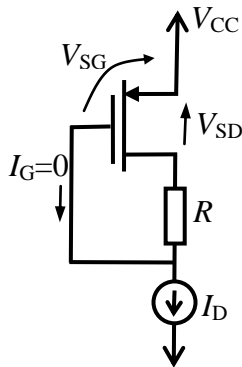


ТРАНЗИСТОРИ СО ЕФЕКТ НА ПОЛЕ (MOSFET)

1. За PMOS транзисторот во колото на сликата да се одредат напоните V_{DS} и V_{GS} , за вредности на отпорникот R од 0, 10 и 100 k Ω .



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 10 \text{ V} \\ V_{TH} &= -1 \text{ V} \\ I_D &= 100 \text{ } \mu\text{A} \\ k_p &= 4 \text{ } \mu\text{A/V}^2 \\ W/L &= 25 \end{aligned}$$

(напон на праг)
(струја низ MOSFET-от)
(транскондуктанса: технолошки процес)
(однос ширина/должина на канал: геометрија)

Подрачјата на работа во кои може да се најде PMOS се:

1. **OFF**, или подрачје на запирање,

$$V_{GS} > V_{TH}, \quad I_D = 0$$

2. **Ω** , омско, триодно или линеарно подрачје,

$$V_{GS} < V_{TH}, \quad V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}, \quad I_D = k \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

3. **PKS**, подрачје на константни струи, или подрачје на заситување,

$$V_{GS} < V_{TH}, \quad V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}, \quad I_D = k \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Подрачјата на работа во кои може да се најде NMOS се:

1. **OFF**, или подрачје на запирање,

$$V_{GS} < V_{TH}, \quad I_D = 0$$

2. **Ω** , омско, триодно или линеарно подрачје,

$$V_{GS} > V_{TH}, \quad V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}, \quad I_D = k \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

3. **PKS**, подрачје на константни струи, или подрачје на заситување,

$$V_{GS} > V_{TH}, \quad V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}, \quad I_D = k \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Забелешка: овие равенки се преземени од книгата „Електроника 1- Електронски елементи“ од проф. д-р Методија Камиловски. Во книгата, при изведувањето на струјата низ мосфет, на страна 135, авторот ја декларира константата $k = \frac{\mu_n}{2} \frac{\epsilon}{t_{ox}} = \frac{\mu_n}{2} C_{ox}$ односно **го вклучува**

факторот 1/2 во самата константа k . Ова е различно отколку во книгата "Microelectronic Circuits" од авторите Адел Седра и Кенет Смит, кои **факторот 1/2 го оставаат надвор од константата k** , па равенката за подрачје на константни струи (saturation, на англиски) се претвора во $I_D = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$ (стр. 250 во бта едиција).

Решение:

А) за $R = 0$ имаме $V_S = 10 \text{ V}$, $V_G = V_D$, $V_{GS} = V_{DS}$

$$\left. \begin{array}{l} V_{DS} \approx V_{GS} - V_{TH} \\ V_{DS} \approx V_{GS} - V_{TH} \\ 0 < 1 \end{array} \right\} Q \rightarrow PKS \Rightarrow I_D = k_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 100 \mu\text{A} \Rightarrow (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{I_D}{k_p \frac{W}{L}} = 1 \text{ V}^2$$

Ова равенство има две решенија:

$$\begin{array}{ll} V_{GS}' - V_{TH} = 1 \text{ V} & \Rightarrow V_{GS}' = 0 \text{ V} \\ V_{GS}'' - V_{TH} = -1 \text{ V} & V_{GS}'' = -2 \text{ V} \end{array} \quad V_{TH} = -1 \text{ V}$$

поради условот $V_{GS} < V_T$ за мосфетот да биде вклучен, само второто решение е точно.
Значи $V_{GS} = V_{DS} = -2 \text{ V}$

Б) за $R = 10 \text{ k}\Omega$ имаме $V_S = 10 \text{ V}$, претпоставка $Q \rightarrow PKS$

Падот на напонот на отпорникот е: $R \cdot I_D = 1 \text{ V}$

Тој напон е во исто време и напон помеѓу дрејнот и гејтот на мосфетот.

