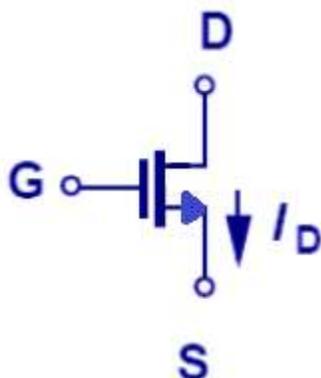


MOSFET

N kanalni:



1. Zakočenje:

$$V_{GS} < V_T \quad (V_T \text{ je napon praga})$$

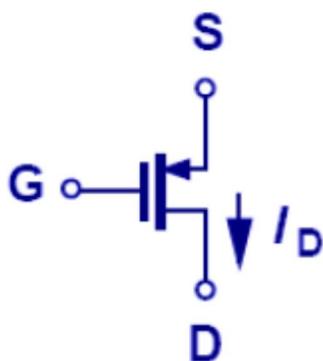
$$I_D = 0$$

2. Provođenje: $V_{GS} > V_T$

a) Omski režim: $V_{GD} > V_T$ $I_D = \beta[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2]$

b) Zasićenje: $V_{GD} \leq V_T$ $I_D = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda V_{DS})$
 $\lambda = \frac{1}{V_{Er}}$

P kanalni:



1. Zakočenje:

$$V_{GS} < -V_T$$

$$I_D = 0$$

2. Provođenje: $V_{GS} > -V_T$

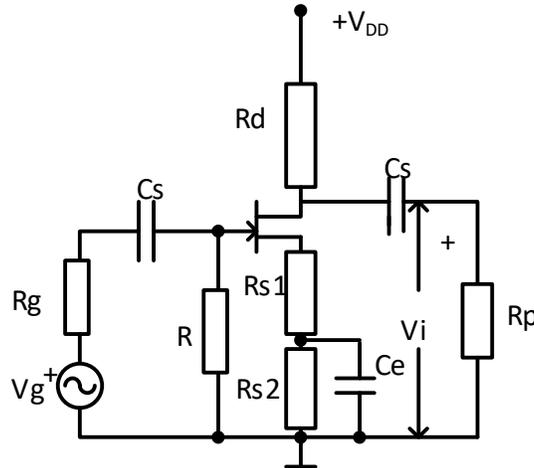
a) Omski režim: $V_{GD} > -V_T$ $I_D = \beta[(V_{SG} + V_T)V_{SD} - \frac{1}{2}V_{SD}^2]$

b) Zasićenje: $V_{GD} \leq -V_T$ $I_D = \frac{\beta}{2}(V_{SG} + V_T)^2(1 + \lambda V_{SD})$
 $\lambda = \frac{1}{V_{Er}}$

Samo ako je u zasićenju MOSFET radi kao pojačavač.

$I_G = 0$ kod MOSFET-a pa je zato $I_S = I_D$

1. Za kolo pojačavača sa FET-om na slici odrediti otpornost R_{S2} i napon V_{GS} tako da koordinate mirne radne tačke budu $I_{DQ} = 2.5\text{mA}$ i $V_{DS} = 8\text{V}$. Poznato je: $I_{DDs} = 10\text{mA}$, $V_T = -4\text{V}$, $V_{DD} = 30\text{V}$, $R_g = 5\text{k}\Omega$, $R = 1\text{M}\Omega$, $V_{Er} = 100\text{V}$, $R_{S1} = 200\Omega$, $R_p = 100\text{k}\Omega$.



