

MASOVNE INSTRUKCIJE

ELEKTRONIKA 1

Za ljetni rok 2017./2018.

Zeljko3

InvictusKudi

1. LJIR 15/16

ZADATAK 1. Koncentracije primjesa na n i p strani silicijske diode iznose $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ i $N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Parametri manjinskih nosilaca su $\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 0,5 \text{ }\mu\text{s}$ i $\tau_p = 0,8 \text{ }\mu\text{s}$. Vrijedi: $W_p \gg L_n$ i $W_n \gg L_p$. Površina pn spoja iznosi $S = 2 \text{ mm}^2$. Maksimalno električno polje u osiromašenom području pri naponu diode U_D iznosi: 94 kV/cm . Vrijedi $T = 300 \text{ K}$.

- Izračunati napon U_D , ukupnu širinu osiromašenog područja (d_B) i širine osiromašenih područja na n i p strani (d_{Bn} , d_{Bp}) pri tom naponu (**4 boda**).
- Skicirati raspodjelu električnog polja, te raspodjele manjinskih nosilaca, izračunati i označiti rubne te ravnotežne koncentracije za priključeni napon U_D (**3 boda**).
- Izračunati struju zasićenja diode I_S (**3 boda**).

2. MI 16/17

ZADATAK 3. Širine p i n strane su $w_p = 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ i $w_n = 200 \text{ }\mu\text{m}$. Koncentracije primjesa na p i n strani diode iznose $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Pokretljivosti manjinskih nosilaca su $1250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $320 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Vremena života nosilaca $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$. Površina pn -spoja iznosi $2,5 \text{ mm}^2$. Pretpostaviti $m = 1$ i $T = 300 \text{ K}$.

- Izračunati napon na diodi ako je izmjeren kapacitet osiromašenog područja iznosa 200 pF (**3 boda**).
- Izračunati struju zasićenja i odrediti struju kroz diodu za napon dobiven u a) dijelu zadatka (**4 boda**).
- Skicirati raspodjele manjinskih nosilaca, izračunati i označiti rubne te ravnotežne koncentracije za napon dobiven u a) dijelu zadatka (**3 boda**).

3. LJIR 15/16

ZADATAK 2. *N*-kanalni silicijski MOSFET ima duljinu kanala od $1\text{ }\mu\text{m}$ i širinu kanala od $2\text{ }\mu\text{m}$, a kapacitet oksida upravljačke elektrode iznosi $10\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$. Pokretljivost nosilaca u kanalu je $300\text{ cm}^2/\text{Vs}$. Uz napon $U_{GS} = 1\text{ V}$, strmina iznosi $7,2\text{ mA/V}$, a faktor naponskog pojačanja $\mu = 1$. $T = 300\text{ K}$. Zanimariti porast struje odvoda u zasićenju.

- Odrediti područje u kojem se nalazi radna točka (triodno ili zasićenje, obrazložiti) **(1 bod)**.
- Izračunati napon U_{DS} u radnoj točki **(3 boda)**.
- Izračunati napon praga **(4 boda)**.
- Odrediti tip MOSFET-a (obrazložiti) **(1 bod)**.
- Izračunati struju odvoda u radnoj točki **(1 bod)**.

4. ZIR 15/16

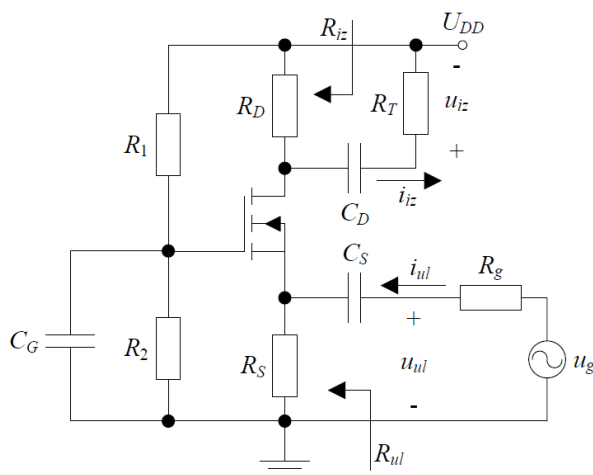
ZADATAK 2. Za silicijski MOSFET poznate su dvije točke (A i B) koje leže na istoj prijenosnoj karakteristici. Jedna od točaka nalazi se u triodnom području, a druga u području zasićenja. Poznati su slijedeći podaci: $U_{GSA} = -0,5\text{ V}$, $U_{DSA} = 1\text{ V}$, $I_{DA} = 0,25\text{ mA}$, $U_{GSB} = 2\text{ V}$, $I_{DB} = 5\text{ mA}$. Zanimariti porast struje odvoda u području zasićenja ($\lambda = 0$).

- Odrediti tip MOSFET-a (*n*- ili *p*-kanalni, obogaćeni ili osiromašeni) i tip nosilaca u kanalu **(1,5 bod)**.
- Odrediti područje rada tranzistora u točkama A i B **(1 bod)**.
- Odrediti napon praga U_{GS0} i strujni koeficijent K **(4 boda)**.
- Točka C leži na istoj izlaznoj karakteristici kao i točka B, te vrijedi $U_{DSC} = 3\text{ V}$. Odrediti područje rada tranzistora i struju odvoda I_{DC} u točki C **(1,5 bod)**.
- Debljina oksida MOS strukture iznosi $t_{ox} = 15\text{ nm}$, pokretljivost nosilaca u kanalu je $\mu = 300\text{ cm}^2/\text{Vs}$, a širina kanala iznosi $10\text{ }\mu\text{m}$. Odrediti duljinu kanala MOSFET-a **(2 boda)**.

5. LJIR 15/16

ZADATAK 3. Za pojačalo na slici zadano je: $U_{DD} = 12\text{ V}$, $R_g = 500\ \Omega$, $R_1 = 3\text{ M}\Omega$, $R_2 = 1,8\text{ M}\Omega$, $R_D = 2\text{ k}\Omega$, $R_S = 1\text{ k}\Omega$, $R_T = 4,7\text{ k}\Omega$. Parametri n -kanalnog MOSFET-a su: $U_{GS0} = 1\text{ V}$, $K = 2,2\text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0\text{ V}^{-1}$.

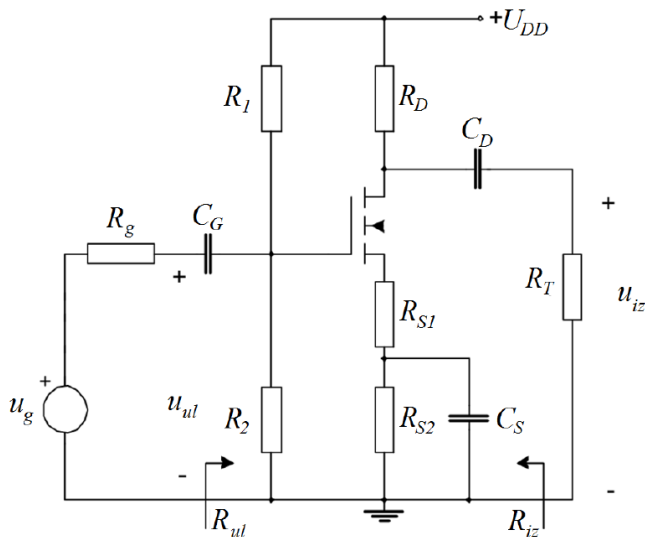
- Odrediti statičku radnu točku (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ}) te provjeriti radi li tranzistor u zasićenju (**3 boda**).
- Odrediti strminu g_m i dinamički otpor r_d tranzistora u statičkoj radnoj točki (**1 bod**).
- Nacrtati nadomjesnu shemu pojačala za dinamičku analizu te izvesti izraze i izračunati iznose naponskih pojačanja $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ i $A_{Vg} = u_{iz}/u_g$, ulaznog otpora $R_{ul} = u_{ul}/i_{ul}$ te izlaznog otpora R_{iz} (**6 bodova**).



6. ZI 11/12

ZADATAK 1. Za pojačalo na slici zadano je: $U_{DD} = 20\text{ V}$, $R_g = 2\text{ k}\Omega$, $R_1 = 450\text{ k}\Omega$, $R_2 = 100\text{ k}\Omega$, $R_{S1} = 1\text{ k}\Omega$, $R_{S2} = 1\text{ k}\Omega$, $R_D = 8\text{ k}\Omega$ i $R_T = 12\text{ k}\Omega$. Parametri n -kanalnog MOSFET-a su: $K = 5\text{ mA/V}^2$, $U_{GS0} = 1\text{ V}$ i $\lambda = 0,005\text{ V}^{-1}$.

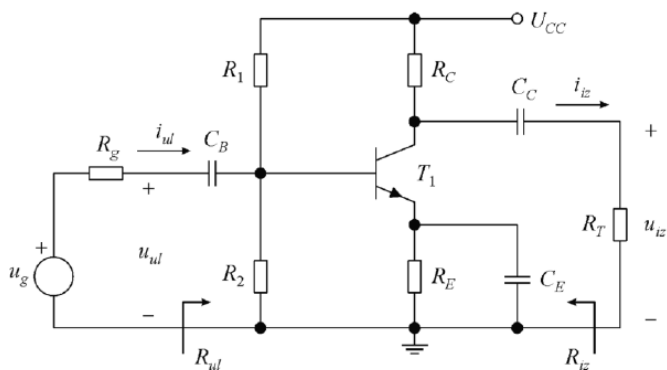
- Odrediti statičku radnu točku tranzistora (I_{DQ} , U_{DSQ} , U_{GSQ}), te strminu i dinamički otpor u radnoj točki. **Provjeriti u kojem području rada radi tranzistor.** Pri proračunu statičke radne točke zanemariti porast struje odvoda u području zasićenja (**2 boda**).
- Nacrtati nadomjesnu shemu, te izvesti izraz i izračunati naponska pojačanja $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ i $A_{Vg} = u_{iz}/u_g$ (**4 boda**).
- Izračunati ulazni otpor R_{ul} te izvesti i izračunati izlazni otpor R_{iz} (**2 boda**).



7. LJIR 15/16

ZADATAK 4. Za pojačalo na slici zadani su sljedeći podaci: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_E = 820 \Omega$, $R_C = 1,5 \text{ k}\Omega$, $R_T = 1,5 \text{ k}\Omega$, $R_g = 50 \Omega$, $U_{CC} = 12 \text{ V}$. Parametri *npn* tranzistora su $\beta \approx h_{fe} = 100$, $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25 \text{ mV}$. Zanimariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području.

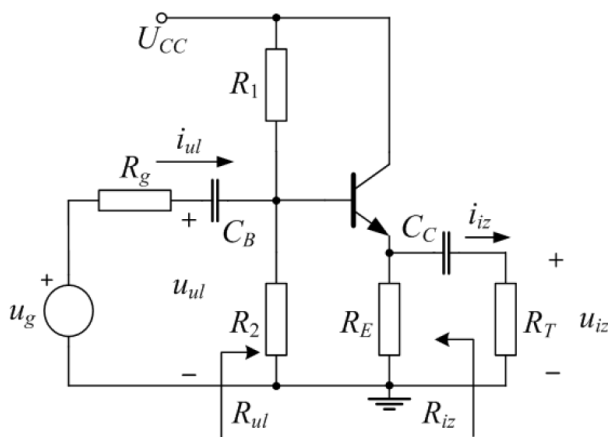
- Odrediti statičku radnu točku (U_{CEQ} , I_{CQ}), strminu i ulazni dinamički otpor u radnoj točki (**2 boda**).
- Skicirati statički i dinamički radni pravac, označiti karakteristične točke i odrediti maksimalni hod izlaznog napona u_{iz} (**3 boda**).
- Nacrtati nadomjesnu shemu pojačala za dinamičku analizu te izvesti izraz i izračunati iznos naponskog pojačanja $A_{vg} = u_{iz}/u_g$ (**4 boda**).
- Odrediti signal generatora $U_{g,max}$ za koji se dobije maksimalni izlazni signal bez izobličenja (**1 bod**).



8. ZI 15/16

ZADATAK 3. Za pojačalo sa slike zadano je $U_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_g = 500 \Omega$, $R_T = 2 \text{ k}\Omega$, $R_E = 3 \text{ k}\Omega$. Parametri tranzistora su $\beta = h_{fe} = 100$ i $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$. Zanimariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature iznosi $U_T = 25 \text{ mV}$.

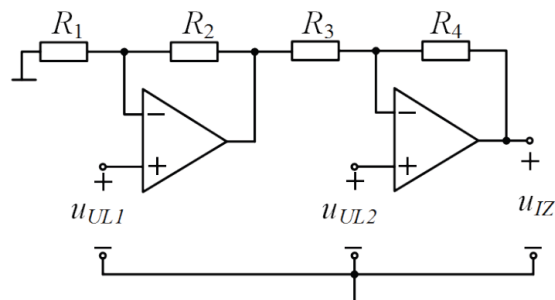
- Ako je naponsko pojačanje $A_v = u_{iz}/u_{ul} = 0,9896$, odrediti iznose otpornika R_1 i R_2 ako vrijedi da je $R_2 = 2 \cdot R_1$. Provjeriti radi li tranzistor u normalnom aktivnom području (**4 boda**).
- Nacrtati shemu pojačala za dinamičku analizu, odrediti strujno pojačanje $A_I = i_{iz}/i_{ul}$, ulazni otpor R_{ul} i izlazni otpor R_{iz} (**4 boda**).



9. ZI 14/15

ZADATAK 4. Shema sklopa s idealnim, simetrično napajanim operacijskim pojačalima je prikazana na slici.

