

**Univerzitet u Nišu
Elektronski fakultet**

**RAČUNSKE VEŽBE IZ PREDMETA
POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE
(IV semestar – modul EKM)**

IV deo

Miloš Marjanović

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE**Računske vežbe****MOSFET TRANZISTORI**

ZADATAK 35. NMOS tranzistor ima napon praga $V_T=2\text{V}$ i kroz njega protiče struja $I_D=1\text{mA}$ kada je $V_{GS}=V_{DS}=3\text{V}$. Odrediti struju drejna I_D za $V_{GS}=4\text{V}$.

Rešenje:

Utvrđujemo na osnovu $V_{GS}>V_T$ da tranzistor nije zakočen. Odredićemo napon $V_{DS(\text{sat})}=V_{GS}-V_T=1\text{V}$. Kako je $V_{DS}>V_{DS(\text{sat})}$ zaključujemo da je tranzistor u zasićenju kada važi $I_D=k(V_{GS}-V_T)^2$. Na osnovu I_D , V_{GS} i V_T određujemo $k=1\text{mA/V}^2$. Za struju drejna se dobija $I_D=k(V_{GS}-V_T)^2=4\text{mA}$, kada je $V_{GS}=4\text{V}$.

ZADATAK 36. Kod NMOS tranzistora je poznato: $V_T=2.5\text{V}$, $L=5\mu\text{m}$, $W=50\mu\text{m}$, $\mu_n=800\text{cm}^2/\text{Vs}$ i kapacitivnost oksida gejta po jedinici površine $8.63 \cdot 10^{-8}\text{F/cm}^2$. Odrediti struje gejta i drejna ovog tranzistora i navesti u kojoj oblasti rada se nalazi ako su poznati naponi na njegovim izvodima:

- $V_{GS}=1.2\text{V}$, $V_{DS}=4\text{V}$
- $V_{GS}=4\text{V}$, $V_{DS}=1.2\text{V}$
- $V_{GS}=4\text{V}$, $V_{DS}=4\text{V}$. Naći snagu disipacije.

Rešenje:

Struja gejta I_G je uvek jednaka nuli.

- $V_{GS}<V_T$, tranzistor je u zakočenju, $I_D=0$.
- $V_{GS}>V_T$, tranzistor nije u zakočenju
 $V_{DS(\text{sat})}=V_{GS}-V_T=1.5\text{V}$
 $V_{DS}<V_{DS(\text{sat})}$, tranzistor radi u linearnoj oblasti
 Određujemo parametar k :

$$k = \frac{\mu_n \epsilon_{ox} W}{t_{ox} L} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 6.9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}^2}.$$

Za struju drejna dobija se:

$$I_D = k \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = 7.452 \cdot 10^{-4} \text{A}.$$

- $V_{GS}>V_T$, tranzistor nije u zakočenju
 $V_{DS(\text{sat})}=V_{GS}-V_T=1.5\text{V}$
 $V_{DS}>V_{DS(\text{sat})}$, tranzistor radi u zasićenju
 Za struju drejna dobija se:

$$I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = 7.76 \cdot 10^{-4} \text{A}.$$

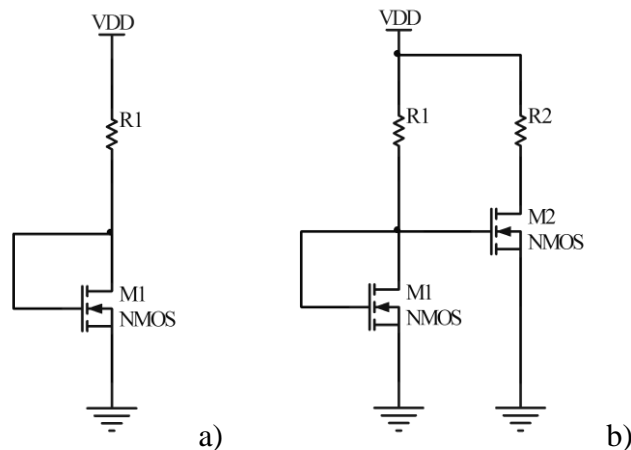
Snaga disipacije je: $P_D=I_D V_{DS}$.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 37.

