

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. DC analiza rada MOSFET tranzistora obogaćenog tipa
2. MOSFET transistor obogaćenog tipa sa naponskim djelilom u krugu baze
3. Pojačala sa naponski reguliranim pojačanjem
4. Sklopovi za kašnjenje sa JFET tranzistorom
5. Primjena FET tranzistora za fiber-optičke komunikacije

Elektronički Elementi i Sklopovi

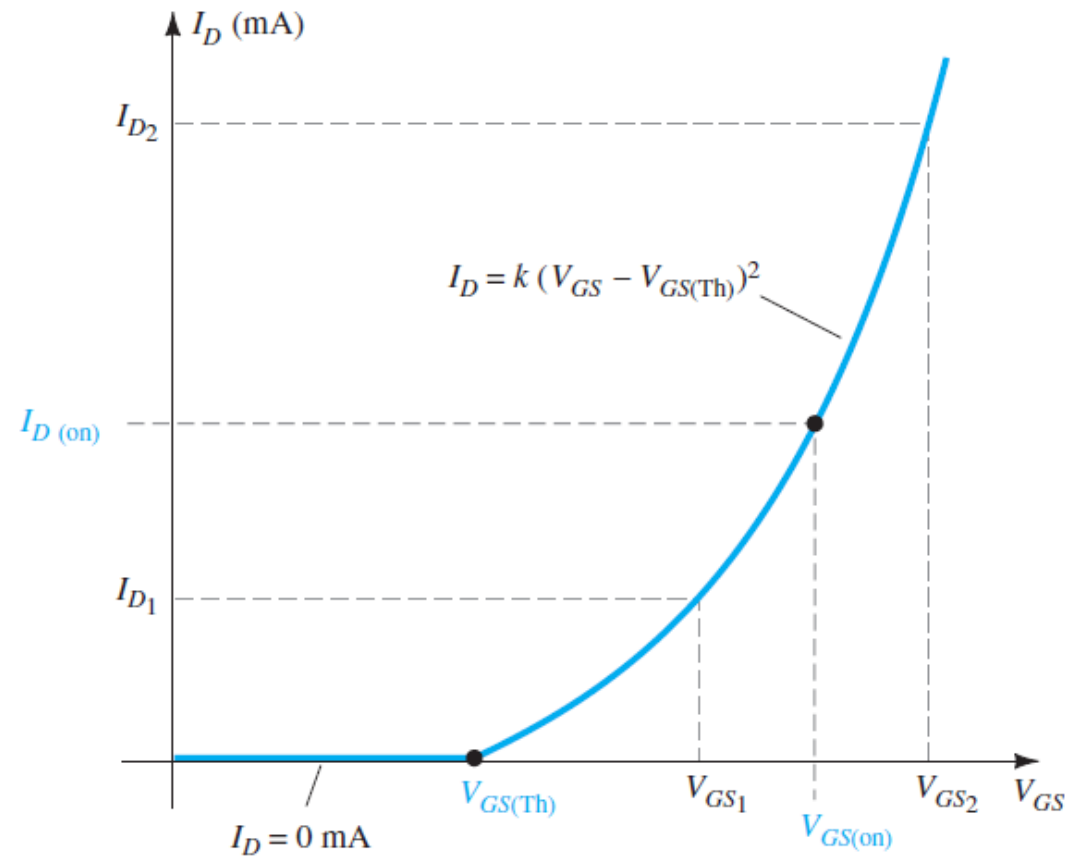
Prijenosna strujno-naponska karakteristika MOSFET tranzistora obogaćenog tipa je bitno drukčija nego kod JFET tranzistora i MOSFET tranzistora osiromašenog tipa. Za razliku od JFET tranzistora i MOSFET tranzistora osiromašenog tipa struja draina $I_D = 0$ sve dok napon V_{GS} ne dosegne *threshold* nivo $V_{GS} = V_{GS(Th)}$. Struja draina I_D MOSFET tranzistora osiromašenog tipa može se opisati jednačbom:

$$(1) I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$

Budući da *data sheetovi* proizvođača tipično specificiraju napon *thresholda* $V_{GS(Th)}$ te struju $I_{D(on)}$ i napon $V_{GS(on)}$ lako možemo izračunati koeficijent k iz jednačbe (1):

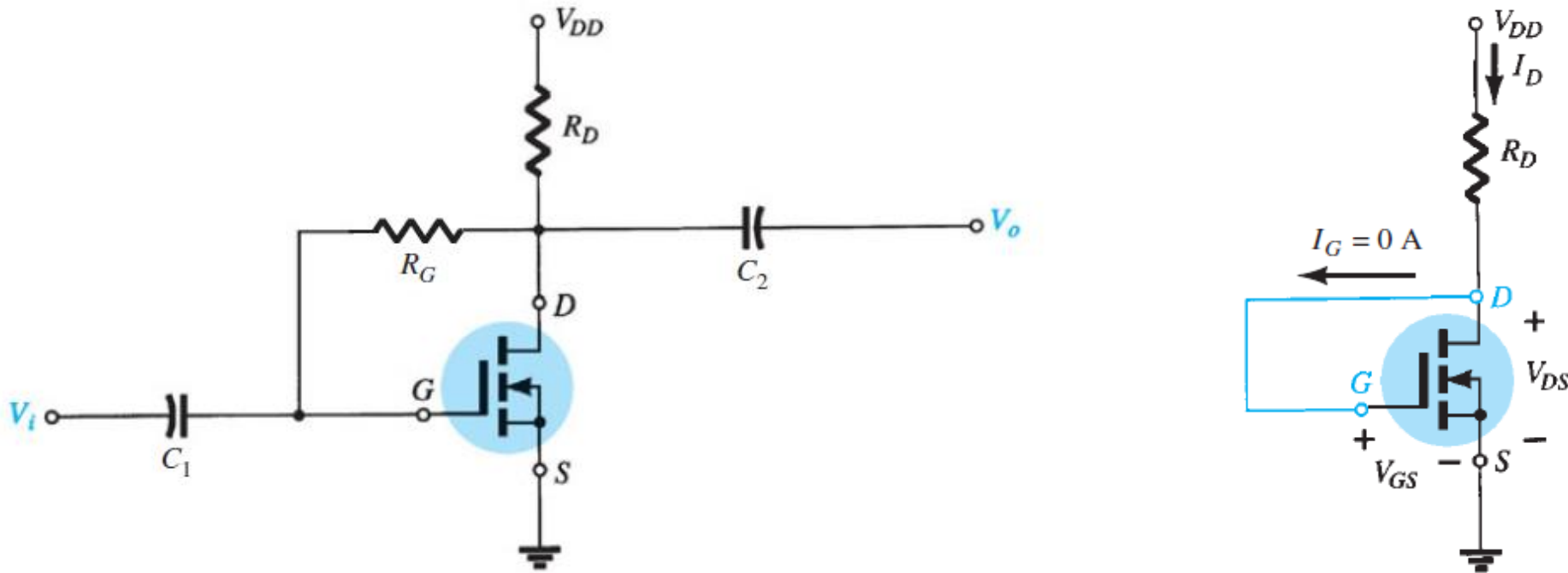
$$(2) k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Elektronički Elementi i Sklopovi