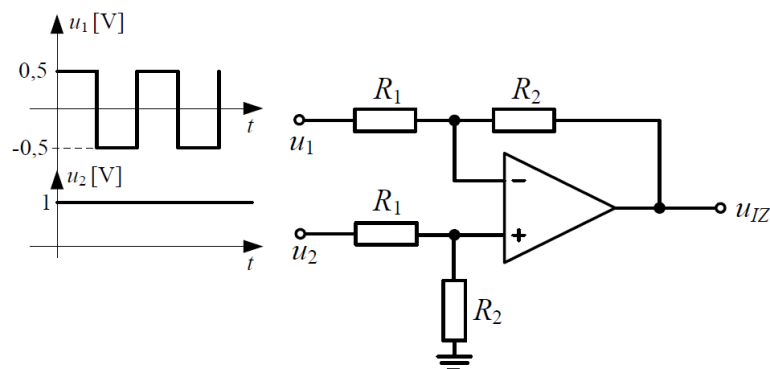
- Izračunati ovisnost izlaznog napona u_{IZ} o ulaznim naponima u_{UL1} i u_{UL2} . (4 boda)
- Izračunati u_{UL2} za zadane $R_1 = 1,8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3,6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5,4 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 7,2 \text{ k}\Omega$, $U_{IZ} = 1 \text{ V}$ te $U_{UL1} = 0,25 \text{ V}$. (2 boda)



10. LJIR 15/16

ZADATAK 5. Za diferencijsko pojačalo prikazano slikom zadan je iznos otpornika $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ i valni oblik ulaznih napona u_1 i u_2 . Operacijsko pojačalo je idealno. Odrediti:

- iznos otpornika R_2 da amplituda izlaznog napona bude 3 V_{pp} (5 bodova),
- valni oblik izlaznog napona u_{IZ} . Nacrtati u koordinatnom sustavu i označiti osi (5 bodova).



$$\textcircled{1.} N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_p = 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\tau_n = 0,5 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\tau_p = 0,8 \text{ } \mu\text{s}$$

$$W_p \gg L_n \rightarrow \text{široka p-strana}$$

$$W_n \gg L_p \rightarrow \text{široka n-strana}$$

$$S = 2 \text{ mm}^2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$F_{\text{max}} = 94 \text{ kV/cm}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

a) napon na diodi $U_D = ?$ (u službenim formulama označen je samo s U), širina osiromašenog područja $d_B = ?$, širine osiromašenog područja n- i p-strane ($d_{Bn}, d_{Bp} = ?$)

↳ za većinske nosioce vrijedi:

$$n_{on} \cong N_D = \underline{5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}$$

$$p_{op} \cong N_A = \underline{5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}}$$

↳ intrinzična koncentracija izračunava se formulom:

$$n_i = C_1 \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E'_{g0}}{2 \cdot E_T}\right)$$

$$\text{gdje su: } C_1 = 3,07 \cdot 10^{16} \text{ K}^{-\frac{3}{2}} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$E'_{g0} = 1,196 \text{ eV}$$

$$E_T = \frac{T}{11600} = \frac{300}{11600} \text{ eV}$$

sve ovo postoji u službenom šalabahteru

dobiva se:

$$n_i = \underline{\underline{1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}}}$$

↳ kontaktni potencijal :

$$U_k = U_T \cdot \ln \frac{n_{on} \cdot p_{op}}{(n_i)^2} = \underline{\underline{0,777 \text{ V}}}$$

$$\text{gdje je: } U_T = \frac{T}{11600} = \frac{300}{11600} \text{ V} \quad \left(\begin{array}{l} \text{naponski} \\ \text{ekvivalent} \\ \text{temperature} \end{array} \right) \quad \boxed{\text{cca. } 25 \text{ mV}}$$

⇒ Da bi dobili napon diode U_D , kombiniramo jednačbe koje definiraju maksimalno električno polje i širinu osiromašenog područja :

$$F_{\max} = \left| \frac{2(U_k - U_D)}{d_B} \right| \quad d_B = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k - U_D)}$$

→ uvrštavanjem $d_B \rightarrow F_{\max}$ slijedi:

$$F_{\max} = \frac{2 \cdot (U_k - U_D)}{\sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k - U_D)}} = \frac{2 \cdot \sqrt{U_k - U_D}}{\sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}} \rightarrow \begin{array}{l} \text{jedina} \\ \text{nepoznanica} \\ \text{ovdje je} \\ U_D \end{array}$$

$$\sqrt{U_k - U_D} = \frac{F_{\max}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad \left| \begin{array}{l} + U_D, \\ - \left(\frac{F_{\max}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \right) \end{array} \right|$$

$$\rightarrow U_D = U_k - \frac{F_{\max}^2 \cdot \epsilon}{2q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) = \underline{\underline{-4,994 \text{ V}}}$$

$$\text{gdje su: } \epsilon = \epsilon_{si} \cdot \epsilon_0, \quad \epsilon_{si} = 11,7 \\ \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm} \quad !!! \\ q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

→ dioda je ZAPORNO polarizirana

↳ širina osiromašenog sloja:

$$d_B = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k - U_D)} = 1,228 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = \underline{\underline{122,8 \mu\text{m}}}$$

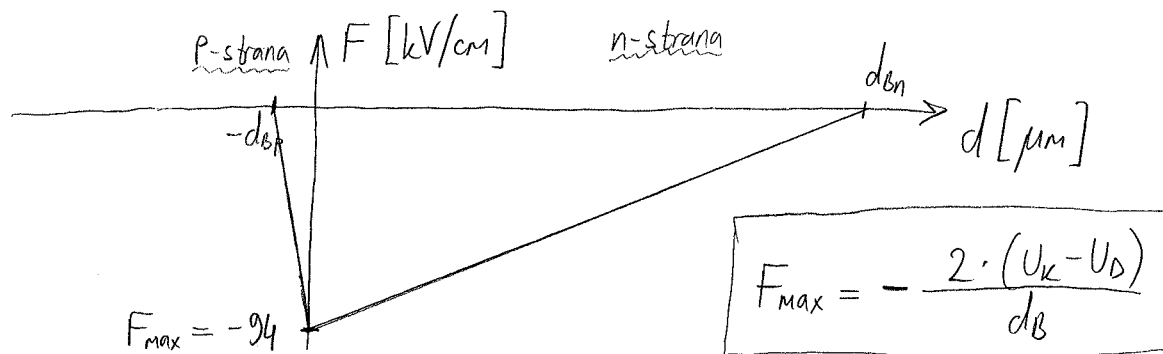
↳ širine osiromašenog sloja na pojedinim stranama :

$$d_{BP} = d_B \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D} = \underline{\underline{1,216 \mu m}}$$

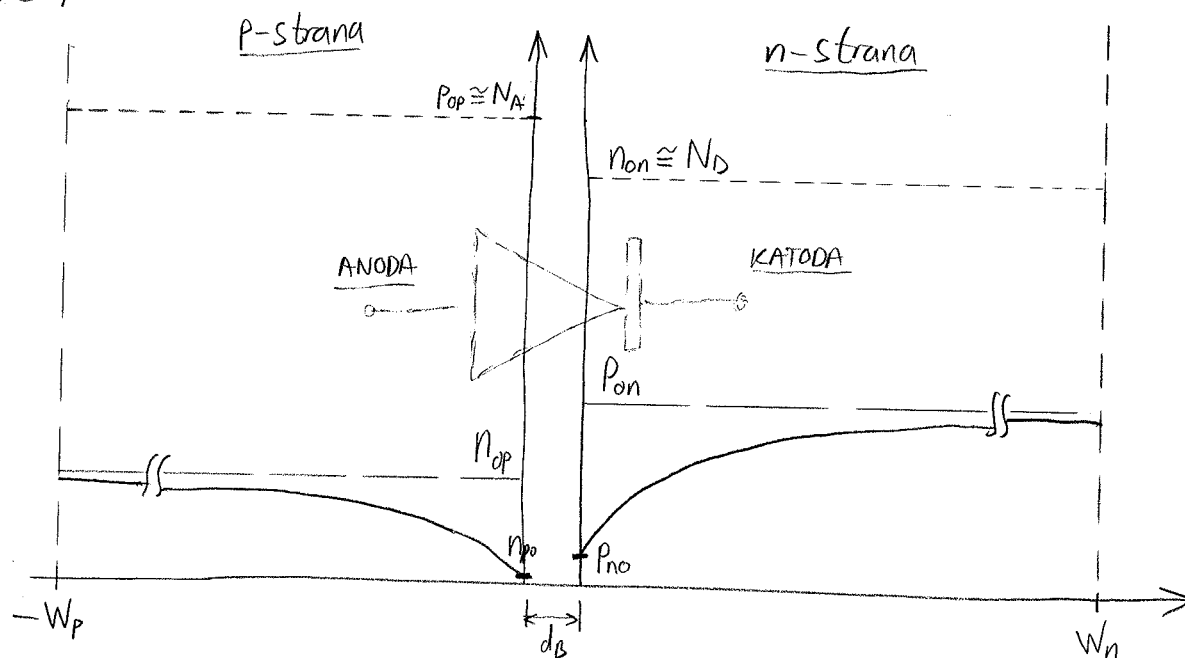
$$d_{Bn} = d_B \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D} = \underline{\underline{121,584 \mu m}}$$

b) Skiciraj i označi raspodjele električnog polja i manjinskih nosilaca za izračunat U_D !

Električno polje:



Manjinski nosioci:



RAVNOTEŽNE KONCENTRACIJE:

$$p_{on} = \frac{(n_i)^2}{n_{on}} = \underline{\underline{42050 \text{ cm}^{-3}}}$$

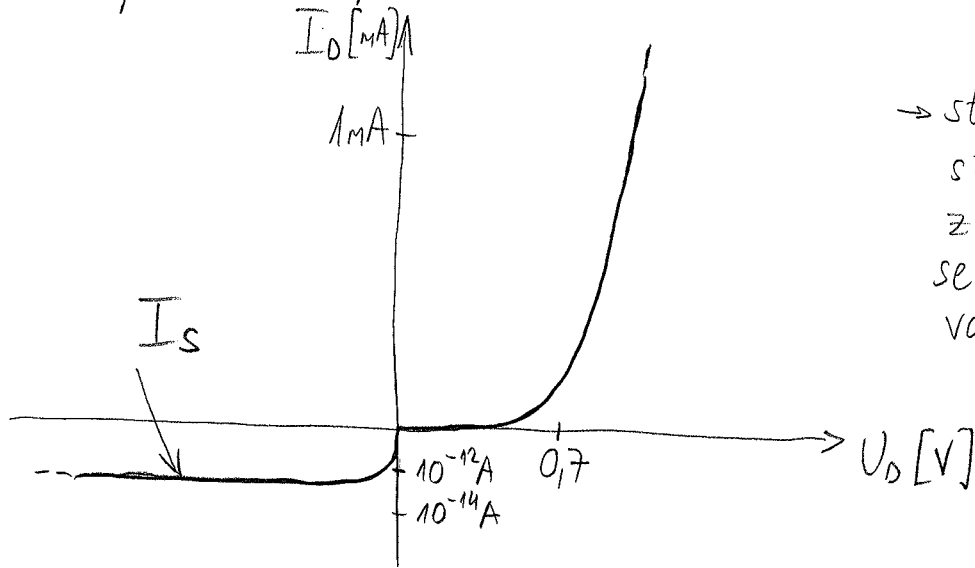
$$n_{op} = \frac{(n_i)^2}{p_{op}} = \underline{\underline{420,5 \text{ cm}^{-3}}}$$

RUBNE KONCENTRACIJE:

$$n_{po} = n_{op} \cdot \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) = 7,38 \cdot 10^{-85} \text{ cm}^{-3} \approx \underline{\underline{\phi}}$$

$$p_{no} = p_{on} \cdot \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) = 7,4 \cdot 10^{-83} \text{ cm}^{-3} \approx \underline{\underline{\phi}}$$

c) Struja zasićenja diode $I_s = ?$



→ struja zasićenja je struja zaporno polarizirane diode i ona se ne mijenja smanjivanjem napona.

$$I_s = 2 \cdot \overset{u \text{ cm}^2 !!}{S} \cdot \left[D_n \cdot \frac{n_{0p}}{L_n} + D_p \cdot \frac{p_{0n}}{L_p} \right] = 3,54 \cdot 10^{-13} A = \underline{\underline{354 \text{ fA}}}$$

$$D_n = U_T \cdot \mu_n = 31,03 \text{ cm}^2/s$$

$$D_p = U_T \cdot \mu_p = 5,17 \text{ cm}^2/s$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} = \sqrt{U_T \cdot \mu_n \cdot \tau_n} = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{U_T \cdot \mu_p \cdot \tau_p} = 2,03 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\textcircled{2.} \quad W_p = 0,2 \mu\text{m} = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$W_n = 200 \mu\text{m} = 200 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_n = 1250 \text{ cm}^2/\text{Vs} \\ \mu_p = 320 \text{ cm}^2/\text{Vs} \end{array} \right\} \text{elektroni uvijek imaju veću} \\ \text{pokretljivost od šupljina !!}$$

$$\tau_p = \tau_n = 1 \mu\text{s}$$

$$S = 2,5 \text{ mm}^2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$m = 1$$

$$T = 300 \text{ K}$$

a) Napon na diodi U_D , ako je zadan kapacitet osiromašenog sloja $C_B = 200 \text{ pF}$

→ isto kao u prošlom zadatku, računamo p_{op} , n_{on} , n_i i U_k :

$$p_{op} \cong N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{on} \cong N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = C_1 \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2E_T}\right) = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$U_k = U_T \cdot \ln \frac{n_{on} \cdot p_{op}}{(n_i)^2} = 0,737 \text{ V}$$

→ Da bi dobili napon diode U_D kombiniramo jednačbe koje definiraju kapacitet i širinu osiromašenog područja:

$$C_B = \epsilon \cdot \frac{S}{d_B}$$

$$d_B = \sqrt{\frac{2\epsilon}{2} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k - U_D)}$$

$$C_B = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{si} \cdot S}{\sqrt{\frac{2\epsilon}{2} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k - U_D)}}$$

...

$$U_D = U_k - \frac{\epsilon \cdot S^2}{C_B^2} \cdot \frac{2}{2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = \underline{\underline{-5,44 \text{ V}}}$$

→ dioda je ZAPORNO polarizirana

b) Struja zasićenja I_s i struja kroz diodu I_D , za U_D iz a) ?

→ prvo nam trebaju ravnotežne koncentracije manjinskih nosilaca p_{on} i n_{op}

$$n_{op} = \frac{(n_i)^2}{p_{op}} = 2105,5 \text{ cm}^{-3}$$

$$p_{on} = \frac{(n_i)^2}{n_{on}} = 42050 \text{ cm}^{-3}$$

→ zadane su nam širine strana, ali moramo provjeriti kakve su (uska / široka) pošto nije striktno zadano u zadatku. To se radi izračunavanjem difuzijskih duljina L_p i L_n :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{U_T \cdot \mu_n \cdot \tau_n} = 56,9 \mu\text{m} \gg W_p = 0,2 \mu\text{m}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{U_T \cdot \mu_p \cdot \tau_p} = 28,8 \mu\text{m} \ll W_n = 200 \mu\text{m}$$

dakle, $(W_p) \ll L_n \rightarrow$ uska p-strana!
 $W_n \gg (L_p) \rightarrow$ široka n-strana!

→ jednačica za struju zasićenja će dakle izgledati:

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \cdot \frac{n_{op}}{W_p} + D_p \cdot \frac{p_{on}}{L_p} \right) = \underline{\underline{14,1 \text{ pA}}}$$

u jednačicu
vlaži ono
što je
KRATČE

↑
uska strana
stavljam odgovarajući
 W (u cm)!

