

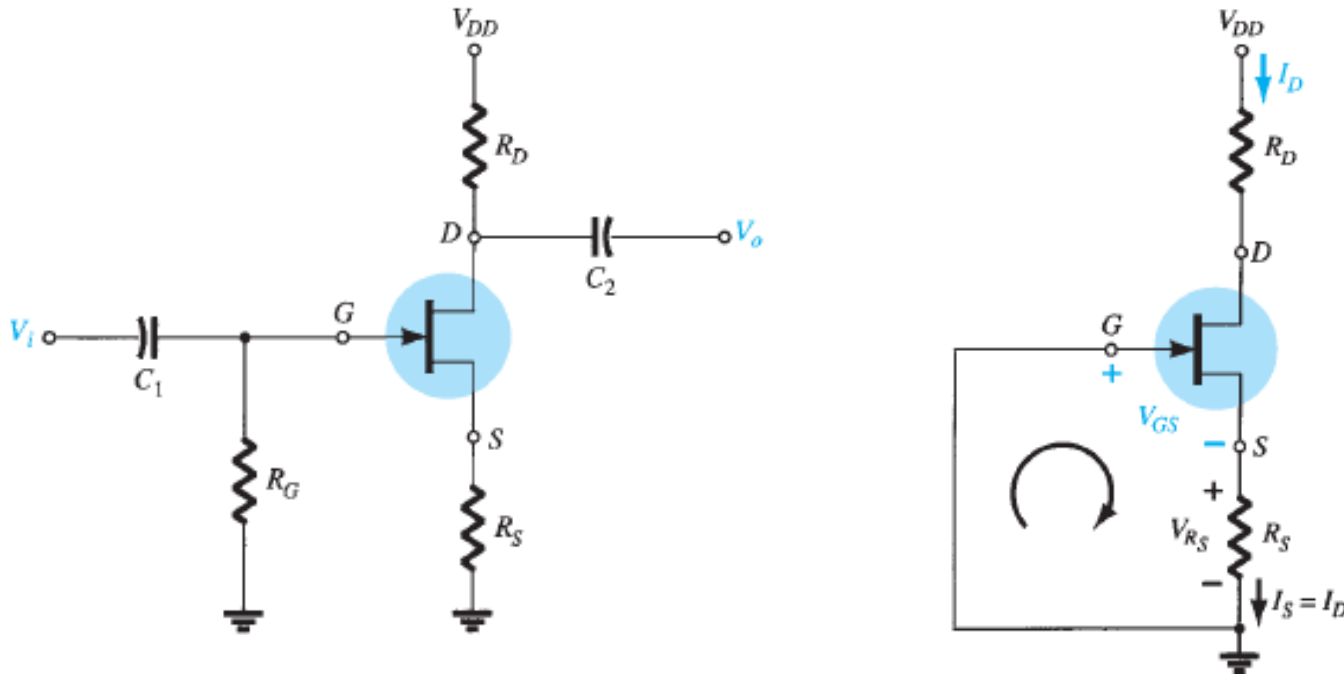
Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. DC analiza rada JFET tranzistora u sklopu s otpornikom na S (source) elektrodi
2. DC analiza rada JFET tranzistora u sklopu s naponskim djelilom na ulazu
3. DC analiza rada MOSFET tranzistora

Elektronički Elementi i Sklopovi

Na slici je JFET transistor u tzv. *self-bias* konfiguraciji koja je prepoznatljiva po otporniku na S (source) elektrodi. Upravljačkim naponom V_{GS} se sada upravlja padom napona na otporu R_S . U svrhu DC analize sklopa na lijevoj slici, kondenzatori postaju otvoreni krug te se dobije električna shema na desnoj slici.



Budući da uzimamo da je struja $I_G = 0$ sa lijeve električne sheme možemo ukloniti otpornik R_G jer je pad napona na otporniku R_G jednak 0.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Struja kroz otpor R_S jest struja I_S ali za struju I_S možemo uzeti da je jednaka:

$$(1) I_S \cong I_D$$

Zbog toga možemo uzeti da je i pad napona V_{R_S} na otporu R_S :

$$(2) V_{R_S} = I_D R_S$$

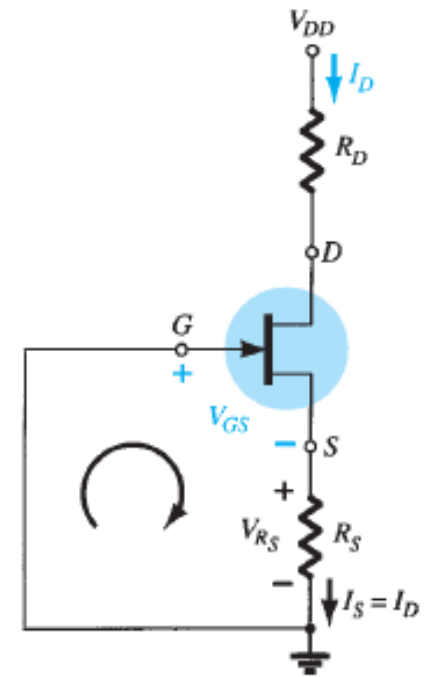
S druge strane za zatvorenu petlju možemo koristiti Kirchhoffov zakon za napone:

$$(3) -V_{GS} - V_{R_S} = 0$$

Kombinirajući jednačbe (2) i (3) dobije se:

$$(4) V_{GS} = -I_D R_S$$

Treba primjetiti da je u ovom slučaju napon V_{GS} funkcija struje I_D te nije fiksnog iznosa (kao u slučaju sa prethodnog predavanja)



Elektronički Elementi i Sklopovi

Ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} se također može izraziti i putem Shocklyeve jednadžbe:

$$(5) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Obe jednadžbe (4) i (5) povezuju dvije iste varijable (I_D , V_{GS}). Iznos struje I_D se može dobiti ili analitički ili grafički. Ako uvrstimo (4) u (5) onda dobijemo:

$$(6) I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{I_D R_S}{V_P}\right)^2$$

Jednadžba (6) jest kvadratna jednadžba i može se napisati kao:

$$(7) I_D^2 + K_1 I_D + K_2 = 0$$

Gdje se koeficijenti K_1 i K_2 mogu odrediti iz izraza (6).

Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako se jednađba (6) raspiše dobije se jednađba:

$$(8) \left(I_{DSS} \frac{R_S^2}{V_P^2} \right) I_D^2 + \left(2I_{DSS} \frac{R_S}{V_P} - 1 \right) I_D + I_{DSS} = 0$$

Iz jednađbe (8) slijedi da su koeficijenti K_1 i K_2 :

$$(9) K_1 = \frac{2I_{DSS} \frac{R_S}{V_P} - 1}{I_{DSS} \frac{R_S^2}{V_P^2}}$$

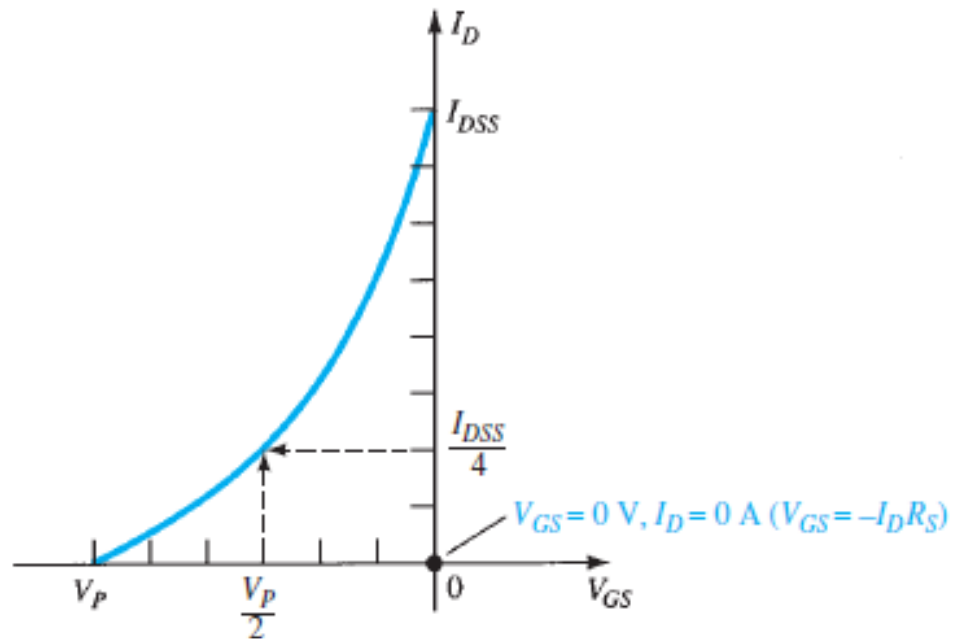
$$(10) K_2 = \frac{V_P^2}{R_S^2}$$

Rješenja kvadratne jednađbe (7) su:

$$(11) I_{D_{1,2}} = \frac{-K_1 \pm \sqrt{K_1^2 - 4K_2}}{2}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kod grafičkog pristupa, treba prvo nacrtati ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} :



S druge strane, struja I_D ovisi o naponu V_{GS} kao i u jednađbi (4), tj. $V_{GS} = -I_D R_S$. Očito je da jednađbe (4) predstavlja jednađbu pravca.

Da bi se nacrtao pravac dan jednađbom (4) treba identificirati dvije točke kroz koje prolazi pravac $V_{GS} = -I_D R_S$.

Jednu točku dobijemo tako što postavimo da je napon $V_{GS} = 0$ te u tom slučaju imamo da je struja $I_D = 0$.

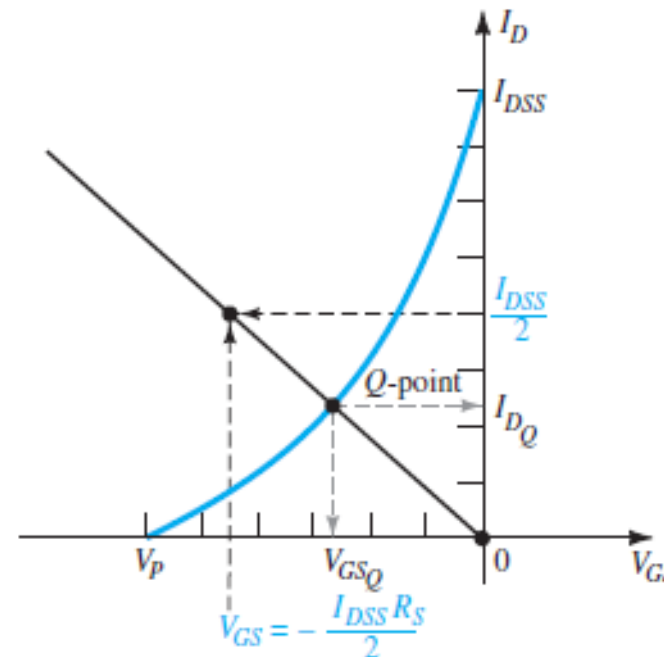
Elektronički Elementi i Sklopovi

Drugu točku možemo dobiti ako pretpostavimo da je struja $I_D = \frac{I_{DSS}}{2}$. Uvrštavanjem struje $I_D = \frac{I_{DSS}}{2}$ u jednadžbu (4) dobije se da je napon V_{GS} u drugoj točki jednak:

$$(12) V_{GS} = -\frac{I_{DSS}}{2} R_S$$

Kada nacrtamo pravac $V_{GS} = -I_D R_S$ na izlaznoj karakteristici dobijemo Q točku:

U Q točki teče struja I_{DQ} pri naponu V_{GSQ} .



