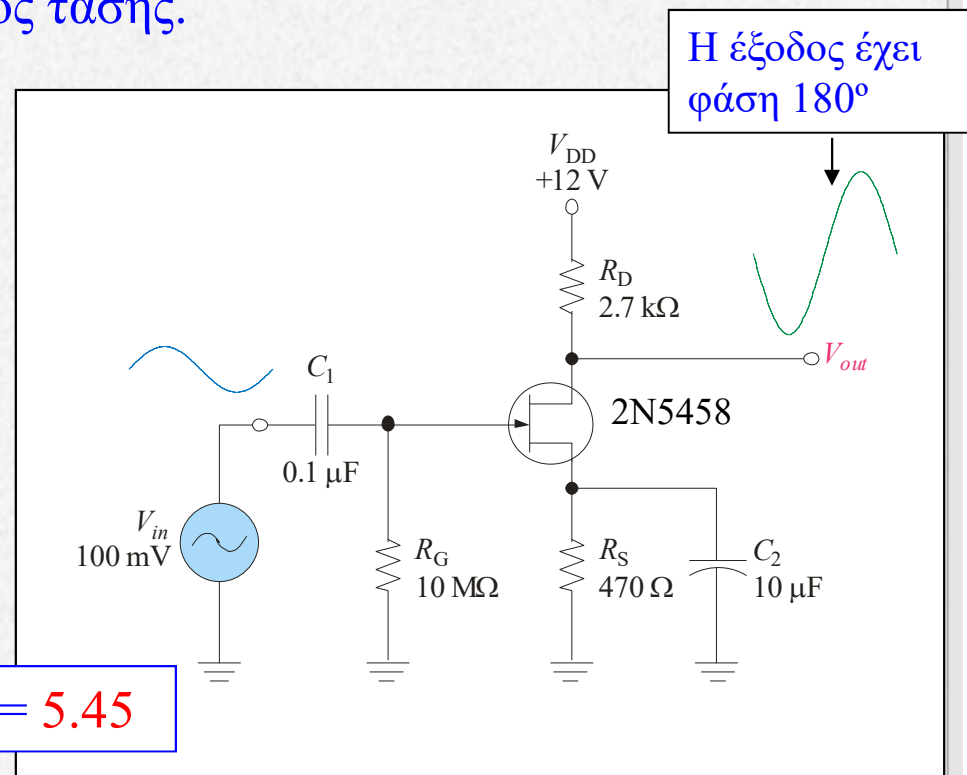
$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|} = \frac{2(6.0 \text{ mA})}{4 \text{ V}} = 3.0 \text{ mS}$$

$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)$$

$$= 3.0 \text{ mS} \left( 1 - \frac{-1.3 \text{ V}}{-4.0 \text{ V}} \right)$$

$$2.02 \text{ mS}$$

$$A_v = g_m R_d = (2.02 \text{ mS})(2.7 \text{ k}\Omega) = 5.45$$



# Ενισχυτές FET

## Ενισχυτής Κοινής-Πηγής

Το κέρδος μειώνεται όταν συνδέεται φορτίο διότι μειώνεται η συνολική ac αντίσταση απορροής ( $R_d$ ).

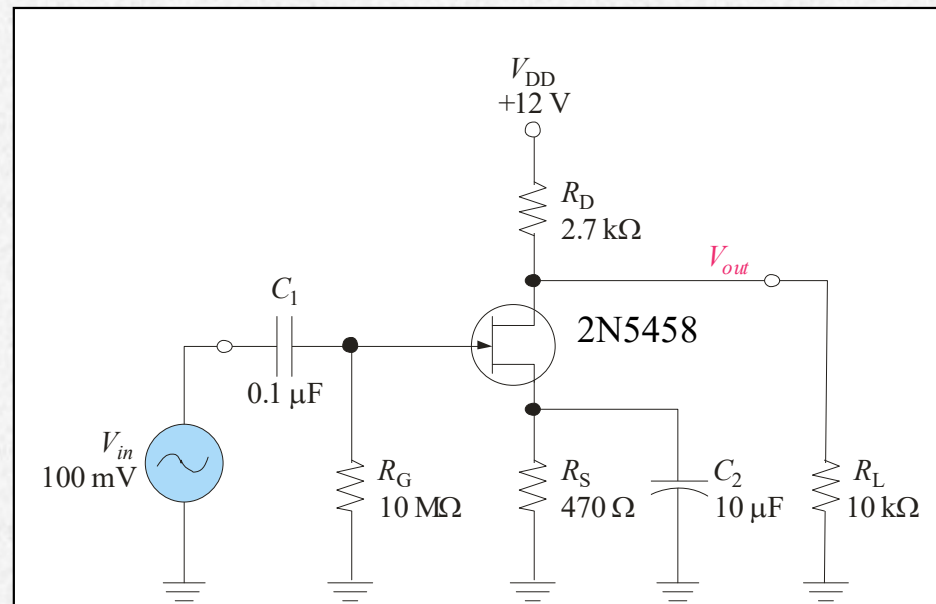
**Παράδειγμα:**

Πώς μεταβάλλεται το κέρδος με την προσθήκη 10 kΩ στην έξοδο?

**Λύση:**

$$\begin{aligned} R_d &= \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} \\ &= \frac{(2.7 \text{ k}\Omega)(10 \text{ k}\Omega)}{2.7 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \\ &= 2.13 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$A_v = g_m R_d = (2.02 \text{ mS})(2.13 \text{ k}\Omega) = 4.29$$



# Ενισχυτές Κοινής Πηγής - Παράδειγμα

Ποια είναι η τιμή της τάσης εξόδου για τον ενισχυτή του σχήματος?

$$I_{DSS} = 4.3\text{mA} ; V_{GS(\text{off})} = -2.7\text{V} ,$$

$$I_D = 1.91\text{mA}$$

Using this value, calculate  $V_D$ .

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 12\text{V} - (1.91\text{mA})(3.3\text{k}\Omega) = 5.70\text{V}$$

Next calculate  $g_m$  as follows:

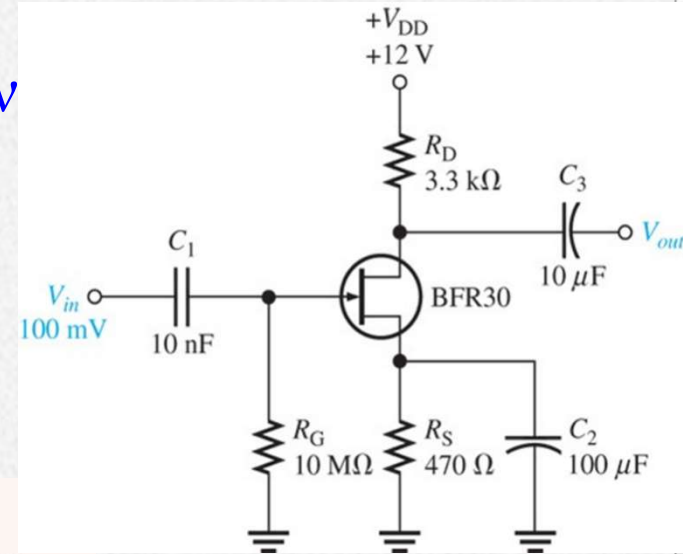
$$V_{GS} = -I_D R_S = -(1.91\text{mA})(470\Omega) = -0.90\text{V}$$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(\text{off})}|} = \frac{2(4.3\text{mA})}{2.7\text{V}} = 3.18\text{mS}$$

$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(\text{off})}} \right) = 3.18\text{mS} \left( 1 - \frac{-0.90\text{V}}{-2.7\text{V}} \right) = 2.12\text{mS}$$

Finally, find the ac output voltage.

$$V_{out} = A_v V_{in} = g_m R_D V_{in} = (2.12\text{mS})(3.3\text{k}\Omega)(100\text{mV}) = 700\text{mV}$$



## Παράδειγμα (Επίδραση AC φορτίου στο κέρδος)

Εάν συνδεθεί φορτίο 4.7K μέσω πυκνωτή στην έξοδο του προηγούμενου ενισχυτή, πόσο θα μεταβληθεί το κέρδος τάσης?

The ac drain resistance is

$$R_d = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} = \frac{(3.3 \text{ k}\Omega)(4.7 \text{ k}\Omega)}{8 \text{ k}\Omega} = 1.94 \text{ k}\Omega$$

Calculation of  $V_{out}$  yields

$$V_{out} = A_v V_{in} = g_m R_d V_{in} = (2.12 \text{ mS})(1.94 \text{ k}\Omega)(100 \text{ mV}) = \mathbf{411 \text{ mV rms}}$$



# Αντίσταση εισόδου

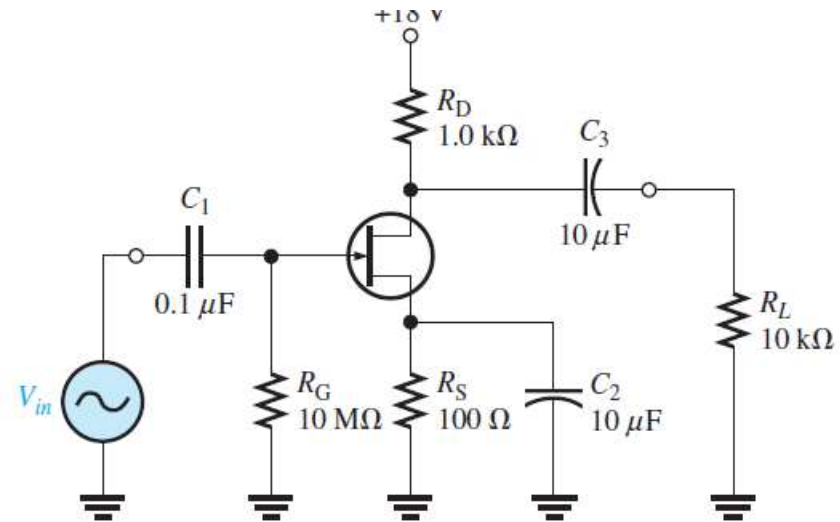
Η αντίσταση εισόδου ισούται με τον παράλληλο συνδυασμό της αντίστασης  $R_G$ , με την αντίσταση εισόδου του FET,  $V_{GS} / I_{GSS}$ . Το ανάστροφο ρεύμα  $I_{GSS}$ , δίνεται από το φύλλο κατασκευαστή για συγκεκριμένη τιμή της  $V_{GS}$  έτσι ώστε η αντίσταση εισόδου δίνεται από:

$$R_{in} = R_G \parallel \left( \frac{V_{GS}}{I_{GSS}} \right)$$

Αφού η ποσότητα  $V_{GS} / I_{GSS}$  είναι τυπικά μεγαλύτερη από την  $R_G$ , η τιμή της αντίστασης εισόδου είναι πολύ κοντά στην τιμή της  $R_G$ .

# Ενισχυτές Κοινής Πηγής - Παράδειγμα

Ποια είναι η αντίσταση εισόδου που βλέπει η γεννήτρια συχνοτήτων?  
 $I_{GSS} = 30 \text{ nA}$  σε τάση  $V_{GS} = 10 \text{ V}$ .



The input resistance at the gate of the JFET is

$$R_{IN(\text{gate})} = \frac{V_{GS}}{I_{GSS}} = \frac{10 \text{ V}}{30 \text{ nA}} = 333 \text{ M}\Omega$$

The input resistance seen by the signal source is

$$R_{in} = R_G \parallel R_{IN(\text{gate})} = 10 \text{ M}\Omega \parallel 333 \text{ M}\Omega = 9.7 \text{ M}\Omega$$

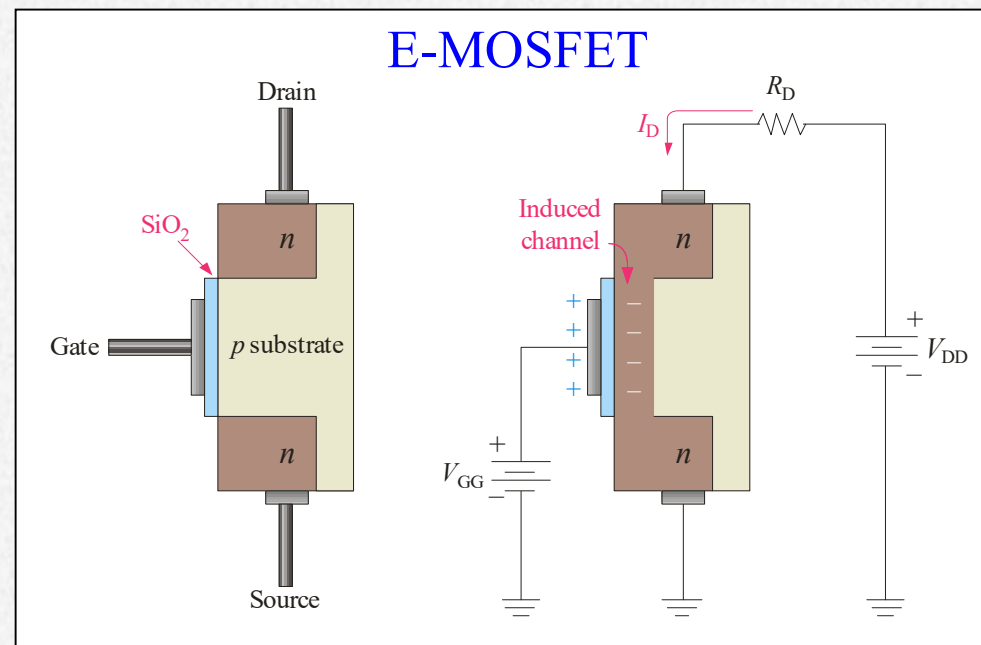
For all practical purposes,  $R_{IN}$  can be assumed equal to  $R_G$ .

# To MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor)

Το FET μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού χρησιμοποιεί μια μονωμένη πύλη για να απομονώσει την πύλη από το κανάλι. Υπάρχουν δύο τύποι, το MOSFET πυκνώσεως (E-MOSFET) και το MOSFET αραιώσεως (D-MOSFET).

## MOSFET Πυκνώσεως (Enhancement E-MOSFET)

Ένα E-MOSFET δεν έχει κανάλι αγωγιμότητας έως ότου αυτό δημιουργηθεί από μια τάση που εφαρμόζεται στην πύλη, οπότε λειτουργεί μόνο σε λειτουργία πυκνώσεως. Εδώ απεικονίζεται ένα MOSFET καναλιού-n με θετική τάση πύλης να δημιουργεί το κανάλι.

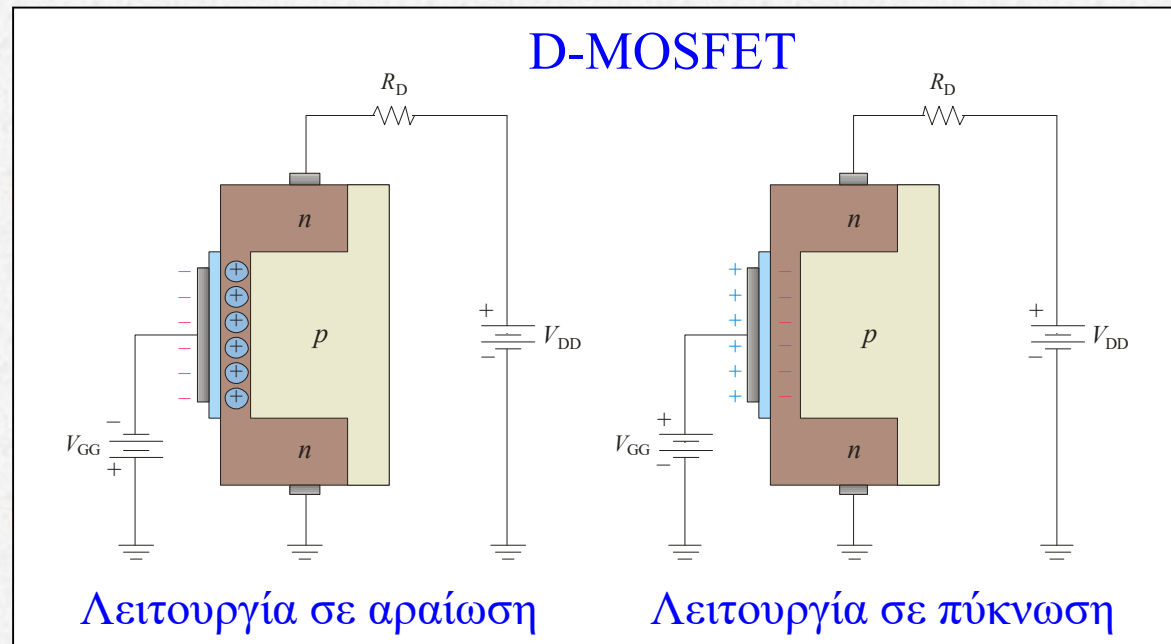


# Το MOSFET

## MOSFET Αραιώσεως (Depletion D-MOSFET)

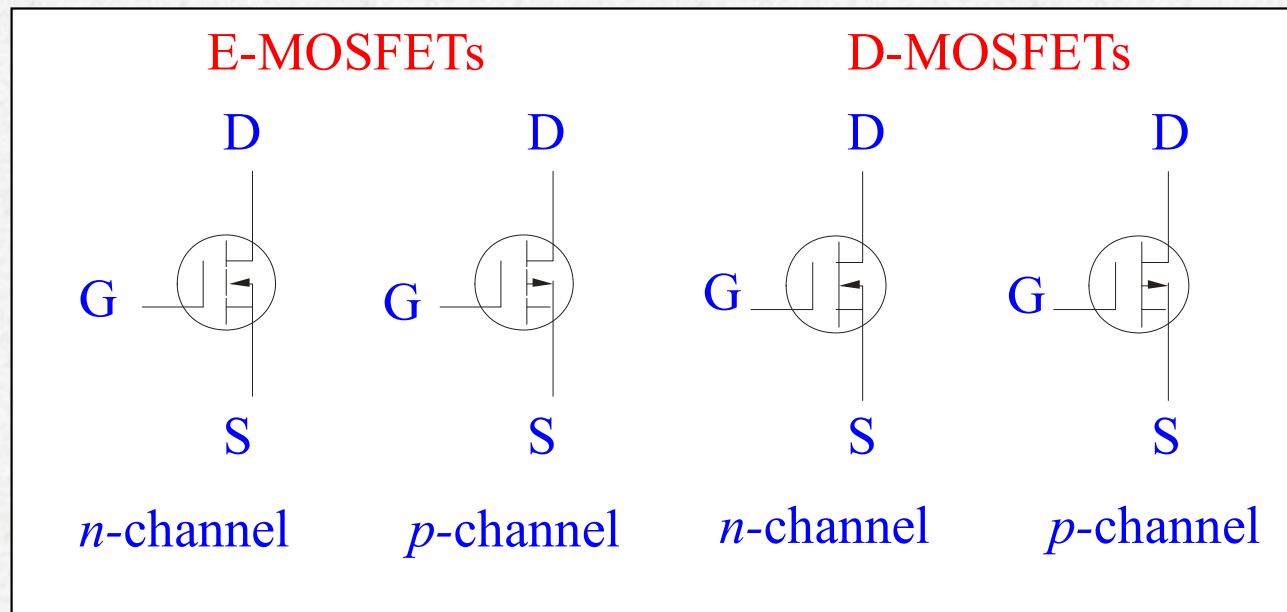
Το D-MOSFET διαθέτει ένα κανάλι που ελέγχεται από την τάση της πύλης. Για MOSFET καναλιού-n, μια αρνητική τάση αραιώνει το κανάλι από φορείς, ενώ μια θετική τάση το ενισχύει σε φορείς.