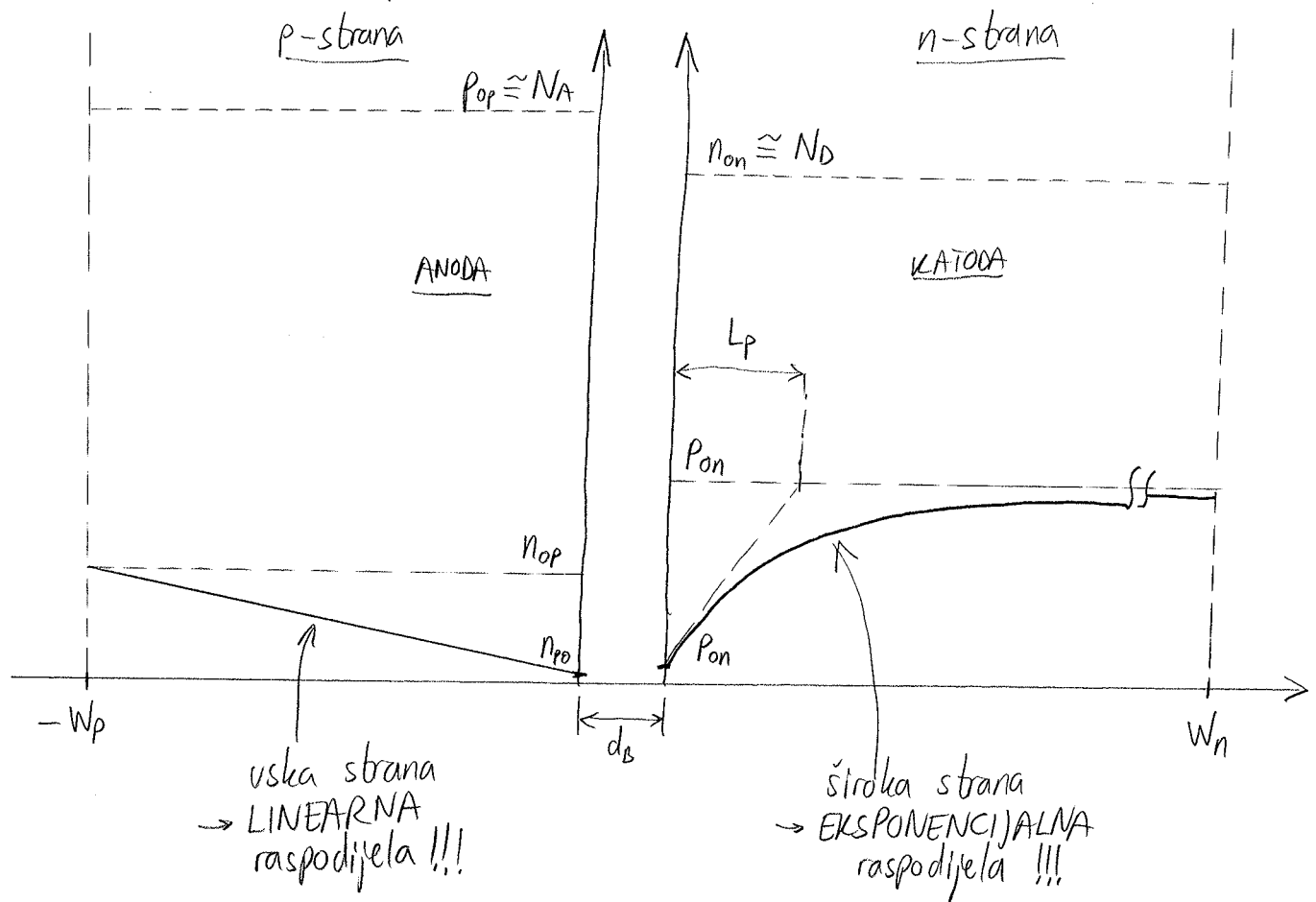
↑
široka strana
stavljam odgovarajući
 L (u cm)!

→ struja kroz diodu I_D dobiva se Shockleyevom jednačicom:

$$I_D = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right] = \underline{\underline{-14,1 \text{ pA}}} = -I_s$$

→ kroz zaporno polariziranu diodu prolazi struja iznosa struje zasićenja, ali obrnutog smjera

c) Raspodjele manjinskih nosioca:



ravnotežne koncentracije:

$$n_{Op} = \frac{(n_i)^2}{p_{Op}} = \underline{\underline{2102,5 \text{ cm}^{-3}}}$$

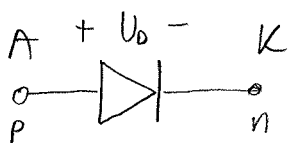
$$p_{On} = \frac{(n_i)^2}{n_{On}} = \underline{\underline{42050 \text{ cm}^{-3}}}$$

rubne koncentracije:

$$n_{p0} = n_{Op} \cdot \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) = 9,34 \cdot 10^{-89} \approx \underline{\underline{0 \text{ cm}^{-3}}}$$

$$p_{n0} = p_{On} \cdot \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) = 1,87 \cdot 10^{-87} \approx \underline{\underline{0 \text{ cm}^{-3}}}$$

DIGRESIJA:



→ propusno polarizirana dioda ima anodu na višem potencijalu od katode, dok je kod zaporne obratno, odnosno napon U_D je negativan !!

3. N-kanalni MOSFET

$$L = 1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm} \rightarrow \text{duljina kanala}$$

$$W = 2 \mu\text{m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \rightarrow \text{širina kanala}$$

$$C_{ox} = 10 \text{ pF/cm} \rightarrow \text{kapacitet oksida gate-a (G)}_1$$

$$\mu_n = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs} \rightarrow \text{pokretljivost elektrona}$$

$$g_m = 7,2 \text{ mA/V} \text{ uz } U_{GSQ} = 1 \text{ V}$$

$$\mu = 1 \rightarrow \text{faktor naponskog pojačanja}$$

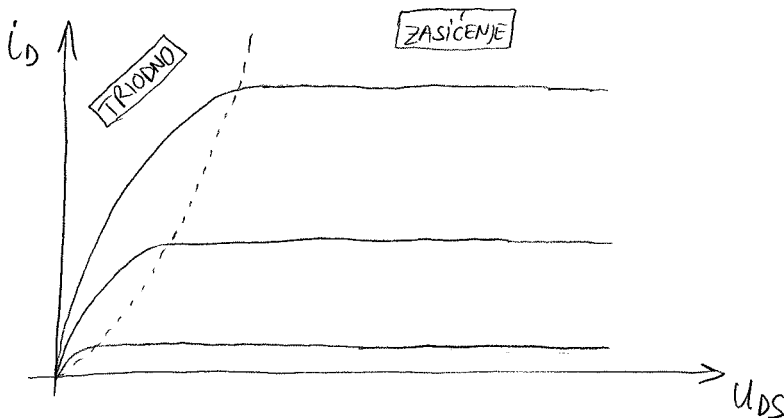
$$T = 300 \text{ K}$$

→ zanemariti porast struje odvoda u zasićenju ($\lambda = 0$)!!

a) odredi područje rada (triodno/zasićenje), obrazloži

↳ promotrimo dinamički otpor u zasićenju

$$r_d = \frac{\partial U_{DS}}{\partial i_D}$$



→ sa izlazne karakteristike tranzistora očitavamo da se

u zasićenju porastom napona U_{DS} struja i_D ne mijenja jer je zadano da je $\lambda = 0$. Dakle vrijedi:

$$r_d = \frac{\partial U_{DS}}{\partial i_D} = \frac{\text{konačna vrijednost}}{0} = \underline{\underline{\infty}}$$

→ nadalje vrijedi:

$$\boxed{\mu = r_d \cdot g_m} \rightarrow \text{u našem slučaju } \mu = 1, \quad g_m = 7,2 \text{ mA/V}$$

je li moguće da umnožak $r_d \cdot g_m = \infty \cdot 7,2 \cdot 10^{-3} = 1 = \mu$?

NE! Dakle, tranzistor nije u zasićenju!!

TRANZISTOR JE U TRIODNOM PODRUČJU!!

b) izračunati U_{DS} u radnoj točki!

→ najprije računamo strujni koeficijent K koji je isti i za triodno područje i za zasićenje:

$$K = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} = \underline{\underline{6 \text{ mA/V}^2}}$$

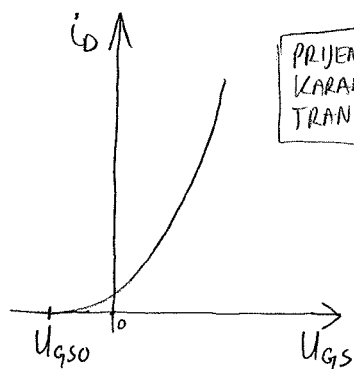
→ imamo zadan g_m za koji vrijedi: $g_m = \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}}$

→ pošto smo u triodnom području:

$$i_D = K \cdot \left[(U_{GS} - U_{GS0}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \rightarrow \text{deriviram po } U_{GS}$$

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}} \right|_Q = K \cdot U_{DSQ} \rightarrow U_{DSQ} = \frac{g_m}{K} = \underline{\underline{1,2 \text{ V}}}$$

c) Odredi napon praga U_{GS0} !



iz formule $\mu = g_m \cdot r_d$:

$$r_d = \frac{\mu}{g_m} = \frac{1}{7,2 \cdot 10^{-3}} = 138,89 \Omega$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\partial i_D}{\partial U_{DS}} \rightarrow \text{uzimam } i_D \text{ triodno!}$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\partial}{\partial U_{DS}} \left[K \left[(U_{GSQ} - U_{GS0}) \cdot U_{DSQ} - \frac{U_{DSQ}^2}{2} \right] \right] = K \cdot [U_{GSQ} - U_{GS0} - U_{DSQ}]$$

$$\hookrightarrow \text{iz toga prolazi: } U_{GS0} = U_{GSQ} - U_{DSQ} - \frac{K}{r_d} = \underline{\underline{-0,20004 \text{ V}}}$$

provjerimo, vrijedi li to za triodno područje:

$$|U_{DSQ}| < |U_{GSQ} - U_{GS0}|$$

$$|1,2| < |1 - (-0,20004)|$$

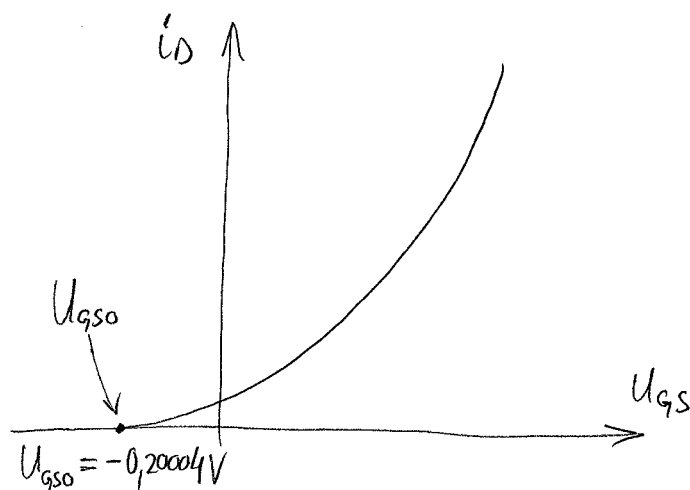
$$1,2 \text{ V} < 1,20004 \text{ V}$$

✓ vrijedi!

d) odrediti tip mosfeta i obrazložiti

→ kao prvo, N-kanalni je MOSFET jer tranzistor vodi isključivo za napone U_{GS} koji su VEĆI (pozitivniji) od napona praga U_{GS0} .

→ kao drugo, oslromašen je tip jer pri naponu $U_{GS} = 0$ struja i_D različita je od 0, odnosno tranzistor tada vodi.



e) Izračunaj struju odvoda u radnoj točki

→ bez komentara, uvrštavanje u formulu :P

$$I_{DQ} = K \cdot \left[(U_{GSQ} - U_{GS0}) \cdot U_{DSQ} - \frac{U_{DSQ}^2}{2} \right] = \underline{\underline{4,32 \text{ mA}}}$$

(Formula za triodno područje!!)

4.) Dvije točke A i B, leže na istoj prijenosnoj karakteristici MOSFET-a, jedna je u TRIODNOM, a jedna u ZASIĆENJU!!

$$U_{GSA} = -0,5V$$

$$U_{DSA} = 1V$$

$$I_{DA} = 0,25mA$$

$$U_{GSB} = 2V$$

$$I_{DB} = 5mA$$

zanemariti porast struje odvoda u području zasićenja ($\lambda = 0$)!

a) Tip MOSFET-a? tip nosilaca u kanalu?

→ pri porastu napona U_{GS} , raste i struja i_D , dakle MOSFET je n-kanalni!

→ pošto pri naponu U_{GS} manjem od nule, a većem od U_{GS0} (jer je n-kanalni) tranzistor vodi, radi se o osiromašenom tipu MOSFET-a!