Kod DC analize prvo se kondenzatori predstavljaju otvorenim krugom. Budući da je struja $I_G = 0$ pad napona V_{R_G} na otporu R_G jest jednak nuli. Stoga je ekvivalentna shema pogodna za DC analizu dana na desnoj strani:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Budući da je struja $I_G = 0$ te napon $V_{R_G} = 0$ može se pisati:

$$(3) V_D = V_G$$

Iz jednadžbe (3) te iz električne sheme na desnoj strani slijedi:

$$(4) V_{DS} = V_{GS}$$

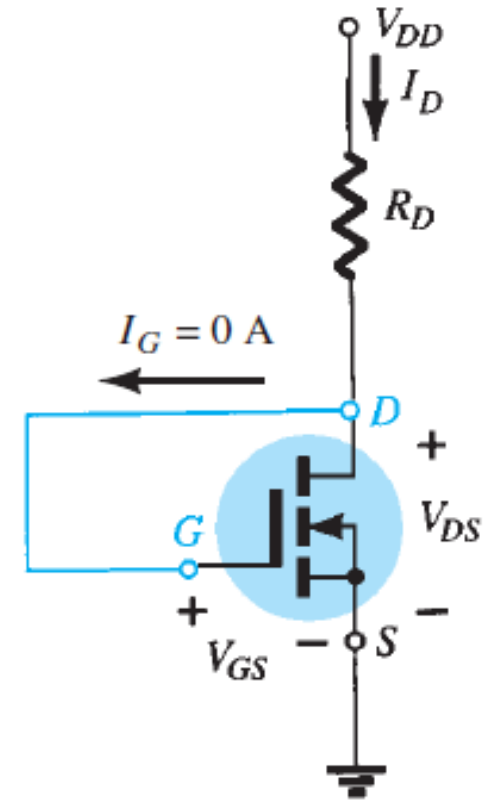
Za izlazni krug, iz Kirchhoffovog zakona vrijedi:

$$(5) V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Substituiranjem (4) u (5) imamo:

$$(6) V_{GS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Jednadžba (6) jest jednadžba pravca gdje je $V_{GS} = f(I_D)$

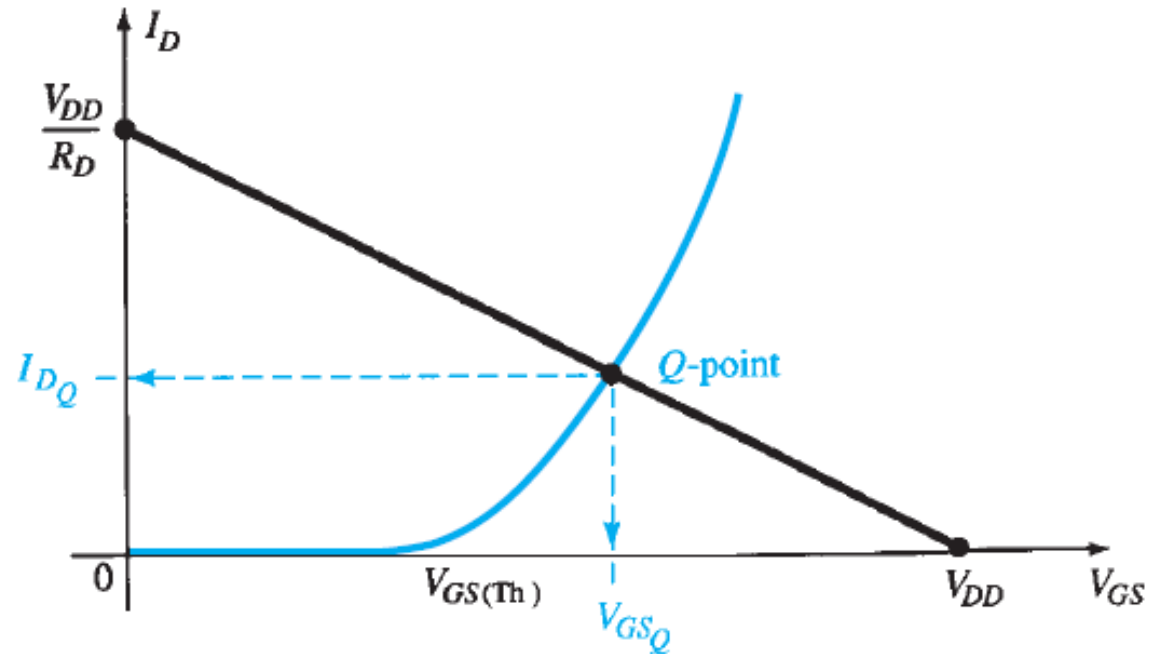


Elektronički Elementi i Sklopovi

Pravac (6) možemo nacrtati ako povučemo crtu između dvije točke:

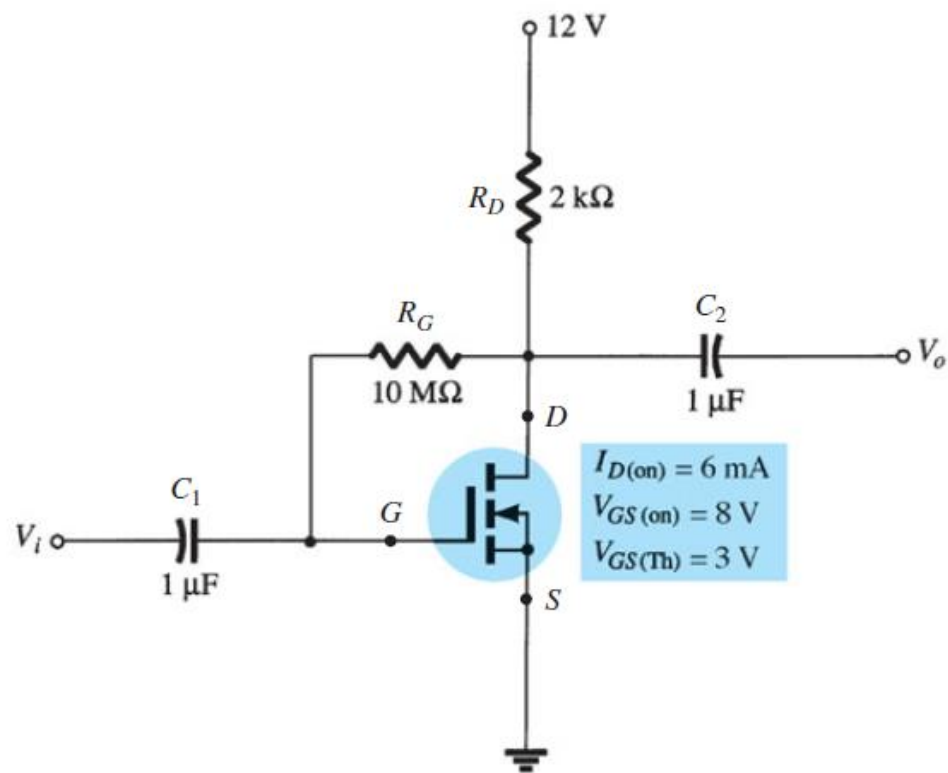
$$(7) I_D = 0 \Rightarrow V_{GS} = V_{DD}$$

$$(8) V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD}}{R_D}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Za mrežu na slici treba odrediti struju I_{DQ} te napon V_{GSQ} . Tranzistor je n-kanalni MOSFET obogaćenog tipa.