- a) Za kolo sa slike odrediti vrednost otpornosti otpornika R_1 i napona na dregnju V_D tako da je struja dregnja $I_D=80\mu\text{A}$, ako je upotrebljen NMOS tranzistor (M1) čiji je napon praga $V_T=0.6\text{V}$, $\mu_n C_{ox}=200\mu\text{A}/\text{V}^2$, $L=0.8\mu\text{m}$, $W=4\mu\text{m}$. Poznato je $V_{DD}=3\text{V}$.
- b) Ukoliko se napon V_D primeni na gejnt tranzistora M2, odrediti radnu tačku (I_D , V_{DS}) ovog tranzistora. Tranzistori M1 i M2 su identični. Naći snagu disipacije tranzistora. Poznato je $R_2=20\text{k}\Omega$.



Rešenje:

- a) Kako je $V_{DS}=V_{GS}$, tranzistor je sigurno u zasićenju. Određujemo:

$$k = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} = 500 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2}.$$

Iz izraza za struju tranzistora u zasićenju dobija da $V_{DS(\text{sat})}=0.4\text{V}$, tako da je $V_{DS}=V_{GS}=V_{DS(\text{sat})}+V_T=1\text{V}$. Kolo se opisuje jednačinom $V_{DD}=R_1 I_D + V_{DS}$, tako da je $R_1=25\text{k}\Omega$.

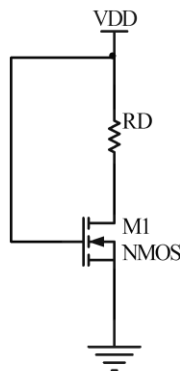
- b) Važi $V_{GS2}=V_{DS}=1\text{V}$. Kako je $V_{GS2}>V_T$, tranzistor nije zakočen. Određujemo $V_{DS(\text{sat})2}=0.4\text{V}$. Pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju, pa je $I_{D2}=k(V_{GS}-V_T)^2=80\mu\text{A}$. Za kolo se može napisati jednačina $V_{DD}=R_2 I_{D2} + V_{DS2}$, tako da je $V_{DS2}=1.4\text{V}$. Kako je $V_{DS2}>V_{DS(\text{sat})2}$, pretpostavka je dobra, tranzistor je u zasićenju.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 38.

- a) Odrediti vrednost otpornosti otpornika R_D tako da napon na drejnu NMOS tranzistora bude $V_D=0.1V$. Poznato je $V_{DD}=5V$, $V_T=1V$, $k=1mA/V^2$. Odrediti i otpornost kanala tranzistora (r_{DS}) u ovom slučaju.
- b) Odrediti radnu tačku (I_D , V_{DS}) ukoliko se upotrebi otpornik R_D dvostruko veće vrednosti otpornosti.



Rešenje:

- a) Napon $V_{GS}=V_{DD}=5V$, a kako je $V_{GS}>V_T$ tranzistor nije zakočen. Određujemo $V_{DS(sat)}=V_{GS}-V_T=4V$. Kako V_{DS} treba da bude $0.1V$, to je $V_{DS}<V_{DS(sat)}$, odnosno tranzistor radi u triodnoj oblasti. Struja drejna je:

$$I_D = k \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = 0.395mA.$$

Kolo se može opisati jednačinom: $V_{DD}=R_D I_D + V_{DS}$, pa se dobija $R_D=12.4 k\Omega$. Otpornost kanala tranzistora je $r_{DS}=V_{DS}/I_D=253 \Omega$.

- b) Sada je $R_D=24.8 k\Omega$, $V_{GS}=5 V$, tako da se dobija:

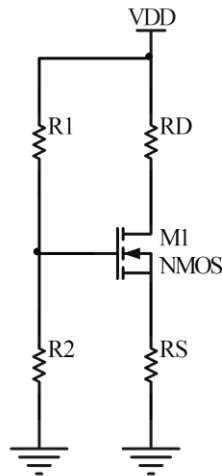
$$V_{DD} = R_D \left\{ k \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \right\} + V_{DS}$$

Za V_{DS} se dobija $0.05 V$ i $I_D=0.2 mA$.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 39. Odrediti sve struje i napone u kolu sa slike, ako je upotrebljen NMOS tranzistor čiji je napon praga $V_T=1\text{V}$, a $k=0.5\text{mA/V}^2$. Poznato je $V_{DD}=10\text{V}$, $R_1=R_2=10\text{M}\Omega$, $R_D=R_S=6\text{k}\Omega$.