Ένα D-MOSFET μπορεί να λειτουργήσει και στις δύο λειτουργίες, ανάλογα με την τάση της πύλης.



# To MOSFET

Εμφανίζονται τα σύμβολα των MOSFET. Παρατηρήστε τη διακεκομμένη γραμμή που αντιπροσωπεύει το E-MOSFET που έχει ένα επαγόμενο κανάλι. Το κανάλι-n έχει το βέλος προς τα μέσα.

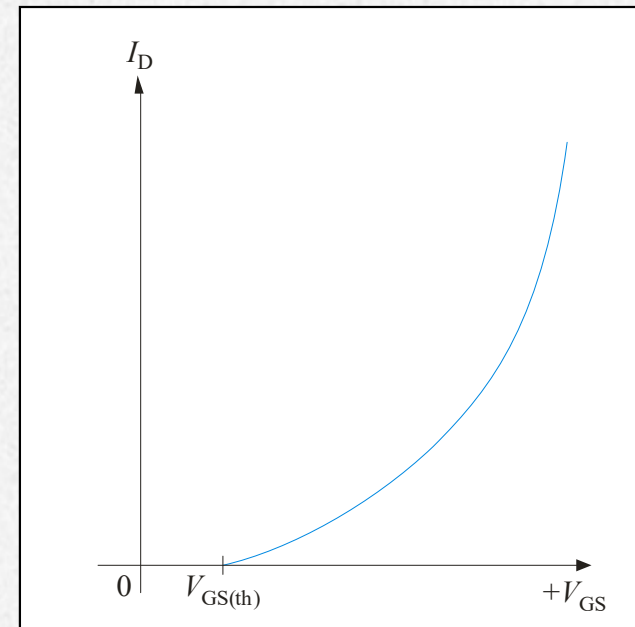


# Χαρακτηριστική και Παράμετροι E-MOSFET

Η χαρακτηριστική μεταφοράς για ένα E-MOSFET έχει το ίδιο παραβολικό σχήμα με το JFET αλλά η θέση της είναι μετατοπισμένη κατά μήκος του άξονα x. Η χαρακτηριστική μεταφοράς για ένα E-MOSFET καναλιού-n βρίσκεται εξ ολοκλήρου στο πρώτο τεταρτημόριο όπως φαίνεται.

Η καμπύλη ξεκινά από  $V_{GS(th)}$ , η οποία είναι η μη μηδενική τάση που απαιτείται για την αγωγιμότητα καναλιού. Η εξίσωση για το ρεύμα απορροής είναι:

$$I_D = K \left( V_{GS} - V_{GS(th)} \right)^2$$

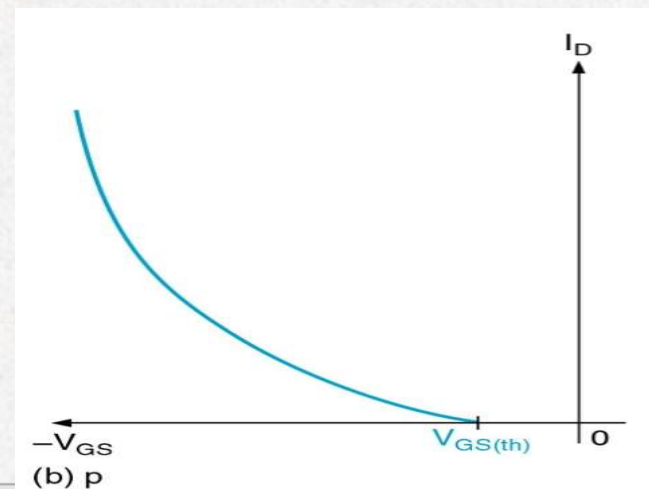
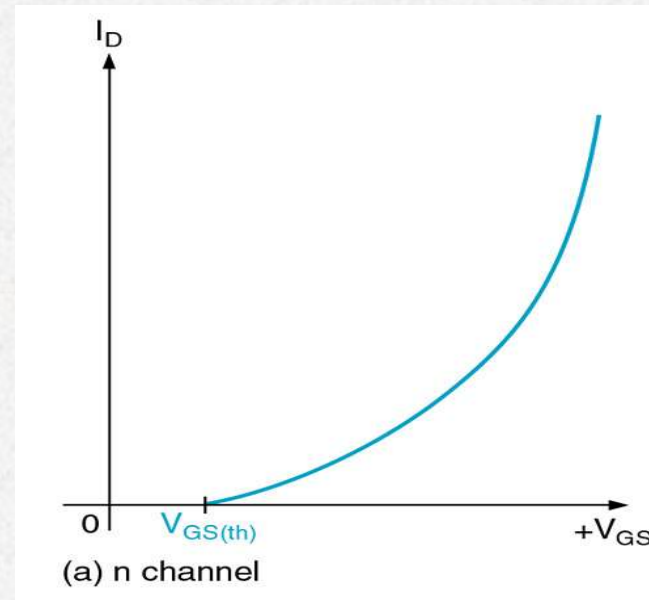


# Χαρακτηριστική και Παράμετροι E-MOSFET

Το E-MOSFET δεν άγει έως ότου η  $V_{GS}$  φτάσει στην τάση κατωφλίου ( $V_{GS(th)}$ ). Το ρεύμα  $I_D$  κατά την αγωγή μπορεί να προσδιοριστεί από τους παρακάτω τύπους. Η σταθερά  $K$  πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί. Το ρεύμα  $I_{D(on)}$  δίνεται στο φύλλο κατασκευαστή.

$$K = I_{D(on)} / (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

$$I_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$



# Χαρακτηριστική και Παράμετροι E-MOSFET

Το E-MOSFET 2N7002 έχει ρεύμα  $I_{D(on)} = 500\text{mA}$  (ελάχιστη τιμή) σε τάση  $V_{GS} = 10\text{V}$  και  $V_{GS(th)} = 1\text{V}$ . Να βρεθεί το ρεύμα απορροής για  $V_{GS} = 5\text{V}$ .

First, solve for  $K$  using Equation 8-4.

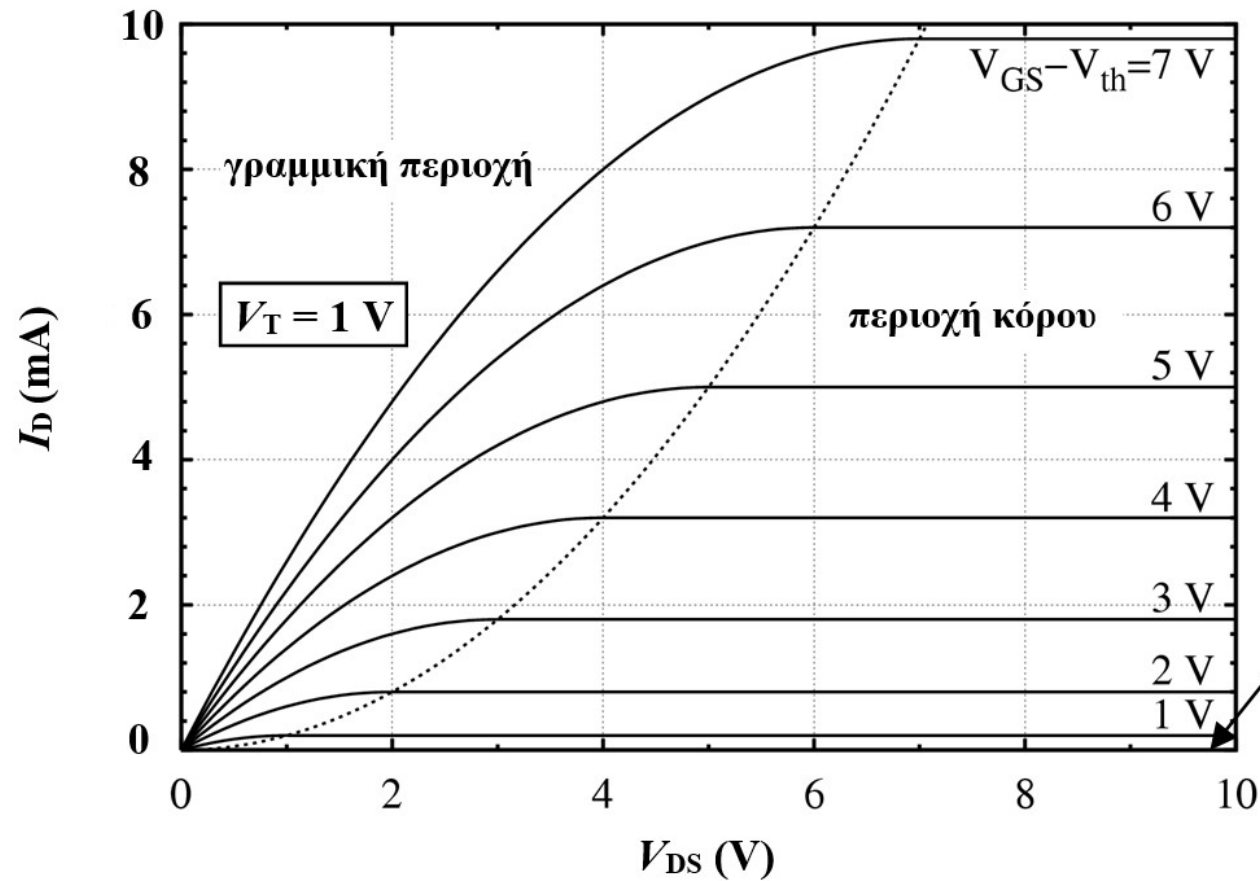
$$K = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS} - V_{GS(th)})^2} = \frac{500 \text{ mA}}{(10 \text{ V} - 1 \text{ V})^2} = \frac{500 \text{ mA}}{81 \text{ V}^2} = 6.17 \text{ mA/V}^2$$

Next, using the value of  $K$ , calculate  $I_D$  for  $V_{GS} = 5 \text{ V}$ .

$$I_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 = (6.17 \text{ mA/V}^2)(5 \text{ V} - 1 \text{ V})^2 = \mathbf{98.7 \text{ mA}}$$



# Στατικές χαρακτηριστικές E-MOSFET



Για λειτουργία στον κόρο θα πρέπει να ικανοποιούνται και οι δύο συνθήκες:

$$V_{GS} \geq V_{GS(th)}$$
$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(th)}$$

περιοχή αποκοπής

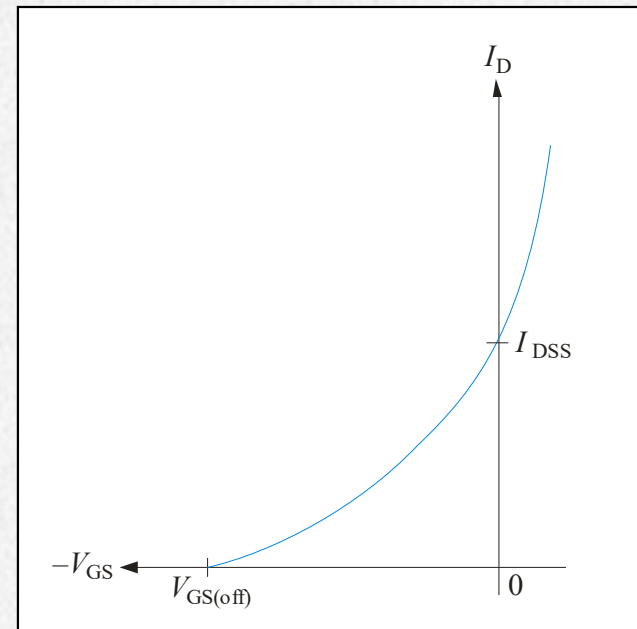
Στατικές χαρακτηριστικές E-MOSFET.

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι D-MOSFET

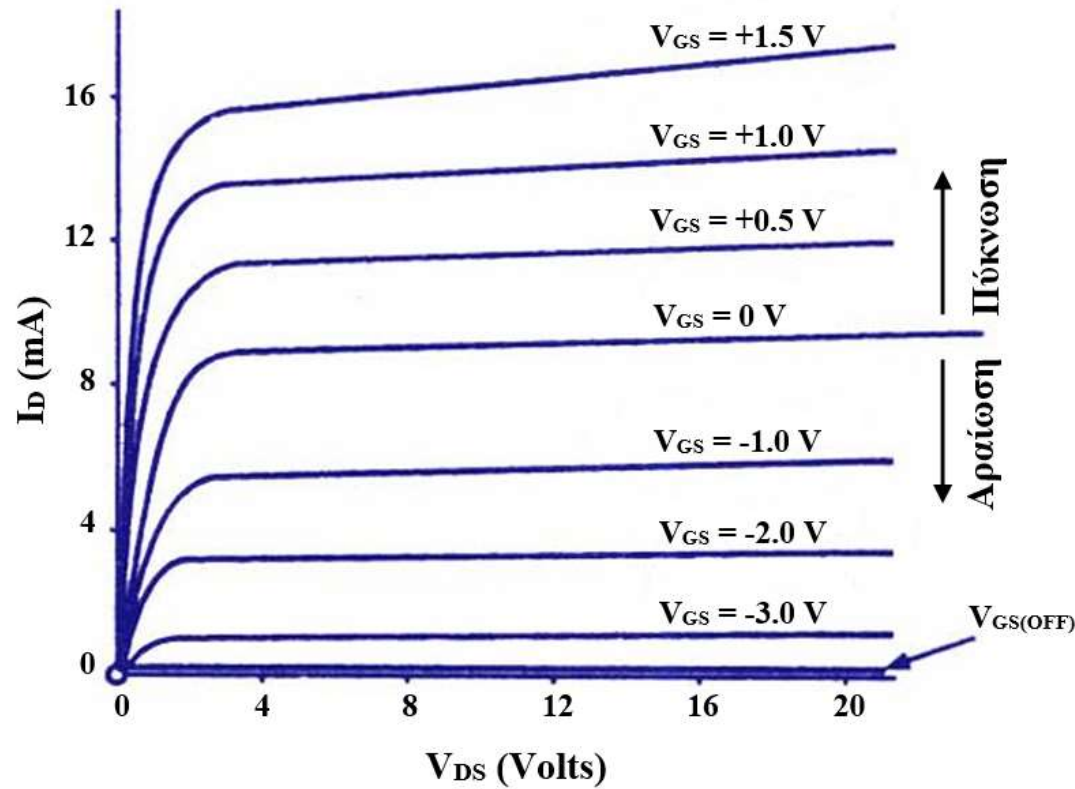
Θυμηθείτε ότι το D-MOSFET μπορεί να λειτουργήσει και στις δύο λειτουργίες. Για το απεικονιζόμενο D-MOSFET καναλιού-n, η λειτουργία στα αριστερά του άξονα y σημαίνει ότι βρίσκεται σε κατάσταση αραίωσης. Λειτουργία στα δεξιά σημαίνει ότι βρίσκεται σε κατάσταση πύκνωσης.