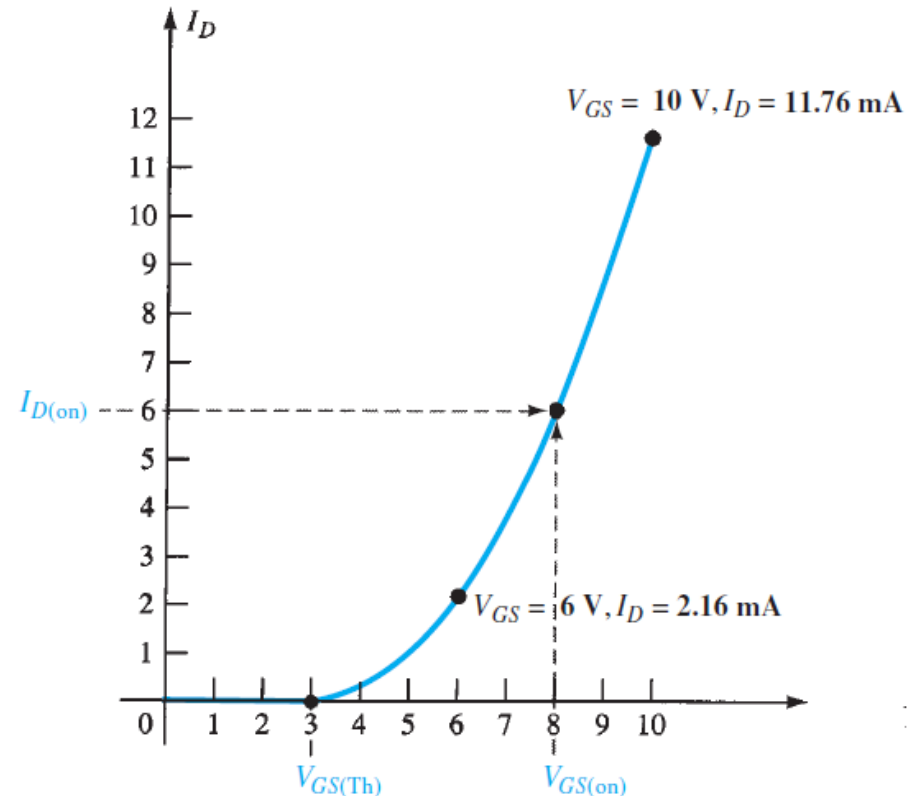


Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: prvo izračunamo konstantu k koristeći jednadžbu (2):

$$(1.1) k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2} = \frac{6 \text{ mA}}{(8\text{V} - 3\text{V})^2} = \frac{6 \times 10^{-3} \text{ A}}{25 \text{ V}^2} = 0.24 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$$

Zatim koristeći jednadžbu (1) nacramo prijenosnu strujno naponsku karakteristiku:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Prijenosna strujno naponska karakteristika može se dobiti ako izračunamo nekoliko točaka:

$$(1.2) V_{GS} = V_{GS(Th)} \Rightarrow I_D = 0$$

$$(1.3) V_{GS} = V_{GS(on)} \Rightarrow I_D = I_{D(on)}$$

$$(1.4) V_{GS} = 6 V \text{ (između napona } V_{GS(Th)} \text{ i } V_{GS(on)} \text{)}$$

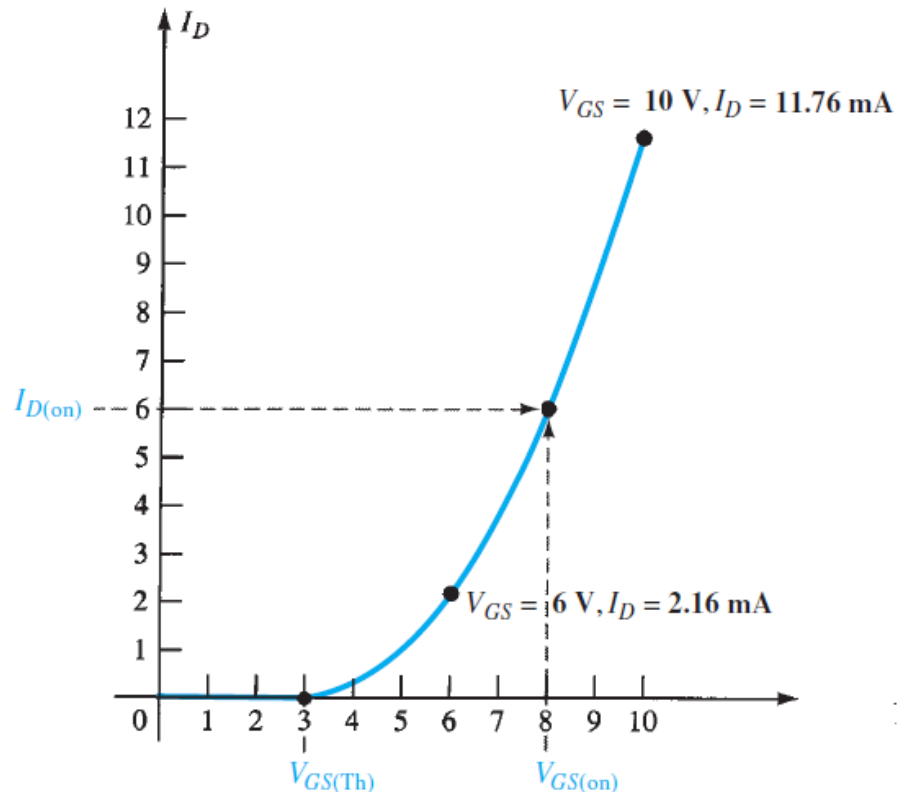
$$\Rightarrow I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 0.24 \times 10^{-3} A/V^2 (6V - 3V)^2 = 2.16 mA$$

$$(1.5) V_{GS} = 10 V \text{ (malo iznad napona } V_{GS(on)} \text{)}$$

$$\Rightarrow I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 0.24 \times 10^{-3} A/V^2 (10V - 3V)^2 = 11.76 mA$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Koristeći ove 4 točke (1.2) - (1.5) dobije se strujno naponska karakteristika na slici:



Sada treba nacrtati liniju tereta. Linija tereta jest pravac:

$$(1.6) V_{GS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Koristeći podatke iz zadatka jednačba (1.6) se može napisati kao:

$$(1.7) V_{GS} = 12 V - I_D \cdot 2 k\Omega$$

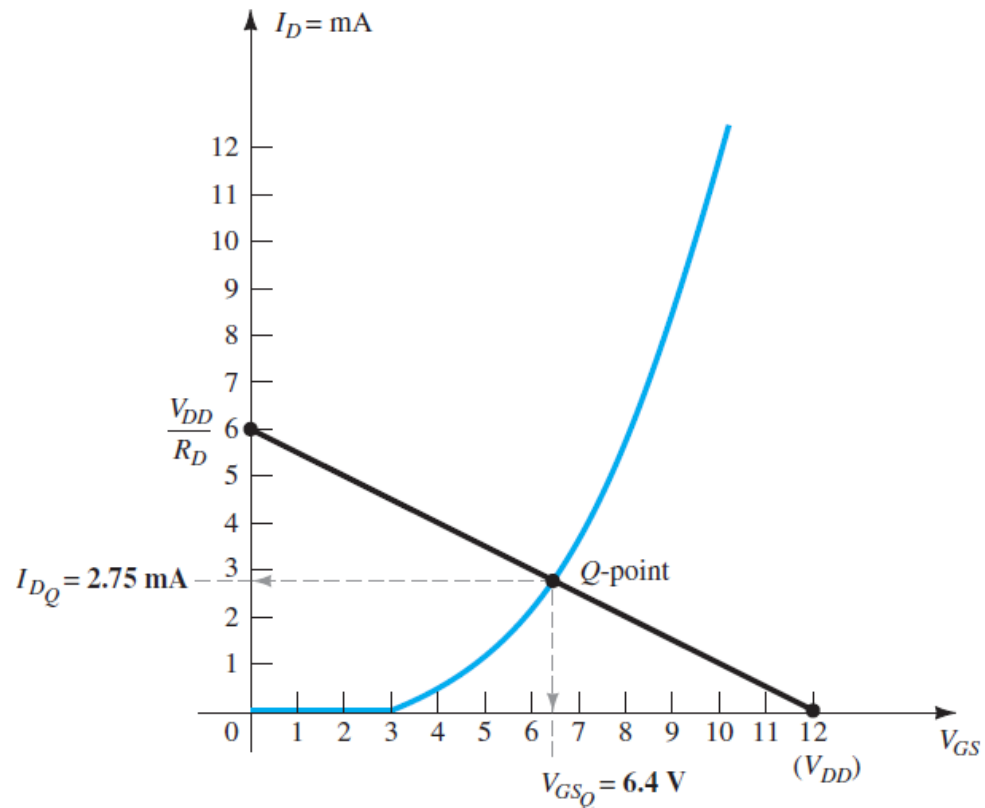
Iz jednačbe (1.7) treba dobiti dvije točke:

$$(1.8) V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} = \frac{12 V}{2 k\Omega} = 6 mA$$

$$(1.9) I_D = 0 \Rightarrow V_{GS} = V_{DD} = 12 V$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sjecište prijenosne strujno naponske karakteristike i linije tereta jest Q-točka:



Sada se iz slike lijevo može očitati struja I_{DQ} te napon V_{GSQ} :

$$(2.0) I_{DQ} = 2.75 \text{ mA}$$

$$(2.1) V_{GSQ} = 6.4 \text{ V}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

MOSFET obogaćenog tipa može imati i naponsko djelilo u ulaznom krugu kao na slici desno. Budući da je struja $I_G = 0$ napon V_G jest:

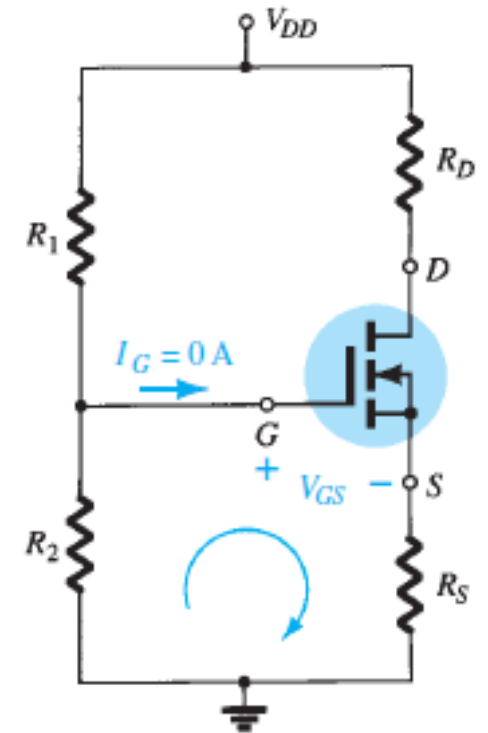
$$(8) V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}$$

Korištenjem Kirchhoffovog zakona za napone na petlji prikazanoj na slici možemo pisati:

$$(9) V_G - V_{GS} - V_{RS} = 0$$

Budući da je $V_{RS} = I_S R_S \cong I_D R_S$ jednačba (9) postaje:

$$(10) V_{GS} = V_G - I_D R_S$$



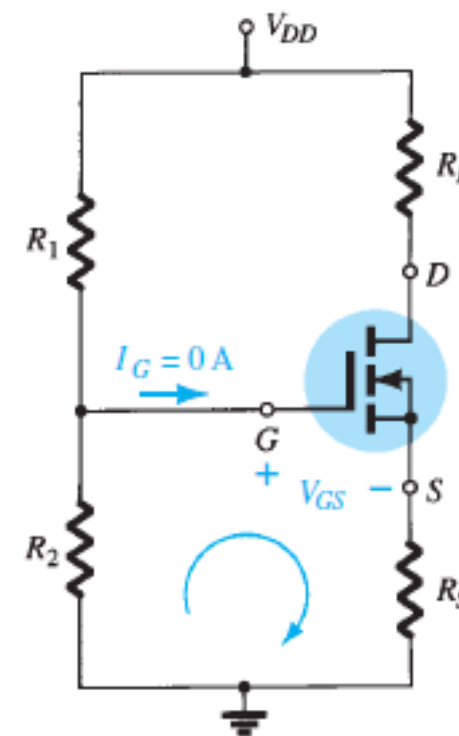
Elektronički Elementi i Sklopovi

Za izlazni krug možemo pisati korištenjem Kirchhoffovog zakona za napone:

$$(11) V_{R_S} + V_{D_S} + V_{R_D} - V_{D_D} = 0$$

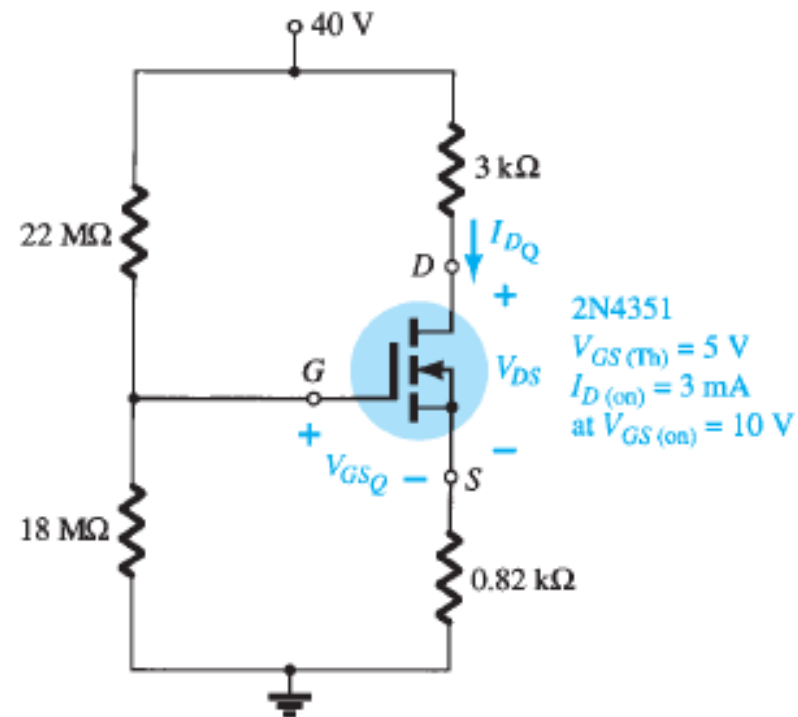
Budući da je $V_{R_S} = I_S R_S \cong I_D R_S$ te $V_{R_D} = I_D R_D$ onda imamo:

$$(12) V_{D_S} = V_{D_D} - I_D (R_S + R_D)$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 2. Odrediti struju I_{DQ} i napone V_{GSQ} , V_{DS} za mrežu na slici:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: prvo treba izračunati napon V_G korištenjem jednadžbe (8):

$$(2.1) V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = \frac{18 \text{ M}\Omega}{22 \text{ M}\Omega + 18 \text{ M}\Omega} \cdot 40 \text{ V} = 18 \text{ V}$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz zadane mreže jednadžbu za ulazni krug jednadžbu (10) možemo napisati kao:

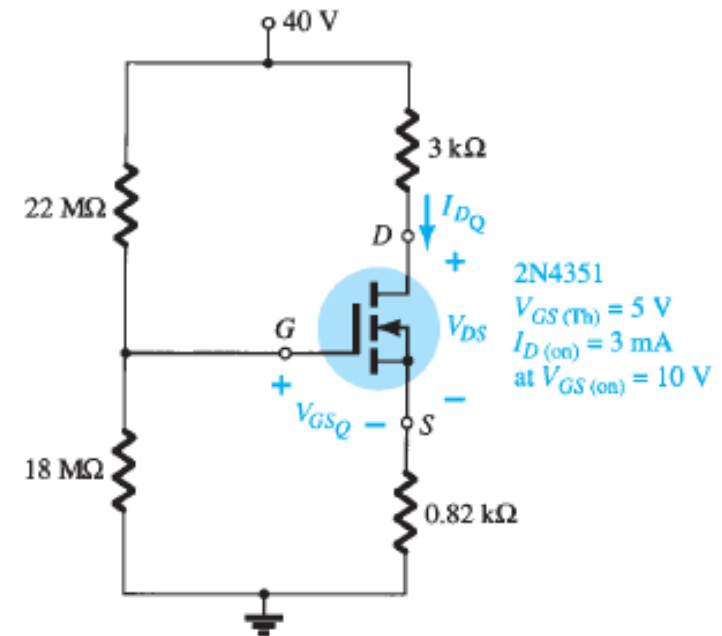
$$(2.2) V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

$$(2.3) V_{GS} = 18 \text{ V} - I_D \cdot 0.82 \text{ k}\Omega$$

Iz jednadžbe (2.3) možemo dobiti dvije točke:

$$(2.4) I_D = 0 \text{ A} \Rightarrow V_{GS} = 18 \text{ V}$$

$$(2.5) V_{GS} = 0 \text{ V} \Rightarrow I_D = 18 \text{ V} / 0.82 \text{ k}\Omega = 21.95 \text{ mA}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Da bi nacrtali ovisnost struje I_D o naponu V_{GS} korištenjem jednadžbe (1) $I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$ treba prvo odrediti konstantu k . Konstanta k se odredi iz uvjeta zadatka korištenjem jednadžbe (2):

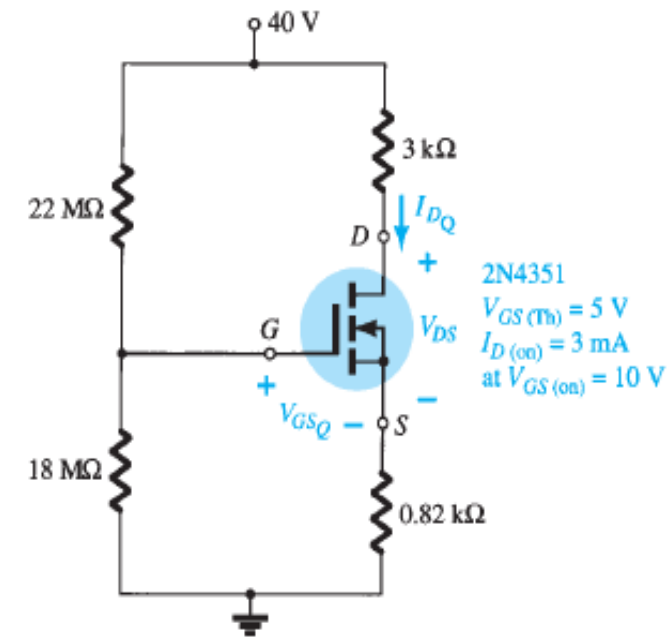
$$(2.6) \quad k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2} = \frac{3 \text{ mA}}{(10 \text{ V} - 5 \text{ V})^2} = \frac{3 \text{ mA}}{25 \text{ V}^2} = 0.12 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$$

Sada korištenjem nekoliko točaka može se nacrtati prienosna karakteristika dana jednadžbom (1). Sve dok je napon $V_{GS} < V_{GS(Th)}$ struja $I_D = 0$. Zbog toga je prva točka na prienosnoj karakteristici:

$$(2.7) \quad V_{GS} = V_{GS(Th)} \Rightarrow I_D = 0$$

Drugu točku dobijemo iz napona uključenja:

$$(2.8) \quad V_{GS} = V_{GS(on)} \Rightarrow I_D = I_{D(on)} = 3 \text{ mA}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Da bi prijosna karakteristika bila dobro nacrtana trebamo još barem dvije točke. Još jedna točka se dobije kada se napon V_{GS} postavi $V_{GS} = (V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})/2$ tada imamo:

$$(2.9) V_{GS} = \frac{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})}{2} = \frac{10 V - 5 V}{2} = 2.5 V$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 0.12 \times 10^{-3} A/V^2 \cdot (10 V - 5 V)^2 = 0.6 \times 10^{-3} A = 0.6 mA$$