Rješenje:

Kondenzatori u jednosmjernom režimu predstavljaju prekid pa kolo za računanje izgleda ovako:

Uzimajući u obzir i činjenicu da je struja gejta 0A, slijedi da je napon na otporniku R 0V pa i granu sa otpornikom R možemo eliminisati iz kola.

$$I_D = I_{DDs} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T}\right)^2 \quad (1)$$

$$V_{GS} = -(R_{S1} + R_{S2})I_D \quad (2)$$

Uvrštanjem (2) u (1) se dobija:

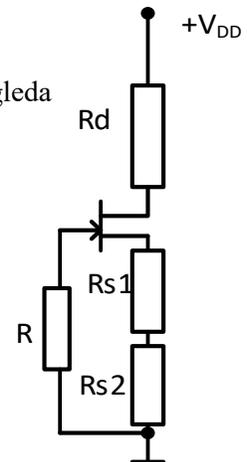
$$I_{DQ} = I_{DDs} \left(1 - \frac{-(R_{S1} + R_{S2})I_{DQ}}{V_T}\right)^2 = I_{DDs} \left(1 + \frac{(R_{S1} + R_{S2})I_{DQ}}{V_T}\right)^2$$

$$\frac{I_{DQ}}{I_{DDs}} = \left(1 + \frac{(R_{S1} + R_{S2})I_{DQ}}{V_T}\right)^2$$

$$\sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DDs}}} = 1 + \frac{(R_{S1} + R_{S2})I_{DQ}}{V_T} \rightarrow \sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DDs}}} - 1 = \frac{(R_{S1} + R_{S2})I_{DQ}}{V_T} \rightarrow \frac{V_T}{I_{DQ}} \left(\sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DDs}}} - 1\right) = R_{S1} + R_{S2}$$

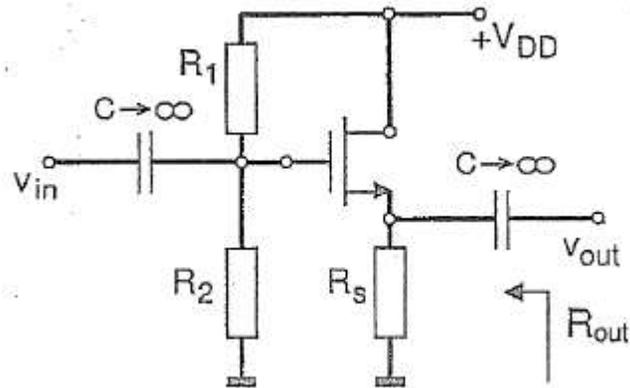
$$R_{S1} + R_{S2} = \frac{-4\text{V}}{2.5\text{mA}} \left(\sqrt{\frac{2.5\text{mA}}{10\text{mA}}} - 1\right) = 800\Omega \rightarrow R_{S2} = 800\Omega - 200\Omega = 600\Omega$$

Vraćanjem dobijene vrijednosti R_{S2} u jednačinu (2) dobija se da je $V_{GS} = -2\text{V}$



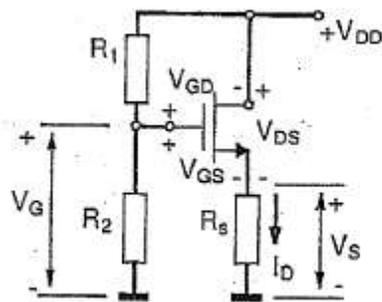
2. Za kolo sa slike poznato je $R_1=54.5\text{k}\Omega$, $R_2=100\text{k}\Omega$, $V_{DD}=10\text{V}$, $R_S=2\text{k}\Omega$, $V_T=2\text{V}$, $r_{ds}\rightarrow\infty$ i $\beta=2\text{mA/V}^2$.

Naći $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$ i R_{out} .



Rješenje:

Prvo se određuje režim rada MOSFET-a sa slike. Prilikom određivanja položaja mirne radne tačke svi kondenzatori u kolu predstavljaju prekid tako da kolo izgleda ovako:



Šema za određivanje položaja mirne radne tačke

Sa slike se vidi da je $V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 6,47\text{V}$.