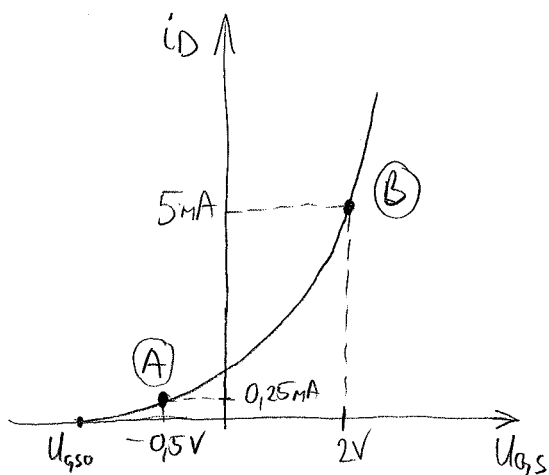
→ n-kanalni je, pa su nosioci u kanalu ELEKTRONI, odnosno negativni naboji!

b) točke A i B nalaze se na istoj prijenosnoj karakteristici, koja se uvijek crta za konstantan U_{DS} , pa vrijedi:

$$U_{DSB} = U_{DSA} = \underline{1V}$$

→ odredi koja je točka u kojem području!

vrijedi: TRIODNO: $|U_{DS}| < |U_{GS} - U_{GS0}|$
ZASIĆENJE: $|U_{DS}| > |U_{GS} - U_{GS0}|$



→ ona točka koja ima veći U_{GS} prije će biti u triodnom području, a pošto je zadano da jedna od njih i jest u triodnom mora vrijediti:

| |
|---------------|
| B → TRIODNO |
| A → ZASIĆENJE |

!

c) Odrediti napon praga U_{GSO} i strujni koeficijent K
→ za struje odvoda vrijedi:

$$(A): I_{DA} = \frac{K}{2} (U_{GSA} - U_{GSO})^2$$

$$(B): I_{DB} = K \cdot \left[(U_{GSB} - U_{GSO}) \cdot U_{DSB} - \frac{U_{DSB}^2}{2} \right]$$

Iz (A) izrazim K :

$$K = \frac{2 \cdot I_{DA}}{(U_{GSA} - U_{GSO})^2} \rightarrow \text{ubacim u (B)}$$

Iz (B) izlazi:

$$I_{DB} = \frac{2 \cdot I_{DA}}{(U_{GSA} - U_{GSO})^2} \left[(U_{GSB} - U_{GSO}) \cdot U_{DSB} - \frac{U_{DSB}^2}{2} \right] \rightarrow \text{uvrstit } U_{DSB} \text{ i pomnožit s nazivnikom}$$

$$I_{DB} \cdot (U_{GSA} - U_{GSO})^2 = 2 \cdot I_{DA} \cdot \left[(U_{GSB} - U_{GSO}) \cdot 1 - \frac{1}{2} \right]$$

$$I_{DB} \cdot U_{GSA}^2 - 2 I_{DB} \cdot U_{GSA} \cdot U_{GSO} + I_{DB} \cdot U_{GSO}^2 = 2 \cdot I_{DA} \cdot U_{GSB} - 2 \cdot I_{DA} \cdot U_{GSO} - I_{DA}$$

$$I_{DB} \cdot U_{GSO}^2 + [2 \cdot I_{DA} - 2 \cdot I_{DB} \cdot U_{GSA}] \cdot U_{GSO} + [I_{DB} \cdot U_{GSA}^2 - 2 \cdot I_{DA} \cdot U_{GSB} + I_{DA}] = 0$$

$$5 \cdot 10^{-3} \cdot U_{GSO}^2 + 5,5 \cdot 10^{-3} U_{GSO} + 5 \cdot 10^{-4} = 0 \quad / : (5 \cdot 10^{-3})$$

$$U_{GSO}^2 + 1,1 U_{GSO} + 0,1 = 0$$

$$\cancel{U_{GSO_1} = -0,1V} \quad \boxed{U_{GSO_2} = -1V} \checkmark \checkmark$$

→ odabiremo $U_{GSO_2} = -1V$ jer već pri naponu $U_{GSA} = -0,5V$ tranzistor vodi, odnosno ima neki iznos struje, u ovom slučaju $I_{DA} = 0,25 \text{ mA}$. Dakle, $U_{GSO_1} = -0,1V$ nema smisla!
Odabiremo U_{GSO} koji je negativniji (pogledaj prienosnu karakteristiku na prethodnoj stranici)

→ izračunati $U_{GSO} = -1V$ vratimo u jednadžbu točke (A) i računamo strujni koeficijent K :

$$K = \frac{2 \cdot I_{DA}}{(U_{GSA} - U_{GSO})^2} = \underline{\underline{2 \text{ mA/V}^2}}$$

d) Točka C. Ista izlazna karakteristika kao i točka B.

$$U_{DSC} = 3V$$

Odredi: područje rada, struju odvoda I_{DC} !

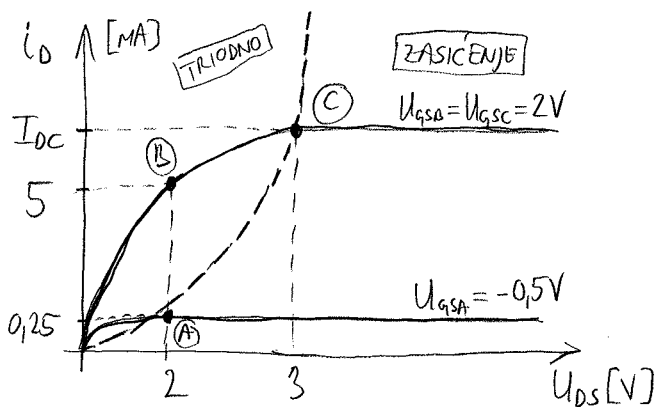
→ izlazna karakteristika crta se u ovisnosti o 2 parametra: i_D i U_{DS} . Svaka izlazna karakteristika ima svoj U_{GS} , a pošto se točka B i C nalaze na istoj izlaznoj karakteristici, vrijedi: $U_{GSC} = U_{GSB} = \underline{\underline{2V}}$

$$|U_{DSC}| \text{ (?) } |U_{GSC} - U_{GS0}|$$

$$|3V| \text{ (?) } |2 - (-1)|$$

$$3V = 3V$$

→ točka C točno je na GRANICI triodnog i područja zasićenja:



struja odvoda I_{DC} :

→ koju formulu koristiti?

→ pošto je $\lambda = \phi$ i točka je na granici zasićenja, odabiremo formulu za zasićenje jer se daljnjim povećanjem U_{DS} struja odvoda ionako neće mijenjati!

$$I_{DC} = \frac{K}{2} (U_{GSC} - U_{GS0})^2 = \underline{\underline{9 \text{ mA}}}$$

e) odrediti duljinu kanala, $L = ?$

$$t_{ox} = 15 \text{ nm} = 15 \cdot 10^{-7} \text{ cm} \rightarrow \text{debljina oksida}$$

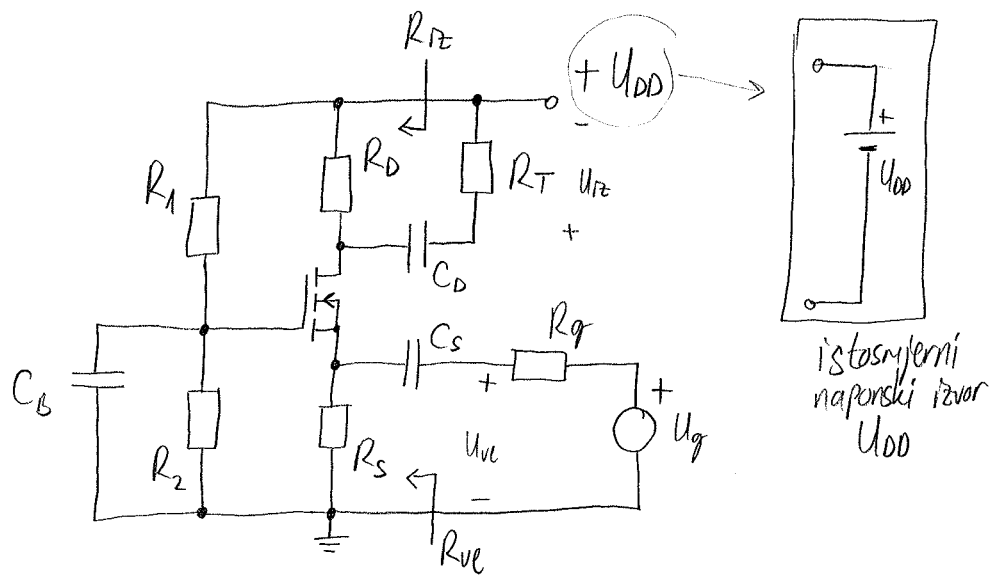
$$\mu_n = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs} \rightarrow \text{pokretljivost nosilaca}$$

$$W = 10 \text{ } \mu\text{m} = 10 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \rightarrow \text{širina kanala}$$

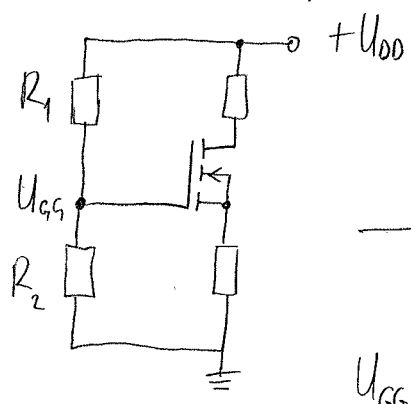
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{SiO_2}}{t_{ox}} = \frac{8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm} \cdot 3,9}{15 \cdot 10^{-7} \text{ cm}} = \underline{\underline{230,204 \text{ nF}}}$$

$$\rightarrow K = \underbrace{\mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L}}_{\text{iz služenog šablontera}} \rightarrow L = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{K} = \underline{\underline{34,53 \text{ } \mu\text{m}}}$$

- 5.) $U_{DD} = 12V$
 $R_g = 500\Omega$
 $R_1 = 3M\Omega$
 $R_2 = 1,8M\Omega$
 $R_D = 2k\Omega$
 $R_S = 1k\Omega$
 $R_T = 4,7k\Omega$
 $U_{GSO} = 1V$
 $K = 2,2mA/V^2$
 $\lambda = 0V^{-1}$



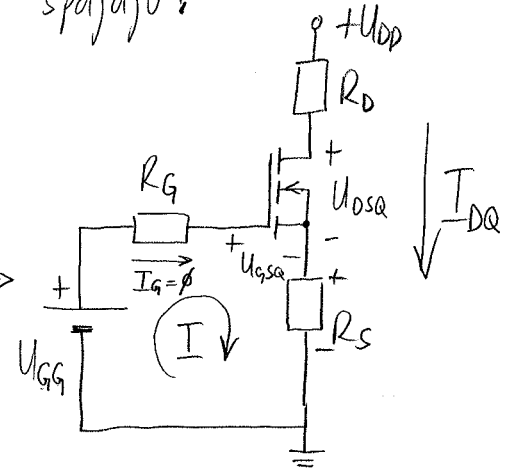
a) STATIKA → kondenzatori mi predstavljaju prazan hod, dakle odspajam sve dijelove koje oni spajaju!



Shemu nadomještam po Theveninu za napon U_{GG}

$$U_{GG} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4,5V$$

$$R_G = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 1,125M\Omega$$



→ struja u upravljačku elektrodi ne postoji!! $I_G = \phi$
 dakle, nema pada napona na otporniku R_G !

Petlja ulaznog kruga:

$$-U_{GG} + U_{GSA} + I_{DQ} \cdot R_S = \phi \rightarrow I_{DQ} = \frac{U_{GG} - U_{GSA}}{R_S}$$

→ kombiniranjem jednačbe dobivene prethodnim postupkom i jednačbe za struju odvoda u zasićenju računamo U_{GSA} !!
 (u sklopovima s MOSFET-om uvijek pretpostavljamo zasićenje!!!!)

→ izraz za struju odvoda u zasićenju:

$$I_{DQ} = \frac{K}{2} (U_{GSQ} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda U_{DSQ})^{\phi}$$
$$= \frac{K}{2} (U_{GSQ} - U_{GS0})^2$$

→ izjednačavam dvije jednačbe za I_{DQ} :

$$\frac{U_{GG} - U_{GSQ}}{R_S} = \frac{K}{2} (U_{GSQ} - U_{GS0})^2$$

$$\frac{2 \cdot U_{GG}}{K \cdot R_S} - \frac{2 U_{GSQ}}{K \cdot R_S} = U_{GSQ}^2 - 2 U_{GSQ} \cdot U_{GS0} + U_{GS0}^2$$

$$U_{GSQ}^2 + \left(\frac{2}{K \cdot R_S} - 2 U_{GS0} \right) \cdot U_{GSQ} + U_{GS0}^2 - \frac{2 U_{GG}}{K \cdot R_S} = 0$$

$$U_{GSQ}^2 - 1,091 U_{GSQ} - 3,091 = 0$$

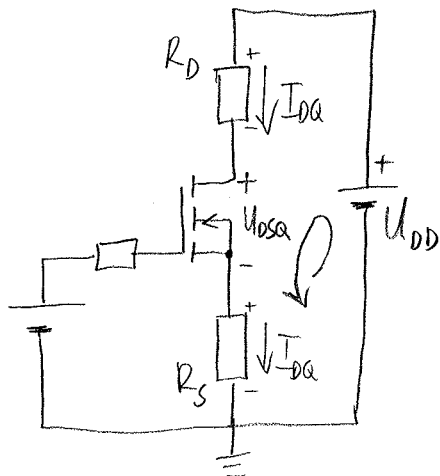
$$\boxed{U_{GSQ1} = 2,386V} \quad \checkmark \quad U_{GSQ2} = -1,295V \quad \times$$

→ odabiremo U_{GSQ1} jer n-kanalni MOSFET vodi za napone U_{GS} koji su veći od U_{GS0} (u našem slučaju 1V)

Iz prve petlje dobivamo struju odvoda u radnoj tački:

$$I_{DQ} = \frac{U_{GG} - U_{GSQ}}{R_S} = \underline{\underline{2,114mA}}$$

Izlazni krug:



$$-U_{DD} + I_{DQ} \cdot R_D + U_{DSQ} + I_{DQ} \cdot R_S = 0$$

Iz toga proizlazi U_{DSQ} :

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S) = \underline{\underline{5,658V}}$$

Provjera zasićenja:

$$|U_{DSQ}| > |U_{GSQ} - U_{GS0}|$$

$$5,658 > 2,386 - 1$$

$\checkmark \checkmark$ u zasićenju je

b) Strmina $g_m = ?$ dinamički otpor $r_d = ?$ (u S.R.T.)

Po definiciji: $g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}} \right|_Q = \frac{\partial}{\partial U_{GS}} \left[\frac{K}{2} (U_{GSQ} - U_{GS0})^2 \cdot (1 + \cancel{\lambda U_{DSQ}}) \right] \quad (\lambda = \phi)$

$$= K \cdot (U_{GSQ} - U_{GS0}) = \underline{\underline{3,05 \text{ mA/V}}}$$

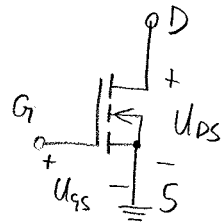
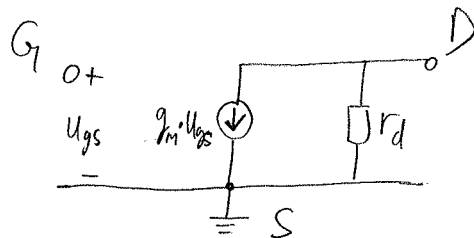
Po definiciji: $\frac{1}{r_d} = \frac{\partial i_D}{\partial U_{DS}} = \phi$ jer je $\lambda = \phi !!$

$$\rightarrow \underline{\underline{r_d = \infty}}$$

\rightarrow također vrijedi: $\mu = g_m \cdot r_d = \infty$ (faktor naponskog pojačanja)

c) DINAMIKA $A_V = ?$, $A_{V_g} = ?$, $R_{ve} = ?$, $R_{iz} = ?$

\rightarrow nadomjesna shema MOSFET-a za dinamičku analizu:



Crtanje dinamičke sheme:

1) Nacrtamo ulaznu i izlaznu stezaljku i masu (mačka ^^)

S. D

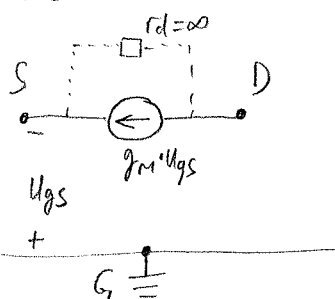


S \rightarrow ulaz

D \rightarrow izlaz

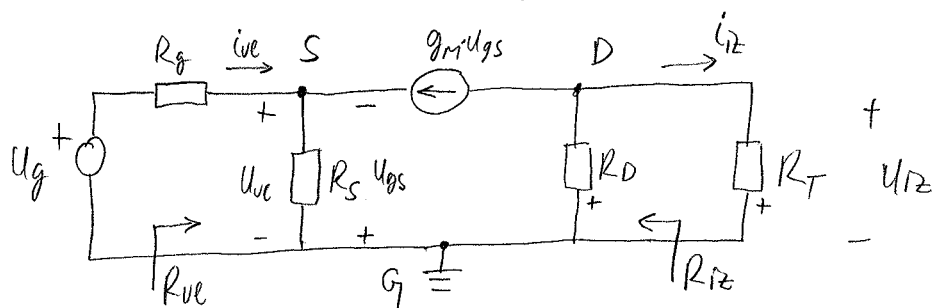
G \rightarrow zajednička, također i na masi

2) zatim nacrtamo nadomjesnu shemu tranzistora na nacrtani raspored elektrodi



$\rightarrow r_d$ možemo izostaviti jer je beskonačan, pa kroz njega ne prolazi nikakva struja

3) Nakon toga nam još preostaje nacrtati dio do ulaza (lijevo) i dio do izlaza (desno). Kondenzatore u dinamici KRATKO SPAJAMO !!