Бидејќи претпоставката е дека $Q \rightarrow \text{NAP}$, важи истата равенка за I_D како и под А), па и вредноста на V_{GS} мора да е иста: $V_{GS} = -2 \text{ V}$.

$$\left. \begin{array}{l} V_{DG} = R I_D = 1 \text{ V} \\ V_{DS} = V_{DG} + V_{GS} \\ V_{DS} = V_{GS} + 1 \text{ V} \end{array} \right\} V_{DS} = -1 \text{ V} \Rightarrow V_S = 10 \text{ V}; \quad V_G = 8 \text{ V}; \quad V_D = 9 \text{ V};$$

На крај мора да се провери и точноста на претпоставката:

$$\left. \begin{array}{l} V_{DS} \approx V_{GS} - V_{TH} \\ V_D - V_S \approx V_G - V_S - V_{TH} \\ 9 - 10 \approx 8 - 10 + 1 \\ -1 = -1 \end{array} \right\} Q \rightarrow PKS / \Omega$$

Транзисторот работи на границата помеѓу подрачјата PKS и Ω , што значи дека претпоставката е точна.

$$V_{GS} = -2 \text{ V} \quad V_{DS} = -1 \text{ V}$$

В) за $R = 100 \text{ k}\Omega$ имаме $V_S = 10 \text{ V}$, претпоставка $Q \rightarrow \text{PKS}$

Како и под Б), ако важат равенките за подрачјето PKS, мора да важи и: $V_{GS} = -2 \text{ V}$.

Тоа би повлекло $V_G = V_S + V_{GS} = 8 \text{ V}$.

Но, во овој случај падот на напонот на отпорникот е: $R \cdot I_D = 10 \text{ V}$

Оттука $V_D = V_G + R \cdot I_D = 8 \text{ V} + 10 \text{ V} = 18 \text{ V}$

Тоа е невозможно бидејќи највисокиот потенцијал во колото е $V_{CC} = 10 \text{ V}$.

Значи, мора да се направи нова претпоставка, $Q \rightarrow \Omega$ подрачје

$$V_{DG} = RI_D = 10\text{V}; \quad \{V_{GS} = V_{DS} - RI_D = V_{DS} - 10\text{V}\}$$

$$I_D = k_p \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$I_D = k_p \frac{W}{L} [2(V_{DS} - 10\text{V} - 1\text{V})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$100\mu\text{A} = 200 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} [2V_{DS}^2 - 18V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$\frac{1}{2} = V_{DS}^2 - 18V_{DS}$$

$$2V_{DS}^2 - 36V_{DS} - 1 = 0$$

Решенијата на квадратната равенка се:

$$V_{DS}' = 18,028 \text{ V} \quad V_{GS}' = V_{DS}' - 10 \text{ V} = 8,028 \text{ V}$$

$$V_{DS}'' = -0,028 \text{ V} \quad V_{GS}'' = V_{DS}'' - 10 \text{ V} = -10,028 \text{ V}$$

поради $V_{CC} = 10 \text{ V}$, а и $V_S > V_D$, го земаме во предвид само второто решение.

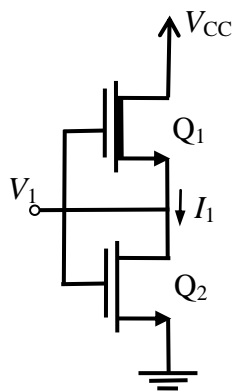
Проверка на претпоставката:

$$\left. \begin{array}{l} V_{DS} ? V_{GS} - V_T \\ -0,028\text{V} ? -10,028\text{V} + 1\text{V} \\ -0,028\text{V} > -9,028 \end{array} \right\} Q \rightarrow \Omega \quad \text{Претпоставката е точна.}$$

$$V_{GS} = -10,028 \text{ V}$$

$$V_{DS} = -0,028\text{V}$$

2. За колото на сликата да се одредат означените напони и струи.