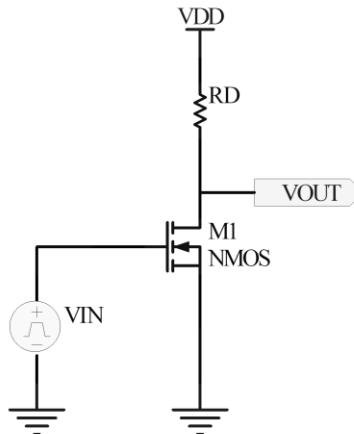
Rešenje:

Struja gejta je $I_G=0\text{A}$, pa se struja koja protiče kroz otpornike R_1 i R_2 računa iz $V_{DD}=I(R_1+R_2)$ i iznosi $I=0.5\mu\text{A}$. Napon na gejtju tranzistora određuje se iz razdelnika napona: $V_G=(R_2/(R_1+R_2))V_{DD}=5\text{V}$. Važi $V_{GS}=V_G-V_S=5-6\cdot 10^3\cdot I_D$. Pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju, tako da je $I_D=k(V_{GS}-V_T)^2$. Rešavanjem kvadratne jednačine dobija se $I_{D1}=0.89\text{mA}$ i $I_{D2}=0.5\text{mA}$. Za $I_{D1}=0.89\text{mA}$, dobija se $V_{S1}=0.89\cdot 10^{-3}\cdot 6\cdot 10^3=5.34\text{V}$ i negativno V_{GS1} što je nemoguće. Za $I_{D2}=0.5\text{mA}$, dobija se $V_{S2}=3\text{V}$, tako da je $V_{GS2}=2\text{V}$. Kako je $V_{GS}>V_T$, tranzistor nije zakočen, pa je $V_{DS(\text{sat})}=1\text{V}$. Iz jednačine $V_{DD}=R_D I_D+V_{DS}+V_S$, dobija se $V_{DS}=4\text{V}$, odnosno $V_D=V_{DS}+V_S=7\text{V}$. Kako je $V_{DS}>V_{DS(\text{sat})}$, pretpostavka je u redu, tranzistor je u zasićenju.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 40. NMOS tranzistor u kolu sa slike ima napon praga $V_T=1.5V$ i $k=0.4mA/V^2$. Ako je napon koji se dovodi na gejt (V_{IN}) – impulsni (0V i 5V), odrediti izlazni napon V_{OUT} . Poznato je $V_{DD}=5V$, $R_D=1k\Omega$.



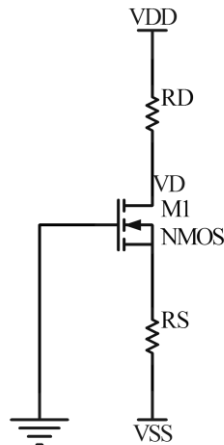
Rešenje:

Kada je $V_G=0V$, tako da je $V_{GS}=0V$, a kako je $V_{GS}<V_T$, tranzistor je zakočen, $I_D=0A$, pa je $V_{OUT}=V_{DD}=5V$. Kada je $V_{GS}=5V$, pošto je $V_{GS}>V_T$ tranzistor nije zakočen i $V_{DS(sat)}=V_{GS}-V_T=3.5V$. Pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju. Dobija se $I_D=k(V_{GS}-V_T)^2=4.9mA$. Iz jednačine $V_{DD}=R_D I_D+V_{OUT}$, pa je $V_{OUT}=0.1V$. Međutim, $V_{OUT}<V_{DS(sat)}$, tako da pretpostavka nije tačna, tranzistor je u triodnoj oblasti. Važi: $I_D=k[2(V_{GS}-V_T)V_{DS}-V_{DS}^2]$ i $V_{DD}=R_D I_D+V_{DS}$. Rešavanjem kvadratne jednačine: $5-V_{DS}=0.4[7V_{DS}-V_{DS}^2]$, dobijaju se rešenja $V_{DS1}=7.91V$ (nema smisla jer bi tranzistor bio u zasićenju, a kolo rešavamo za rad u triodnoj oblasti) i $V_{DS2}=1.6V<V_{DS(sat)}$, tranzistor je u triodnoj oblasti. Za struju se dobija: $I_D=(V_{DD}-V_{DS})/R_D=3.4mA$.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 41. Odrediti vrednosti otpornosti otpornika R_D i R_S tako da je struja drejna $I_D=0.4\text{mA}$ i $V_D=+0.5\text{V}$. NMOS tranzistor ima napon praga $V_T=0.7\text{V}$, $\mu_n C_{ox}=100\mu\text{A}/\text{V}^2$, $L=1\mu\text{m}$, $W=32\mu\text{m}$. Poznato je $V_{DD}=+2.5\text{V}$ i $V_{SS}=-2.5\text{V}$.