→ također, pitanje je gdje su nestali R_1 i R_2 ?

Ako se vratimo na početnu shemu, vidimo da, ako gledamo dinamičke prilike, gdje se kondenzatori kratko spajaju, a također i ISTOSMJERNI NAPONI NAPAJANJA (baterija, $+U_{DD}$) koji se gašenjem spajaju na MASU, na stezaljkama R_1 i R_2 nema RAZLIKE POTENCIJALA! Kroz njih ne teče struja. Oba otpora su zakucana na masu. :)

→ Sada kada imamo dinamičku shemu, izvodimo pojačanja:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ve}}$$

$U_{ve} = -U_{gs}$ → ulazni napon je jednostavno obrnuti U_{gs} .

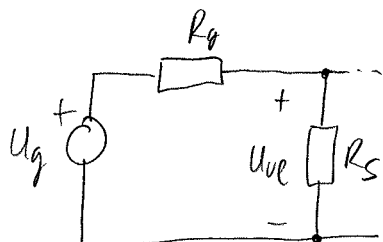
$U_{iz} = -g_m \cdot U_{gs} \cdot (R_D \parallel R_T)$ → vidimo da strujni izvor $g_m \cdot U_{gs}$ na paraleli $R_D \parallel R_T$ radi pad napona koji je obrnuto polariziran, pa zato ide predznak (-).

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ve}} = \frac{-g_m \cdot U_{gs} \cdot R_D \parallel R_T}{-U_{gs}} = g_m \cdot R_D \parallel R_T = \underline{\underline{4,278}}$$

→ poanta je da se iz izraza eliminiira nepoznati parametar, koji je u sklopovima s MOSFET-om uvijek dinamički U_{gs} . Zato moramo izraziti i izlazni i ulazni napon pomoću njega.

$$\rightarrow A_{vg} = \frac{U_{Rz}}{U_g} = \left(\frac{U_{Rz}}{U_{ve}} \right) \cdot \frac{U_{ve}}{U_g} = A_v \cdot \frac{U_{ve}}{U_g}$$

→ treba još izraziti odnos $\frac{U_{ve}}{U_g}$



$$U_{ve} = U_g \cdot \frac{R_s}{R_g + R_s}$$

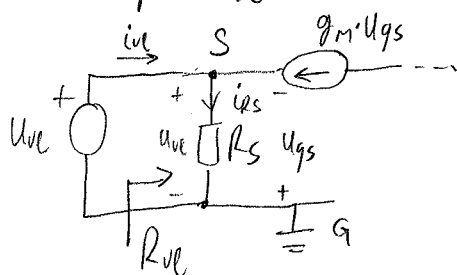
→ jednostavno
naponsko
djelilo

$$A_{vg} = \frac{U_{Rz}}{U_g} = A_v \cdot \frac{R_s}{R_s + R_g} = \underline{\underline{2,852}}$$

ULAZNI I IZLAZNI OTPOR:

$$R_{ve} = \frac{U_{ve}}{i_{ve}}$$

→ kod ulaznog otpora nam je bitan U_{ve} , a ne U_g , pa stavljamo simbol idealnog naponskog izvora U_{ve} koji tjera struju i_{ve}



→ sve nakon strujnog izvora $g_m U_{gs}$ uopće ne utječe na R_{ve} .

Za čvor S vrijedi: $i_{rs} = i_{ve} + g_m \cdot U_{gs}$

$$i_{rs} = \frac{U_{ve}}{R_s} \quad , \quad g_m \cdot U_{gs} = -g_m \cdot U_{ve}$$

$$i_{rs} = i_{ve} - g_m \cdot U_{ve}$$

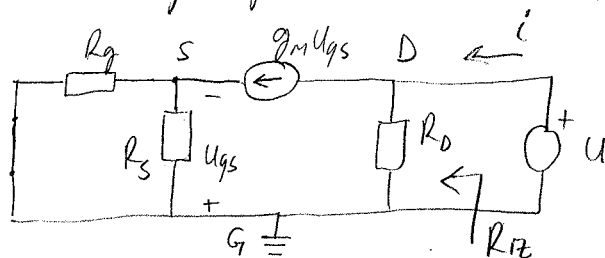
$$\frac{U_{ve}}{R_s} = i_{ve} - g_m \cdot U_{ve}$$

$$i_{ve} = \frac{U_{ve}}{R_s} + g_m \cdot U_{ve}$$

$$\frac{i_{ve}}{U_{ve}} = \frac{1}{R_s} + g_m$$

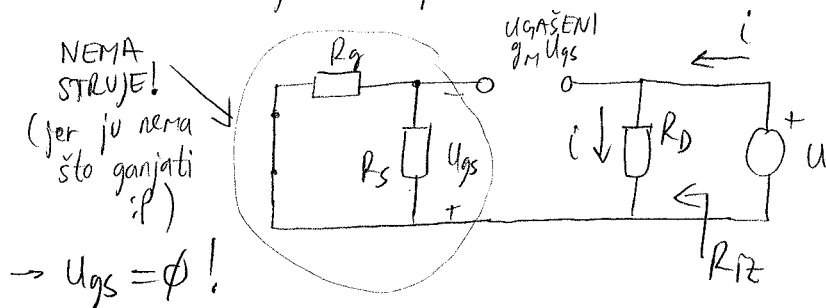
$$R_{ve} = \frac{U_{ve}}{i_{ve}} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} = R_s \parallel \frac{1}{g_m} = \underline{\underline{247 \, \Omega}}$$

R_{iz} : izlazni otpor je otpor koji se vidi sa izlaznih stezaljki kada je teret isključen! (Nema R_T).
 Pošto je definicija otpora po Ohmovom zakonu $R = \frac{U}{I}$ stavljamo umjesto tereta probni naponski izvor "u" koji tjera struju "i", ali da pritom ugasimo SVE NEOVISNE NAPONSKE I STRUJNE IZVORE (u našem slučaju je to samo U_{gs} !!)



→ što je sa ovisnim strujnim izvorom $g_m \cdot U_{gs}$?

Protokol: MAKNEMO izvor i gledamo POSTOJI LI UOPĆE parametar o kojem on ovisi (u našem slučaju U_{gs})
 Ako POSTOJI, ostavljamo ga, ako NE POSTOJI, moramo ga uključiti u račun izlaznog otpora!

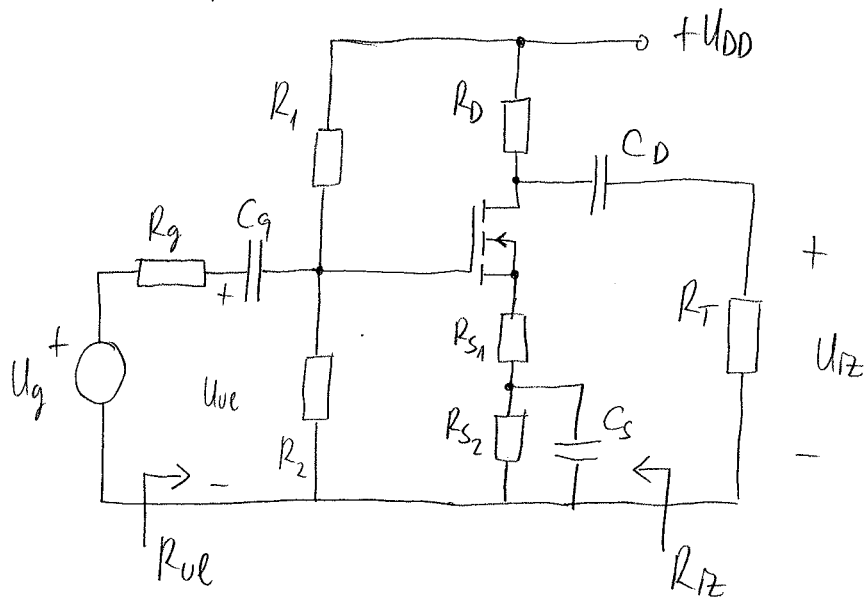


→ VIDIMO DA U VLAZNOM KRUGU NEMA STRUJE, A PRITOM NITI NE POSTOJI NAPON U_{gs} , PA NITI OVISNI IZVOR $g_m \cdot U_{gs}$
 → ISKLJUČUJEMO GA!!

→ uz isključen izvor $g_m \cdot U_{gs}$ proračun izlaznog otpora je ultra jednostavan:

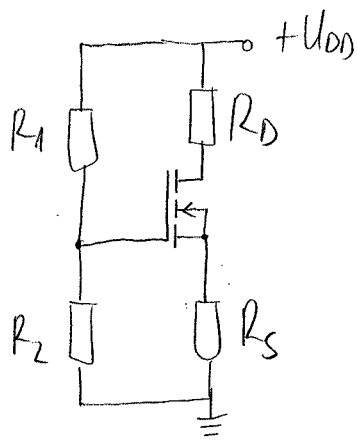
$$R_{iz} = \frac{u}{i} = R_D = \underline{\underline{2k\Omega}}$$

6.) $U_{DD} = 20V$
 $R_g = 2k\Omega$
 $R_1 = 450k\Omega$
 $R_2 = 100k\Omega$
 $R_{S1} = 1k\Omega$
 $R_{S2} = 1k\Omega$
 $R_D = 8k\Omega$
 $R_T = 12k\Omega$
 $K = 5mA/V^2$
 $U_{GSO} = 1V$
 $\lambda = 0,005V^{-1}$

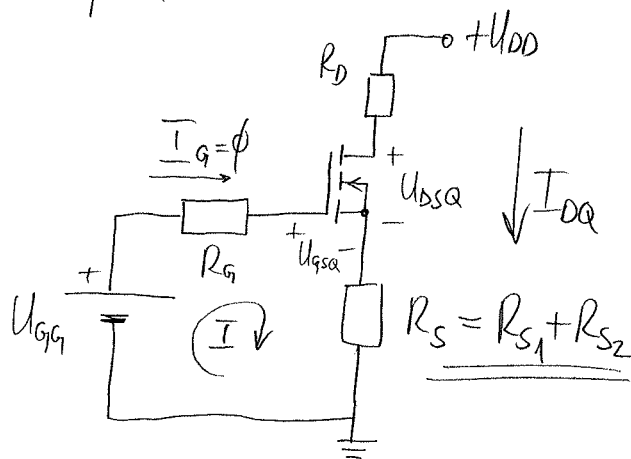


a) "pri proračunu statičke radne točke zanemariti porast struje odvoda u području zasićenja" znači da u statički vrijedi $\lambda = 0$!!

STATIKA: identičan račun kao u prošlom zadatku!



Theremin



$$U_{GG} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \underline{\underline{3,636V}}$$

$$R_g = R_1 || R_2 = \underline{\underline{81,82k\Omega}}$$

$$(I): I_{DQ} = \frac{U_{GG} - U_{GSO}}{R_S}$$

$$\text{ZASIĆENJE: } I_{DQ} = \frac{K}{2} (U_{GSA} - U_{GSO})^2$$

izjednačavamo I_{DQ}
 jednačbe i računamo
 U_{GSA}

↳ Nakon izjednačavanja jednažbi za I_{DQ} i kombiniranja:

$$U_{GSQ}^2 + \left(\frac{2}{K \cdot R_S} - 2U_{GS0} \right) \cdot U_{GSQ} + \left(U_{GS0}^2 - \frac{2U_{GG}}{K \cdot R_S} \right) = 0$$

$$U_{GSQ}^2 - 1,8 U_{GSQ} + 0,2728 = 0$$

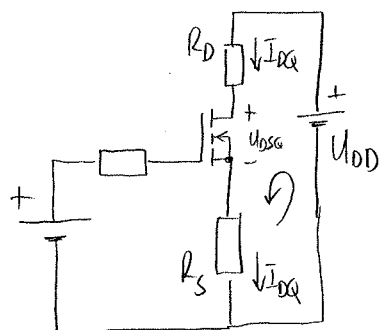
$$\boxed{U_{GSQ1} = 1,633 \text{ V}} \quad U_{GSQ2} = \cancel{0,167 \text{ V}}$$

↳ Odabiremo U_{GSQ1} jer mora vrijediti $U_{GSQ} > U_{GS0}$ da bi tranzistor uopće vodio !!

Nadalje, iz petlje I:

$$I_{DQ} = \frac{U_{GG} - U_{GSQ}}{R_S} = \underline{\underline{1 \text{ mA}}}$$

Izlazni krug:



$$-U_{DD} + I_{DQ} \cdot R_D + U_{DSQ} + I_{DQ} \cdot R_S = 0$$

$$\rightarrow U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S) = \underline{\underline{10 \text{ V}}}$$

$$|U_{DSQ}| ? \quad |U_{GSQ} - U_{GS0}|$$

$$10 \text{ V} > 0,633 \text{ V} \rightarrow \text{Tranzistor, radi! u ZASICENJU!}$$

DINAMIČKI PARAMETRI:

→ ovaj put uključujemo λ u račun!!!