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 3 \text{ V} \\ |V_{TH}| &= 1 \text{ V} \\ k_n &= 10 \mu\text{A/V}^2 \\ W &= 30 \mu\text{m} \\ L &= 10 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Решение:

Напони на праг:

$$\begin{aligned} Q_1 &\rightarrow \text{вграден канал,} & V_{TH1} &= -1 \text{ V} \\ Q_2 &\rightarrow \text{индуциран канал,} & V_{TH2} &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

претпоставка $Q_1, Q_2 \rightarrow \text{PKS}$

$$V_{GS1} = 0;$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_1 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 = 30 \mu\text{A} = k_n \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{TH2})^2$$

Двете решенија за V_{GS2} се:

$$\begin{aligned} V_{GS2}' &= 2 \text{ V} \\ V_{GS2}'' &= 0 \text{ V} \quad V_{TH2} = 1 \text{ V} \end{aligned}$$

поради условот $V_{GS} > V_T$ за мосфетот да биде вклучен, само првото решение е точно.

$$V_{GS2} = 2 \text{ V} \rightarrow V_1 = 2 \text{ V} \quad I_1 = 30 \mu\text{A}$$

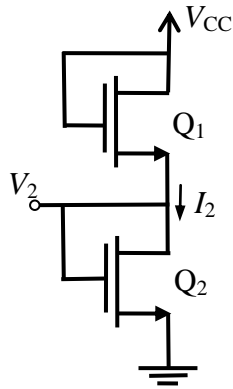
Проверка на точноста на претпоставката:

$$\left. \begin{aligned} V_{DS1} &? V_{GS1} - V_{TH1} \\ V_{D1} - V_1 &? V_{G1} - V_1 - V_{TH1} \\ V_{CC} &? V_1 - V_{TH1} \\ 3 &? 2 + 1 \\ 3 &= 3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_1 \rightarrow \text{PKS} / \Omega$$

$$\left. \begin{aligned} V_{DS2} &? V_{GS2} - V_{TH2} \\ V_1 - 0 &? V_1 - 0 - V_{TH2} \\ 0 &? -V_{TH2} \\ 0 &? -1 \\ 0 &> -1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_2 \rightarrow \text{PKS}$$

Транзисторот Q_1 работи на границата помеѓу подрачјата PKS и Ω , а Q_2 во подрачјето PKS, што значи дека претпоставките се точни.

3. За колото на сликата да се одредат означените напони и струи.



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 3 \text{ V} \\ /V_{TH}/ &= 1 \text{ V} \\ k_n &= 10 \mu\text{A/V}^2 \\ W &= 30 \mu\text{m} \\ L &= 10 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Решение:

Напони на праг:

$$\begin{aligned} Q_1 &\rightarrow \text{индуциран канал,} & V_{TH1} &= 1 \text{ V} \\ Q_2 &\rightarrow \text{индуциран канал,} & V_{TH2} &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

Поради $V_{DS1} = V_{GS1}$ и $V_{DS2} = V_{GS2}$, може веднаш да се заклучи во кои подрачја работат Q_1 и Q_2

$$\left. \begin{array}{l} V_{DS1} ? V_{GS1} - V_{TH1} \\ V_{DS1} ? V_{DS1} - V_{TH1} \\ 0 ? -V_{TH1} \\ 0 > -1 \end{array} \right\} \Rightarrow Q_1 \rightarrow PKS \quad \left. \begin{array}{l} V_{DS2} ? V_{GS2} - V_{TH2} \\ V_{DS2} ? V_{DS2} - V_{TH2} \\ 0 ? -V_{TH2} \\ 0 > -1 \end{array} \right\} \Rightarrow Q_2 \rightarrow PKS \quad Q_1, Q_2 \rightarrow PKS$$

