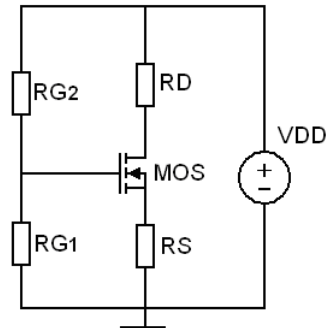


Exemple de probleme rezolvate pentru cursul 06 DEEA
Tranzistoare MOS

Problema 1

Se dă circuitul de mai jos pentru care se cunosc: $V_{DD} = 10[V]$, $R_{G1} = 100[k\Omega]$, $R_{G2} = 100[k\Omega]$, $R_S = 3[k\Omega]$, $R_D = 4,2[k\Omega]$. Tranzistorul MOS are parametrul $k = 5 \times 10^{-4} [A/V^2]$ și tensiunea de prag $V_{TH} = 1[V]$. Să se determine PSF-ul tranzistorului și să se verifice dacă acesta funcționează în regiunea de saturație.



Rezolvare

În calculele numerice, se recomandă ca valorile marimilor electrice să fie exprimate astfel:

- tensiunea electrică: **[V]** volt
- curentul electric: **[mA]** miliamper
- rezistența electrică: **[kΩ]** kilohmi
- parametrul de transconductanță **[mA/V²]** miliamperi / volți la patrat

Punctul static de funcționare al tranzistorului este compus din perechea de mărimi electrice:

- I_D – curentul continuu de drenă
- V_{DS} – tensiunea continuă drenă sursă.

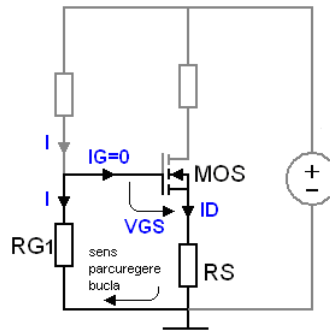
Aceste mărimi se determină în ordinea: a. I_D ; b. V_{DS}

a. determinarea lui I_D se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidență curenții prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidență tensiunea grilă sursă a tranzistorului – V_{GS} ;
- se aplică teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea V_{GS} și NU trece prin tensiunile V_{DS} și V_{GD} ale tranzistorului respectiv;
- se presupune că tranzistorul MOS funcționează în regiunea activă normală și pe baza ecuației de funcționare a tranzistorului specifică acestei regiuni și a ecuației obținute în etapa precedentă, se determină mai întâi tensiunea V_{GS} și apoi curentul I_D .

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):

Exemple de probleme rezolvate pentru cursul 06 DEEA
Tranzistoare MOS

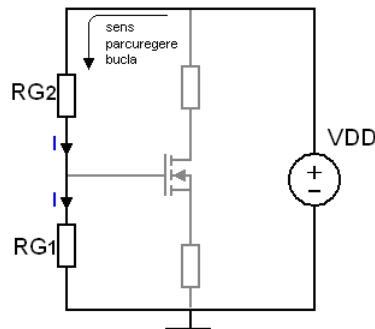


Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă ecuația:

$$RS \cdot ID - RG1 \cdot I + VGS = 0 \quad (1)$$

În relația de mai sus, curentul **I** reprezintă curentul care trece prin rezistențele RG1 și RG2. Acest curent trece prin ambele rezistențe deoarece curentul de grilă IG a tranzistorului este egal cu 0[A] și dacă s-ar aplica teorema lui Kirchhoff 1 în nodul în care sunt conectate rezistențele RG1, RG2 și tranzistorul, atunci s-ar ajunge la concluzia că rezistențele RG1 și RG2 au același curent.

Valoarea lui **I** se poate determina aplicând teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla formată din elementele RG1, RG2 și sursa de tensiune VDD – vezi figura de mai jos. Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă:



$$RG1 \cdot I + RG2 \cdot I - VDD = 0 \quad (2)$$

de unde, curentul **I** se determină cu relația:

$$I = \frac{VDD}{RG1 + RG2} = \frac{10[V]}{200[k\Omega]} = 0,05[mA] \quad (3)$$

În continuare, se presupune că tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație – regiunea în care poate amplifica – caz în care funcționarea sa este descrisă de ecuația:

$$ID = k \cdot (VGS - VTH)^2 \quad (4)$$

În calculele numerice, se recomandă ca valoarea numerică a parametrului de transconductanță să fie exprimată în $[mA/V^2] \Rightarrow k = 5 \times 10^{-4} [A/V^2] = 0.5 [mA/V^2]$.