Rešenje:

Struja i napon na gejtu su jednaki nuli. Za napon na sorsu može se napisati jednačina: $V_S=R_S I_D+V_{SS}$, odnosno $V_{GS}=V_G-V_S=-R_S I_D-V_{SS}$. Pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju, tada važi $I_D=k(V_{GS}-V_T)^2=kV_{DS(sat)}^2$. Parametar k određujemo na osnovu formule:

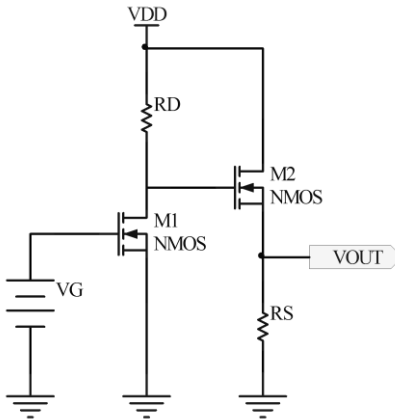
$$k = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} = 1.6 \text{ mA}/\text{V}^2.$$

Nalazimo $V_{DS(sat)}=0.5\text{V}$. Kako je $V_{DS} \geq V_{DS(sat)}$, tranzistor je u zasićenju. Možemo odrediti $V_{GS}=V_{DS(sat)}+V_T=1.2\text{V}$. Sada je $R_S=(-V_{GS}-V_{SS})/I_D=3.25\text{k}\Omega$. Iz $V_{DD}=R_D I_D+V_D$, određujemo $R_D=5\text{k}\Omega$.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 42. Odrediti V_{OUT} i I_{OUT} (kroz otpornik R_S) u kolu dvostepenog pojačavača prikazanog na slici, kada je $V_G=4V$. Upotrebljeni su identični tranzistori čiji je napon praga $V_T=3V$ i $k=1A/V^2$. Poznato je $V_{DD}=12V$, $R_D=2\Omega$, $R_S=2\Omega$.



Rešenje:

Struja gejta je jednaka nuli. Napon $V_{GS1}=4V$, pa je $V_{GS1}>V_T$, tako da tranzistor M1 nije zakočen. Određujemo $V_{DS(sat)1}=V_{GS1}-V_T=1V$. Pretpostavimo da je tranzistor M1 u zasićenju, tada je $I_{D1}=kV_{DS(sat)1}^2=1A$. Iz jednačine $V_{DD}=R_D I_{D1}+V_{DS1}$, određujemo $V_{DS1}=10V$, što je veće od napona zasićenja, tako da je pretpostavka opravdana, tranzistor M1 je u zasićenju. Dalje je $V_{G2}=V_{DS1}=10V$, pa je $V_{GS2}=V_{G2}-V_{S2}=10-2\cdot I_{OUT}$. Takođe, važi $V_{S2}=R_S I_{OUT}=V_{OUT}$. Pretpostavimo da je tranzistor M2 u zasićenju, tako da je $I_{OUT}=k(10-2I_{OUT}-3)^2$. Dobija se kvadratna jednačina $4I_{OUT}^2-29I_{OUT}+49=0$, čijim rešavanjem se dobijaju rešenja: $I_{OUT1}=2.68A$ i $I_{OUT2}=4.57A$. Tako da su $V_{OUT1}=5.36V$, odnosno $V_{OUT2}=9.14V$. Imamo V_{GS} u prvom slučaju je $10-5.36=4.64V$, dok je u drugom slučaju $10-9.14=0.86V$. Za napone zasićenja dobija se $V_{DS(sat)}$ u prvom slučaju $4.64-3=1.64V$, a u drugom $0.86-3$, što nema smisla pa ovo rešenje odbacujemo. Dakle, $I_{OUT}=2.68A$, $V_{OUT}=5.36V$, $V_{GS2}=4.64V$, $V_{DS(sat)2}=1.64V$, $V_{DS2}=12-5.36=6.64V$. Kako je $V_{DS2}>V_{DS(sat)2}$, tranzistor jeste u zasićenju.