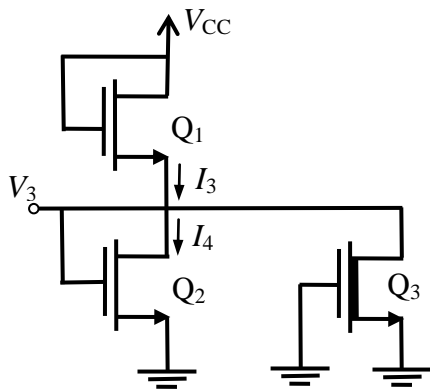
$$\left. \begin{aligned} I_{D1} = I_{D2} = I_2 &= k_n \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{TH2})^2 \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2} \\ V_{GS1} + V_{GS2} &= V_{CC} = 3 \text{ V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2} = 1,5 \text{ V}$$

Оттука и $V_2 = 1,5 \text{ V}$.

$$V_2 = 1,5 \text{ V} \quad I_2 = 7,5 \mu\text{A}$$

Проверка на точноста на претпоставката: во случаи како овој, каде што подрачјето на работа е однапред определено, проверка не треба да се врши, освен на условот $V_{GS} > V_{TH}$ за мосфетот да биде вклучен, а тој е исполнет ($1,5 \text{ V} > 1 \text{ V}$).

4. За колото на сликата да се одредат означените напони и струи.



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 3 \text{ V} \\ |V_{TH}| &= 1 \text{ V} \\ k_n &= 10 \mu\text{A/V}^2 \\ W &= 30 \mu\text{m} \\ L &= 10 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Решение:

Напони на праг:

$$\begin{aligned} Q_1 &\rightarrow \text{индуциран канал,} & V_{TH1} &= 1 \text{ V} \\ Q_2 &\rightarrow \text{индуциран канал,} & V_{TH2} &= 1 \text{ V} \\ Q_3 &\rightarrow \text{вграден канал,} & V_{TH3} &= -1 \text{ V} \end{aligned}$$

Аналогно на решението од задача 3, Q_1 и Q_2 работат во подрачјето PKS
претпоставка $Q_3 \rightarrow \text{PKS}$

$$V_{GS3} = 0;$$

$$I_{D3} = k_n \frac{W}{L} (V_{GS3} - V_{TH3})^2 = 30 \mu\text{A} = I_3 - I_4 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 - k_n \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{TH2})^2$$

$$\{V_{GS2} = V_{CC} - V_{GS1}\}$$

$$30 \mu\text{A} = 30 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (V_{GS1} - 1\text{V})^2 - 30 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (3\text{V} - V_{GS1} - 1\text{V})^2$$

$$\Rightarrow V_{GS1} = 2\text{V} \Rightarrow I_{D1} = I_3 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 = 30 \mu\text{A}$$

$$\Rightarrow V_{GS2} = V_3 = 3\text{V} - V_{GS1} = 1\text{V} \Rightarrow I_{D2} = I_4 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 = 0$$

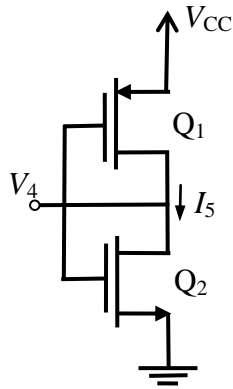
$$V_3 = 1 \text{ V} \quad I_3 = 30 \mu\text{A} \quad I_4 = 0$$