Όπως και με το JFET, το  $I_D = 0$  στην  $V_{GS(off)}$ . Όταν η  $V_{GS} = 0$ , το ρεύμα απορροής είναι  $I_{DSS}$ , που όμως **δεν** είναι το μέγιστο ρεύμα. Η εξίσωση του ρεύματος απορροής είναι

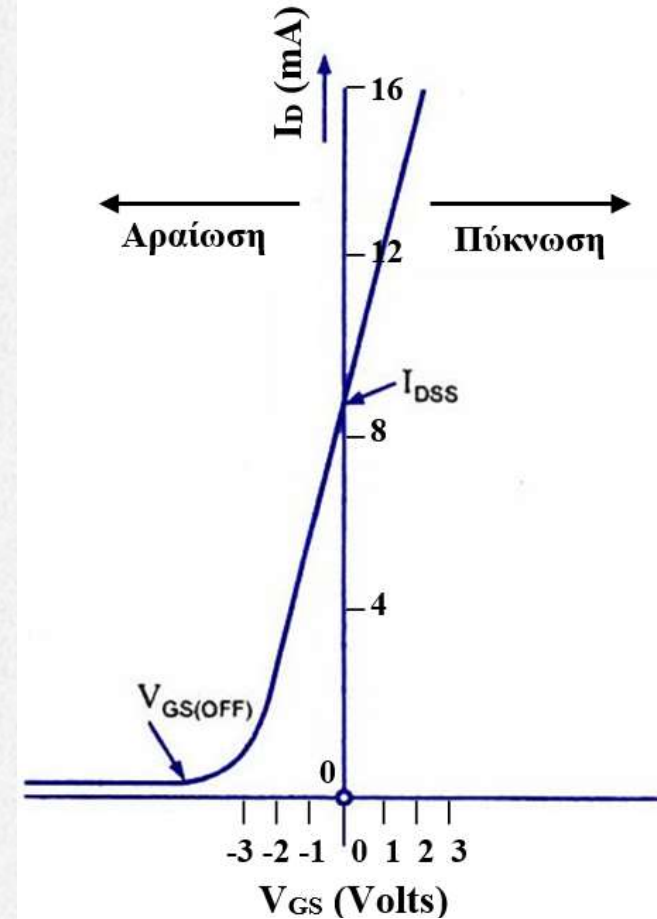
$$I_D \cong I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$



# Στατικές χαρακτηριστικές και χαρακτηριστική μεταφοράς D-MOSFET



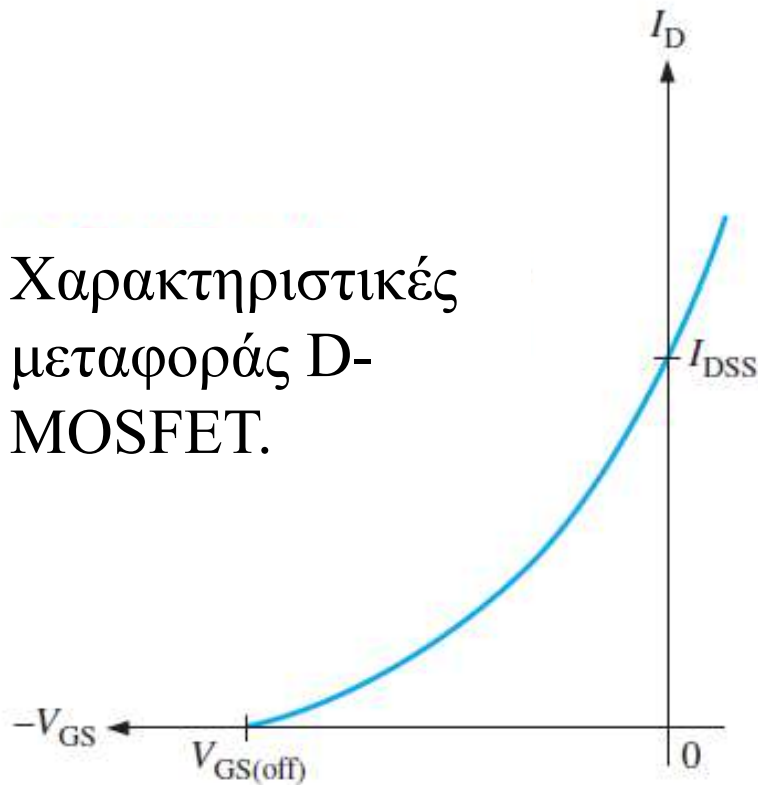
Στατικές χαρακτηριστικές D-MOSFET.



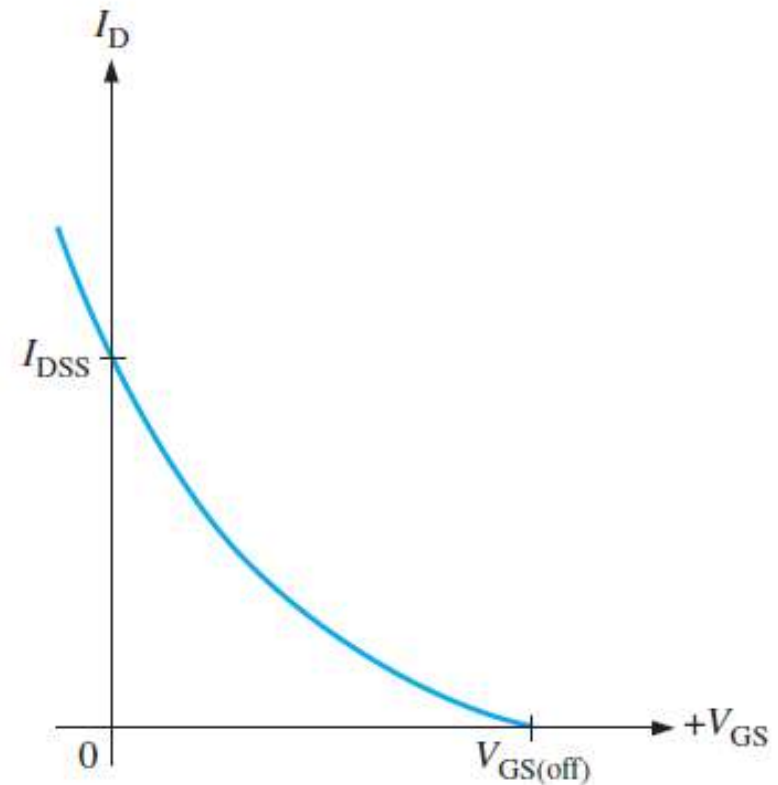
Χαρακτηριστική μεταφοράς D-MOSFET.

# Χαρακτηριστική και Παράμετροι D-MOSFET

Χαρακτηριστικές  
μεταφοράς D-  
MOSFET.



(a)  $n$  channel



(b)  $p$  channel

# Χαρακτηριστική Μεταφοράς D-MOSFET

Για ένα D-MOSFET έχουμε  $I_{DSS} = 10\text{mA}$  και  $V_{GS(off)} = -8\text{V}$ . Να βρεθούν:

- (a) Είναι καναλιού-n ή καναλιού-p?
- (b) Υπολογίστε το  $I_D$  στην τάση  $V_{GS} = -3\text{V}$ .
- (c) Υπολογίστε το  $I_D$  στην τάση  $V_{GS} = +3\text{V}$ .

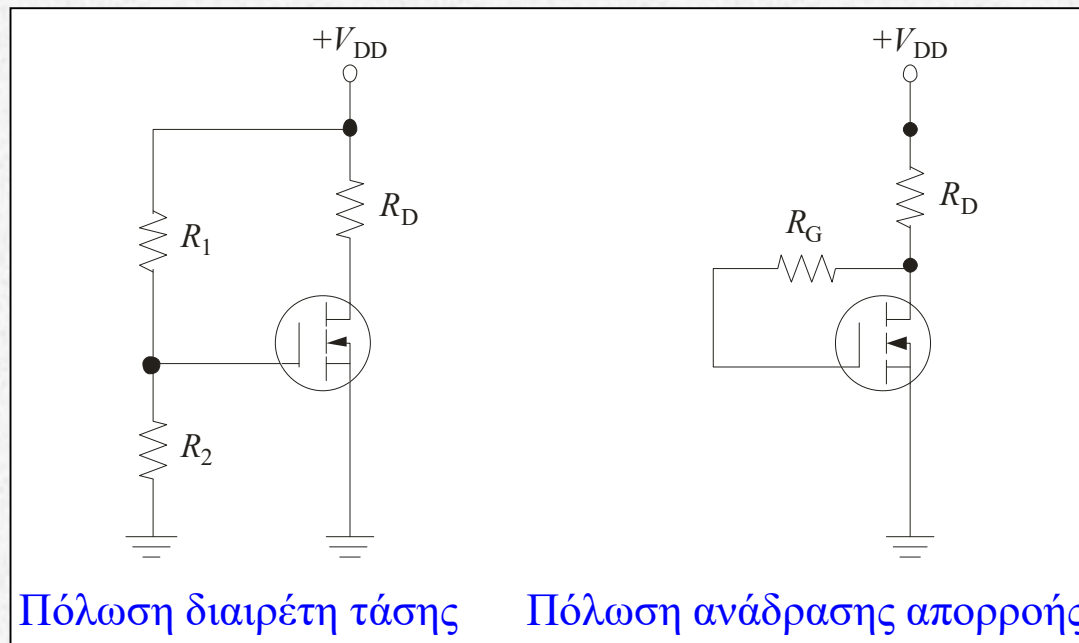
**Solution** (a) The device has a negative  $V_{GS(off)}$ ; therefore, it is an *n*-channel MOSFET.

$$(b) I_D \cong I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 = (10 \text{ mA}) \left( 1 - \frac{-3 \text{ V}}{-8 \text{ V}} \right)^2 = 3.91 \text{ mA}$$

$$(c) I_D \cong (10 \text{ mA}) \left( 1 - \frac{+3 \text{ V}}{-8 \text{ V}} \right)^2 = 18.9 \text{ mA}$$

# Πόλωση E-MOSFET

Τα E-MOSFET μπορούν να πολωθούν με τις ίδιες μεθόδους με τα BJT που μελετήθηκαν νωρίτερα. Απεικονίζονται η πόλωση με διαιρέτη τάσης και η πόλωση ανάδρασης απορροής για MOSFET καναλιού-n.



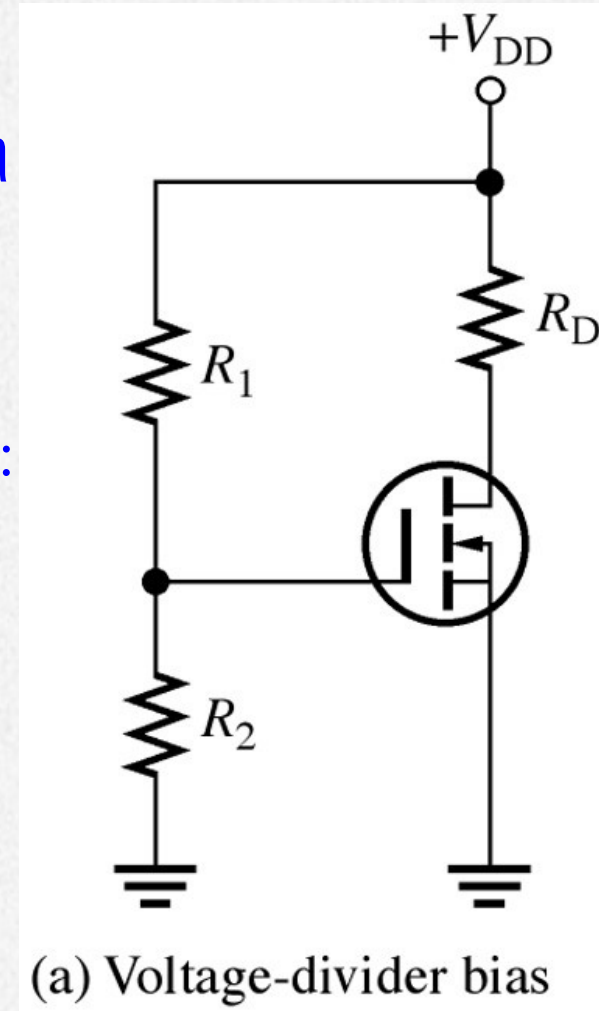
# Πόλωση E-MOSFET

Στα E-MOSFET, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηδενική πόλωση. Πρέπει να εφαρμοστεί πόλωση διαιρέτη τάσης για να ρυθμιστεί η  $V_{GS}$  σε τιμή μεγαλύτερη από την κατώτατη τάση ( $V_{GS(th)}$ ). Το  $I_D$  μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας τους ακόλουθους τύπους:

$$K = I_{D(on)} / (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

$$I_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

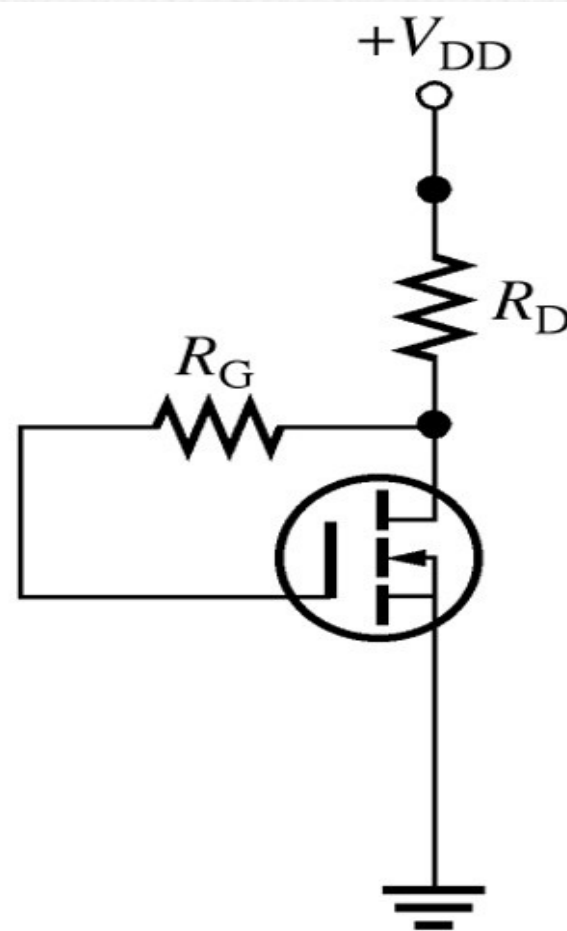
Η  $V_{DS}$  μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή των νόμων του Ohm και Kirchhoff στο κύκλωμα απορροής.



# Πόλωση E-MOSFET

Με πόλωση ανάδρασης απορροής δεν υπάρχει πτώση τάσης σε όλη την  $R_G$  κάνοντας  $V_{GS} = V_{DS}$ . Με την  $V_{GS}$  δοσμένη, ο προσδιορισμός του  $I_D$  μπορεί να επιτευχθεί από τον παρακάτω τύπο:

$$I_D = (V_{DD} - V_{DS})/R_D$$



(b) Drain-feedback bias



# Πόλωση E-MOSFET - Παράδειγμα

Προσδιορίστε τις  $V_{GS}$  και  $V_{DS}$  για το E-MOSFET που δίνεται. Υποθέστε ότι το  $I_{D(on)} = 200\text{mA}$  σε τάση  $V_{GS} = 4\text{V}$  και  $V_{GS(th)} = 2\text{V}$ .

For the E-MOSFET in Figure 8–47, the gate-to-source voltage is

$$V_{GS} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} = \left( \frac{15\text{ k}\Omega}{115\text{ k}\Omega} \right) 24\text{ V} = 3.13\text{ V}$$

To determine  $V_{DS}$ , first find  $K$  using the minimum value of  $I_{D(on)}$  and the specified voltage values.

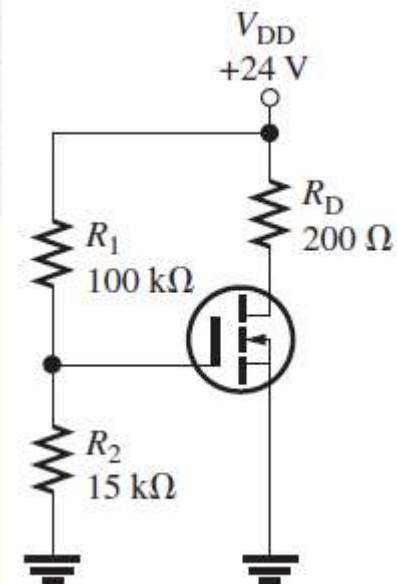
$$K = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS} - V_{GS(th)})^2} = \frac{200\text{ mA}}{(4\text{ V} - 2\text{ V})^2} = \frac{200\text{ mA}}{4\text{ V}^2} = 50\text{ mA/V}^2$$

Now calculate  $I_D$  for  $V_{GS} = 3.13\text{ V}$ .

$$\begin{aligned} I_D &= K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 = (50\text{ mA/V}^2)(3.13\text{ V} - 2\text{ V})^2 \\ &= (50\text{ mA/V}^2)(1.13\text{ V})^2 = 63.8\text{ mA} \end{aligned}$$

Finally, calculate  $V_{DS}$ .