Ako pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju važi da je:

$$\left. \begin{aligned} I_D &= \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \\ V_{GS} &= -R_S I_D + V_G \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_D = \frac{\beta}{2} (-R_S I_D + V_G - V_T)^2$$

$$I_D = \frac{\beta}{2} [R_s^2 I_D^2 - 2R_s I_D (V_G - V_T) + (V_G - V_T)^2] =$$

$$= \frac{\beta}{2} R_s^2 I_D^2 - \beta R_s I_D (V_G - V_T) + \frac{\beta}{2} (V_G - V_T)^2.$$

Prebacivanjem kompletnog izraza nakon znaka = sa lijeve strane dobija se kvadratna jednačina:

$$\frac{\beta}{2} R_s^2 I_D^2 - [\beta R_s (V_G - V_T) + 1] I_D + \frac{\beta}{2} (V_G - V_T)^2 = 0.$$

Rješenja ove jednačine su:

$$(I_D)_{1,2} = \frac{\beta R_s (V_G - V_T) + 1 \pm \sqrt{[\beta R_s (V_G - V_T) + 1]^2 - \beta^2 R_s^2 (V_G - V_T)^2}}{\beta R_s^2}$$

$$I_{D1} = 3,117 \text{ mA} \text{ i } I_{D2} = 1,602 \text{ mA}.$$

Kako je:

$$V_{GS} = -R_s I_D + V_G,$$

uvrštanjem vrijednosti oba rješenja kvadratne jednačine u prethodni izraz dobija se:

$$V_{GS1} = -R_s I_{D1} + V_G = 0,236 \text{ V} < 2 \text{ V} = V_T \text{ (zakocenje)}$$

$$V_{GS2} = -R_s I_{D2} + V_G = 3,266 \text{ V} > 2 \text{ V} = V_T \text{ (provodjenje)}$$

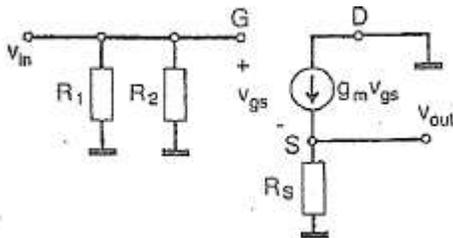
Obzirom da smo pretpostavili da je transistor u zasićenju odbacuje se rješenje V_{GS1} , a samim tim i I_{D1} tako da imamo da je $I_D = I_2$ a $V_{GS} = V_{GS2}$.

Sada se provjera uslov zasićenja: $V_{GD} \leq V_T$ odnosno $V_G - V_D \leq V_T$

Obzirom da je $V_G = V_{GS} + V_s = V_{GS} + R_s I_D = 6,47 \text{ V}$ i $V_D = V_{DD}$ slijedi

$$V_{GD} = V_G - V_D = -3,53 \text{ V} < 2 \text{ V} = V_T$$

Ovo je dokaz da je transistor u zasićenju pa možemo crtati šemu za male signale:



Prvo odredimo g_m iz formule:

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 2,53 \text{ mA/V}$$

a naponsko pojačanje je se dobija kao $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$

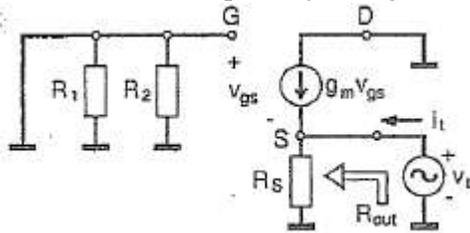
Obzirom da sa slike vidimo da je $v_{out} = g_m v_{gs} R_s$ uvrštavanje drugog izraza u prvi dobijamo:

$$v_{gs} = -v_{out} + v_{in}$$

$v_{out} = g_m (v_{in} - v_{out}) R_s = g_m R_s v_{in} - g_m R_s v_{out}$ pa je sada naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} = 0,835$$

Sada je neophodno predstaviti šemu za određivanje izlazne otpornosti pri čemu se ulazni napon postavlja na masu, a na izlazu se postavlja test generator:



Izlazna otpornost se dobija kao

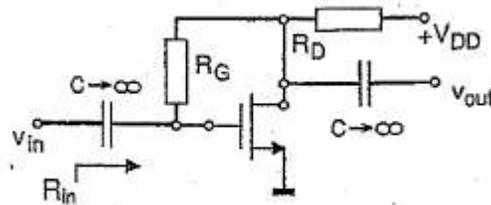
$$R_{out} = \frac{v_t}{i_t}$$

Za čvor S važi $\left. \begin{aligned} \frac{v_t}{R_s} &= i_t + g_m v_{gs} \\ v_{gs} &= -v_t \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_t}{R_s} = i_t - g_m v_t \rightarrow \left(\frac{1}{R_s} + g_m \right) v_t = i_t \Rightarrow \frac{1 + g_m R_s}{R_s} v_t = i_t$

$$R_{out} = \frac{R_s}{1 + g_m R_s} = 329,9 \Omega$$

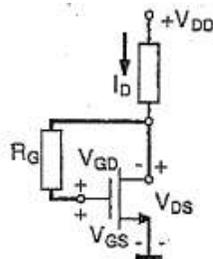
3. Za kolo sa slike poznato je $R_G=100M\Omega$, $R_D=10k\Omega$, $V_{DD}=15V$, $V_T=1.5V$, $r_{ds} \rightarrow \infty$ i $\beta=0.25mA/V^2$.

Naći $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$ i R_{in} .



Rješenje:

Prvo se određuje režim rada MOSFET-a sa slike. Prilikom određivanja položaja mirne radne tačke svi kondenzatori u kolu predstavljaju prekid tako da kolo izgleda ovako:



Šema za određivanje položaja mirne radne tačke

Sa slike se vidi da je $V_{GS} = V_{DS}$, $V_{GD} = 0 < 1,5V = V_T$ pa je transistor u zasićenju i važi:

$$\left. \begin{aligned} I_D &= \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \\ V_{GS} &= V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_D = \frac{\beta}{2} (V_{DD} - R_D I_D - V_T)^2$$

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{\beta}{2} [R_D^2 I_D^2 - 2R_D I_D (V_{DD} - V_T) + (V_{DD} - V_T)^2] = \\ &= \frac{\beta}{2} R_D^2 I_D^2 - \beta R_D I_D (V_{DD} - V_T) + \frac{\beta}{2} (V_{DD} - V_T)^2 \end{aligned}$$

Prebacivanjem kompletnog izraza nakon znaka = sa lijeve strane dobija se kvadratna jednačina:

$$\frac{\beta}{2} R_D^2 I_D^2 - [\beta R_D (V_{DD} - V_T) + 1] I_D + \frac{\beta}{2} (V_{DD} - V_T)^2 = 0.$$

Sada se rješenja kvadratne jednačine dobijaju kao:

$$(I_D)_{1,2} = \frac{\beta R_D (V_{DD} - V_T) + 1 \pm \sqrt{[\beta R_D (V_{DD} - V_T) + 1]^2 - \beta^2 R_D^2 (V_{DD} - V_T)^2}}{\beta R_D^2}$$

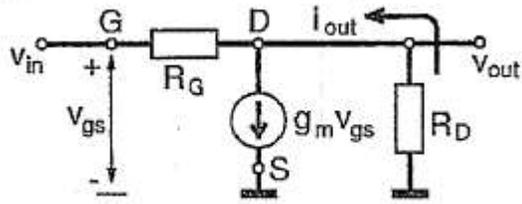
$$I_{D1} = 1,721mA \text{ i } I_{D2} = 1,059mA$$

Kako je $V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$ za oba rješenja kvadratne jednačine dobija se:

$$\begin{aligned} V_{GS1} &= V_{DD} - R_D I_{D1} = -2,21V < 1,5V = V_T \text{ (zakocenje)} \\ V_{GS2} &= V_{DD} - R_D I_{D2} = 4,41V > 1,5V = V_T \text{ (provodjenje)} \end{aligned}$$

Obzirom da smo pretpostavili da je transistor u zasićenju odbacuje se rješenje V_{GS1} , a samim tim i I_{D1} tako da imamo da je $I_D = I_2$ a $V_{GS} = V_{GS2}$.