Проверка на точноста на претпоставката: за Q_1 треба да се провери само условот $V_{GS} > V_{TH}$, додека за Q_3 и $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$

$$\left. \begin{array}{l} V_{GS1} \geq V_{TH1} \\ 2 \geq 1 \\ 2 > 1 \end{array} \right\} \Rightarrow Q_1 \rightarrow \text{PKS} \quad \left. \begin{array}{l} V_{GS2} \geq V_{TH2} \\ 1 \geq 1 \\ 1 = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow Q_2 \rightarrow \text{PKS} / \text{OFF} \quad \left. \begin{array}{l} V_{DS3} \geq V_{GS3} - V_{TH3} \\ V_3 - 0 \geq 0 - V_{TH3} \\ V_3 \geq -V_{TH3} \\ 1 \geq -1 \\ 1 = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow Q_3 \rightarrow \text{PKS} / \Omega$$

Транзисторот Q_1 работи во подрачјето PKS, Q_2 на границата на запирање, а Q_3 на границата помеѓу подрачјата PKS и Ω , што значи дека сите претпоставки се точни.

5. За колото на сликата да се одредат означените напони и струи.



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 3 \text{ V} \\ |V_{TH}| &= 1 \text{ V} \\ k_n &= 10 \mu\text{A/V}^2 \\ k_p &= 4 \mu\text{A/V}^2 \\ W &= 30 \mu\text{m} \\ L &= 10 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Решение:

Напони на праг:

$$\begin{aligned} Q_1 &\rightarrow \text{PMOS, индуциран канал, } V_{TH1} = -1 \text{ V} \\ Q_2 &\rightarrow \text{NMOS, индуциран канал, } V_{TH2} = 1 \text{ V} \end{aligned}$$

Поради $V_{DS1} = V_{GS1}$ и $V_{DS2} = V_{GS2}$, може веднаш да се заклучи во кои подрачја работат Q_1 и Q_2

$$\left. \begin{aligned} V_{DS1} &? V_{GS1} - V_{TH1} \\ V_{DS1} &? V_{DS1} - V_{TH1} \\ 0 &? -V_{TH1} \\ 0 &< 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_1 \rightarrow \text{PKS} \quad \left. \begin{aligned} V_{DS2} &? V_{GS2} - V_{TH2} \\ V_{DS2} &? V_{DS2} - V_{TH2} \\ 0 &? -V_{TH2} \\ 0 &> -1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_2 \rightarrow \text{PKS} \quad Q_1, Q_2 \rightarrow \text{PKS}$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_5 = k_p \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{TH2})^2$$

$$\{V_{GS2} = V_{GS1} + V_{CC}\}$$

$$V_{GS1}^2 + 2 \cdot V_{GS1} + 1 = 2,5 \cdot V_{GS1}^2 + 10 \cdot V_{GS1} + 10$$

$$1,5 \cdot V_{GS1}^2 + 8 \cdot V_{GS1} + 9 = 0$$

Двете решенија за V_{GS1} се:

$$V_{GS1}' = -1,61 \text{ V}$$

$$V_{GS1}'' = -3,72 \text{ V} \quad V_{TH1} = -1 \text{ V}$$

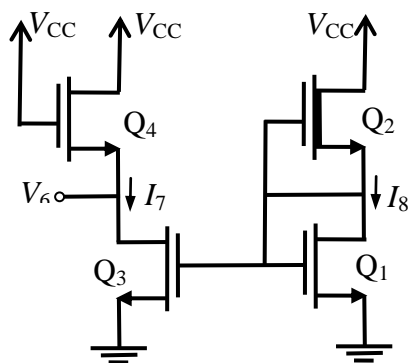
поради условот $V_{GS} < V_{TH}$ за мосфетот да биде вклучен, само првото решение е точно.

$$V_{GS1} = -1,61 \text{ V} < V_{TH1} \quad (Q_1 \rightarrow \text{ON, PKS}) \rightarrow V_{GS2} = V_{CC} + V_{GS1} = 1,39 \text{ V} > V_{TH2} \quad (Q_2 \rightarrow \text{ON, PKS})$$

$$I_{D1} = I_{D2} = I_5 = k_p \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{TH2})^2 = 4,56 \mu\text{A}$$

$$V_4 = 1,39 \text{ V} \quad I_5 = 4,56 \mu\text{A}$$

6. За колото на сликата да се одредат означените напони и струи.