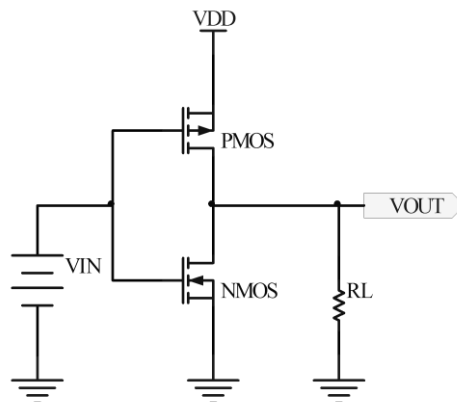
POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 43. NMOS i PMOS tranzistor su upareni (čine CMOS inverter) tako da je napon praga $V_{TN}=-V_{TP}=1V$ i $k_N=k_P=0.5mA/V^2$. Odrediti struje I_{DN} i I_{DP} , kao i izlazni napon V_{OUT} , kada je:

- $V_{IN}=0V$
- $V_{IN}=2.5V$.

Poznato je $V_{DD}=2.5V$, $R_L=10k\Omega$.



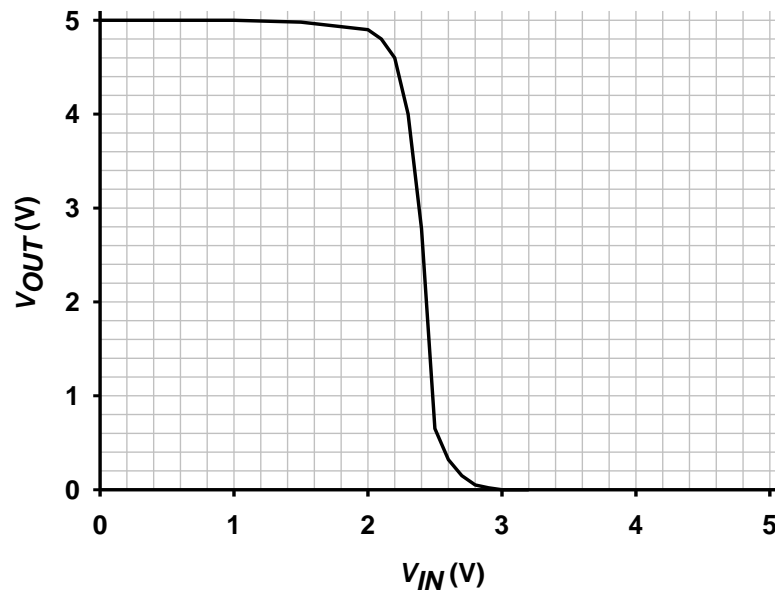
Rešenje:

- Kada je $V_{IN}=0V$, tada je $V_{GSN}=0V$, tako da je $V_{GSN}<V_T$, odnosno tranzistor je zakočen i struja $I_{DN}=0A$. Napon $V_{GSP}=V_G-V_S=-V_{DD}=-2.5V$, a kako je $|V_{GSP}|>|V_T|$ tranzistor nije zakočen. PMOS tranzistor radi u omskoj – linearnoj oblasti, tako da je struja $I_{DP}=2k(V_{GS}-V_T)V_{DS}$. Važi: $V_{DD}=V_{SD}+V_{OUT}$ i $V_{OUT}=I_{DP}R_L$. Može se pisati: $V_{DS}=V_{OUT}-V_{DD}$, pa je $I_{DP}=2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}(-2.5-(-1))(I_{DP} \cdot 10 \cdot 10^3-2.5)$. Rešavanjem jednačine dobija se $I_{DP}=0.234mA$, odnosno $V_{OUT}=2.34V$.
- Kada je $V_{IN}=2.5V$, tada je $V_{GSN}=V_G-V_S=2.5V$, tako da je $V_{GSN}>V_T$, tranzistor nije zakočen. Važi $V_{DS}=V_{OUT}=0V$, tako da je $I_{DN}=2k(V_{GS}-V_T)V_{DS}=0A$. Napon $V_{GSP}=0V$, tako da je $V_{GSP}<V_T$, odnosno tranzistor je zakočen i struja $I_{DP}=0A$.

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

Računske vežbe

ZADATAK 44. Na slici je data prenosna karakteristika CMOS invertora. Označiti karakteristične naponske nivoe (V_{IL} , V_{OL} , V_{IH} , V_{OH}), odrediti njihove vrednosti i proračunati margine šuma ovog invertora.



Rešenje:

Grafičkim putem se očitaju vrednosti, tako da je $NM_H = V_{OH} - V_{IH} = 4.7 - 3.3 = 1.4$ V, $NM_L = V_{IL} - V_{OL} = 2.5 - 0.3 = 2.2$ V.