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}} = K \cdot (U_{GSQ} - U_{GS0}) (1 + \lambda U_{DS}) = \underline{\underline{3,323 \text{ mA/V}}}$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\partial i_D}{\partial U_{DS}} = \frac{K}{2} (U_{GSQ} - U_{GS0})^2 \cdot \lambda = 5 \cdot 10^{-6}$$

$$\rightarrow r_d = \frac{1}{5 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{200 \text{ k}\Omega}}$$

$$\text{faktor naponskog pojačanja: } \mu = g_m \cdot r_d = \underline{\underline{663,457}}$$

b) DINAMIKA

Crtanje sheme:

1)

G

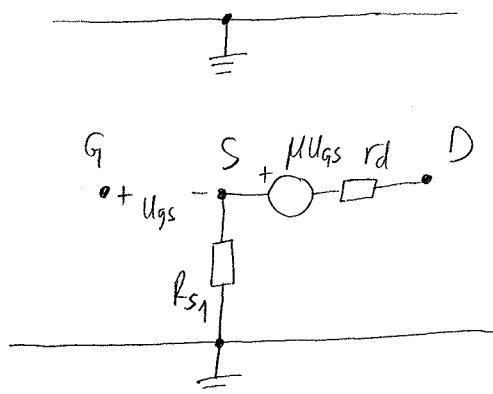
D

MAČKA

ulaz: G

izlaz: D

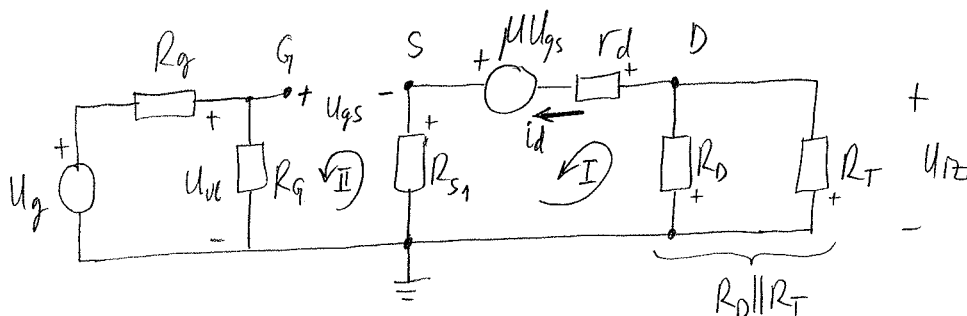
2)



TRANZISTOR

→ S nije na masi
jer S₁ nije
premosten kondenzatorom!

3)



SVE

→ nema smisla
stavljati $g_m u_{gs}$
jer bi r_d onda
stršao van :)

Pita se: $A_v = \frac{u_{rz}}{u_{ve}}$, $A_{vg} = \frac{u_{rz}}{u_g} = ?$

$u_{rz} = -i_d \cdot R_D \parallel R_T \rightarrow$ razrit pomoću u_{gs} !!

petlja (I): $i_d \cdot R_D \parallel R_T + i_d \cdot r_d - \mu u_{gs} + i_d \cdot R_{S1} = 0$ (2. KZ N)

$i_d [R_D \parallel R_T + r_d + R_{S1}] = \mu u_{gs}$

$i_d = u_{gs} \cdot \frac{\mu}{R_D \parallel R_T + r_d + R_{S1}}$

$u_{rz} = -u_{gs} \cdot \frac{\mu \cdot R_D \parallel R_T}{R_D \parallel R_T + r_d + R_{S1}}$

petlja (II): $u_{ve} - u_{gs} - i_d \cdot R_{S1} = 0$ (2. KZ N)

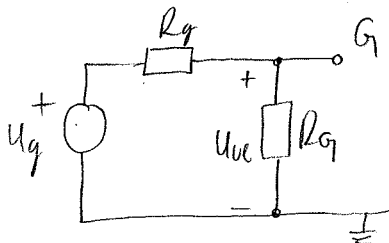
$u_{ve} = u_{gs} + \underbrace{R_{S1} \cdot u_{gs} \cdot \frac{\mu}{R_D \parallel R_T + r_d + R_{S1}}}_{i_d}$

$$U_{ve} = U_{gs} \left[1 + \frac{\mu R_{S1}}{R_{D||R_T} + r_d + R_{S1}} \right]$$

$$U_{ve} = U_{gs} \cdot \left[\frac{R_{D||R_T} + r_d + (1+\mu)R_{S1}}{R_{D||R_T} + r_d + R_{S1}} \right]$$

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ve}} = \frac{-U_{gs} \cdot \frac{\mu \cdot R_{D||R_T}}{R_{D||R_T} + r_d + R_{S1}}}{U_{gs} \cdot \frac{R_{D||R_T} + r_d + (1+\mu)R_{S1}}{R_{D||R_T} + r_d + R_{S1}}} = -\frac{\mu \cdot R_{D||R_T}}{R_{D||R_T} + r_d + (1+\mu)R_{S1}} = \underline{\underline{-3,664}}$$

$$A_{Vg} = \frac{U_{iz}}{U_g} = \left(\frac{U_{iz}}{U_{ve}} \right) \cdot \frac{U_{ve}}{U_g} = A_V \cdot \frac{U_{ve}}{U_g} = A_V \cdot \frac{R_G}{R_g + R_G} = \underline{\underline{-3,576}}$$

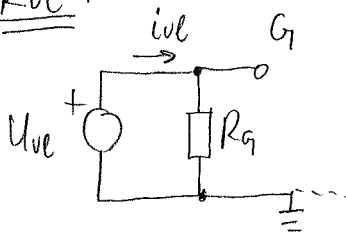


$$U_{ve} = U_g \cdot \frac{R_G}{R_g + R_G} \rightarrow \text{naponsko djelilo!}$$

$$\frac{U_{ve}}{U_g} = \frac{R_G}{R_g + R_G}$$

c) ULAZNI I IZLAZNI OTPOR:

R_{ue} :



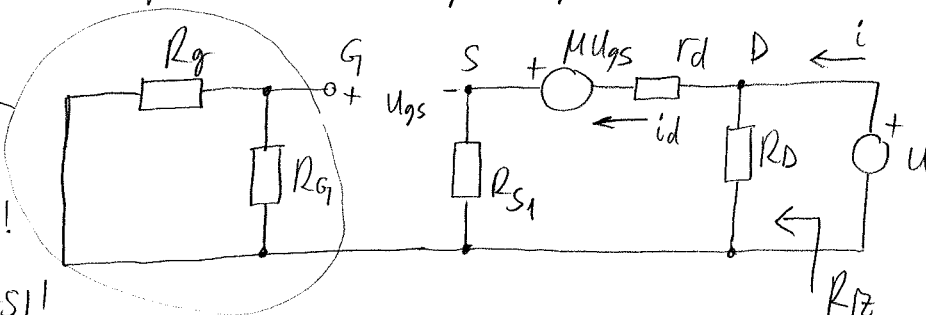
→ ulazni otpor ne vidi ništa iza upravljačke elektrode jer su ulazni i izlazni krug **RAZDVOJENI!**

$$R_{ue} = \frac{U_{ve}}{i_{ve}} = R_g = \underline{\underline{81,82 \text{ k}\Omega}}$$

R_{iz} : gasim neovisne izvore i stavljam pomoćni naponski izvor U (umjesto tereta R_T) koji tjera struju i . Gašenje $U_g \rightarrow$ **KRATKI SPOJ!!**

OPET:
NEMA
struje jer
ju nema
što gajati!

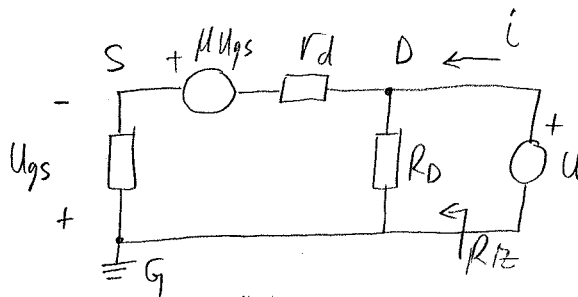
G na MAS!



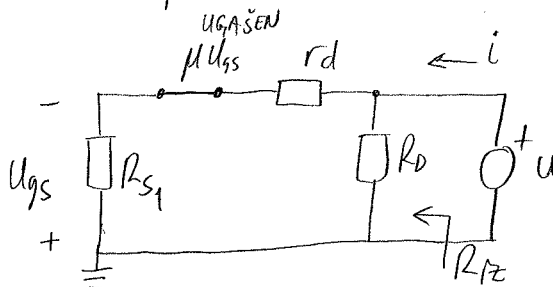
Ohmov zakon:

$$R_{iz} = \frac{U}{i}$$

→ pojednostavljena shema:



→ provjera postoji li izvor μU_{gs} :



→ ovoga puta napon U_{gs} nije nula kada ugasimo ovisni naponski izvor μU_{gs} koji se gašenjem kratko spaja, tako da ga pri proračunu izlaznog otpora MORAMO UZETI u obzir!

Konačna shema za R_{iz} :

za čvor D pišemo 1. KZ

$$\boxed{i = i_{RD} + i_d}$$

Vrijedi: $i_{RD} = \frac{u}{R_D}$ (1)

Петља(I): $-u + r_d \cdot i_d - \mu \cdot U_{gs} + i_d \cdot R_{s1} = 0$

$$i_d = \frac{u + \mu U_{gs}}{r_d + R_{s1}} \quad , \quad \boxed{U_{gs} = -i_d \cdot R_{s1}}$$

$$\rightarrow i_d = \frac{u - \mu \cdot i_d \cdot R_{s1}}{r_d + R_{s1}}$$

$$i_d [r_d + R_{s1}] = u - \mu \cdot i_d \cdot R_{s1}$$

$$i_d [r_d + (1 + \mu) R_{s1}] = u$$

$$i_d = \frac{u}{r_d + (1 + \mu) R_{s1}} \quad (2)$$

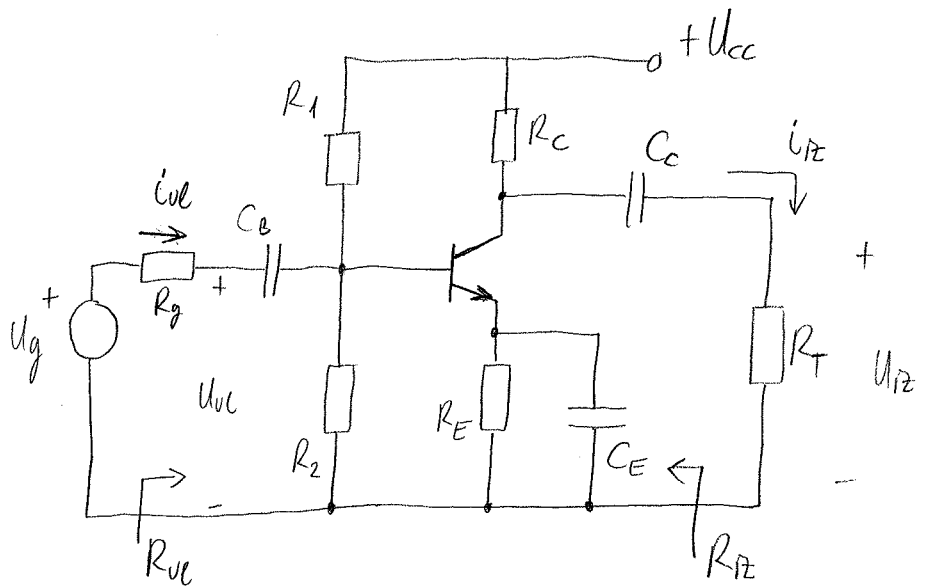
čvor D!!

$$\rightarrow i = (1) + (2) = \frac{u}{R_D} + \frac{u}{r_d + (1 + \mu) R_{s1}} \rightarrow \text{nađi odnos } \frac{u}{i}!$$

$$R_{iz} = \frac{u}{i} = \frac{1}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_d + (1 + \mu) R_{s1}}} = R_D \parallel [r_d + (1 + \mu) R_{s1}] = \underline{\underline{7,927 \text{ k}\Omega}}$$

definicija paralele!!

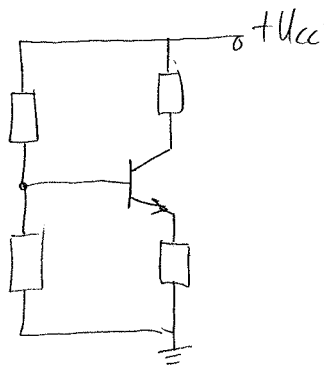
7.) $R_1 = 10\text{k}\Omega$
 $R_2 = 4,7\text{k}\Omega$
 $R_E = 820\Omega$
 $R_C = 1,5\text{k}\Omega$
 $R_T = 1,5\text{k}\Omega$
 $R_g = 50\Omega$
 $U_{CC} = 12\text{V}$
 $\beta \approx h_{FE} = 100$
 $U_g = 0,7\text{V}$
 $U_T = 25\text{mV}$



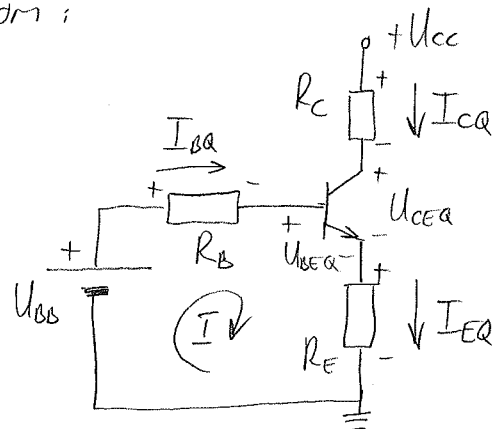
zanemariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području: $r_{ce} \rightarrow \infty$

a) STATIKA

→ početak statike za sklop s bipolarnim tranzistorom identičan je onom s MOSFET-om:



Thevenin



$$U_{BB} = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \underline{\underline{3,837\text{V}}}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \underline{\underline{3,197\text{k}\Omega}}$$

→ za razliku od MOSFET-a, ulazni napon u bipolarni tranzistor je poznat i iznosi $U_{BEQ} = U_g = \underline{\underline{0,7\text{V}}}$ što je ekvivalent naponu koljena kod klasičnog p-n spoja, što spoj baza-emiter i jest!!