Relațiile 1 și 4 formează un sistem de ecuații în necunoscutele VGS și ID. Din acest sistem, se va determina mai întâi necunoscuta VGS. Pentru aceasta, în sistemul respectiv se introduc valorile numerice:

Exemple de probleme rezolvate pentru cursul 06 DEEA
Tranzistoare MOS

$$\begin{cases} 3[k\Omega] \cdot ID - 100[k\Omega] \cdot 0,05[mA] + VGS = 0 \\ ID = 0,5 \left[\frac{mA}{V^2} \right] \cdot (VGS - 1V)^2 \end{cases} \quad (5)$$

Apoi, prin eliminarea necunoscutei ID , rezultă ecuația în necunoscuta VGS : \Rightarrow

$$\begin{aligned} 1,5 \cdot (VGS - 1)^2 - 5 + VGS &= 0 \quad \Rightarrow \\ 1,5 \cdot (VGS^2 - 2 \cdot VGS + 1) - 5 + VGS &= 0 \quad \Rightarrow \\ 1,5 \cdot VGS^2 - 3 \cdot VGS + 1,5 - 5 + VGS &= 0 \quad \Rightarrow \\ 1,5 \cdot VGS^2 - 2 \cdot VGS - 3,5 &= 0 \end{aligned}$$

sau, înmulțind ecuația cu 2:

$$\boxed{3 \cdot VGS^2 - 4 \cdot VGS - 7 = 0}$$

$$\Rightarrow \Delta = 16 - 4 \cdot 3 \cdot (-7) = 100 \quad \Rightarrow \quad VGS_{1,2} = \frac{4 \pm \sqrt{\Delta}}{6} [V] = \frac{4 \pm 10}{6} [V] = \begin{cases} 2,33[V] \\ -1[V] \end{cases}$$

Din cele 2 soluții se alege soluția care este mai mare decât valoarea tensiunii de prag V_{TH} , deci:

$$VGS = 2,33[V] \quad (6)$$

Observație: În cazul în care ambele soluții ale lui VGS rezultă sub valoarea V_{TH} , atunci tranzistroul funcționează în regiunea de blocare, iar curentul ID este $0[A]$.

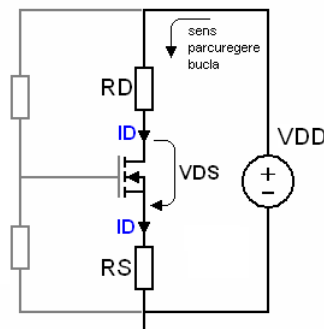
$$\text{Curentul } ID \text{ se determină pe baza ecuației 4: } ID = 0,5 \left[\frac{mA}{V^2} \right] \cdot (2,33[V] - 1[V])^2 \cong 0,9[mA]$$

$$ID = 0,9[mA] \quad (7)$$

b. determinarea tensiunii VDS se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scoate în evidență tensiunea drenă sursă a tranzistorului – VDS
- se aplică teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea VDS și NU trece prin tensiunea VGD a tranzistorului respectiv; dacă este necesar, bucla poate trece și prin tensiunea VGS (nu este cazul în această problemă).

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):



Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă ecuația:

Exemple de probleme rezolvate pentru cursul 06 DEEA
Tranzistoare MOS

$$R_S \cdot I_S - V_{DD} + R_D \cdot I_D + V_{DS} = 0 \quad (8) \quad \Rightarrow$$

$$V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_D \quad (9)$$

Pentru calculul numeric, rezistențele se păstrează în kilohmi, curentul electric în miliamperi, iar tensiunea se va exprima în volți:

$$\Rightarrow V_{DS} = 10[V] - (4,2[k\Omega] + 3[k\Omega]) \cdot 0,9[mA] = 10[V] - 6,48[V] = 3,52[V] \quad (10) \quad V_{DS} = 3,52[V]$$

2. tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație dacă este îndeplinită condiția:

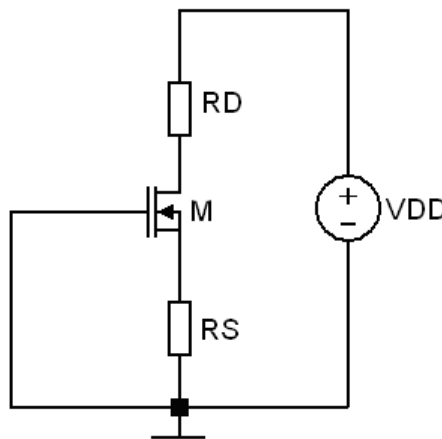
$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH} \quad (11)$$

Ținând cont de valorile numerice rezultate, condiția 11 este satisfăcută $3,52[V] > 2,33[V] - 1[V]$, deci tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație. În aceste condiții, Punctul Static de Funcționare al tranzistorului MOS este:

$$I_D = 0,9[mA]; V_{DS} = 3,52[V]$$

Problema 2

Se dă circuitul de mai jos pentru care se cunosc: $V_{DD} = 5[V]$, $R_S = 1[k\Omega]$, $R_D = 10[k\Omega]$. Tranzistorul MOS are parametrul $k = 2 \times 10^{-4} [A/V^2]$ și tensiunea de prag $V_{TH} = -1[V]$. Să se determine PSF-ul tranzistorului și să se verifice dacă acesta funcționează în regiunea de saturație.