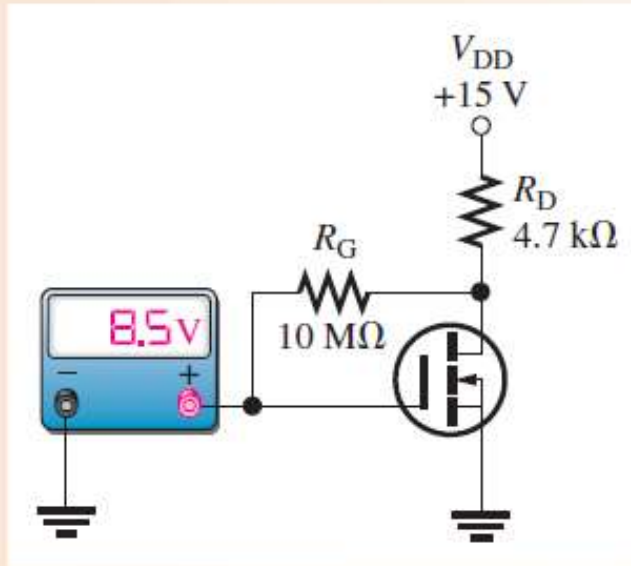
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 24\text{ V} - (63.8\text{ mA})(200\ \Omega) = 11.2\text{ V}$$



# Πόλωση E-MOSFET - Παράδειγμα

Προσδιορίστε το ρεύμα απορροής  $I_D$ . Το MOSFET έχει  $V_{GS(th)} = 3\text{ V}$ .

► FIGURE 8-48

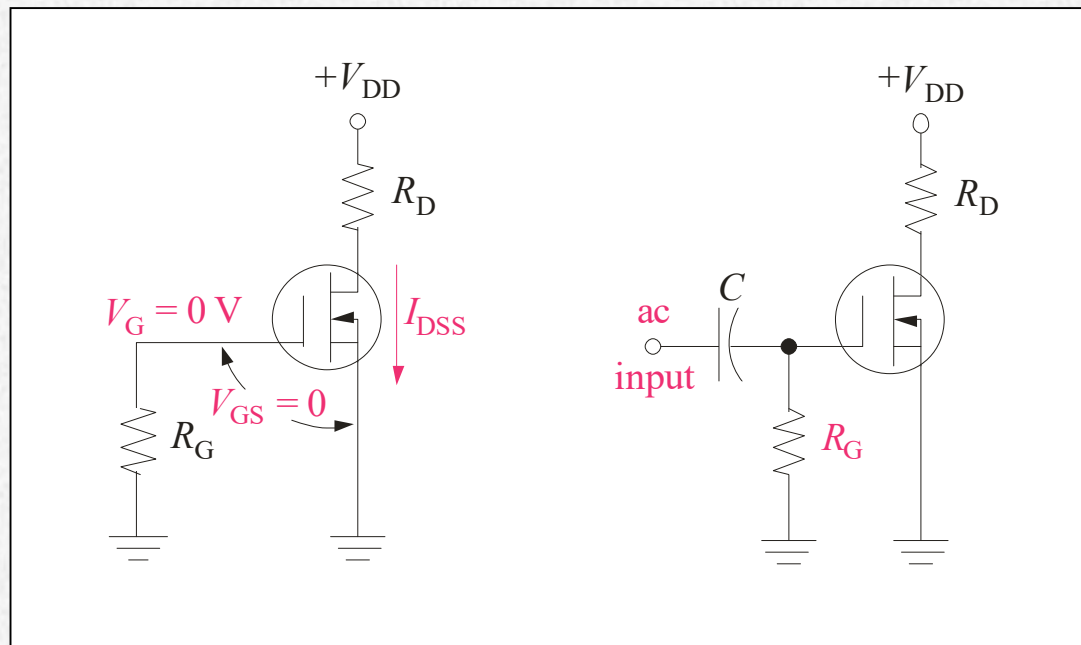


The meter indicates  $V_{GS} = 8.5\text{ V}$ . Since this is a drain-feedback configuration,  $V_{DS} = V_{GS} = 8.5\text{ V}$ .

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{15\text{ V} - 8.5\text{ V}}{4.7\text{ k}\Omega} = 1.38\text{ mA}$$

# Πόλωση D-MOSFET

Ο απλούστερος τρόπος για να πολώσουμε ένα D-MOSFET είναι με μηδενική πόλωση. Αυτό λειτουργεί επειδή η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει είτε σε λειτουργία αραίωσης είτε σε πύκνωση, οπότε η πύλη μπορεί να είναι πάνω ή κάτω από 0 V.

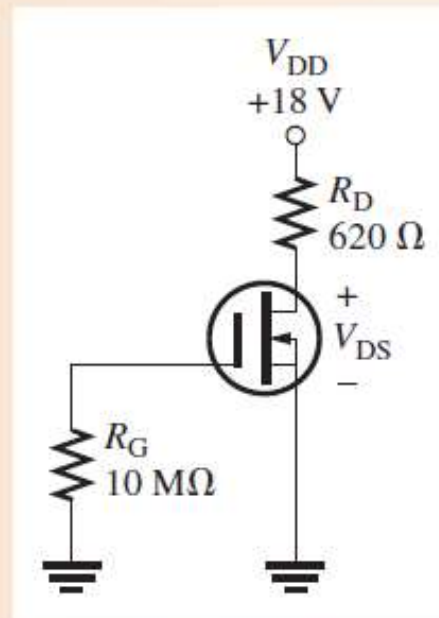


Μηδενική πόλωση, μπορεί να εφαρμοστεί στο D-MOSFET

# Πόλωση D-MOSFET - Παράδειγμα

Προσδιορίστε την  $V_{DS}$  για το D-MOSFET που δίνεται. Υποθέστε ότι το  $I_{DSS} = 12\text{mA}$  και  $V_{GS(\text{off})} = -8\text{V}$ .

► FIGURE 8-50



Since  $I_D = I_{DSS} = 12\text{ mA}$ , the drain-to-source voltage is

$$V_{DS} = V_{DD} - I_{DSS}R_D = 18\text{ V} - (12\text{ mA})(620\ \Omega) = \mathbf{10.6\text{ V}}$$

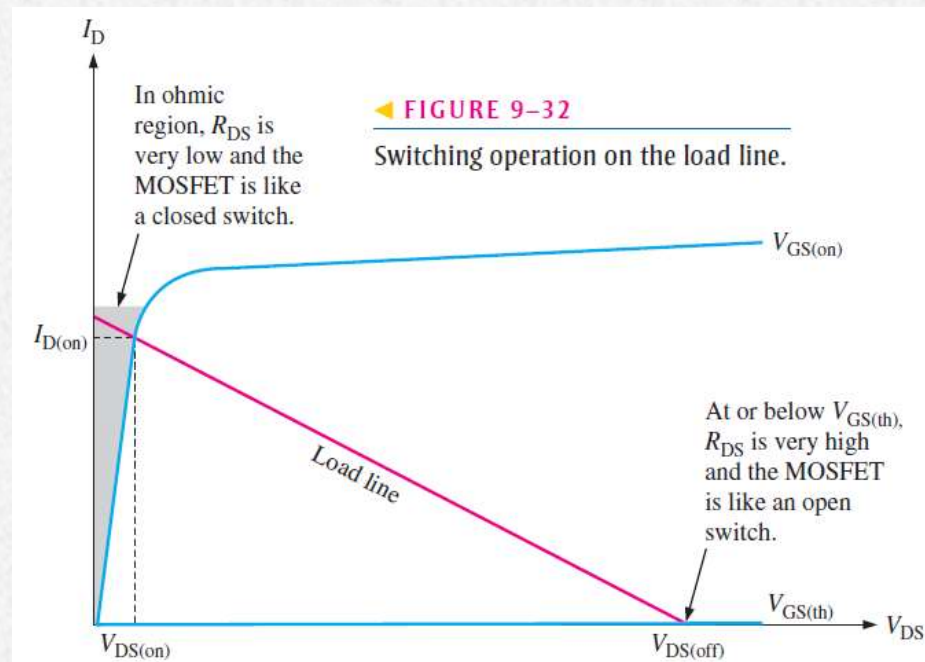
# Προφυλάξεις σχετικά με τα MOSFET

Τα MOSFET έχουν πολύ λεπτό στρώμα  $\text{SiO}_2$  (μονωτικού). Αυτό μπορεί πολύ εύκολα να καταστραφεί εάν:

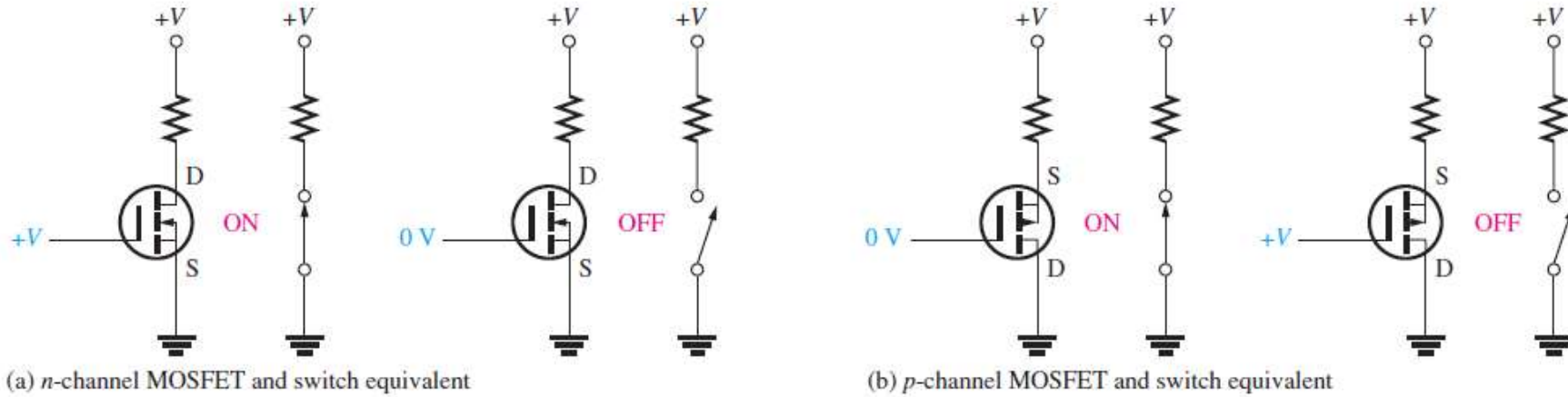
- Εφαρμόσουμε υπερβολική τάση  $V_{GS}$ .
- Προσθαιρέσουμε το MOSFET ενώ το κύκλωμα είναι υπό τάση.
- Το αγγίζουμε με τα χέρια μας επάγοντας στατικό φορτίο.

# Αναλογικοί διακόπτες MOSFET

Τα E-MOSFET χρησιμοποιούνται γενικά σε κυκλώματα ως διακόπτες λόγω του χαρακτηριστικού κατωφλίου τους,  $V_{GS(th)}$ . Όταν η τάση πύλης-πηγής είναι μικρότερη από την τιμή κατωφλίου, το MOSFET είναι απενεργοποιημένο. Όταν η τάση πύλης-πηγής είναι μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου, το MOSFET είναι ενεργοποιημένο. Όταν το  $V_{GS}$  κυμαίνεται μεταξύ  $V_{GS(th)}$  και  $V_{GS(on)}$ , το MOSFET λειτουργεί ως διακόπτης. Στην κατάσταση OFF,  $V_{GS} < V_{GS(th)}$  όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στο κάτω άκρο της γραμμής φορτίου και ενεργεί σαν ανοικτός διακόπτης (πολύ υψηλή  $R_{DS}$ ). Όταν η  $V_{GS}$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από την  $V_{GS(th)}$ , το τρανζίστορ λειτουργεί στο άνω άκρο της γραμμής φορτίου στην ωμική περιοχή και λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης (πολύ χαμηλή  $R_{DS}$ ).

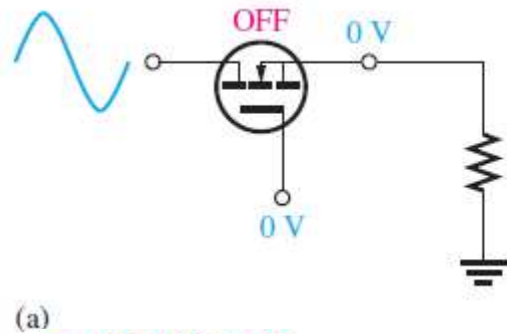


# Ιδανικός διακόπτης MOSFET

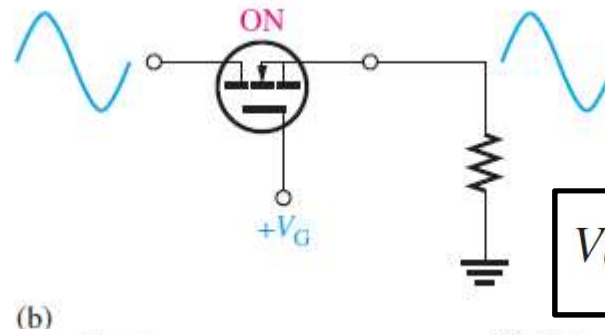


▲ FIGURE 9-33

The MOSFET as a switch.

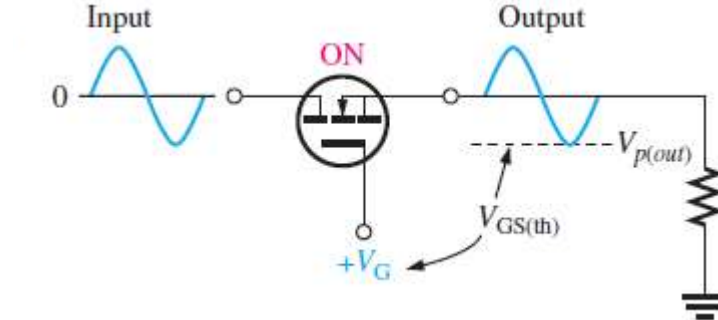


Το πλάτος σήματος περιορίζεται από την  $V_{GS(th)}$ .



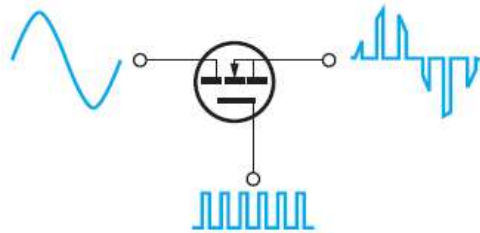
Λειτουργία MOSFET καναλιού-*n* σαν αναλογικός διακόπτης.

$$V_{GS} = V_G - V_{p(out)} \geq V_{GS(th)}$$

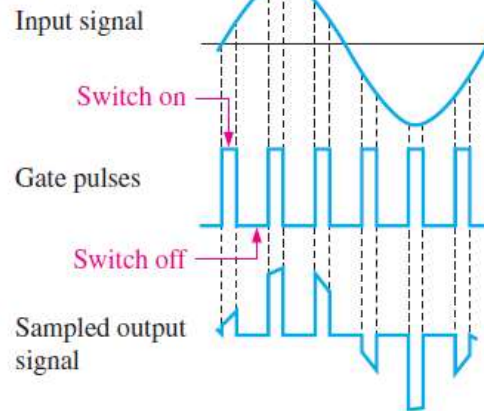


# Εφαρμογές διακόπτη MOSFET

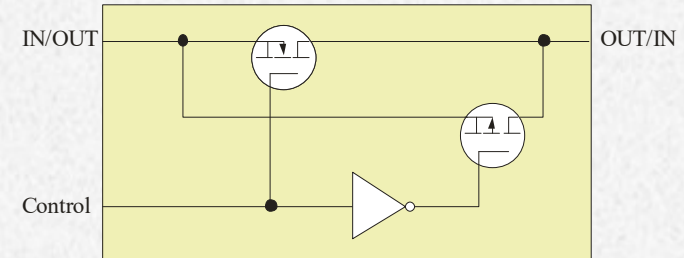
Ο αναλογικός διακόπτης λειτουργεί σαν κύκλωμα δειγματοληψίας.



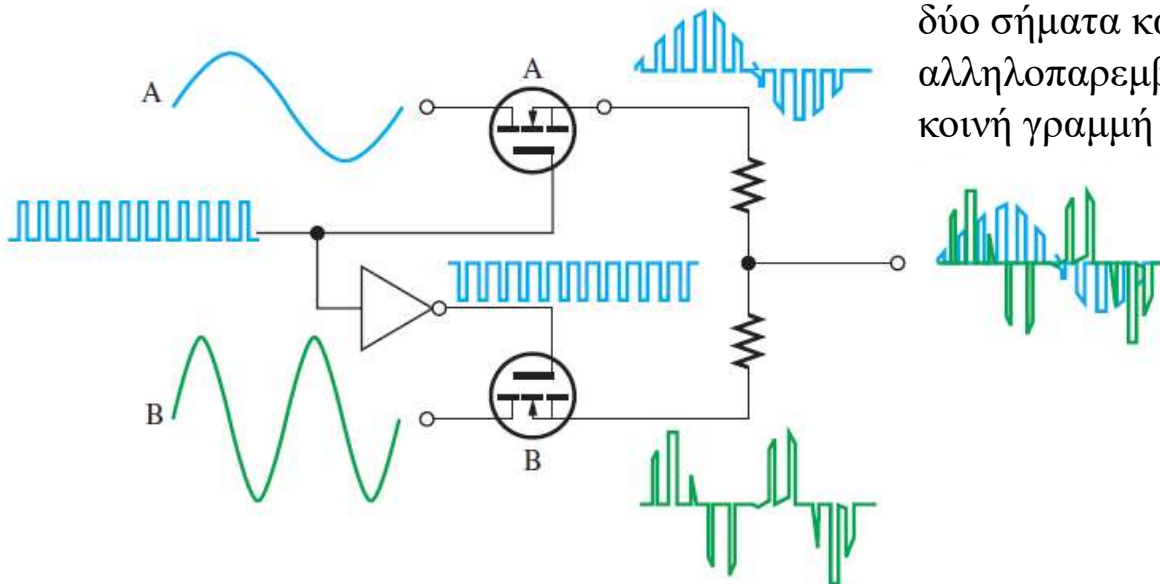
(a) Circuit action



(b) Waveform diagram



Απλοποιημένη εσωτερική κατασκευή διπλο-κατευθυντικού IC αναλογικού διακόπτη.