Obzirom da smo već ustanovili da je tranzistor u zasićenju jer je $V_{GD} < V_T$ možemo preći na šemu za male signale:



Prvo odredimo g_m iz formule:

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} = 0.727 \text{ mA/V}$$

a naponsko pojačanje je se dobija kao $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$

Sa slike vidimo da je:

$$v_{out} = -R_D i_{out} \quad (1)$$

$$v_{gs} = v_{in} \quad (2)$$

Za čvor D imamo: $g_m v_{gs} = \frac{v_g - v_d}{R_G} + i_{out} = \frac{v_{in} - v_{out}}{R_G} + i_{out} \quad (3)$

Odnosno uvrštavanjem (2) u (3) $g_m v_{in} = \frac{v_{in} - v_{out}}{R_G} + i_{out} \rightarrow i_{out} = \left(g_m - \frac{1}{R_G}\right)v_{in} + \frac{1}{R_G}v_{out}$

Uvrštavanjem dobijenog izraza za i_{out} u (1) dobijamo:

$$\begin{aligned} v_{out} = -R_D i_{out} &= -R_D \left[\left(g_m - \frac{1}{R_G}\right)v_{in} + \frac{1}{R_G}v_{out} \right] = \\ &= -R_D \left(g_m - \frac{1}{R_G}\right)v_{in} - \frac{R_D}{R_G}v_{out} \end{aligned}$$

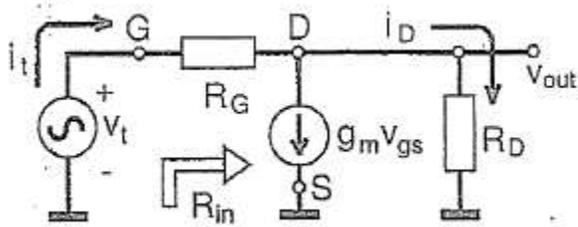
Izdvajanjem v_{out} na jednu stranu prethodni izraz se svodi na:

$$\left(1 + \frac{R_D}{R_G}\right)v_{out} = -R_D \left(g_m - \frac{1}{R_G}\right)v_{in}$$

pa naponsko pojačanje dobijamo kao:

$$A_v = \frac{-R_D \left(g_m - \frac{1}{R_G}\right)}{1 + \frac{R_D}{R_G}} \quad (R_G \rightarrow \infty) \Rightarrow A_v = -g_m R_D = -7.27$$

Ulazna otpornost se dobija kao $R_{in} = \frac{v_i}{i_i}$ a šema za dobijanje ulazne otpornosti je:



Sa slike se vidi da se pri traženju ulazne otpornosti na ulazu postavlja test generator pri čemu sada važe sljedeće jednačine:

$$i_I = g_m v_{gs} + i_D \quad \text{and} \quad v_{gs} = v_t \quad \text{and} \quad i_D = \frac{v_{out}}{R_D}$$

Takođe vidimo i da je $i_I = \frac{v_t - v_{out}}{R_G} \Rightarrow v_{out} = v_t - R_G i_I \rightarrow i_D = \frac{v_t - R_G i_I}{R_D}$

Uvrštavanjem prethodno izvedenih izraza u prvi izraz za test struju i_I dobijamo:

$$i_I = g_m v_t + \frac{v_t - R_G i_I}{R_D} = \left(g_m + \frac{1}{R_D} \right) v_t - \frac{R_G}{R_D} i_I$$

Odnosno prebacivanjem kompletnog izraza koji zavisi od i_I na jednu stranu dobijamo:

$$\left(1 + \frac{R_G}{R_D} \right) i_I = \left(g_m + \frac{1}{R_D} \right) v_t \rightarrow R_{in} = \frac{v_t}{i_I} \rightarrow R_{in} = \frac{1 + \frac{R_G}{R_D}}{g_m + \frac{1}{R_D}} = \frac{R_G + R_D}{1 + g_m R_D} = 1,21 M\Omega$$