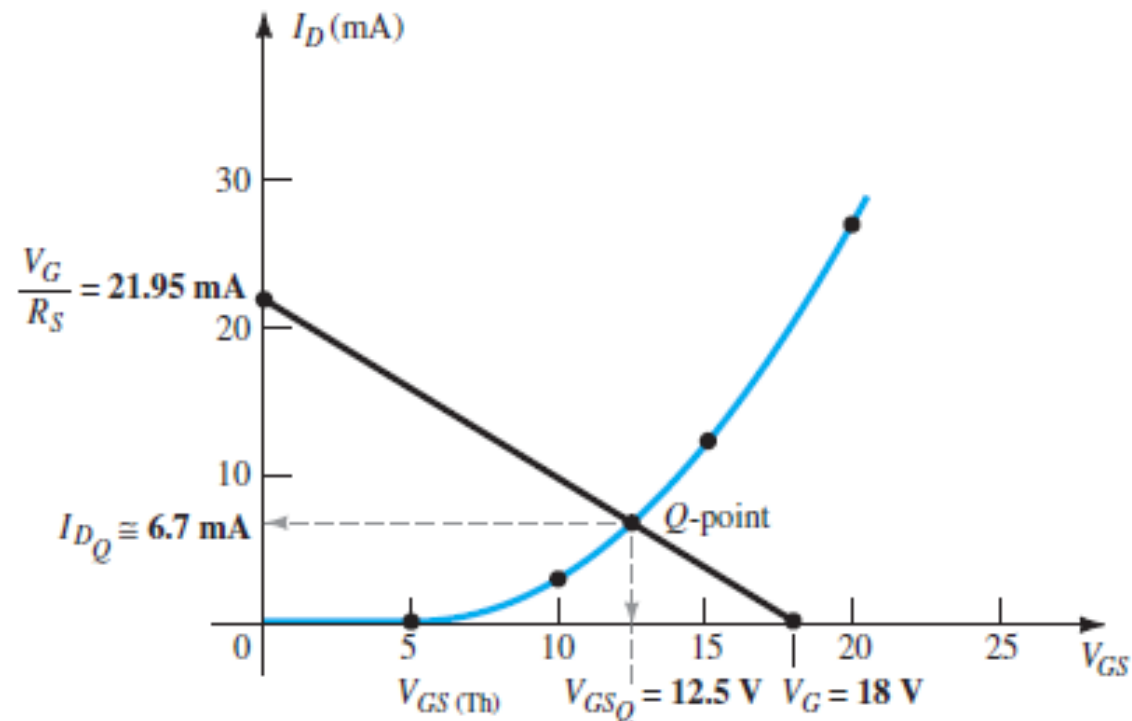
Četvrta točka se dobije kada se postavi da je napon $V_{GS} > V_{GS(on)}$ tada imamo

$$(2.10) V_{GS} = 15 V$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 0.12 \times 10^{-3} A/V^2 \cdot (15 V - 5 V)^2 = 12 \times 10^{-3} A = 12 mA$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sjecište pravca danog jednađbom (2.3) $V_{GS} = 18 V - I_D \cdot 0.82 k\Omega$ te prienosne karakteristike dane jednađbom (1) predstavlja točku Q .



Iz sjecišta dvaju krivulja očitamo vrijednosti u Q točki:

$$(2.11) I_{DQ} = 6.7 \text{ mA}$$

$$(2.12) V_{GSQ} = 12.5 \text{ V}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

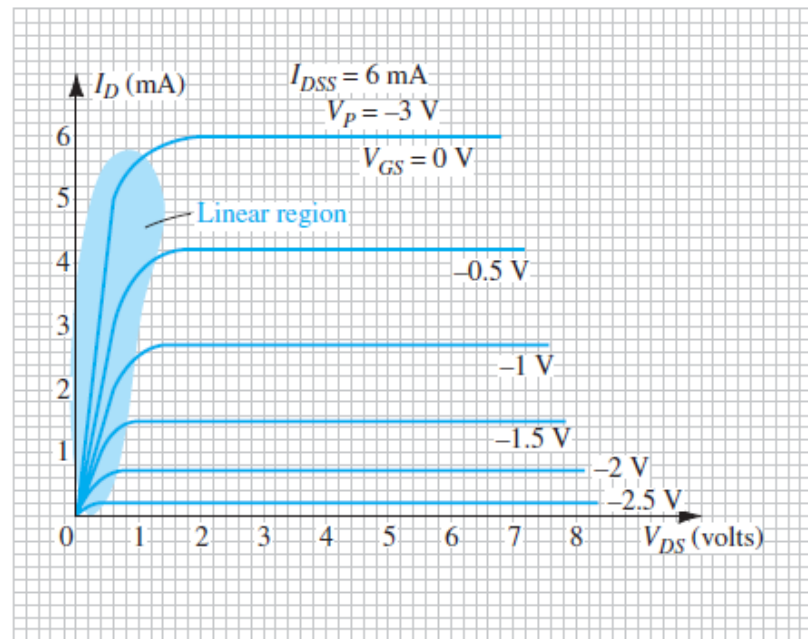
Budući da nam je sada poznata struja $I_{DQ} = 6.7 \text{ mA}$ iz jednadžbe za izlazni krug (12) $V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D)$ možemo odrediti napon V_{DS} :

$$(2.13) V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D) = 40 \text{ V} - 6.7 \text{ mA} \cdot (0.82 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega) = 14.4 \text{ V}$$

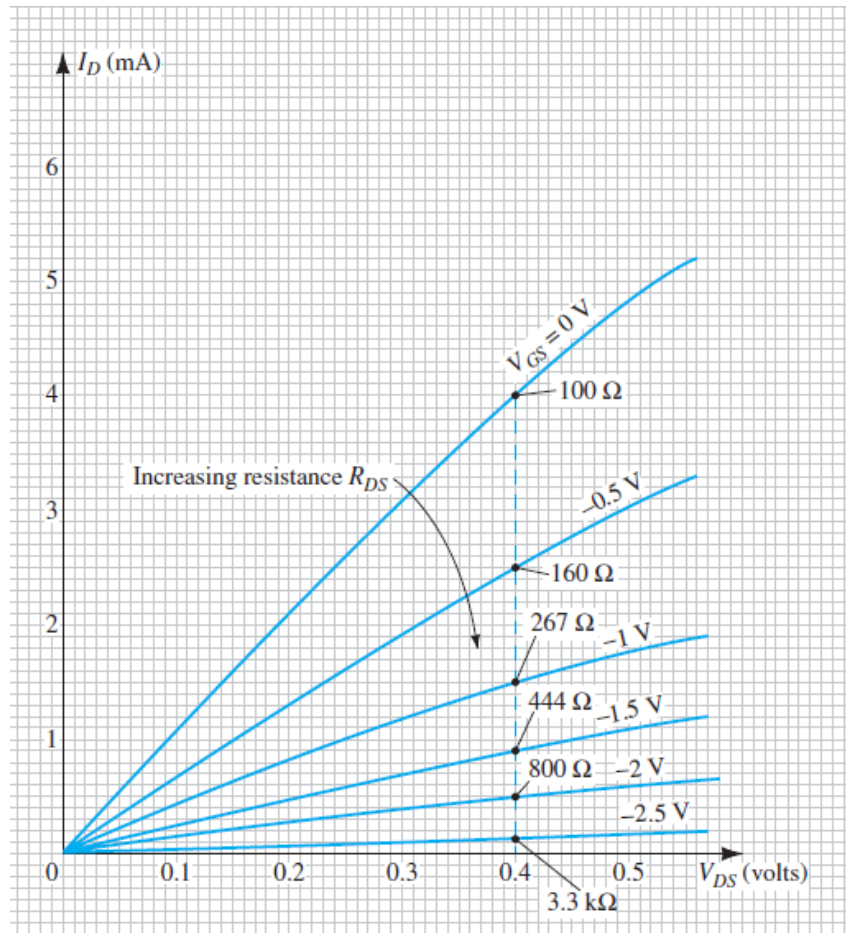
Elektronički Elementi i Sklopovi

JFET tranzistor u sklopu naponski upravljano pojačala

Jedna od najčešćih primjena JFET tranzistora jest kao naponski upravljani otpor. Na slici je istaknuto linearno područje JFET tranzistora:



Elektronički Elementi i Sklopovi



Uvećano linearno područje rada JFET tranzistora je prikazano na slici lijevo.

Iako ovisnost struje I_D o naponu V_{DS} (izlazna strujno-naponska karakteristika) nije predstavljena savršenim pravcima, ipak ovu ovisnost možemo dovoljno dobro aproksimirati pravcem.