Ο αναλογικός πολυπλέκτης δειγματοληπτει εναλλακτικά δύο σήματα και τα αλληλοπαρεμβάλλει στην κοινή γραμμή εξόδου.

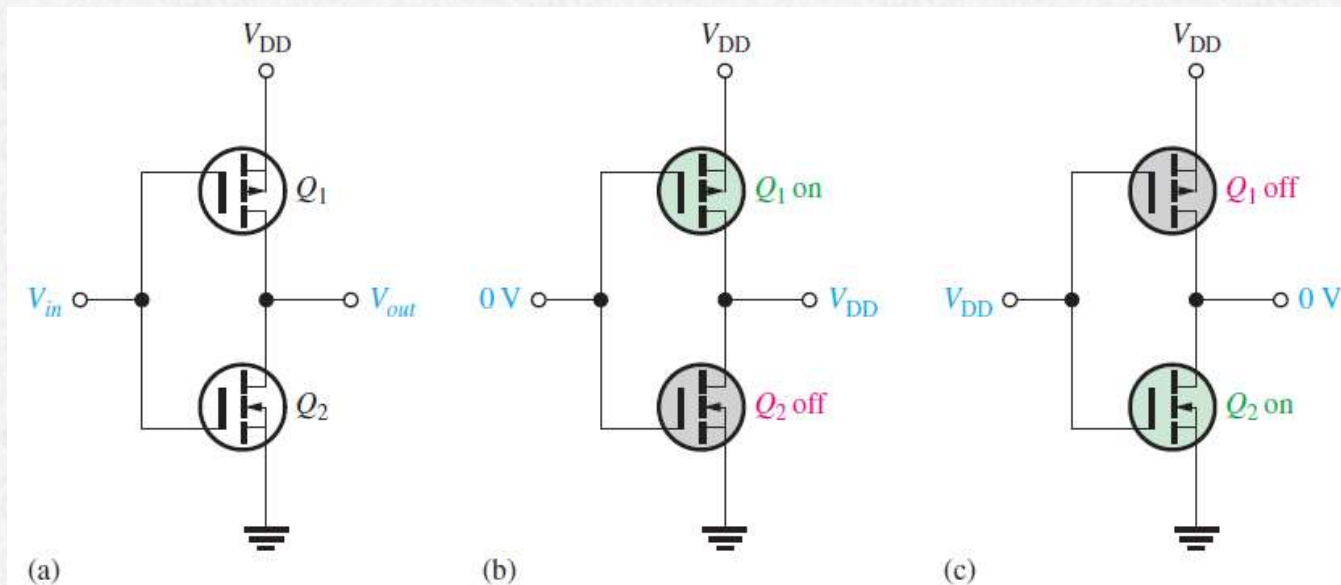


# Ψηφιακός διακόπτης MOSFET (CMOS)

Το CMOS (Συμπληρωματικό MOS) συνδυάζει δύο E-MOSFET καναλιού-n και καναλιού-p σε σειρά όπως φαίνεται στο Σχήμα. Η τάση εισόδου στις πύλες είναι είτε 0 V είτε  $V_{DD}$ . Παρατηρήστε ότι το  $V_{DD}$  και η γείωση συνδέονται και οι δύο στους ακροδέκτες πηγής των τρανζίστορ.

Για να αποφευχθεί η σύγχυση, ο όρος  $V_{DD}$  χρησιμοποιείται για τη θετική τάση, η οποία βρίσκεται στον ακροδέκτη πηγής του τρανζίστορ καναλιού-p. Όταν  $V_{in} = 0$  V, το Q1 είναι ενεργοποιημένο και το Q2 είναι απενεργοποιημένο, όπως φαίνεται στο μέρος (b).

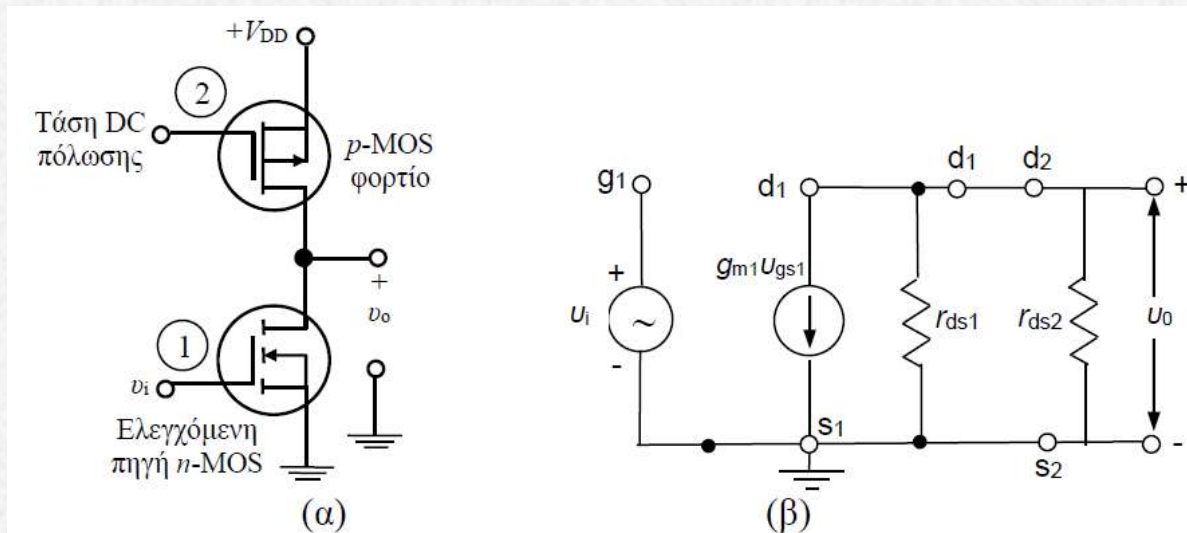
Επειδή το Q1 λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης, η έξοδος είναι περίπου ίση με  $V_{DD}$ . Όταν  $V_{in} = V_{DD}$ , το Q2 είναι ενεργοποιημένο και το Q1 είναι απενεργοποιημένο, όπως φαίνεται στο μέρος (γ). Επειδή το Q2 λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης, η έξοδος συνδέεται ουσιαστικά με τη γείωση (0 V).



Λειτουργία  
CMOS.

# Ψηφιακός διακόπτης MOSFET (CMOS)

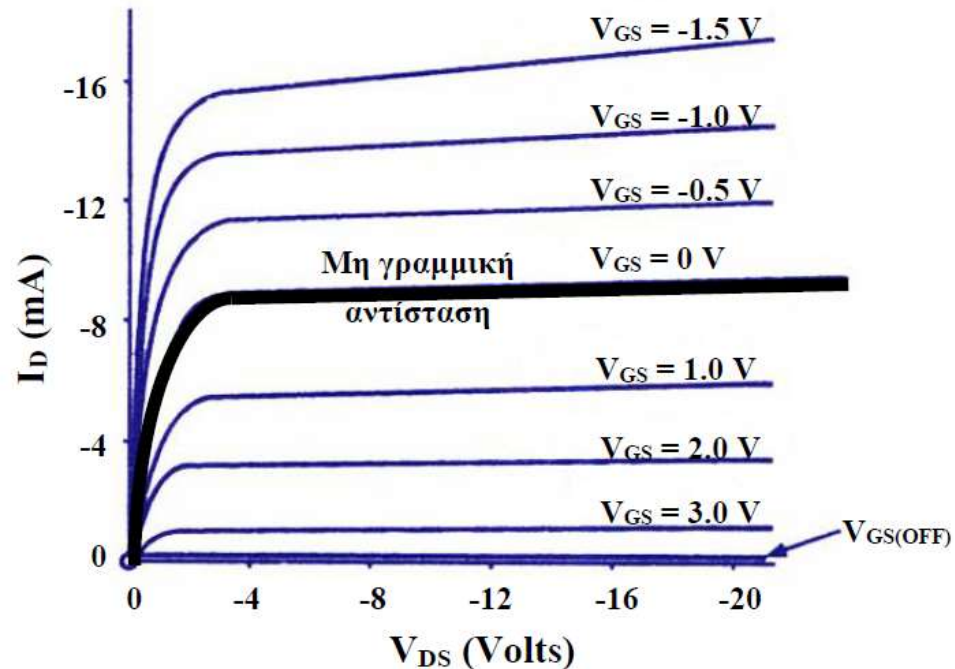
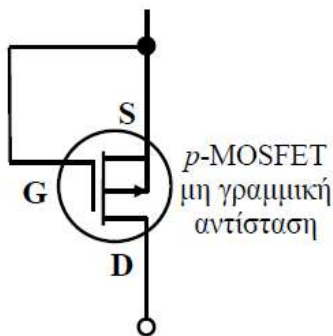
Τα αναλογικά κυκλώματα CMOS χρησιμοποιούν συχνά την συνδεσμολογία που φαίνεται στο σχήμα. Το τρανζίστορ διαύλου-n λειτουργεί σαν ελεγχόμενη πηγή, ενώ το τρανζίστορ διαύλου-p δίνει το ωμικό φορτίο. Στο σχήμα (β) φαίνεται το ισοδύναμο ασθενούς σήματος του κυκλώματος. Ας σημειωθεί η απουσία της πηγής  $g_{m2}v_{gs2}$  στο ισοδύναμο του MOSFET διαύλου-p επειδή  $v_{gs2} = 0$  (η πηγή είναι σε σταθερό δυναμικό). Η αντίσταση φορτίου  $r_{ds2}$  είναι γενικά της τάξης μερικών  $k\Omega$  ή δεκάδων  $k\Omega$ . Αν χρησιμοποιούσαμε για φορτίο ωμική αντίσταση με τιμή  $r_{ds2}$ , αυτή θα χρειαζόταν πολύ περισσότερο χώρο στο chip, απ' ότι χρειάζεται το τρανζίστορ MOS. Αυτό είναι ένα βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας CMOS στα αναλογικά κυκλώματα.



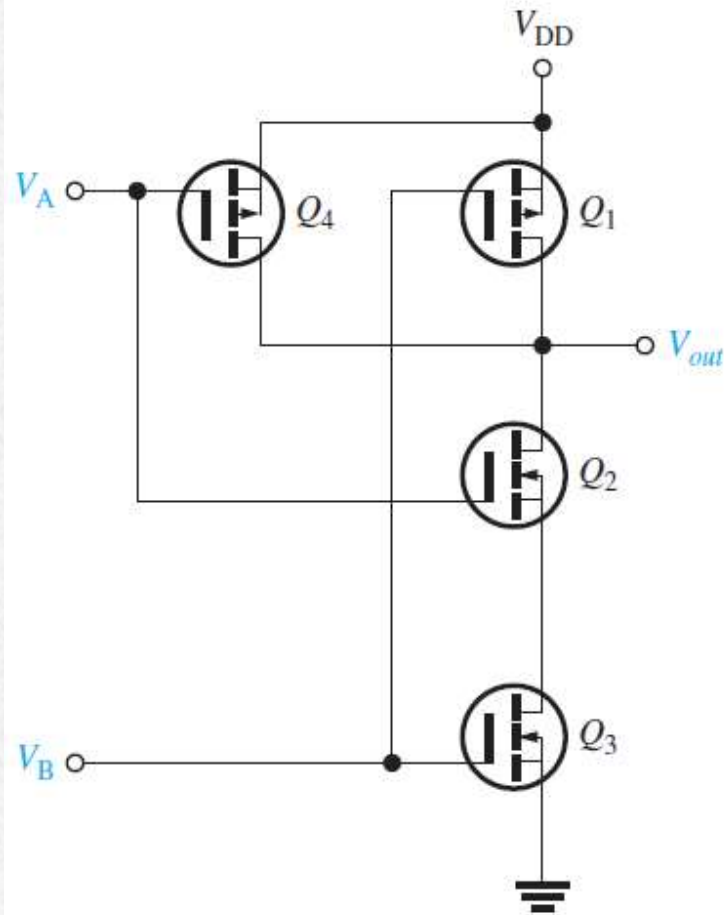
(α) Συνδεσμολογία κυκλώματος και (β) ισοδύναμο ac διάταξης CMOS.

# Ψηφιακός διακόπτης MOSFET (CMOS)

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι η διπλή λειτουργία του τρανζίστορ διαύλου-p : (1) δίνει την αντίσταση DC στο κύκλωμα και (2) δίνει την αντίσταση φορτίου AC. Αυτές οι τιμές αντιστάσεων μπορεί να διαφέρουν αισθητά, γιατί διαφέρουν οι απαιτήσεις πόλωσης και οι απαιτήσεις επεξεργασίας σήματος. Για παράδειγμα, έστω ότι χρειάζεται  $r_{ds2} = 20 \text{ k}\Omega$  για την επιθυμητή απολαβή τάσης. Αν η αντίσταση αυτή χρειαζόταν και για ρεύμα DC 0.5 mA, η πτώση τάσης ηρεμίας στα άκρα της θα ήταν  $0.5 \times 20 = 10 \text{ V}$  (μεγάλη τιμή!!!). Θυμηθείτε, ότι  $r_{ds2}$  είναι η κλίση της χαρακτηριστικής εξόδου στο σημείο ηρεμίας και, επειδή η λειτουργία είναι στην περιοχή κόρου, όπου η καμπύλη του σχήματος είναι σχεδόν οριζόντια, η  $r_{ds2}$  μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη (της τάξης των δεκάδων k $\Omega$ ).



# Ψηφιακός διακόπτης CMOS



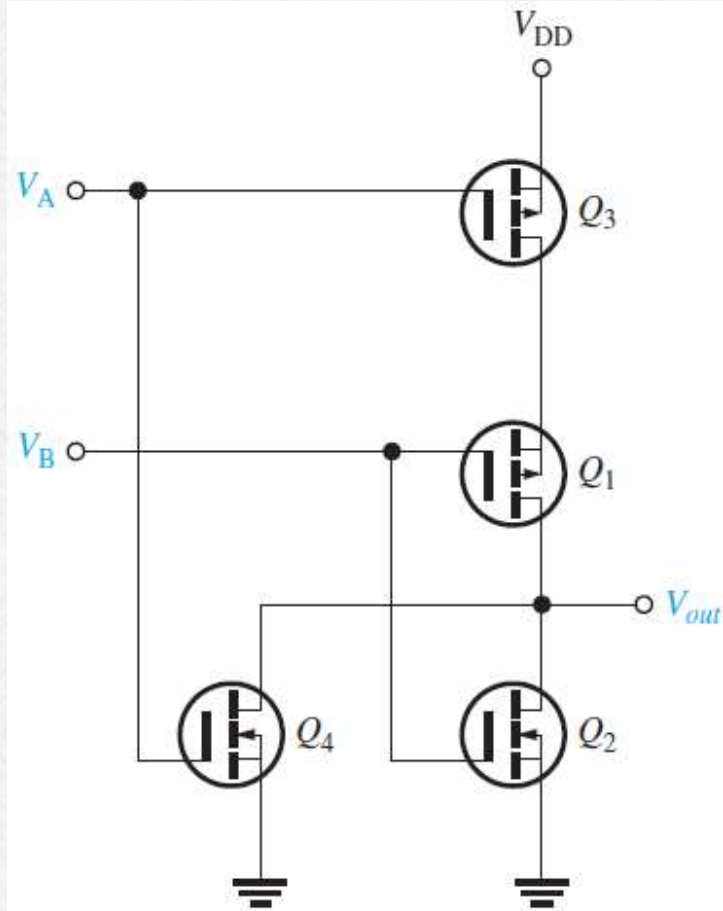
(a)

Λειτουργία πύλης NAND με CMOS.

$V_A$	$V_B$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$V_{out}$
0	0	on	off	off	on	$V_{DD}$
0	$V_{DD}$	off	off	off	on	$V_{DD}$
$V_{DD}$	0	on	off	off	off	$V_{DD}$
$V_{DD}$	$V_{DD}$	off	on	on	off	0

(b)

# Ψηφιακός διακόπτης CMOS



(a)

Λειτουργία πύλης NOR με CMOS.