Elektronički Elementi i Sklopovi

Napon u izlaznom krugu V_{DS} možemo dobiti iz Kirchhoffovog zakona za napone:

$$(13) V_{R_S} + V_{DS} + V_{R_D} - V_{DD} = 0$$

Padovi napona V_{R_S} i V_{R_D} na otporima R_S i R_D su $V_{R_S} = I_S R_S$ i $V_{R_D} = I_D R_D$ te jednačba (13) postaje:

$$(14) I_S R_S + V_{DS} + I_D R_D - V_{DD} = 0$$

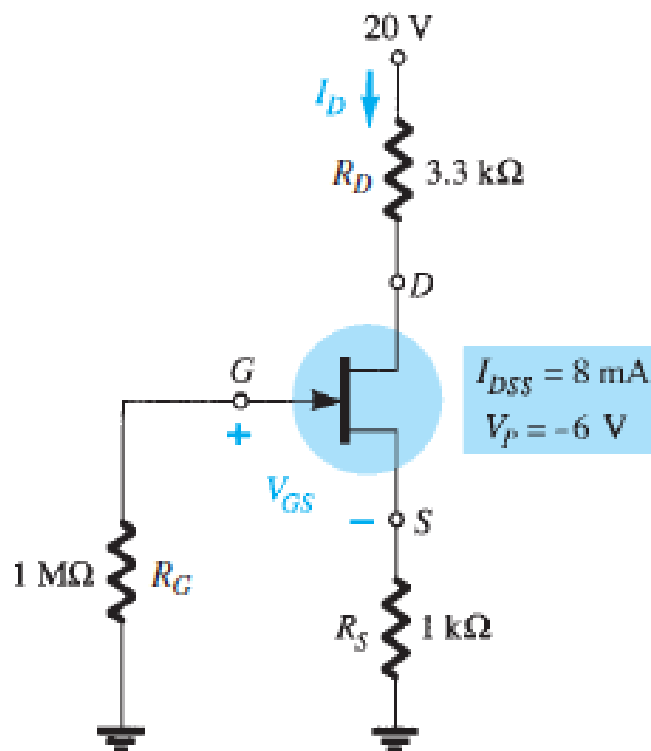
Ako uzmemo da su struje I_D i I_S jednake, tj. $I_D \cong I_S$ onda imamo:

$$(15) V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_S + R_D)$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Za mrežu na slici treba naći slijedeće vrijednosti:

- a) V_{GSQ}
- b) I_{DQ}
- c) V_{DS}
- d) V_S
- e) V_G
- f) V_D



Elektronički Elementi i Sklopovi

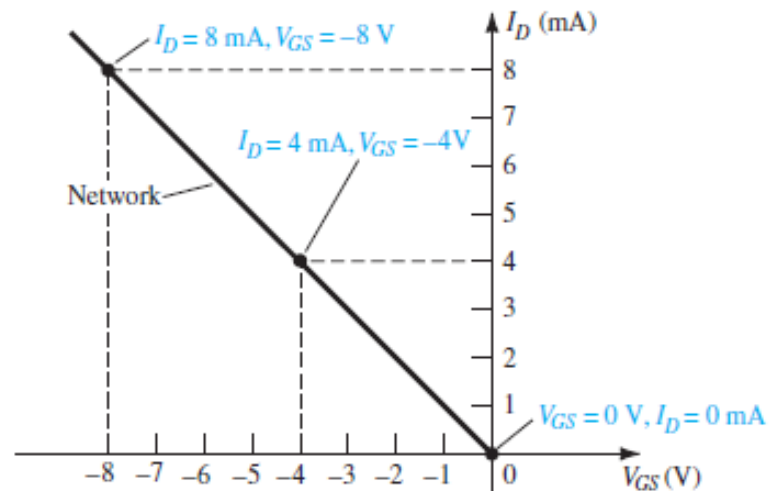
Rješenje: napon V_{GS} ovisi o struji I_D prema jednadžbi (4):

$$(1.1) V_{GS} = -I_D R_S$$

Jednadžba (1.1) jest jednadžba pravca. Prvu točku na tom pravcu dobijemo tako što postavimo $I_D = 0$ pa iz jednadžbe (1.1) slijedi da je u tom slučaju napon $V_{GS} = 0$. Ako odaberemo da je struja $I_D = 4 \text{ mA}$ onda imamo da je napon V_{GS} jednak:

$$(1.2) V_{GS} = -4 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = -4 \text{ V}$$

Sada jednadžbu pravca možemo nacrtati:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Slijedeći korak je nacrtati ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} prema Shockleyevoj jednadžbi:

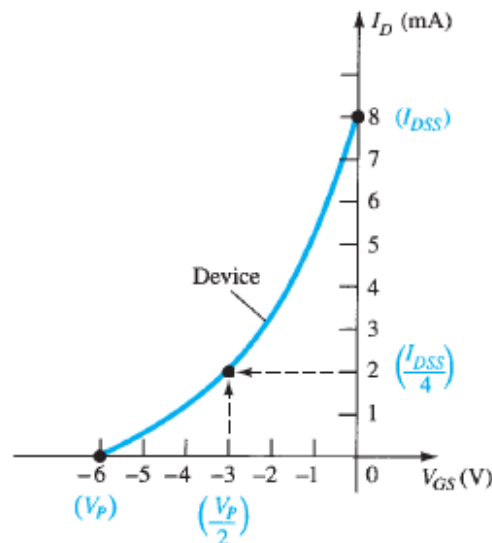
$$(1.3) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Struja I_{DSS} i *pinch-off* napon V_P su poznati iz uvjeta zadatka te ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} možemo nacrtati iz tri točke:

$$(1.4) V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

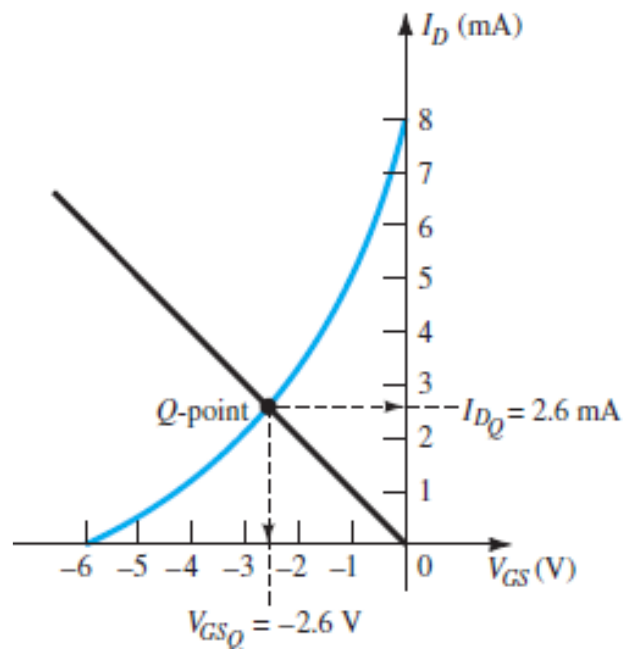
$$(1.5) V_{GS} = V_P \Rightarrow I_D = 0$$

$$(1.6) V_{GS} = \frac{V_P}{2} \Rightarrow I_D = \frac{I_{DSS}}{4}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Q točka, ili radna točka JFET tranzistora iz zadatka se dobije presjekom jednadžbe pravca (1.1) $V_{GS} = -I_D R_S$ te Shockleyeve jednadžbe:



Iz presjeka jednadžbe pravca i Shockleyeve jednadžbe dobije se napon V_{GS} i struja I_D u statičkoj radnoj točki Q :

$$(1.7) V_{GSQ} = -2.6 \text{ V}$$

$$(1.8) I_{DQ} = 2.6 \text{ mA}$$

Sada se iz jednadžbe (15) može izračunati napon V_{DS} :

$$(1.9) V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_S + R_D) = \\ = 20 \text{ V} - 2.6 \text{ mA} \cdot (1 \text{ k}\Omega + 3.3 \text{ k}\Omega) \\ = 8.82 \text{ V}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Napon V_S možemo naći iz izraza:

$$(1.10) V_S = I_S R_S \cong I_D R_S = I_{DQ} R_S = 2.6 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 2.6 \text{ V}$$

Budući da je struja $I_G \cong 0$ napon V_G jest:

$$(1.11) V_G = I_G R_G = 0 \text{ V}$$

Konačno, napon V_D možemo naći iz izraza:

$$(1.12) V_D = V_{DS} + V_S = 8.82 \text{ V} + 2.6 \text{ V} = 11.42 \text{ V}$$

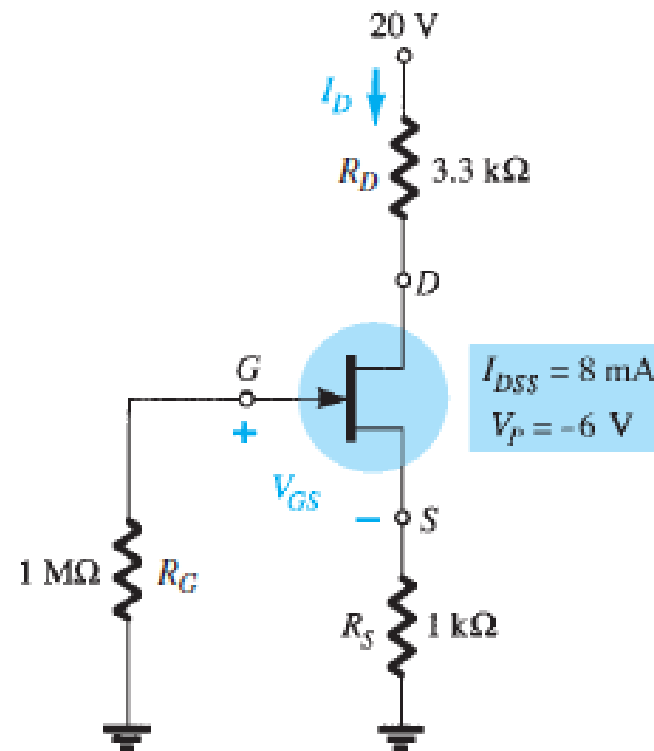
ili ekvivalentno

$$(1.13) V_D = V_{DD} - I_D R_D = 20 \text{ V} - 2.6 \text{ mA} \cdot 3.3 \text{ k}\Omega = 11.42 \text{ V}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 2. Naći statičku radnu točku Q za sklop na slici ako je otpor R_S :

- a) $R_S = 100 \Omega$
- b) $R_S = 10 \text{ k}\Omega$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje:

za obe linije tereta iz jednadžbe (4) $V_{GS} = -I_D R_S$ slijedi da je jedna točka na liniji tereta ($V_{GS} = 0, I_D = 0$)

a) kada je otpor $R_S = 100 \Omega$ uzmemo da je struja $I_D = 4 \text{ mA}$. Tada je napon V_{GS} jednak:

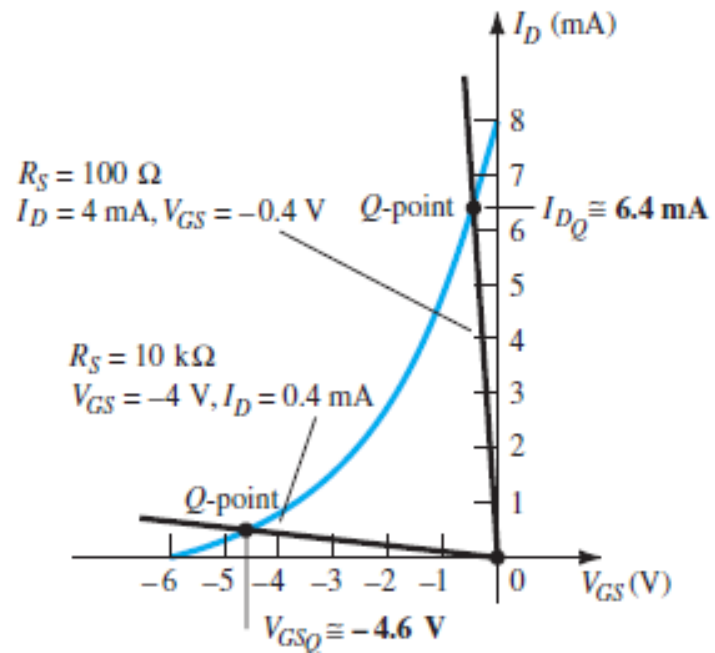
$$(2.1) V_{GS} = -I_D R_S = -4 \text{ mA} \cdot 100 \Omega = -0.4 \text{ V}$$