Što je pravac na slici položeniji to je izlazni otpor veći. Vrijedi i obrnuto; što je veći nagib pravca to je izlazni otpor JFET tranzistora manji.

Za linearno područje vrijedi da je *pinch-off* napon JFET tranzistora dosta veći od napona u linearnom području.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Izlazni otpor R_{DS} može se dobiti iz Shocklyeve jednadžbe:

$$(14) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Dijeleći jednadžbu (14) sa V_{DS} dobije se:

$$(15) R_D = \frac{R_0}{\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2}$$

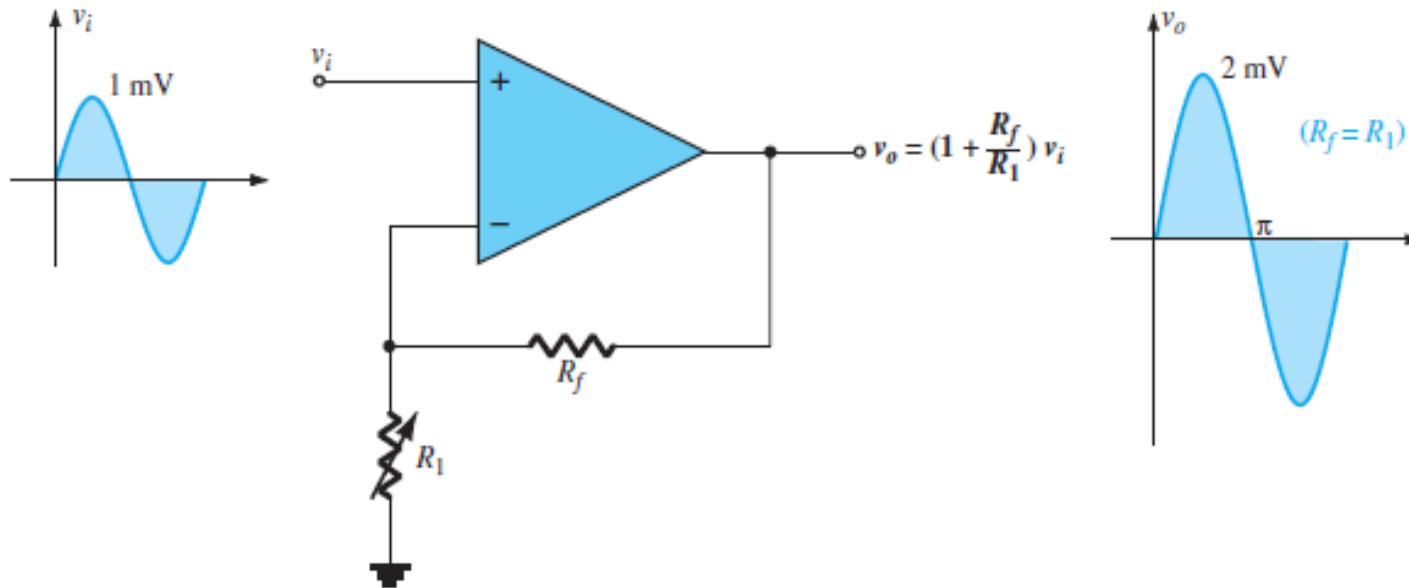
Otpor R_0 se izrazi pomoću:

$$(16) R_0 = \frac{V_{DS}}{I_{DSS}}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kod neinvertirajućeg pojačala izlazni napon v_o i ulazni napon v_i su u fazi te ovise o okolnoj otpornoj mreži kao:

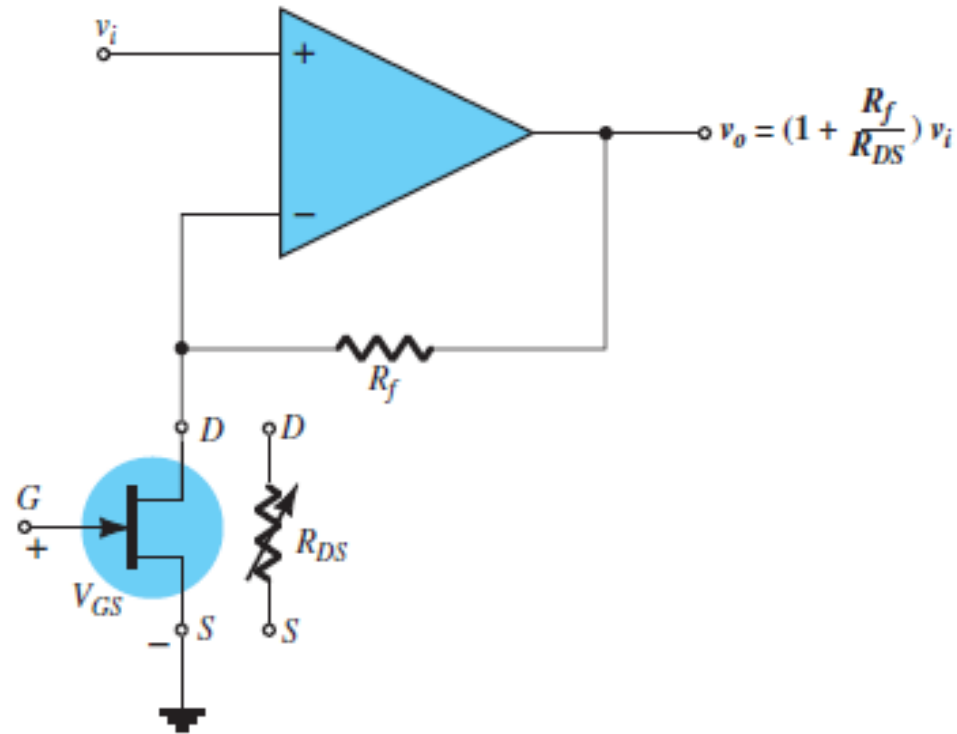
$$(17) v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_i$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Otpor R_1 možemo zamijeniti JFET tranzistorom. Tada će izlazni napon v_o i ulazni napon v_i ovisiti putem relacije:

$$(17) v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_{DS}}\right) v_i$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Stabilnost ovog sklopa najviše ovisi o varijacijama temperature. Kako temperatura raste tako pojačanje pojačala najčešće raste. Budući da pojačanje pojačala u raste temperaturom to dovodi do još većeg porasta temperature. Takvo stanje može rezultirati takozvanim thermal *runaway stanjem*.

Ovo stanje može se izbjeći dodavanjem termistora JFET tranzistoru budući da otpor termistora opada sa porastom temperature. Sklop se može izvesti tako da otpor R_{DS} raste s porastom temperature te se na taj način stabilizira pojačanje pojačala.