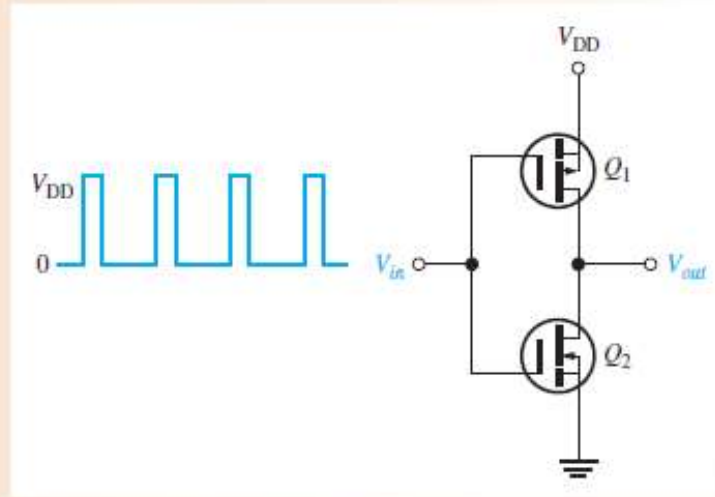
$V_A$	$V_B$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$V_{out}$
0	0	on	off	on	off	$V_{DD}$
0	$V_{DD}$	off	on	on	off	0
$V_{DD}$	0	on	off	on	off	0
$V_{DD}$	$V_{DD}$	off	on	off	on	0

(b)

# Ψηφιακός διακόπτης CMOS

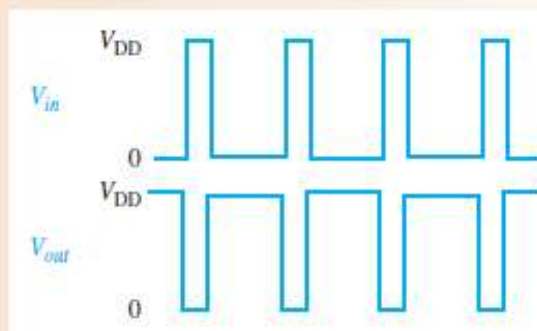
Εφαρμόζεται παλμική κυματομορφή στο κύκλωμα CMOS που φαίνεται.  
Προσδιορίστε την κυματομορφή εξόδου και εξηγήστε τη λειτουργία του κυκλώματος.

► FIGURE 9-44



The output waveform is shown in Figure 9-45 in relation to the input. When the input pulse is at  $V_{DD}$ ,  $Q_1$  is *off* and  $Q_2$  is *on*, connecting the output to ground (0 V). When the input pulse is at 0,  $Q_1$  is *on* and  $Q_2$  is *off*, connecting the output to  $V_{DD}$ .

► FIGURE 9-45



# Παράδειγμα πόλωσης FET - 1

Ένα ηλεκτρονικό όργανο χρησιμοποιεί την τεχνική πόλωσης που φαίνεται στο παρακάτω κύκλωμα. Κατά την κατασκευή του κυκλώματος γίνεται ένα λάθος με αποτέλεσμα την βραχυκύκλωση της αντίστασης  $R_s$ . Δίνονται:  $V_{DD}=12V$ ,  $R_{G1}=5.6M\Omega$ ,  $R_{G2}=2.2M\Omega$ .

α) Ποια είναι η τιμή της  $V_{GG}$ ;

β) Αν οι προδιαγραφές του προμηθευτή επιτρέπουν στο  $k$  να κυμαίνεται από 220 έως 380  $\mu A/V^2$  και στην τάση κατωφλίου  $V_T$  από 1.3 έως 2.4 V, ποιες είναι οι οριακές τιμές που μπορεί να λάβει το  $I_D$ ;

γ) Πόση θα έπρεπε να ήταν η τιμή της αντίστασης  $R_s$  για να περιοριστεί το μέγιστο ρεύμα  $I_D$  στα 0.15mA;

δ) Πόσο είναι τότε το ελάχιστο ρεύμα;

α) Από τον διαιρέτη τάσης στην είσοδο:  $V_{GG} = 12 \left( \frac{2.2}{2.2 + 5.6} \right) = 3.38V$

β) Επειδή η  $R_s$  βραχυκυκλώθηκε αυτό σημαίνει ότι  $R_s = 0$ . Άρα  $V_{GG} = V_{GS}$ .

Υποθέτουμε ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στον κόρο:  $I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{k}{2} (3.38 - V_T)^2$

Οι ακραίες τιμές του  $I_D$  είναι:  $I_D = 110 (3.38 - 2.4)^2 = 0.106 \text{ mA}$

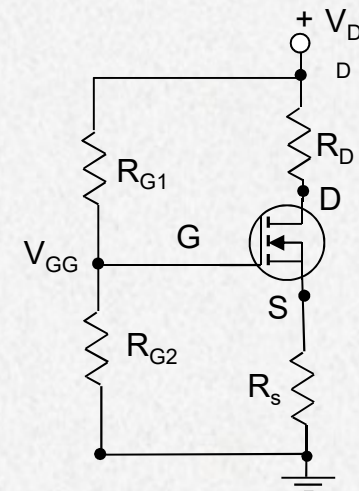
και  $I_D = 190 (3.38 - 1.3)^2 = 0.822 \text{ mA}$

γ) Το μέγιστο ρεύμα συμβαίνει όταν  $k=0.38 \text{ mA/V}^2$  και  $V_T=1.3V$ .

$$0.15 \text{ mA} = 0.19 (V_{GS} - 1.3)^2 \Rightarrow V_{GS} = 2.19V$$

$$V_s = (3.38 - 2.19) V = 1.19V.$$

$$R_s = 1.19 V / 0.15 \text{ mA} = 7.93k\Omega.$$



# Παράδειγμα πόλωσης FET - 1

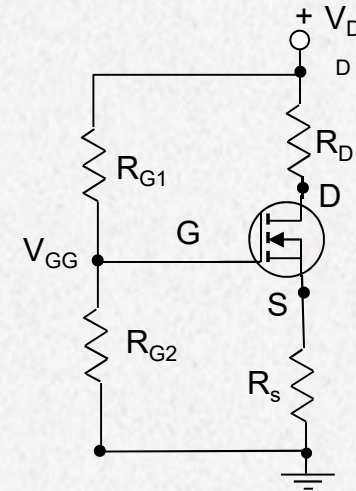
δ) Το ελάχιστο ρεύμα συμβαίνει όταν  $K=0.22 \text{ mA/V}^2$  και  $V_T=2.4\text{V}$ .

$$0.11(V_{GS} - 2.4)^2 = \frac{(3.38 - V_{GS})}{7.93}$$

$$V_{GS}^2 - 3.65V_{GS} + 1.8846 = 0 \Rightarrow V_{GS,1} = 3.0275 \quad , \quad V_{GS,2} = 0.625$$

Η δεύτερη ρίζα απορρίπτεται γιατί η  $V_{GS}$  που προκύπτει είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου. Άρα:

$$I_D = (3.38 - 3.0275)/7.93 = 0.044\text{mA}$$





# Παράδειγμα πόλωσης FET - 2

Θεωρήστε το παρακάτω κύκλωμα. Αν το JFET έχει  $V_{GS(off)} = 3V$  και  $I_{DSS} = 4 mA$ :

α) Ποια είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να έχει το ρεύμα  $I$ ;

β) Ποια θα είναι τότε η τιμή της τάσης της πηγής;

γ) Ποια θα είναι τότε η οριακή τιμή της  $V_{DS}$  ώστε το JFET να είναι στον κόρο;

δ) Με το μέγιστο ρεύμα πόλωσης  $I$ , ποια είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η  $R_D$  δίχως να εξέλθει το τρανζίστορ από την περιοχή του κόρου;

α) Μέγιστη τιμή του  $I$  είναι  $I_{DSS}$  ή  $4 mA$ .

β) Σε αυτή την τιμή του  $I$ , η  $V_{GS}=0 V$  οπότε η  $V_S=0 V$ .

γ) Για τη λειτουργία στην ωμική περιοχή, η  $V_D$  πρέπει να είναι χαμηλότερη από την  $V_G$  κατά τουλάχιστον  $|V_{GS(off)}|=3 V$ . Αυτό διότι για να έχουμε κόρο θα πρέπει:

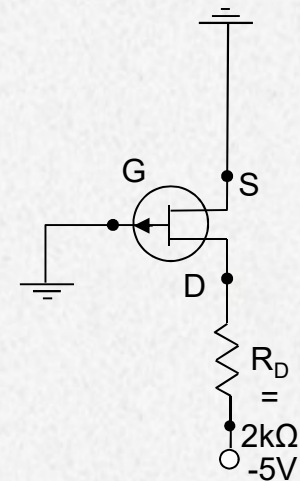
$$|V_{DS}| + |V_{GS}| \geq |V_P| = |V_{GS(off)}| \Rightarrow |V_{DS}| \geq |V_P| - |V_{GS}|$$

. Άρα για λειτουργία στην ωμική περιοχή, θα πρέπει:

$$|V_{DS}| < |V_P| - |V_{GS}| \Rightarrow |V_{DS}| < 3 - 0 = 3 V \Rightarrow V_{DS} > -3 V.$$

δ) Οπότε η μέγιστη τιμή της  $V_{DS}$  είναι  $-3 V$  και αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της  $R_D$  είναι:

$$R_D = \frac{V_D - (-5)}{I_{DSS}} = \frac{-3 - (-5)}{4} = 0.5 k\Omega$$



# Κύκλωμα ενισχυτή με αυτοπόλωση

Δίνεται το κύκλωμα ενισχυτή του σχήματος, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ JFET διαύλου τύπου η το οποίο έχει τάση  $V_{GS(off)} = -2 \text{ V}$  και μέγιστο ρεύμα κόρου  $I_{DSS} = 1,65 \text{ mA}$ . Ζητείται να πολωθεί το κύκλωμα σε ρεύμα  $I_D = 0,8 \text{ mA}$ , όταν χρησιμοποιείται τάση τροφοδοσίας  $V_{DD} = 24 \text{ V}$ . Υποθέστε ότι η εσωτερική αντίσταση  $r_d \gg R_d$  και ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (ακουστικές). Θεωρήστε επίσης ότι όλοι οι πυκνωτές  $C_1$ ,  $C_2$  και  $C_s$  έχουν πολύ μεγάλες τιμές. Να βρεθούν:

(α) η τάση  $V_{GS}$ ,

(β) η αμοιβαία αγωγιμότητα  $g_m$ ,

(γ) η αντίσταση αυτοπόλωσης  $R_s$ ,

(δ) η αντίσταση του κυκλώματος απορροής  $R_d$  έτσι ώστε το κέρδος τάσης να είναι τουλάχιστον 20 dB.

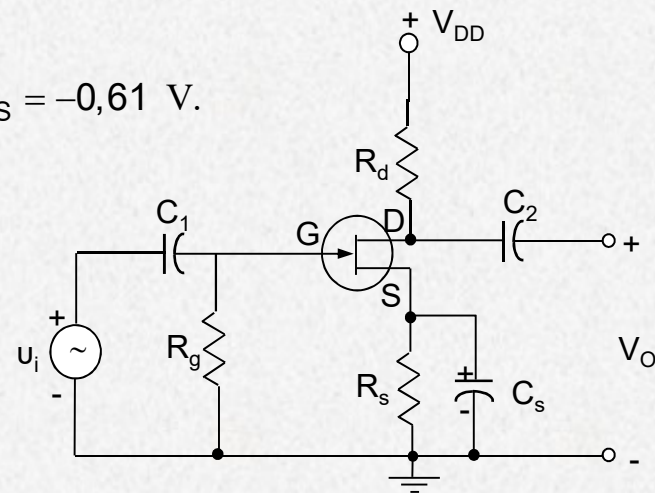
$$I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad \text{Άρα: } 0,8 \text{ mA} = 1,65 \times \left( 1 - \frac{V_{GS}}{-2} \right)^2 \Rightarrow V_{GS} = -0,61 \text{ V.}$$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|} = \frac{2 \cdot 1,65}{2} = 1,65 \text{ mA/V}$$

$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) = 1,65 \cdot \left( 1 - \frac{0,61}{2} \right) = 1,14 \text{ mA/V}$$

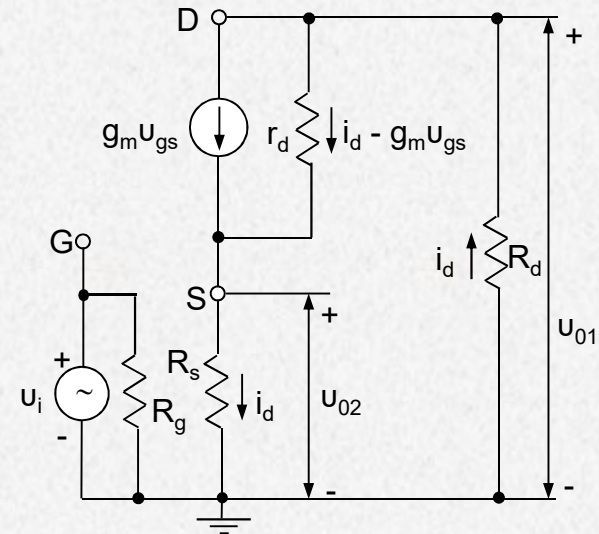
$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D R_s = -I_D R_s$$

$$R_s = -\frac{V_{GS}}{I_D} = \frac{0,62}{0,8} = 0,77 \text{ k}\Omega = 770 \text{ }\Omega$$



# Κύκλωμα ενισχυτή με αυτοπόλωση

Θα αντικαταστήσουμε το FET με το ισοδύναμο κύκλωμα ασθενούς σήματος (ac). Παραλείπονται όλοι οι πυκνωτές διότι έχουν πολύ μεγάλες τιμές οπότε ισοδυναμούν με βραχυκυκλώματα. Το ισοδύναμο κύκλωμα του JFET δίνεται από την εξαρτημένη πηγή ρεύματος  $g_m u_{gs}$  και την εσωτερική αντίσταση  $r_d$ . Στο ισοδύναμο ac κύκλωμα έχουμε συμπεριλάβει και την αντίσταση αυτοπόλωσης  $R_s$ , παρ' όλων ότι αυτή βραχυκυκλώνεται από τον πυκνωτή  $C_s$ , ώστε να περιγράψουμε την πιο γενική περίπτωση που δεν υπάρχει πυκνωτής παρακάμψεως  $C_s$ .



$$i_d R_d + (i_d - g_m u_{gs}) r_d + i_d R_s = 0$$

$$u_{gs} = u_i - i_d R_s$$

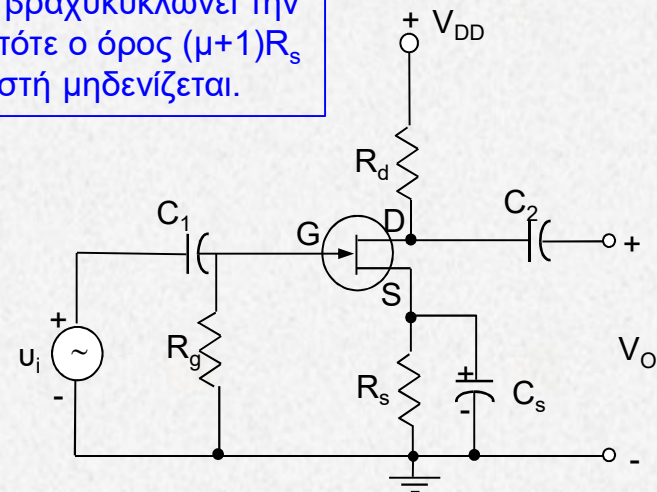
$$i_d = \frac{\mu u_i}{r_d + R_d + (\mu + 1) R_s}$$

Ο πυκνωτής  $C_s$  βραχυκυκλώνει την αντίσταση  $R_s$  οπότε ο όρος  $(\mu + 1) R_s$  στον παρονομαστή μηδενίζεται.

$$A_V = \frac{u_{01}}{u_i} = \frac{-\mu R_d}{r_d + R_d} = -g_m R'_d \quad \text{όπου: } R'_d = R_d // r_d$$

$$20 \text{ dB} = 20 \log_{10} A_V \Rightarrow A_V = 10$$

$$|A_V| \cong g_m R_d \geq 10 \Rightarrow R_d \geq \frac{10}{1,14 \text{ mA/V}} = 8,76 \text{ k}\Omega.$$



# Ενισχυτής JFET με διαιρέτη τάσης

Δίνεται το κύκλωμα ενισχυτή του σχήματος ο οποίος δέχεται στην είσοδό του σήμα από γεννήτρια με εσωτερική αντίσταση  $R$  και χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ JFET διαύλου τύπου  $n$  το οποίο έχει τάση  $V_{GS(off)} = -5\text{ V}$  και μέγιστο ρεύμα κόρου  $I_{DSS} = 10\text{ mA}$ . Δίνεται η τάση τροφοδοσίας  $V_{DD} = 30\text{ V}$  και δίνονται οι τιμές των αντιστάσεων  $R = 200\ \Omega$ ,  $R_S = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 11\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 1\text{ M}\Omega$  και  $r_d = 1\text{ M}\Omega$ . Υποθέστε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (ακουστικές). Θεωρήστε επίσης ότι οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  έχουν πολύ μεγάλες τιμές.