b) kada je otpor $R_S = 10 \text{ k}\Omega$ uzmemo da je struja $I_D = 0.4 \text{ mA}$. Tada je napon V_{GS} jednak:

$$(2.2) V_{GS} = -I_D R_S = -0.4 \text{ mA} \cdot 10 \text{ k}\Omega = -4 \text{ V}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz Shocklyeve jednadžbe nacrtamo krivulju ovisnosti struje I_D o naponu V_{GS} (odrede se tri točke kao i ranije) te nacrtamo pravac za slučaj a) i za slučaj b). Sjecišta ovih dvaju pravaca sa strujno-naponskom karakteristikom Shocklyeve jednadžbe su Q točke za slučaj a) i slučaj b).



Za slučaj a) imamo:

$$(2.3) I_{DQ} \cong -6.4 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} \cong -0.64 \text{ V}$$

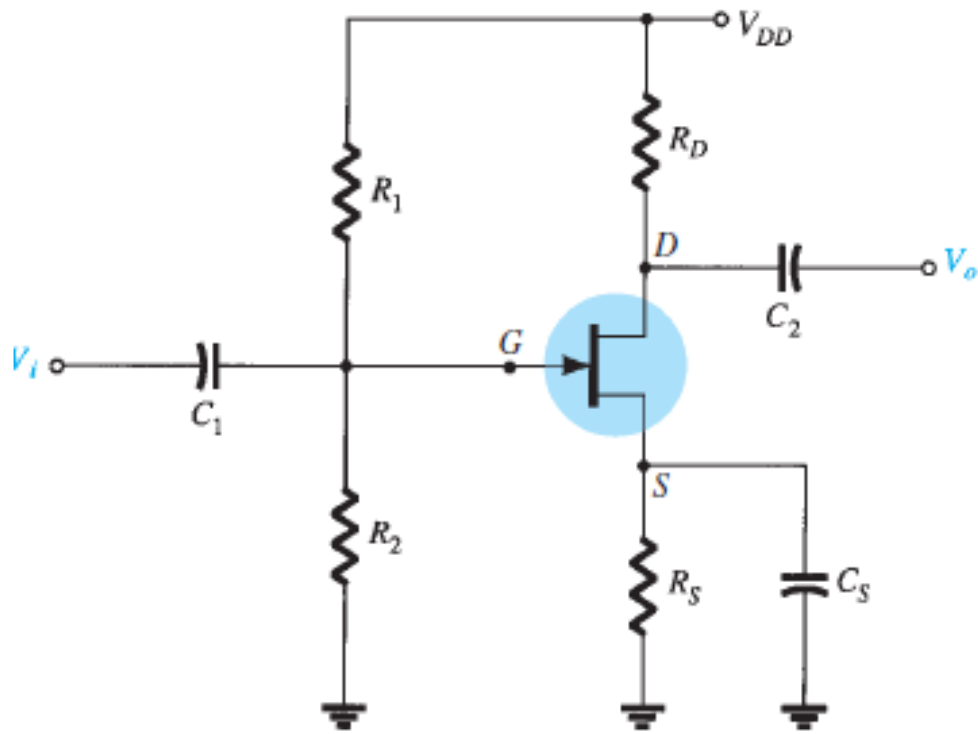
Za slučaj b) imamo:

$$(2.3) I_{DQ} \cong -0.46 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} \cong -4.6 \text{ V}$$

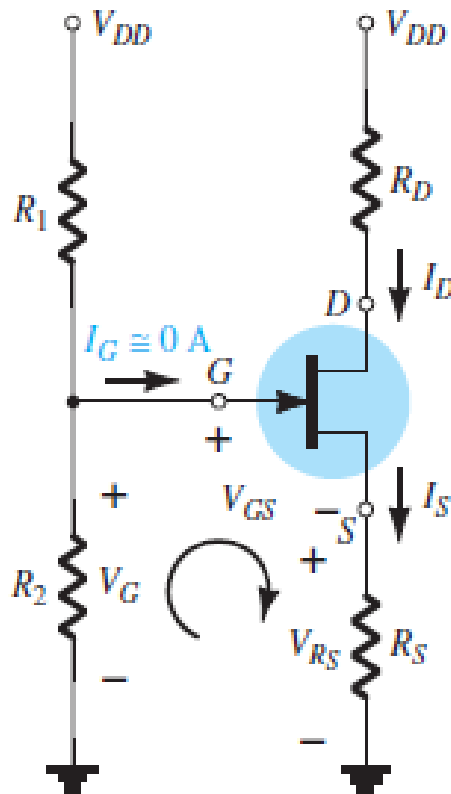
Elektronički Elementi i Sklopovi

Slično kao i kod BJT tranzistora, FET tranzistori u ulaznom krugu mogu imati naponsko djelilo.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Budući da se radi o DC analizi, sve kondenzatore možemo zamijeniti otvorenim krugom.