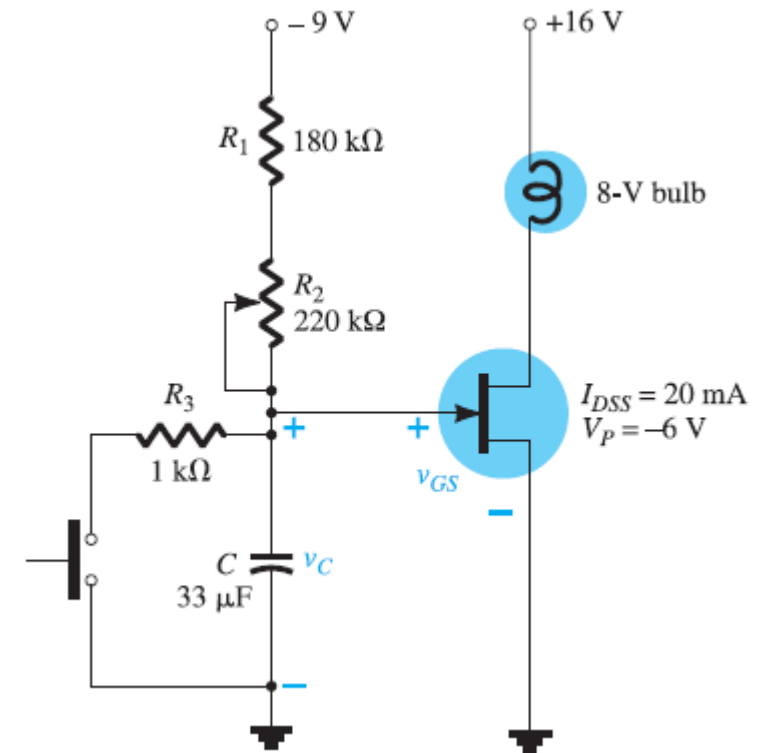
Ponekad se, za vojne aplikacije, pojačala čak stavljaju u specijalno konstruirana metalna kućišta kojima se precizno regulira temperatura. Takve tzv. "peći" uspostavljaju konstantni nivo temperature preko cijelog sklopa pojačala.

Elektronički Elementi i Sklopovi

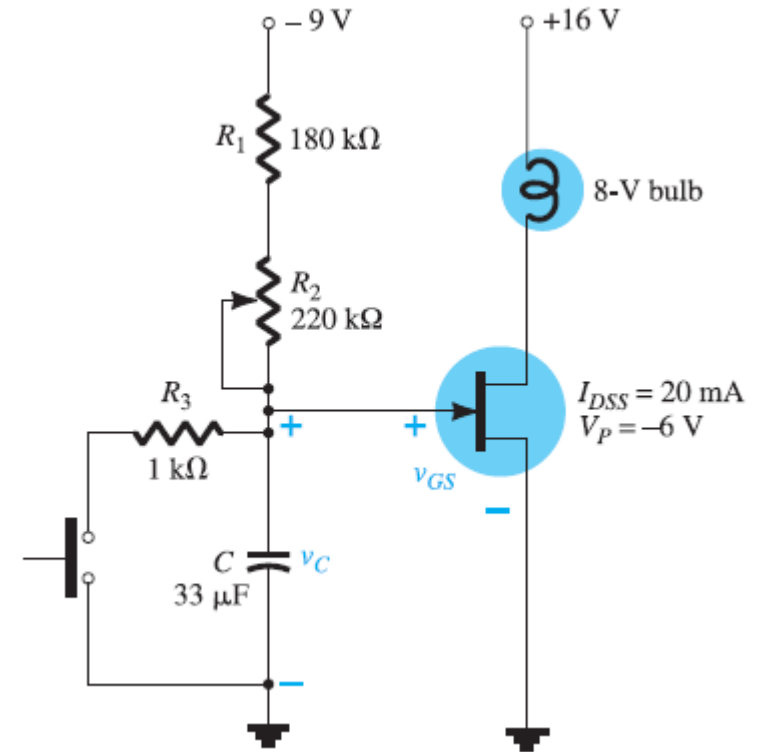
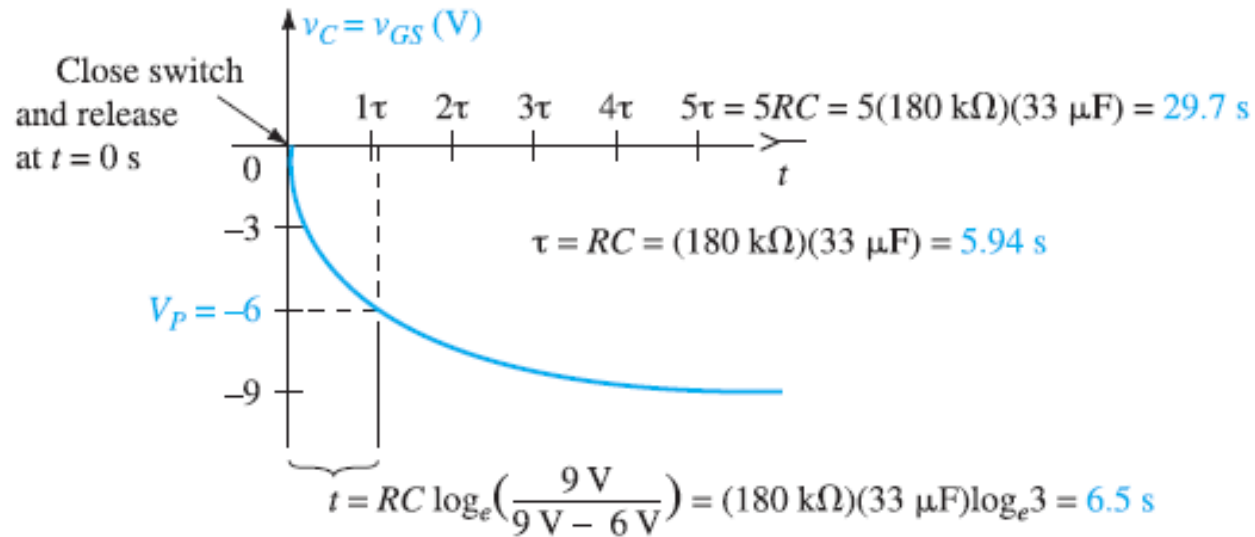
Visoka ulazna impedancija omogućava jednostavnu konstrukciju timera. Visoka ulazna impedancija nema uticaj (tj. nema gotovo nikakav uticaj) na RC konstantu kruga. Kada se prekidač pritisne kondenzator se može inicijalno smatrati kratkim spojem. Zbog toga je napon V_{GS} inicijalno jednak $V_{GS} = 0\text{ V}$ te kroz žarulju teče struja I_{DSS} .

Kada se prekidač otpusti, kondenzator se počinje puniti na -9V. Zbog visoke ulazne impedancije, JFET tranzistor nema uticaj na RC konstantu kruga. Kada napon v_C na kondenzatoru dosegne *pich-off* napon V_P tada JFET tranzistor prestaje voditi struju te se žarulja ugasi. Vremenska konstant ovog sklopa jest:

$$(18) \tau = (R_1 + R_2)C$$



Elektronički Elementi i Sklopovi



Elektronički Elementi i Sklopovi

Primjena JFET timera:

- automatsko gašenje svjetla na hodnicima (ušteta energije)
- automatsko gašenje svjetala u automobilima

Treba primjetiti da je ovakav sklop teže realizirati sa BJT tranzistorima. BJT tranzistori imaju relativno malu ulaznu impedanciju od samo nekoliko $k\Omega$. To bi uticalo ne samo na vremensku konstantu τ nego i na maksimalni napon na koji se može nabiti kondenzator.