→ druga stvar, struja u ulaznu stezaljku postoji!!

$$\underline{\underline{I_{BQ} \neq \phi}}$$

→ Iz petlje (I) imamo:

$$-U_{BB} + I_{BQ} \cdot R_B + U_{BEQ} + I_{EQ} \cdot R_E = 0$$

↳ Da bi izračunali I_{BQ} , fali nam još samo par stvari:

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

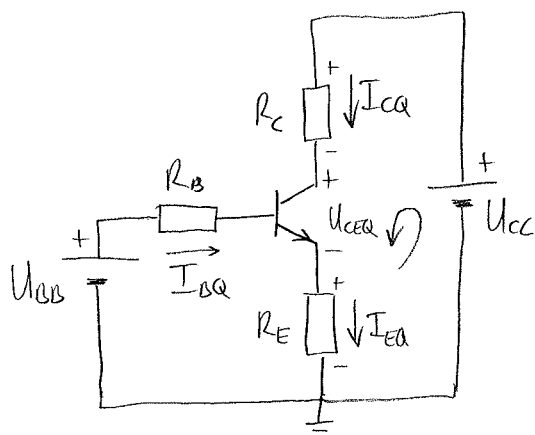
$$I_{EQ} = I_{BQ} + I_{CQ} \rightarrow I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ}$$

→ Dakle, vrijedi:

$$I_{BQ} = \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E} = \underline{\underline{36,47 \mu A}}$$

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = \underline{\underline{3,647 \text{ mA}}}$$

IZLAZNI KRUG:



$$-U_{CC} + I_{CQ} \cdot R_C + U_{CEQ} + I_{EQ} \cdot R_E = 0$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= U_{CC} - I_{CQ} \cdot R_C - I_{EQ} \cdot R_E \\ &= U_{CC} - \beta I_{BQ} \cdot R_C - (1 + \beta) I_{BQ} \cdot R_E \\ &= U_{CC} - I_{BQ} \cdot [\beta R_C + (1 + \beta) R_E] \end{aligned}$$

$$U_{CEQ} = \underline{\underline{3,51 \text{ V}}}$$

DINAMIČKI PARAMETRI:

Vrijede formule:

$$r_{be} = \frac{U_T}{I_{BQ}}$$

$$g_m = \frac{h_{fe}}{r_{be}}$$

$$r_{be} = \underline{\underline{685,5 \Omega}}$$

$$g_m = \underline{\underline{146 \text{ mA/V}}}$$

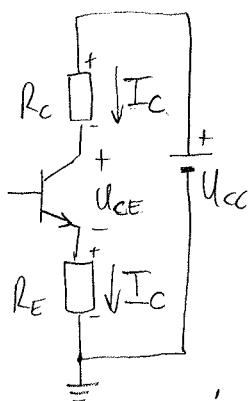
→ strmina kod bipolarnog tranzistora puno je veća od one kod MOSFET-a koja je bila $3 \div 5 \text{ mA/V}!!$

→ zbog toga se BJT očituje većim pojačanjima od MOSFET-a

b) STATIČKI I DINAMIČKI RADNI PRAVAC, MAKSIMALNI HOD IZLAZNOG SIGNALA ($U_{iz,max}$, $I_{iz,max}$) = ?

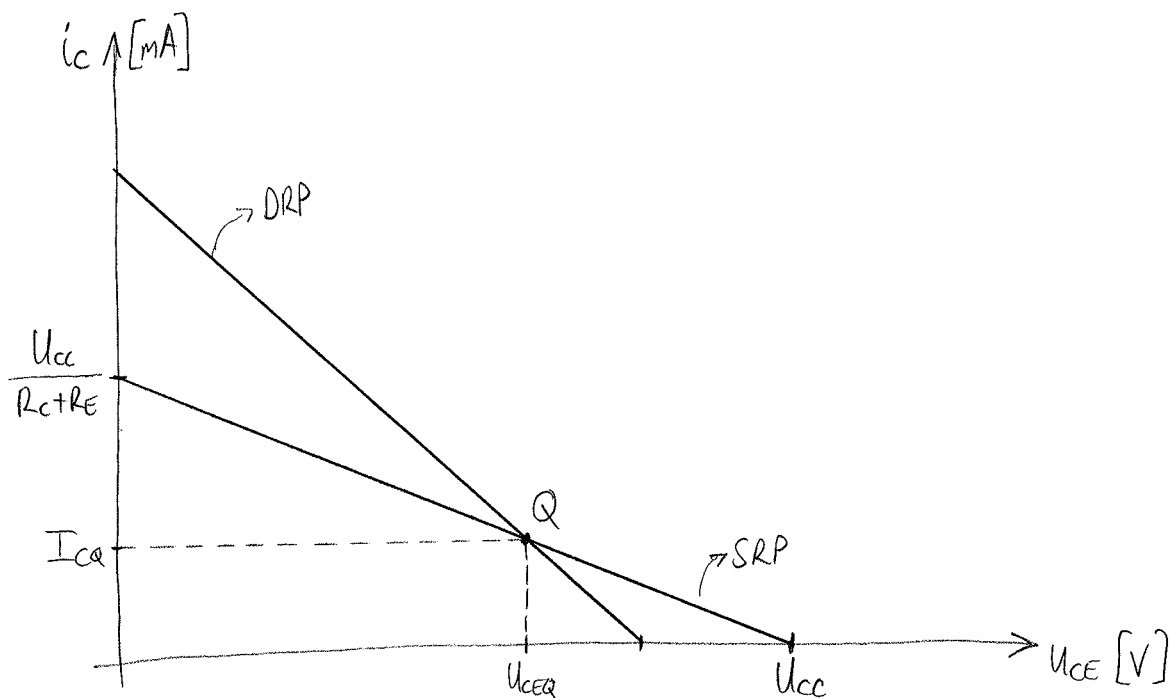
→ za potrebe ovog podzadatka iskoristiti ćemo pretpostavku da je $\beta \gg 1$ (što uvijek i jest $\rightarrow 100 \div 200$) s kojom možemo reći da su struje kroz kolektor i emiter približno jednake $I_E \approx I_C$.

SRP: (dobiva se iz izlaznog kruga statike)



$$\phi = -U_{CC} + I_C \cdot R_C + U_{CE} + I_C \cdot R_E$$

$$U_{CE} = U_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C \quad \underline{\underline{SRP}}$$



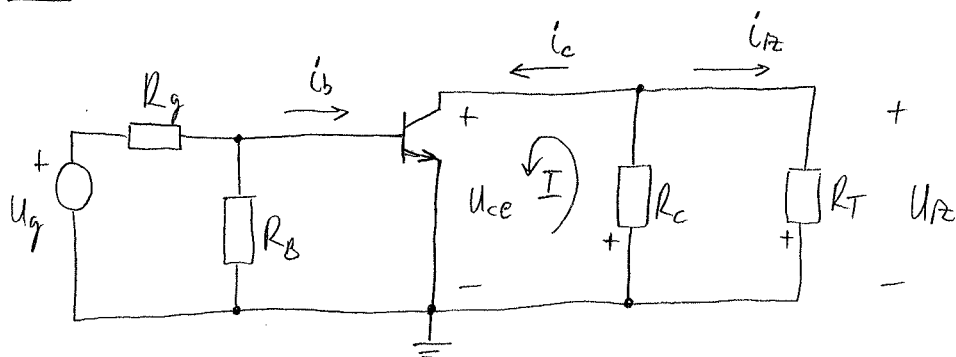
Sjecišta SRP-a nalaze se tako da izjednačimo U_{CE} i I_C s nulom:

$$\hookrightarrow \underline{I_C = 0} : U_{CE} = U_{CC} = \underline{\underline{12V}}$$

$$\hookrightarrow \underline{U_{CE} = 0} : I_C = \frac{U_{CC}}{R_C + R_E} = \underline{\underline{5,172 mA}}$$

$$\underline{\underline{nagib SRP-a}} : k = -\frac{1}{R_C + R_E} = -4,31 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\Omega} \text{ [Si]} \rightarrow \text{Siemens!}$$

DRP: crtam dinamičku shemu, ali OSTAVLJAM SIMBOL BJT-a !!!

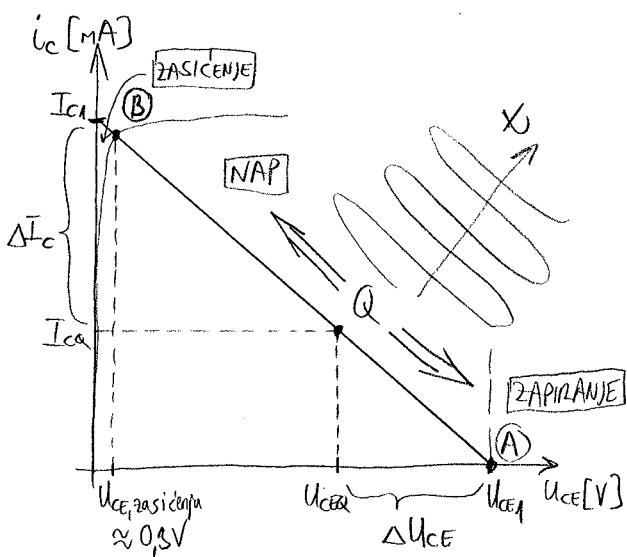


petlja (I): $U_{ce} + i_c \cdot (R_c \parallel R_L) = 0$

$$U_{ce} = - (R_c \parallel R_L) i_c \quad \underline{\underline{DRP}}$$

nagib DRP-a: $k = - \frac{1}{R_c \parallel R_L} = \frac{1}{750} = 1,33 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\Omega} [s]$

→ nagib DRP-a veći je od nagiba SRP-a, a njihovo sjecište je upravo STATIČKA RADNA TOČKA Q !!!



→ odsječak na osi apscisa od U_{ceQ} do sjecišta:

$$\Delta U_{ce} = (R_c \parallel R_L) \cdot I_{cq} = \underline{\underline{2,735 V}}$$

→ sjecište DRP-a s apscisom:

$$U_{ce1} = U_{ceQ} + \Delta U_{ce} = \underline{\underline{6,25 V}}$$

→ odsječak na osi ordinata od I_{cq} do sjecišta:

$$\Delta I_c = \frac{U_{ceQ}}{(R_c \parallel R_L)} = \underline{\underline{4,68 mA}}$$

→ sjecište DRP-a sa ordinatom:

$$I_{c1} = I_{cq} + \Delta I_c = \underline{\underline{8,327 mA}}$$

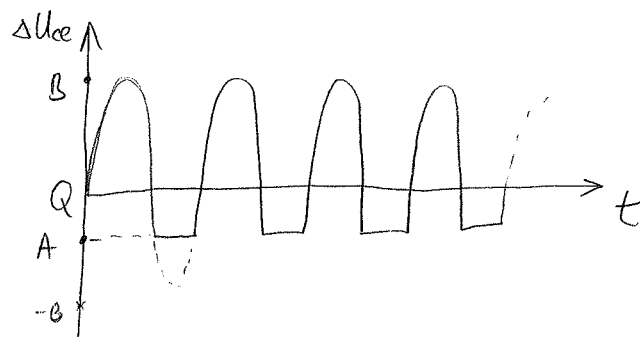
→ maksimalni hod napona U_{ce} ograničen je KRAĆOM udaljenošću do jedne od graničnih točaka A ili B:

A → granica NAP-a sa zapiranjem!

B → granica NAP-a sa zasićenjem!

→ ukoliko se izabere veća vrijednost, signal će s jedne strane biti izobličen („rezan“)

Primjer: ako se uzme hod napona do točke B:



→ odabiremo udaljenost do točke **(A)!!**

↳ maksimalni hod U_{ce} : $U_{ce,max} = U_{CE1} - U_{CEQ} = \underline{2,74V}$

↳ maksimalni hod I_c : $I_{c,max} = I_{CQ} - I_{cA} = \underline{3,647mA}$

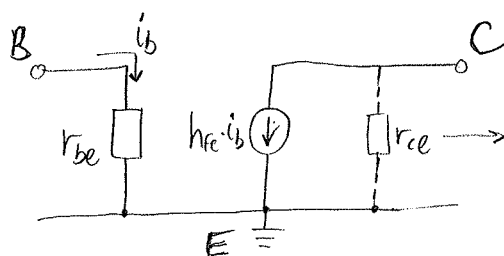
MAKSIMALNI HOD IZLAZNOG NAPONA I STRUJE:

$$U_{R,max} = U_{ce,max} = \underline{2,74V}$$

$$I_{R,max} = I_{c,max} \cdot \frac{R_c}{R_c + R_T} = \underline{1,8235mA} \quad \left(\begin{array}{l} \text{strujno djelilo na izlazu} \\ \text{(vidi shemu za dobivanje DRP-a)} \end{array} \right)$$

c) DINAMIKA: $A_{vq} = \frac{U_{Rq}}{U_{gq}} = ?$

↳ nadomjesna shema bipolarnog tranzistora (BJT-a) u dinamičkim prilikama:



→ najčešće zanemaren!
 $r_{ce} \rightarrow \infty$

CRTANJE DINAMIČKE SCHEME:

1. mačka ¹¹

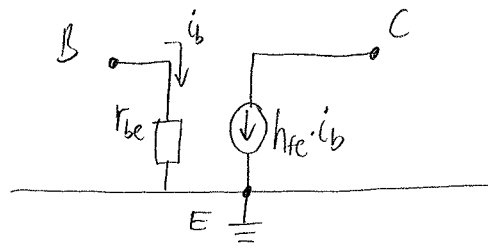
B

C

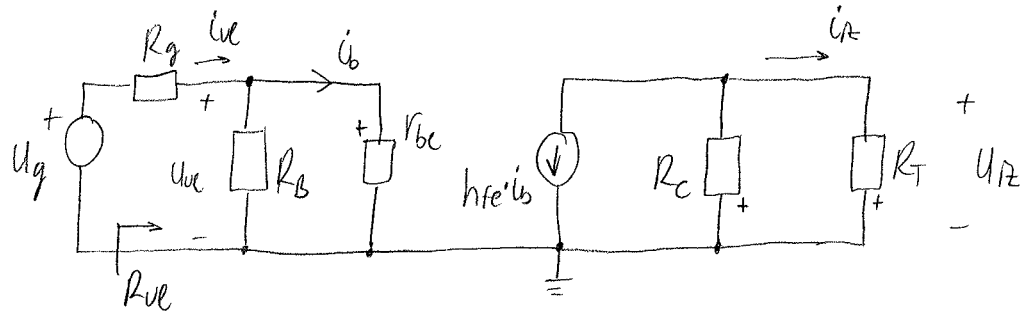
ulaz: B
izlaz: C



2. tranzistor



3. dinamička shema total \rightarrow izlaz zdesna, ulaz slijeva



DINAMIČKA ANALIZA:

$$U_{iz} = -h_{fe} \cdot i_b \cdot R_C \parallel R_T$$

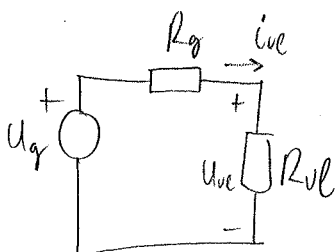
\rightarrow strujni izvor $h_{fe} \cdot i_b$ stvara obrnuti polaritet napona na paraleli $R_C \parallel R_T$ od U_{iz} pa zato predznak (-)

$$U_{ve} = i_b \cdot r_{be}$$

\rightarrow ulazni napon je na R_B , ali je također i na r_{be} !
A upravo struju koja kroz njega prolazi (i_b) moramo eliminirati, pa uzimamo upravo taj umnožak, a ne
 $U_{ve} = i_{R_B} \cdot R_B$!!

$$A_{vg} = \frac{U_{iz}}{U_g} = \frac{U_{iz}}{U_{ve}} \cdot \frac{U_{ve}}{U_g} = A_v \cdot \frac{U_{ve}}{U_g}$$

$$A_v = \frac{U_{iz}}{U_{ve}} = -h_{fe} \cdot \frac{R_C \parallel R_T}{r_{be}} = \underline{\underline{-109,41}}$$



$$U_{ve} = U_g \cdot \frac{R_{ve}}{R_{ve} + R_g} \rightarrow \frac{U_{ve}}{U_g} = \frac{R_{ve}}{R_{ve} + R_g}$$

$$R_{ve} = \frac{U_{ve}}{i_{ve}} = R_B \parallel r_{be} = \underline{\underline{564 \Omega}}$$

→ Konačno, slijedi:

$$A_{vq} = A_v \cdot \frac{U_{ve}}{U_g} = A_v \cdot \frac{R_{ve}}{R_{ve} + R_g} = \underline{\underline{-100,5}}$$

↳ kao što možemo vidjeti, BJT sklop ima puno veća pojačanja od sklopa s MOSFET-om !!

d) Odrediti signal generatora $U_{g,max}$ za koji se dobije maksimalni izlazni signal bez izobličenja!