Sada bi mogli, u svrhu egzaktne analaize, naponsko djelilo u ulaznom krugu zamijeniti Theveninovim ekvivalentnim izvorom i Theveninovim otporom. Međutim s obzirom da je ulazni otpor FET tranzistora vrlo velik, to nije potrebno već se možemo poslužiti slijedećom aproksimacijom:

$$(16) V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}$$

Sada možemo primjeniti Kirchhoffov zakon za napone na petlju u ulaznom krugu:

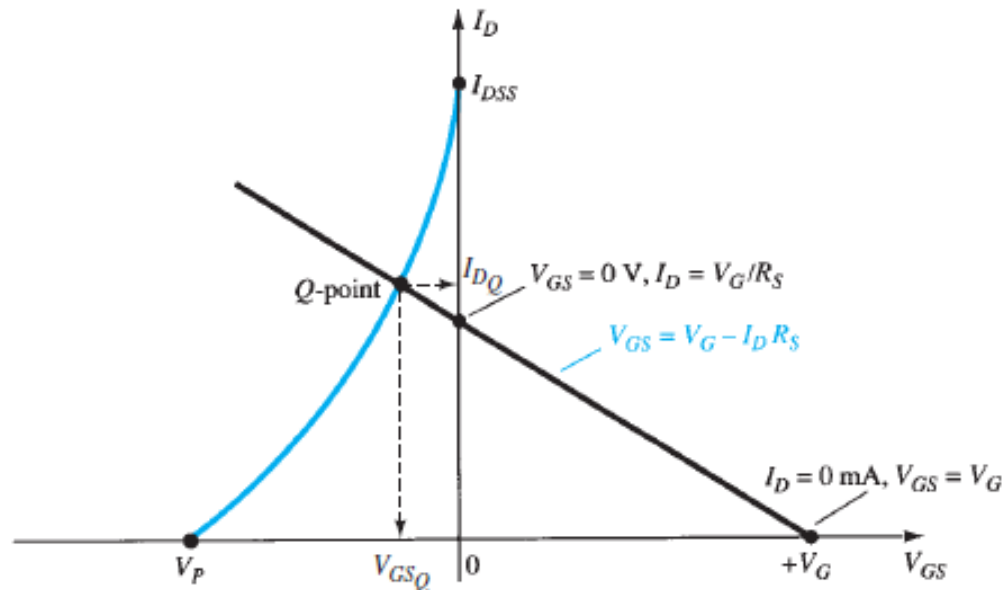
$$(17) V_G - V_{GS} - V_{RS} = 0$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Pošto vrijedi izraz $V_{R_S} = I_S R_S \cong I_D R_S$ jednačba (17) postaje:

$$(18) V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

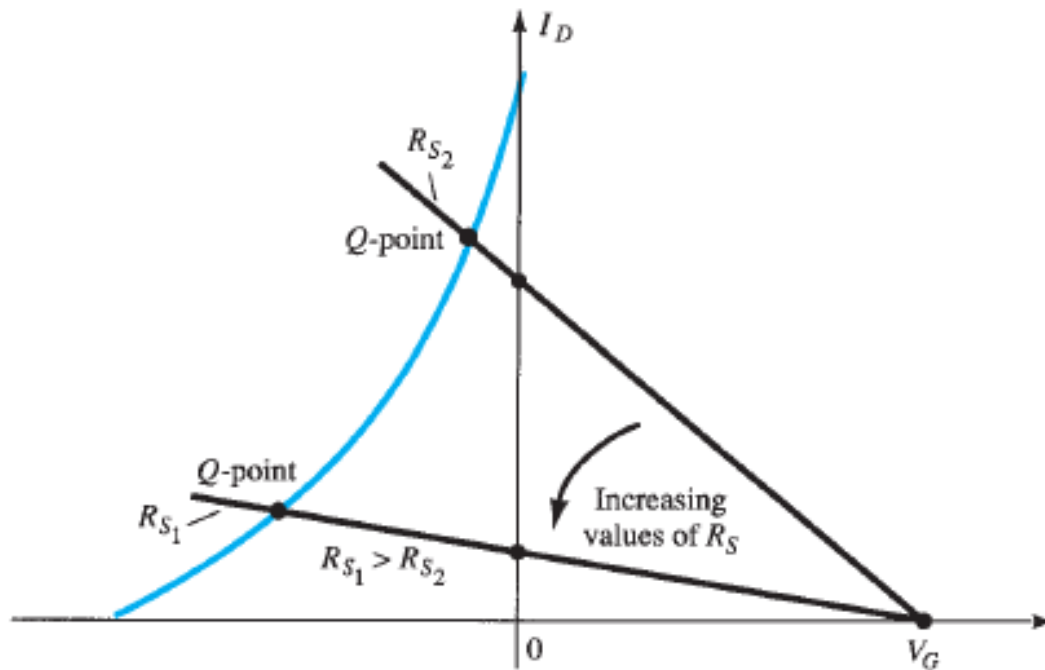
Sada iz presjeka Shocklyeve jednačbe i pravca danog jednačbom (18) možemo naći Q točku:



Da bi nacrtali pravac na slici možemo postaviti da je struja $I_D = 0$. Tada iz (18) slijedi da je $V_{GS} = V_G$. Za drugu točku možemo postaviti da je $V_{GS} = 0$. U tom slučaju struja imamo da je struja $I_D = V_G/R_S$.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz prethodne analize slijedi da što je otpor R_S veći to je nagib pravca danog jednađbom (18) veći.



Jednom kada se odrede vrijednosti struje I_D i napona V_{GS} u statičkoj radnoj točki Q (I_{DQ}, V_{GSQ}) ostale vrijednosti se mogu odrediti kao i do sada:

$$(19) V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D)$$

$$(20) V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

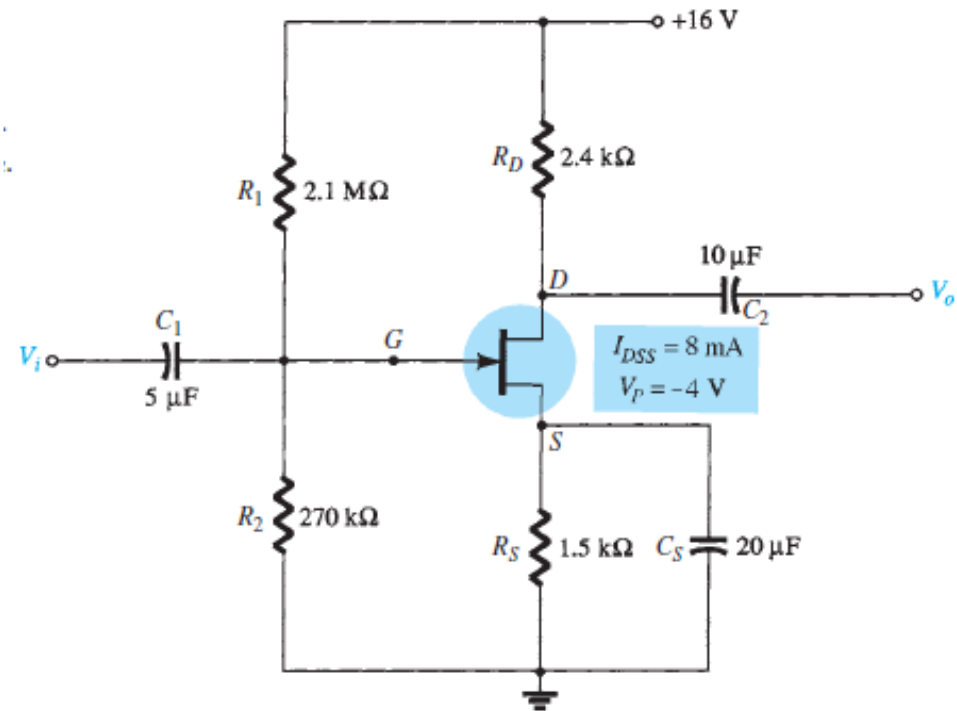
$$(21) V_S = I_D R_S$$

$$(22) I_{R_1} = I_{R_2} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 3. Za sklop na slici treba odrediti sljedeće veličine:

- a) I_{DQ} i V_{GSQ}
- b) V_D
- c) V_{DS}
- d) V_G



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: prvo nacrtamo prijenosnu strujno-naponsku karakteristiku, tj. ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} prema Shocklyevoj jednadžbi. To možemo iz tri točke:

$$(3.1) V_{GS} = 0 V, I_D = I_{DSS} = 8 mA$$

$$(3.2) V_{GS} = V_P, I_D = 0$$

$$(3.3) V_{GS} = V_P/2, I_D = I_{DSS}/4$$

Napon V_G možemo izračunati iz izraza (16):

$$(3.4) V_G = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{DD} = \frac{270 k\Omega}{2.1 M\Omega+270 k\Omega} \cdot 16 V = 1.82 V$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Uvrštavajući vrijednosti iz zadatka u (18) dobije se:

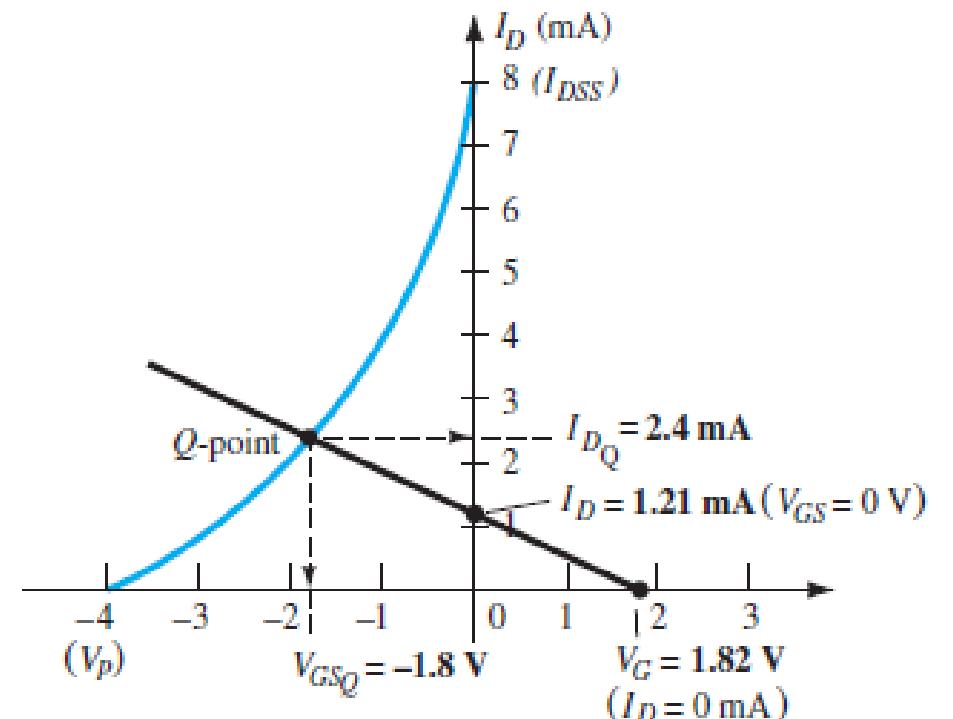
$$(3.5) V_{GS} = V_G - I_D R_S \Rightarrow V_{GS} = 1.82 \text{ V} - I_D \cdot 1.5 \text{ k}\Omega$$

Jednadžba (3.5) jest jednadžba pravca, dok sjecište jednadžbe pravca i Shocklyeve jednadžbe jest statička radna točka Q .

Jednadžbu pravca (3.5) nacrtamo tako što postavimo struju $I_D = 0$ te iz (3.5) dobijemo da je $V_{GS} = 1.82 \text{ V}$.

Drugu točku na pravcu (3.5) dobijemo tako što postavimo da je $V_{GS} = 0$ pa tako dobijemo da je

$$(3.6) I_D = \frac{1.82 \text{ V}}{1.5 \text{ k}\Omega} = 1.21 \text{ mA}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz sjecišta jednadžbe pravca (3.5) i Shocklyeve jednadžbe dobijemo struju I_D i napon V_{GS} u točki Q :

$$(3.7) I_{DQ} = 2.4 \text{ mA}$$

$$(3.8) V_{GSQ} = -1.8 \text{ V}$$

Za izlazni krug, napon V_D možemo odrediti iz jednadžbe (20):

$$(3.9) V_D = V_{DD} - I_D R_D = 16 \text{ V} - 2.4 \text{ mA} \cdot 2.4 \text{ k}\Omega$$