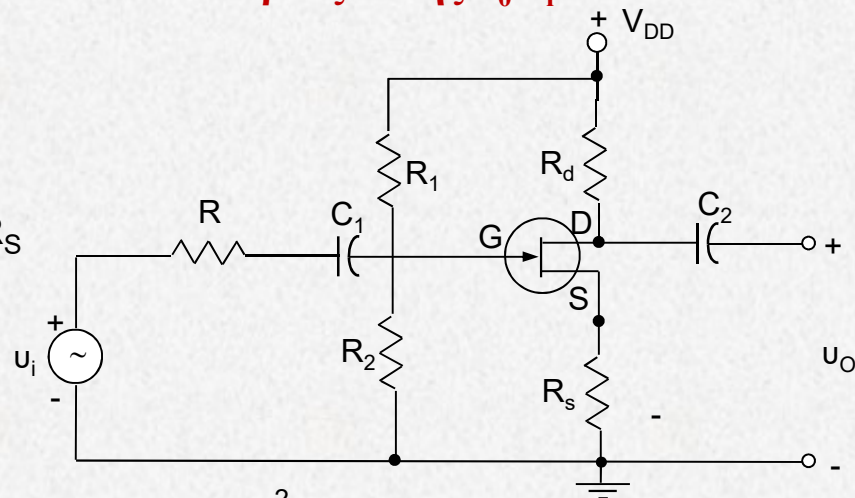
Ζητούνται:

- (α) Το ρεύμα πόλωσης  $I_{DS}$ . Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
- (β) Η τάση  $V_{GS}$ . Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
- (γ) Το ac ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή,
- (δ) Η αντίσταση του κυκλώματος απορροής  $R_d$  έτσι ώστε το κέρδος τάσης  $u_0/u_i$  να είναι τουλάχιστον 30 dB.

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 2,5 \quad V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_{DS} R_S$$

$$I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_G - I_{DS} R_S}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

$$(I_{DSS} R_S^2) I_{DS}^2 + [2I_{DSS} R_S (V_{GS(off)} - V_G) - V_{GS(off)}^2] I_{DS} + I_{DSS} (V_{GS(off)} - V_G)^2 = 0$$



# Ενισχυτής JFET με διαιρέτη τάσης

$$10I_{DS}^2 - 175I_{DS} + 562,5 = 0 \quad I_{DS1} = 13,25 \text{ mA} \text{ και } I_{DS2} = 4,24 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_{DS}R_S \quad \text{βρίσκουμε: } V_{GS} = -1,74 \text{ V.}$$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|} = \frac{2 \cdot 10}{5} = 4 \text{ mA/V.}$$

$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) = 4 \cdot \left( 1 - \frac{-1,74}{-5} \right) = 2,6 \text{ mA/V}$$

$$i_d R_d + (i_d - g_m v_{gs}) r_d + i_d R_s = 0 \quad v_{gs} = v' - i_d R_s$$

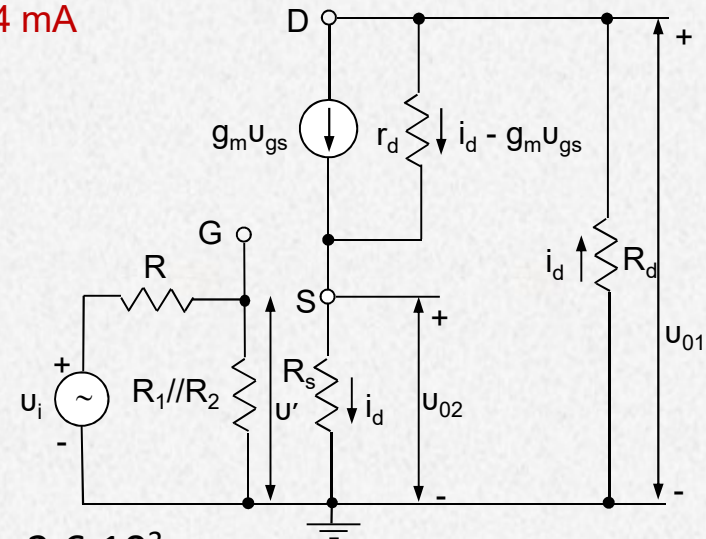
$$i_d = \frac{\mu v'}{r_d + R_d + (\mu + 1)R_s} \quad \mu = r_d g_m = 10^6 \Omega \cdot 2,6 \text{ mA/V} = 2,6 \cdot 10^3$$

$$v_{01} = -i_d R_d \Rightarrow v_{01} = \frac{-\mu v' R_d}{r_d + R_d + (\mu + 1)R_s} \quad |A'_V| = \frac{v_{01}}{v'} = \frac{\mu R_d}{r_d + R_d + (\mu + 1)R_s}$$

$$A_V = \frac{v_{01}}{v_i} = \frac{v_{01}}{v'} \cdot \frac{v'}{v_i} = A'_V \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} = 0,999$$

$$A_V = A'_V \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} = \frac{\mu R_d}{r_d + R_d + (\mu + 1)R_s} \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} \geq 31,6227 \Rightarrow$$

$$R_d \geq \frac{A_V \{r_d + (\mu + 1)R_s\}}{\mu \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} - A_V} \Rightarrow R_d \geq 44,32 \text{ k}\Omega$$



**Παρατήρηση:** Διαπιστώνουμε ότι η απαίτηση για κέρδος τάσης 30 dB δίνει ελάχιστη τιμή για την  $R_d$  η οποία δεν συμβαδίζει με την dc ανάλυση των ερωτημάτων (α) και (β). Δηλαδή, η τιμή  $R_d = 44,32 \text{ k}\Omega$  δίνει dc πτώση τάσης ίση με  $188\text{V} \gg V_{DD} = 30\text{V}$ .

Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η χρήση διάταξης CMOS (βλ. παράγραφο 8.3.10), αντί για ωμική αντίσταση  $R_d$ , ώστε να ικανοποιείται ταυτόχρονα η απαίτηση για dc και ac λειτουργία σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές.

# Ενισχυτής JFET

Δίνεται το κύκλωμα ενισχυτή του σχήματος ο οποίος δέχεται στην είσοδό του σήμα από γεννήτρια με εσωτερική αντίσταση  $R$  και χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ JFET διαύλου τύπου  $n$  το οποίο έχει τάση  $V_{GS(off)} = -5\text{ V}$  και μέγιστο ρεύμα κόρου  $I_{DSS} = 10\text{ mA}$ . Δίνεται η τάση τροφοδοσίας  $V_{DD} = 30\text{ V}$  και δίνονται οι τιμές των αντιστάσεων  $R = 200\ \Omega$ ,  $R_{S1} = 0,5\text{ k}\Omega$ ,  $R_{S2} = 0,5\text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 11\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 1\text{ M}\Omega$  και  $r_d = 1\text{ M}\Omega$ . Υποθέστε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (ακουστικές). Θεωρήστε επίσης ότι οι πυκνωτές  $C_1$ ,  $C_2$   $C_S$  και έχουν πολύ μεγάλες τιμές. Ζητούνται:

(α) Το DC σημείο λειτουργίας  $Q$  του τρανζίστορ ( $V_{GSQ}$ ,  $V_{DSQ}$ ,  $I_{DSQ}$ ). Σχεδιάστε το ισοδύναμο DC κύκλωμα.

(β) Το ac ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή,

(γ) Το κέρδος τάσης του ενισχυτή  $v_o / v_i$

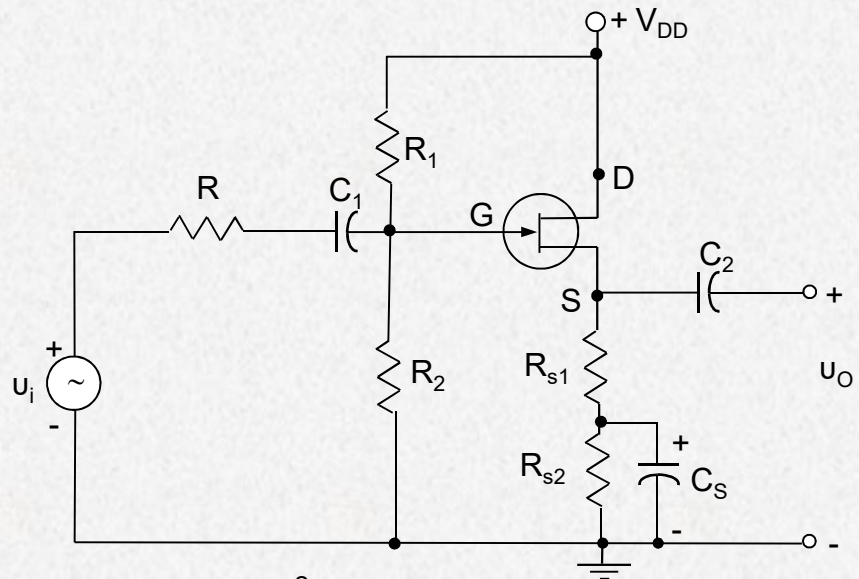
(δ) Το κέρδος ρεύματος του ενισχυτή.

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} \quad R_G = R_1 // R_2 = 916,66\text{ k}\Omega$$

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 2,5 \quad V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_{DS} R_S$$

$$I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_G - I_{DS} R_S}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

$$(I_{DSS} R_S^2) I_{DS}^2 + [2I_{DSS} R_S (V_{GS(off)} - V_G) - V_{GS(off)}^2] I_{DS} + I_{DSS} (V_{GS(off)} - V_G)^2 = 0$$



# Ενισχυτής JFET

$$10I_{DS}^2 - 175I_{DS} + 562,5 = 0 \quad I_{DS1} = 13,25 \text{ mA} \text{ και } I_{DS2} = 4,24 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_{DS}R_S \quad \text{βρίσκουμε: } V_{GS} = -1,74 \text{ V.}$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DSQ}R_S = 30 \text{ V} - 4,24 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 25,75 \text{ V.}$$

Αρα, το σημείο λειτουργίας είναι:  $V_{GSQ} = -1,74 \text{ V}$ ,  $V_{DSQ} = 25,75 \text{ V}$ ,  $I_{DSQ} = 4,24 \text{ mA}$ .

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|} = \frac{2 \cdot 10}{5} = 4 \text{ mA/V.}$$

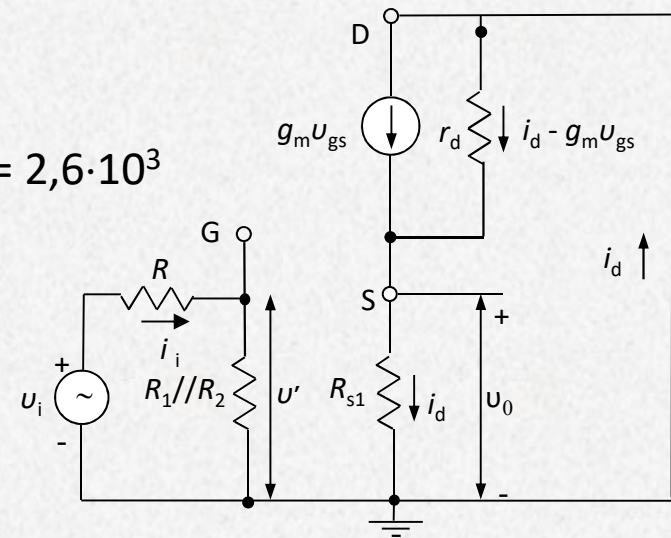
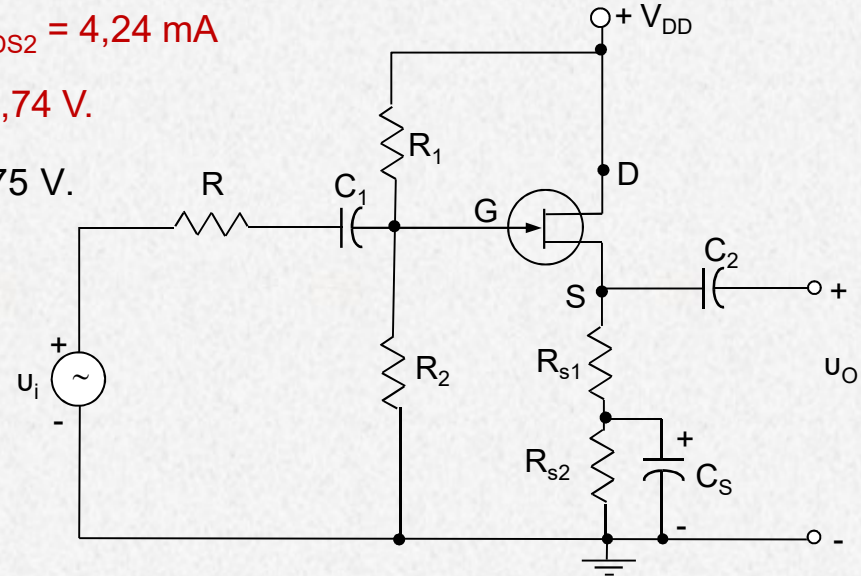
$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) = 4 \cdot \left( 1 - \frac{-1,74}{-5} \right) = 2,6 \text{ mA/V}$$

$$(i_d - g_m v_{gs}) r_d + i_d R_{s1} = 0 \quad v_{gs} = v' - i_d R_{s1}$$

$$i_d = \frac{\mu v'}{r_d + (\mu + 1)R_{s1}} \quad \mu = r_d g_m = 10^6 \Omega \cdot 2,6 \text{ mA/V} = 2,6 \cdot 10^3$$

$$v_0 = i_d R_{s1} \Rightarrow v_0 = \frac{\mu v' R_{s1}}{r_d + (\mu + 1)R_{s1}}$$

$$|A'_V| = \frac{v_0}{v'} = \frac{\mu R_{s1}}{r_d + (\mu + 1)R_{s1}} \quad \text{Αντικαθιστώντας βρίσκουμε: } |A'_V| = 0,5656$$



# Ενισχυτής JFET

$$A_V = \frac{v_0}{v_i} = \frac{v_0}{v'} \cdot \frac{v'}{v_i} = A'_V \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2}$$

$$\frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} = 0,99978$$

$$A_V = A'_V \cdot \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} = 0,5655.$$

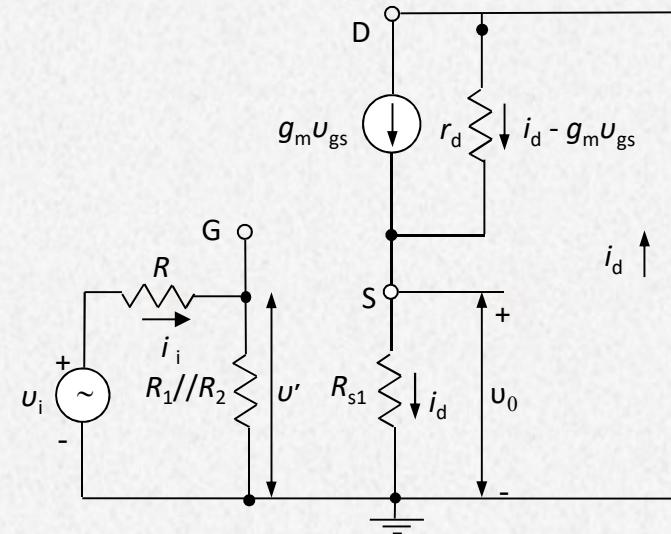
Από τον ορισμό της μονάδας decibel:  $20 \log_{10} A_V \Rightarrow \mathbf{A_V = -4,95 \text{ dB}}$ .

$$A_I = \frac{i_d}{i_i} \quad R_G = R_1 \parallel R_2$$

$$i_i = \frac{v_i}{R + R_G} \quad i_d = \frac{\mu v'}{r_d + (\mu + 1)R_{S1}} \quad \frac{v'}{v_i} = \frac{R_G}{R + R_G}$$

$$A_I = \frac{i_d}{i_i} = \frac{\mu R_G}{r_d + (\mu + 1)R_{S1}}$$

Και αντικαθιστώντας τις δοσμένες τιμές βρίσκουμε:  $\mathbf{A_I = 1036,96}$ .





# Ενισχυτής MOSFET

Δίνεται το κύκλωμα ενισχυτή του σχήματος ο οποίος δέχεται στην είσοδό του σήμα από γεννήτρια και χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ MOSFET διαύλου τύπου-n το οποίο έχει τάση κατωφλίου  $V_T = 1,5 \text{ V}$ . Δίνονται οι τιμές των εξής παραμέτρων:  $R_G = 10 \text{ M}\Omega$ ,  $R_D = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{DD} = 15 \text{ V}$ ,  $k = 0,25 \text{ mA/V}^2$

Υποθέστε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (ακουστικές). Θεωρήστε επίσης ότι οι πυκνωτές  $C_1$ ,  $C_2$  και έχουν πολύ μεγάλες τιμές. Θεωρήστε επίσης ότι η εσωτερική αντίσταση του MOSFET  $r_d$  είναι άπειρη. Ζητούνται:

(α) Το DC σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ ( $V_{GSQ}$ ,  $V_{DSQ}$ ,  $I_{DSQ}$ ). Σχεδιάστε το ισοδύναμο DC κύκλωμα.

(β) Το ac ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή,

(γ) Το κέρδος τάσης του ενισχυτή  $v_o / v_i$

(δ) Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή.