Punctul Static de Funcționare a acestui tranzistor se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos.

Rezolvare

Punctul Static de Funcționare este compus din perechea de mărimi electrice I_D și V_{DS} . Ordinea în care se determină valorile celor 2 mărimi electrice este următoarea:

1. I_D
2. V_{DS}

1. Determinarea curentului I_D :

Exemple de probleme rezolvate pentru cursul 06 DEEA
Tranzistoare MOS

Aplicând TK2 pe bucla **VGS**, **RS** rezultă relația: $V_{GS} + R_S \cdot I_D = 0$

Se presupune că tranzistorul MOS lucrează în regiunea de saturatie. În acest caz, tranzistorul MOS funcționează după ecuația:

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

În calculele numerice, se recomandă ca valoarea numerică a parametrului de transconductanță să fie exprimată în $[mA/V^2]$ $\Rightarrow k = 2 \times 10^{-4} [A/V^2] = 0.2 [mA/V^2]$.

Ecuațiile de mai sus formează un sistem de ecuații, în necunoscutele **V_{GS}** și **I_D**.

Pentru rezolvarea sistemului, în relațiile de mai sus se introduc valorile numerice ale primilor cunoscute

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{GS} + 1[k\Omega] \cdot I_D = 0 \\ I_D = 0.2 \left[\frac{mA}{V^2} \right] \cdot [V_{GS} - (-1[V])]^2 \end{cases}$$

Din cele 2 necunoscute, mai întâi se determină necunoscuta **V_{GS}**:

$$\Rightarrow V_{GS} + 0.2 \cdot [V_{GS} + 1]^2 = 0$$

$$\Rightarrow V_{GS} + 0.2 \cdot (V_{GS}^2 + 2 \cdot V_{GS} + 1) = 0$$

$$\Rightarrow V_{GS} + 0.2 \cdot V_{GS}^2 + 0.4 \cdot V_{GS} + 0.2 = 0$$

$$\Rightarrow 0.2 \cdot V_{GS}^2 + 1.4 \cdot V_{GS} + 0.2 = 0$$

$$\Rightarrow V_{GS1,2} = \frac{-1.4 \pm \sqrt{1.4^2 - 4 \cdot 0.2 \cdot 0.2}}{2 \cdot 0.2} [V]$$

$$\Rightarrow V_{GS1,2} = \frac{-1.4 \pm \sqrt{1.8}}{0.4} [V] \cong \frac{-1.4 \pm 1.34}{0.4} [V] = \begin{cases} V_{GS1} = \frac{-1.4 - 1.34}{0.4} [V] = -\frac{2.74}{0.4} [V] = -6.85 [V] \\ V_{GS2} = \frac{-1.4 + 1.34}{0.4} [V] = -\frac{0.06}{0.4} [V] = -0.15 [V] \end{cases}$$

Din cele două soluții obținute, se alege soluția care satisface condiția:

$$V_{GS} > V_{TH}$$

Din cele două soluții, numai cea de a 2-a satisface condiția de mai sus, de unde rezultă:

Exemple de probleme rezolvate pentru cursul 06 DEEA
Tranzistoare MOS

$$V_{GS} = -0.15[V]$$

După determinarea tensiunii V_{GS} , curentul I_D se calculează din ecuația de funcționare a tranzistorului

$$\text{MOS } I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2.$$

$$\Rightarrow I_D = 0.2 \left[\frac{mA}{V^2} \right] \cdot [-0.15[V] - (-1)[V]]^2 = 0.2 \cdot (0.85)^2 [mA] = 0.1445[mA]$$

$$I_D = 0.1445[mA]$$

- **Determinarea tensiunii V_{DS} :**

se aplica TK2 pe bucla **RD, VDS, RS, VDD**:

$$R_D \cdot I_D + V_{DS} + R_S \cdot I_D - V_{DD} = 0$$

Rezulta:

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

$$V_{DS} = 5[V] - 0.1445[mA] \cdot (10[k\Omega] + 1[k\Omega]) = 5[V] - 0.1445[mA] \cdot 11[k\Omega] = 5[V] - 1.5895[V] = 3.4105[V]$$

- **Verificare presupunere initiala**

S-a presupus ca tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație. La final, această presupunere trebuie verificată. Tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație dacă valorile tensiunilor V_{GS} si V_{DS} calculate ca mai sus satisfac conditia:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

Ținând cont de valorile numerice obținute condiția de mai sus devine:

$$3.4105[V] > -0.15[V] - (-1)[V] = 0.85[V] \quad \checkmark$$

Condiția de mai sus este satisfăcută, deci presupunerea inițială este adevărată. În aceste condiții, OSFul tranzistorului MOS este:

$$I_D=0,1445[mA]; V_{DS}=3,4105[V]$$