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 5 \text{ V} \\ |V_{TH}| &= 1 \text{ V} \\ k_n &= 10 \mu\text{A/V}^2 \\ W &= 20 \mu\text{m} \\ L &= 1 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Решение:

Напони на праг:

$$\begin{aligned} Q_2 &\rightarrow \text{вграден канал,} & V_{TH2} &= -1 \text{ V} \\ Q_1, Q_3, Q_4 &\rightarrow \text{индуциран канал,} & V_{TH1} = V_{TH3} = V_{TH4} &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

Поради $V_{DS1} = V_{GS1}$ и $V_{DS4} = V_{GS4}$, може веднаш да се заклучи во кои подрачја работат Q_1 и Q_4

$$\left. \begin{aligned} V_{DS1} &? V_{GS1} - V_{TH1} \\ V_{DS1} &? V_{DS1} - V_{TH1} \\ 0 &? -V_{TH1} \\ 0 &> -1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_1 \rightarrow \text{PKS} \quad \left. \begin{aligned} V_{DS2} &? V_{GS2} - V_{TH2} \\ V_{DS2} &? V_{DS2} - V_{TH2} \\ 0 &? -V_{TH2} \\ 0 &> -1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_4 \rightarrow \text{PKS} \quad Q_1, Q_4 \rightarrow \text{PKS}$$

претпоставка $Q_2, Q_3 \rightarrow \text{PKS}$

$$V_{GS2} = 0; \quad I_{D1} = I_{D2} = I_8 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{TH2})^2 = 200 \mu\text{A} = k_n \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{TH1})^2$$

Двете решенија за V_{GS1} се:

$$\begin{aligned} V_{GS1}' &= 2 \text{ V} \\ V_{GS1}'' &= 0 \text{ V} \end{aligned} \quad V_{TH1} = 1 \text{ V} \quad (\text{треба } V_{GS} > V_{TH}, \text{ само првото решение е точно}).$$

$$V_{GS1} = 2 \text{ V} > V_{TH1} \quad (Q_1 \rightarrow \text{ON, PKS}) \quad V_{GS3} = V_{GS1} = 2 \text{ V}$$

$$I_{D3} = I_{D4} = I_7 = k_n \frac{W}{L} (V_{GS3} - V_{TH3})^2 = 200 \mu\text{A} = k_n \frac{W}{L} (V_{GS4} - V_{TH4})^2$$

Двете решенија за V_{GS4} се:

$$\begin{aligned} V_{GS4}' &= 2 \text{ V} \\ V_{GS4}'' &= 0 \text{ V} \end{aligned} \quad V_{TH4} = 1 \text{ V} \quad (\text{повторно само првото решение е точно поради условот } V_{GS} > V_{TH}).$$

$$V_{GS4} = 2 \text{ V} > V_{TH4} \quad (Q_4 \rightarrow \text{ON, PKS}) \quad V_{DS3} = V_6 = V_{CC} - V_{GS4} = 3 \text{ V}$$

Проверка на точноста на претпоставките за Q_2 и Q_3 :

$$\left. \begin{aligned} V_{DS2} &? V_{GS2} - V_{TH2} \\ V_{CC} - V_{GS1} &? 0 - V_{TH1} \\ 3 &> -1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_2 \rightarrow \text{PKS} \quad \left. \begin{aligned} V_{DS3} &? V_{GS3} - V_{TH3} \\ V_6 - 0 &? V_{GS3} - V_{TH3} \\ 3 &> 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_3 \rightarrow \text{PKS}$$

$$V_6 = 3 \text{ V} \quad I_7 = I_8 = 200 \mu\text{A}$$