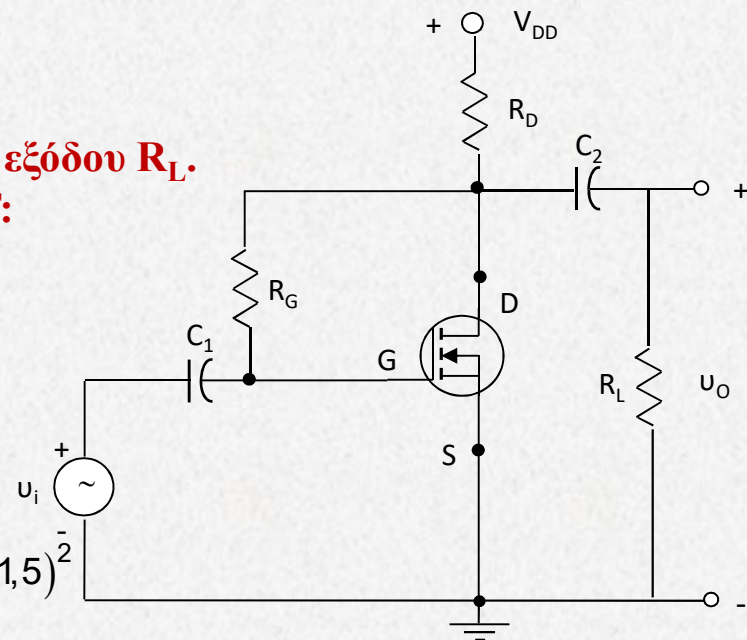
(ε) Το κέρδος ρεύματος του ενισχυτή στην αντίσταση εξόδου  $R_L$ .

Δίνεται ότι το ρεύμα κόρου του τρανζίστορ MOSFET:

$$I_{DSQ} = \frac{k}{2} (V_{GSQ} - V_T)^2$$

και ότι:  $g_m = k(V_{GSQ} - V_T)$

$$I_{DSQ} = \frac{k}{2} (V_{GSQ} - V_T)^2 = 0,125 (V_{GSQ} - 1,5)^2 = 0,125 (V_{DSQ} - 1,5)^2$$



# Ενισχυτής MOSFET

$$I_{DSQ} = \frac{k}{2}(V_{GSQ} - V_T)^2 = 0,125(V_{GSQ} - 1,5)^2 = 0,125(V_{DSQ} - 1,5)^2$$

$$V_{DD} = V_{DSQ} + R_D I_{DSQ} \quad 15 = V_{DSQ} + 10 I_{DSQ}$$

$$(kR_D^2)I_{DS}^2 + [-2kR_D(V_{DD} - V_T) - 2]I_{DS} + k(V_{DD} - V_T)^2 = 0$$

$$25I_{DS}^2 - 69,5I_{DS} + 45,5625 = 0$$

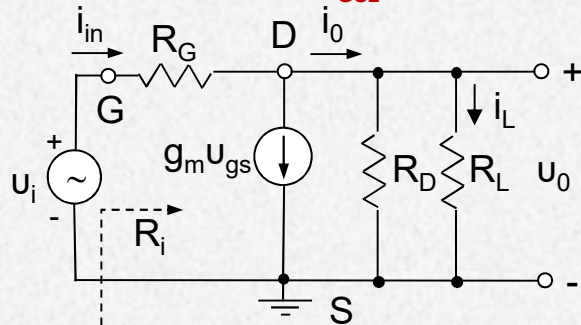
$$I_{DS1} = 1,72 \text{ mA} \quad \text{και} \quad I_{DS2} = 1,058 \text{ mA}$$

$$V_{DD} = V_{DSQ} + R_D I_{DSQ} \Rightarrow V_{DSQ} = V_{GSQ} = V_{DD} - R_D I_{DSQ}$$

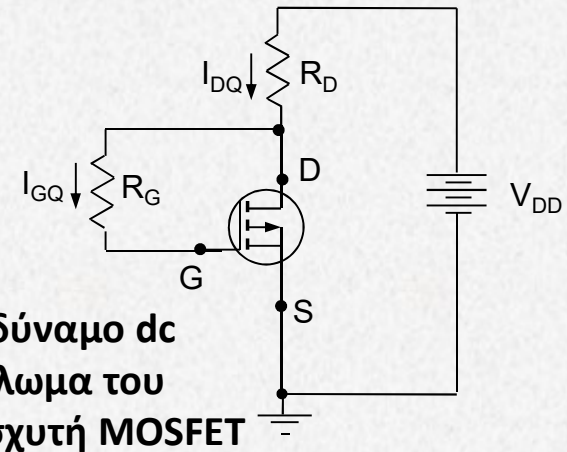
$$\text{βρίσκουμε: } V_{GS1} = -2,21 \text{ V} \quad \text{και} \quad V_{GS2} = 4,41 \text{ V.}$$

$$\text{Επειδή πρέπει } V_{DS} > V_{GS} - V_T \quad \text{και} \quad V_{GS} > V_T$$

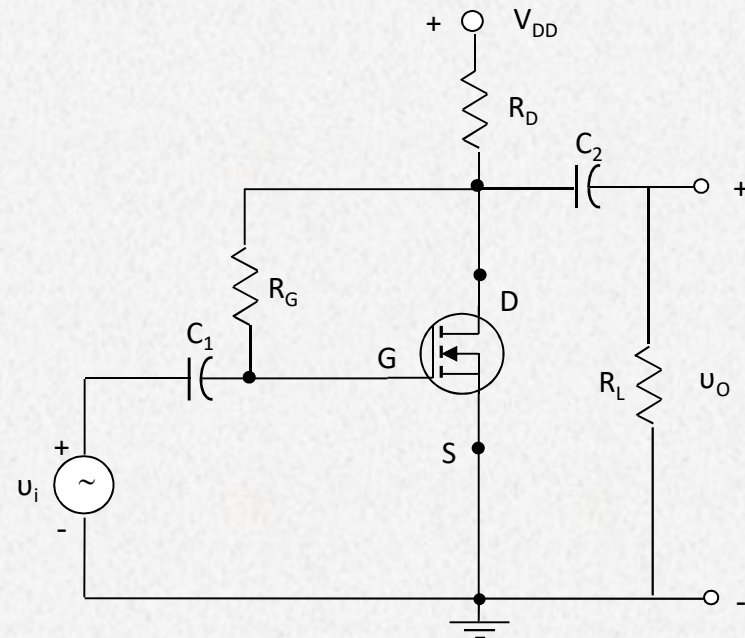
$$I_{DS2} = 1,058 \text{ mA} \quad \text{και} \quad V_{GS2} = 4,41 \text{ V.}$$



Ισοδύναμο ac κύκλωμα του ενισχυτή MOSFET



Ισοδύναμο dc κύκλωμα του ενισχυτή MOSFET



# Ενισχυτής MOSFET

$$g_m = k(V_{GSQ} - V_T) = 0,25 \cdot (4,41 - 1,5) = 0,727 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$v_o = i_o \cdot (R_D // R_L) = (i_{in} - g_m v_{gs}) \cdot (R_D // R_L)$$

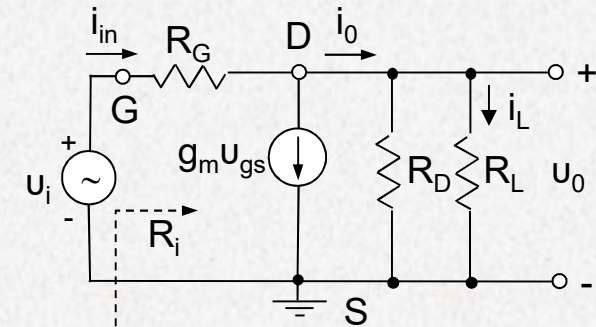
$$i_{in} = \frac{v_i - v_o}{R_G} \quad v_{gs} = v_i$$

$$v_o = \left( \frac{v_i - v_o}{R_G} - g_m v_{gs} \right) \cdot (R_D // R_L) \Rightarrow A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\left( \frac{1}{R_G} - g_m \right) (R_D // R_L)}{1 + \frac{(R_D // R_L)}{R_G}} = 3,633$$

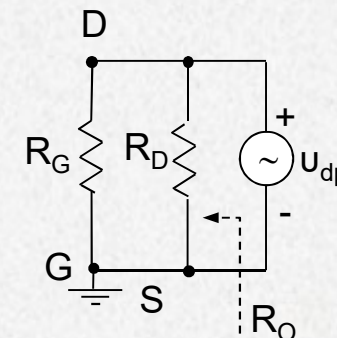
$$i_{in} = \frac{v_i - v_o}{R_G} = \frac{v_i}{R_G} (1 - A_V) \quad R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{\frac{v_i}{R_G} (1 - A_V)} = \frac{R_G}{(1 - A_V)} = \frac{10^6}{4,633} = 2,158 \text{ M}\Omega.$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{v_o / R_L}{(v_i - v_o) / R_G} = \frac{A_V R_G}{(1 - A_V) R_L} = -784,16.$$

Η αντίσταση εξόδου είναι:  $R_o = R_G // R_D = 9,99 \text{ k}\Omega.$



Ισοδύναμο ac κύκλωμα



Κύκλωμα υπολογισμού αντίστασης εξόδου του ενισχυτή MOSFET

# Ενισχυτής MOSFET

Δίνεται το κύκλωμα ενισχυτή του σχήματος ο οποίος δέχεται στην είσοδό του σήμα από γεννήτρια και χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ MOSFET διαύλου τύπου-n το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Δίνονται οι τιμές των εξής παραμέτρων:  $V_{DD}=25\text{ V}$ ,  $R=100\ \Omega$ ,  $R_L=80\ \Omega$ ,  $g_m=200\text{ mA/V}$ ,  $V_{DS}=10\text{ V}$ ,  $I_D=250\text{ mA}$ ,  $V_T=0,8\text{ V}$ ,  $R_D=21\ \Omega$ ,  $R_2 = 180\text{ k}\Omega$ .

Υποθέστε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (ακουστικές). Θεωρήστε επίσης ότι οι πυκνωτές  $C_1$ ,  $C_2$  και έχουν πολύ μεγάλες τιμές. Θεωρήστε επίσης ότι η εσωτερική αντίσταση του MOSFET  $r_d$  είναι άπειρη. Ζητούνται:

(α) Η τάση  $V_{GSQ}$  και οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_S$ . Σχεδιάστε το ισοδύναμο DC κύκλωμα.

(β) Το κέρδος τάσης του ενισχυτή  $v_o / v_i$

(γ) Το κέρδος ρεύματος του ενισχυτή στην αντίσταση εξόδου  $R_L$ .

(δ) Το κέρδος ισχύος του ενισχυτή.

(ε) Η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή.

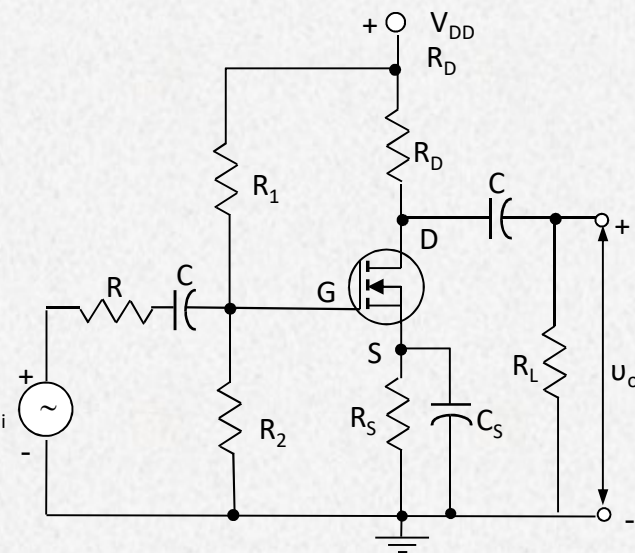
Δίνεται ότι το ρεύμα κόρου του τρανζίστορ MOSFET:

$$I_{DSQ} = \frac{k}{2} (V_{GSQ} - V_T)^2$$

και ότι:  $g_m = k(V_{GSQ} - V_T)$

Από την αμοιβαία αγωγιμότητα  $g_m$  και την τάση κατωφλίου  $V_T$  βρίσκουμε:

$$k = \frac{1}{2} \frac{g_m^2}{I_D} = \frac{1}{2} \frac{200^2}{250} = 80 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$



# Ενισχυτής MOSFET

$$I_{DSQ} = \frac{k}{2}(V_{GSQ} - V_T)^2 \rightarrow V_{GSQ} = V_T + (2I_{DSQ}/k)^{1/2} = 3,3V$$

**Βρόχος εισόδου**

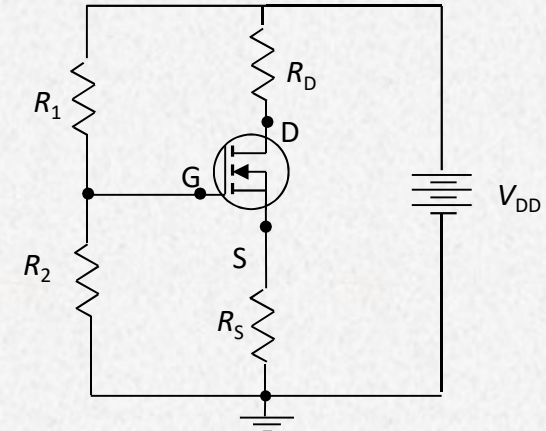
$$V_{GG} = V_{GSQ} + I_{DQ}R_S = 3,3 + 250R_S$$

**Βρόχος εξόδου**

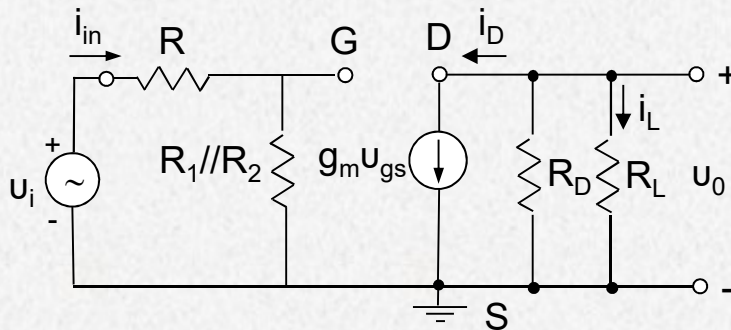
$$V_{DD} = V_{DSQ} + I_{DQ}(R_D + R_S) = 10 + 250(R_D + R_S) \Rightarrow (R_D + R_S) = 0,06k\Omega.$$

Άρα :  $R_S = 60 \Omega - 21 \Omega = 39 \Omega$ .  $V_{GG} = 13,05 V$ . Ισχύει όμως επίσης ότι:

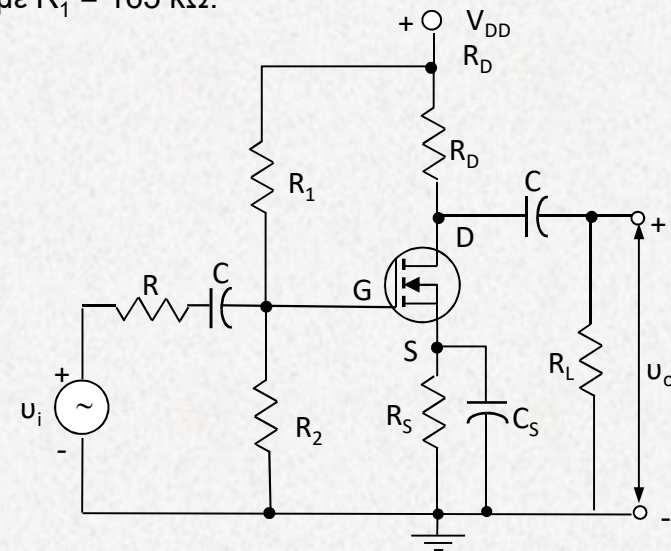
$$V_{GG} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 13,05 V. \text{ Με την τιμή της } R_2 = 180 k\Omega, \text{ βρίσκουμε } R_1 = 165 k\Omega.$$



**Ισοδύναμο dc κύκλωμα**



**Ισοδύναμο ac κύκλωμα**



# Ενισχυτής MOSFET

$$v_L = -i_D \cdot (R_D // R_L) \quad i_D = g_m \cdot v_{gs}$$

$$v_{gs} = \frac{R_1 // R_2}{R + (R_1 // R_2)} \cdot v_i = \frac{86}{0,1 + 86} \cdot v_i = 0,999 v_i \cong v_i$$

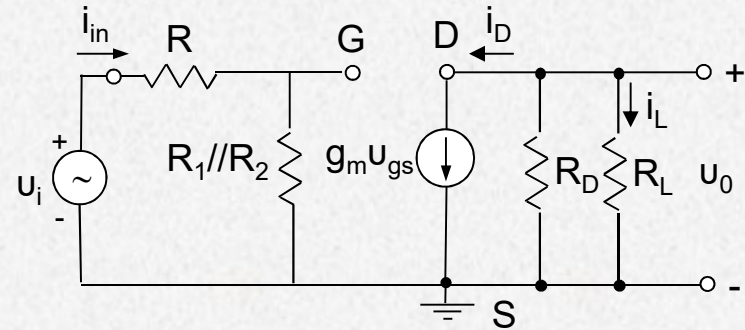
$$v_o = -g_m \cdot (R_D // R_L) \cdot v_{gs} = -g_m \cdot (R_D // R_L) \cdot v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (R_D // R_L) = 3,32$$

$$i_L = -\frac{R_D}{R_D + R_L} i_D = -\frac{R_D}{R_D + R_L} g_m v_{gs} \quad i_{in} = \frac{v_i}{R + R_1 // R_2}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_{in}} = -\frac{\frac{R_D}{R_D + R_L} g_m v_{gs}}{\frac{v_i}{R + R_1 // R_2}} = -g_m \cdot \frac{R_D (R + R_1 // R_2)}{R_D + R_L} = -3.580,4$$

$$A_P = A_v \cdot A_i = (-3,32) \cdot (-3580,4) = 11.887$$



Ισοδύναμο ac κύκλωμα