Napon V_S se odredi iz (21) kao:

$$(3.10) V_S = I_D R_S = 2.4 \text{ mA} \cdot 2.4 \text{ k}\Omega = 3.6 \text{ V}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Napon V_{DS} se može odrediti iz razlike potencijala:

$$(3.11) V_{DS} = V_D - V_S$$

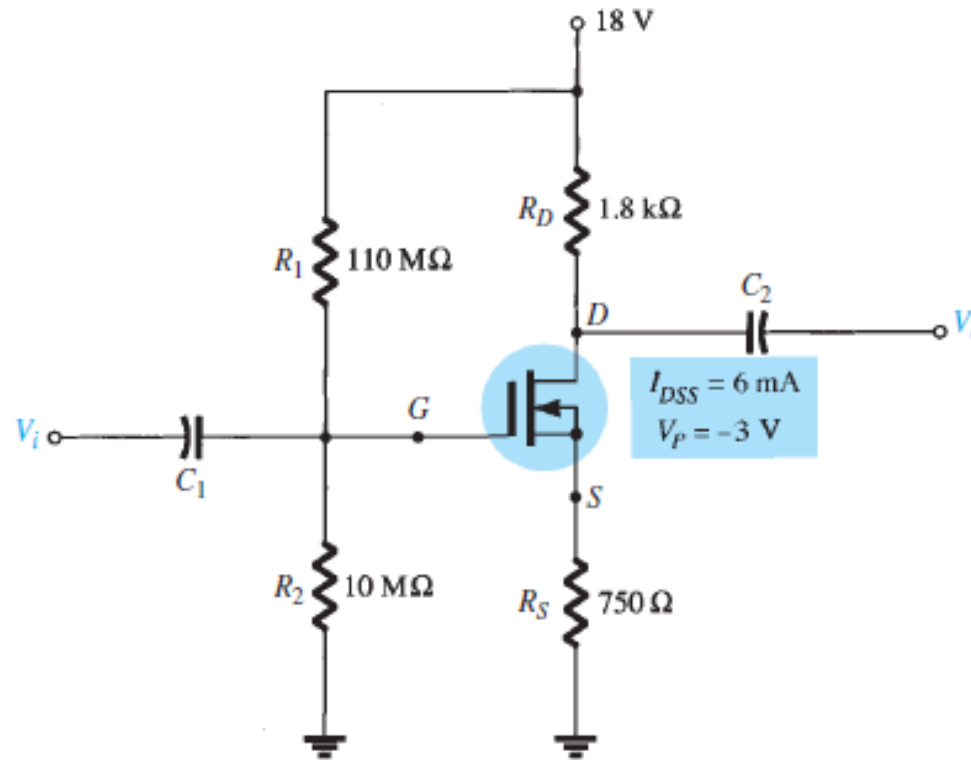
ili ekvivalentno:

$$(3.12) V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S) = 16V - 2.4 \text{ mA} \cdot (2.4 \text{ k}\Omega + 1.5 \text{ k}\Omega)$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 4. Za sklop na slici sa n-kanalnim MOSFET tranzistorom osiromašenog tipa treba odrediti:

- a) I_{DQ} i V_{GSQ}
- b) V_{DS}



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: iz jednadžbe (4) imamo $V_{GS} = -I_D R_S$. Prvo treba nacrtati prijenosnu karakteristiku n-kanalnog MOSFET tranzistora. To možemo iz Shocklyeve jednadžbe:

$$(4.1) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Struja I_{DSS} i *pinch-off* napon V_P su poznati iz uvjeta zadatka te ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} možemo nacrtati iz tri točke:

$$(4.2) V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

$$(4.3) V_{GS} = V_P \Rightarrow I_D = 0$$

$$(4.4) V_{GS} = \frac{V_P}{2} \Rightarrow I_D = \frac{I_{DSS}}{4}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

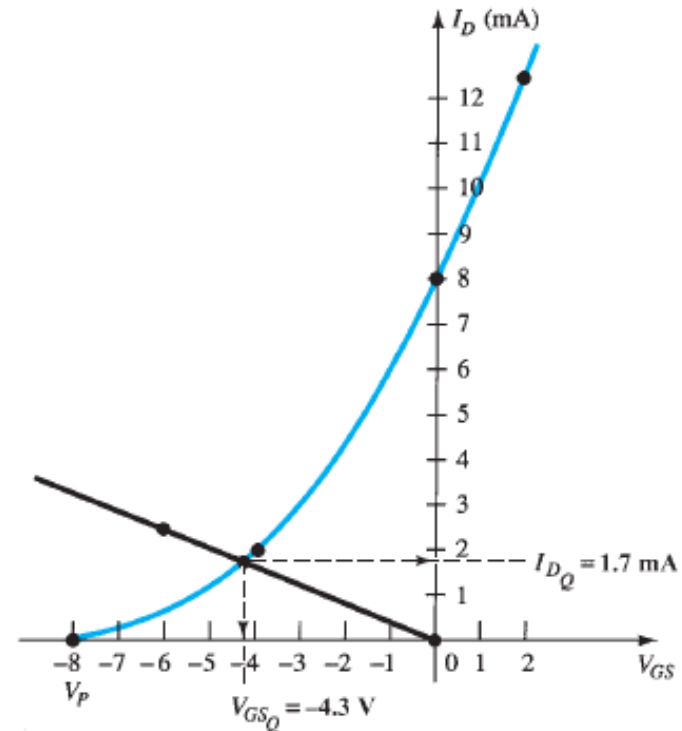
Pravac $V_{GS} = -I_D R_S$ možemo nacrtati iz dvije točke. Prva točka je kada je $I_D = 0$ tada imamo $V_{GS} = 0$. Drugu točku možemo dobiti ako pretpostavimo da je napon $V_{GS} = -6V$. Tada je struja I_D :

$$(4.5) I_D = -\frac{V_{GS}}{R_S} = -\frac{-6V}{2.4 k\Omega} = 2.5 mA$$

Rezultirajuća struja I_{DQ} i napon V_{GSQ} se odredi sa grafa:

$$(4.6) I_{DQ} = 1.7 mA$$

$$(4.7) V_{GSQ} = -4.3 V$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Napon V_{DS} se odredi iz jednadžbe:

$$(4.8) V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 9.46 V$$