↳ za ovaj podzadatak nam trebaju rezultati b) i d) podzadatka!

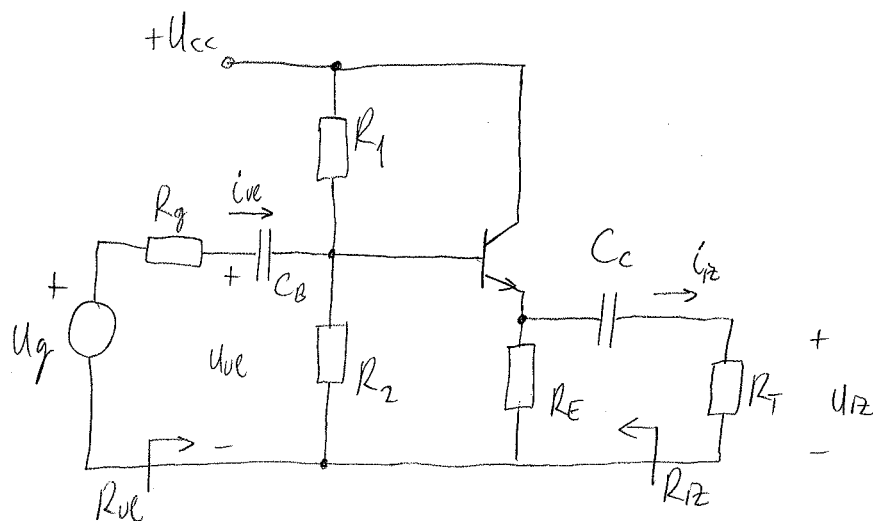
Mora vrijediti:

$$|A_{vq}| = \frac{|U_{iz}|}{|U_g|} = \frac{|U_{iz,max}|}{|U_{g,max}|}$$

$$U_{g,max} = \frac{U_{iz,max}}{|A_{vq}|} = \frac{2,74V}{100,5} = \underline{\underline{27,26 mV}}$$

→ ako pojačamo amplitudu napona generatora iznad 27,26 mV na izlazu će se pojaviti IZOBLIČENJA koja su prikazana u b) podzadatku.

8.) $U_{cc} = 12V$
 $R_g = 500\Omega$
 $R_T = 2k\Omega$
 $R_E = 3k\Omega$
 $\beta \approx h_{fe} = 100$
 $U_g = 0,7V$
 $r_{ce} \rightarrow \infty$
 $U_T = 25mV$



a) Zadano je naponsko pojačanje $A_V = 0,9896$, a treba odrediti R_1 i R_2 uz to da vrijedi: $R_2 = 2 \cdot R_1$
 Provjeri radi li tranzistor u NAP-u!

ZADATAK U RIKVERC :P

↳ Krećemo od dinamike:

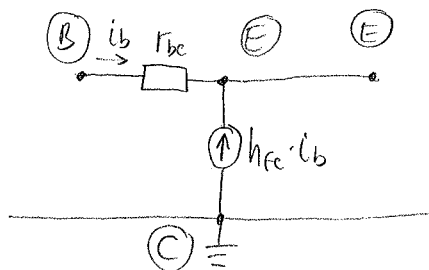
1. MAČKA 11:

B. E

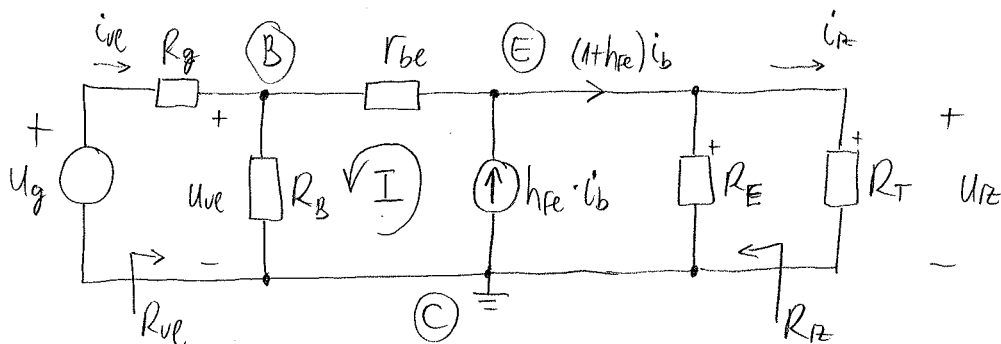
ULAZ: baza
IZLAZ: emiter



2. TRANZISTOR:



3. DINAMIČKA SCHEMA: IZLAZ ZDESNA, ULAZ SLIJEVA!

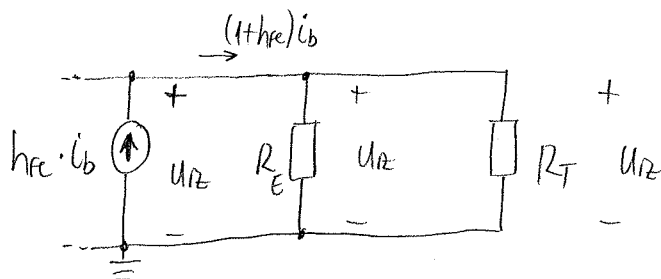


→ iz dinamičke analize pronalazimo r_{be} !!

$$A_V = \frac{U_{RZ}}{U_{ve}} = 0,9896$$

$$U_{RZ} = (1+h_{fe}) \cdot i_b \cdot R_E \parallel R_T$$

↳ taj napon također je i na ovisnom strujnom izvoru $h_{fe} \cdot i_b$:



Iz petlje (I) na dinamičkoj shemi dobivamo izraz za U_{ve}

$$(I) \quad U_{ve} - r_{be} \cdot i_b - U_{RZ} = \phi$$

$$U_{ve} = r_{be} \cdot i_b + U_{RZ} = r_{be} \cdot i_b + (1+h_{fe}) i_b \cdot R_E \parallel R_T$$

$$U_{ve} = i_b [r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T]$$

$$A_V = \frac{U_{RZ}}{U_{ve}} = \frac{(1+h_{fe}) \cancel{i_b} \cdot R_E \parallel R_T}{\cancel{i_b} \cdot [r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T]} = \frac{(1+h_{fe}) R_E \parallel R_T}{(1+h_{fe}) R_E \parallel R_T + r_{be}} = 0,9896 \quad \begin{matrix} \uparrow \\ \text{zadano!} \end{matrix}$$

$$[r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T] \cdot 0,9896 = (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T$$

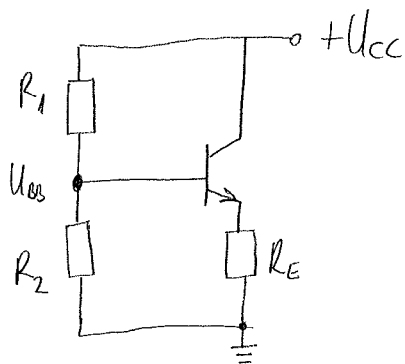
$$0,9896 \cdot r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T \cdot 0,9896 = (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T$$

$$r_{be} = \frac{(1+h_{fe}) R_E \parallel R_T \cdot [1 - 0,9896]}{0,9896} = \underline{\underline{1,274 \text{ k}\Omega}}$$

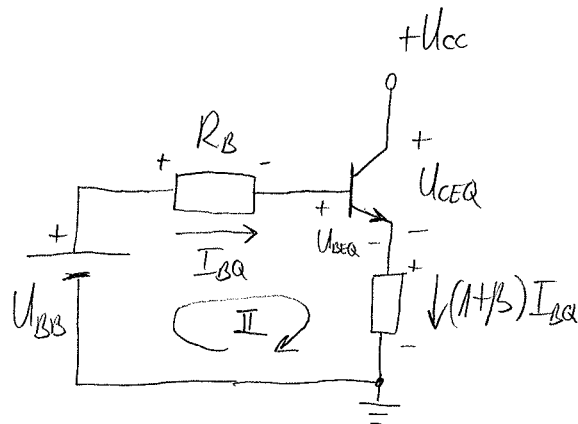
↳ Iz dobivenog r_{be} lako se računa statička struja baze I_{BQ} :

$$r_{be} = \frac{U_T}{I_{BQ}} \rightarrow I_{BQ} = \frac{U_T}{r_{be}} = \underline{\underline{19,63 \mu A}}$$

→ VRAĆAMO SE U STATIČKU ANALIZU:



Thevenin



Vrijedi: $U_{BEQ} = \underline{0,7V}$, $R_2 = 2R_1$

$$U_{BB} = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{CC} \cdot \frac{2R_1}{R_1 + 2R_1} = U_{CC} \cdot \frac{2}{3} = \underline{8V}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \cdot 2R_1}{R_1 + 2R_1} = \frac{2}{3} R_1$$

↳ iz petlje (II) dobivamo R_1 :

$$(II) - U_{BB} + R_B \cdot I_{BQ} + U_{BEQ} + (1+\beta)I_{BQ} \cdot R_E = 0$$

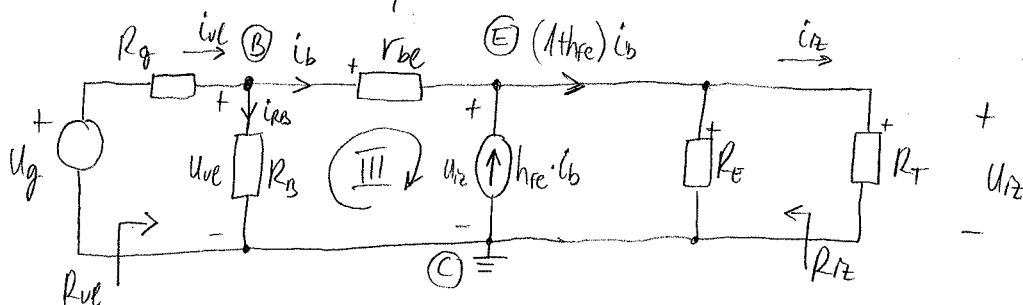
$$\frac{2}{3}R_1 \cdot I_{BQ} = U_{BB} - U_{BEQ} - (1+\beta)I_{BQ} \cdot R_E$$

$$R_1 = \frac{U_{BB} - U_{BEQ} - (1+\beta)I_{BQ} \cdot R_E}{\frac{2}{3} \cdot I_{BQ}} = \underline{\underline{103,32 \text{ k}\Omega}}$$

$$R_2 = 2 \cdot R_1 = \underline{\underline{206,64 \text{ k}\Omega}}$$

b) Ponovno dinamika: izvedi A_I , R_{ve} , R_{iz}

→ nacrtajmo ponovno shemu za dinamičku analizu (postupak opisan u a) podzadatku):



$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \underline{\underline{68,88 \text{ k}\Omega}}$$

Za strujno pojačanje vrijedi:

$$A_I = \frac{i_z}{i_{ve}} = \frac{\frac{u_z}{R_T}}{\frac{u_{ve}}{R_{ve}}} = \frac{u_z}{u_{ve}} \cdot \frac{R_{ve}}{R_T} = A_V \cdot \frac{R_{ve}}{R_T}$$

→ prvo moramo računati ulazni otpor R_{ve} :

u čvoru (B) vrijedi I. KZS:

$$\boxed{i_{ve} = i_b + i_{RB}}$$

→ treba izraziti i_b i i_{RB} pomoću u_{ve} i odgovarajućih otpora!

$$(1) \quad i_{RB} = \frac{u_{ve}}{R_B} \quad (\text{jednostavno, Ohmov zakon})$$

iz petlje (III) dobiva se:

$$(III): -u_{ve} + i_b \cdot r_{be} + u_z = 0 \quad (\text{ponovno vrijedi da se izlazni napon preslika skroz na ovisni strujni izvor } h_{fe} \cdot i_b !!)$$

$$-u_{ve} + i_b \cdot r_{be} + (1+h_{fe}) i_b \cdot R_E \parallel R_T = 0$$

$$i_b \cdot [r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T] = u_{ve}$$

$$(2) \quad i_b = \frac{u_{ve}}{r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T}$$

→ natrag u čvor (B):

$$i_{ve} = i_{RB} + i_b = (1) + (2) = \frac{u_{ve}}{R_B} + \frac{u_{ve}}{r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T}$$

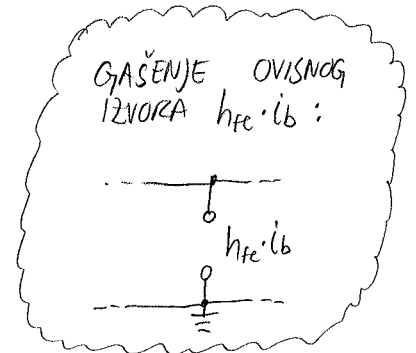
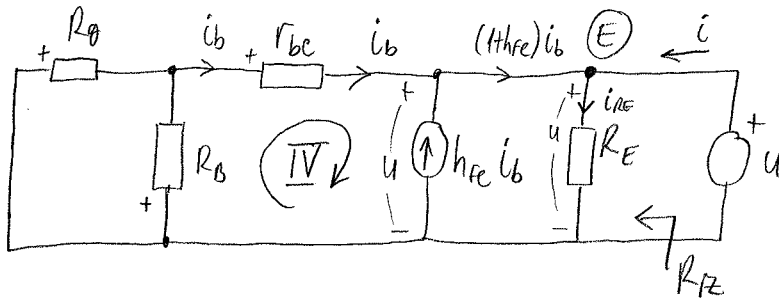
$$R_{ve} = \frac{u_{ve}}{i_{ve}} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T}} = R_B \parallel [r_{be} + (1+h_{fe}) R_E \parallel R_T] = \underline{\underline{446 \Omega}}$$

→ konačno, strujno pojačanje glasi:

$$A_I = \frac{i_z}{i_{ve}} = \frac{\frac{u_z}{R_T}}{\frac{u_{ve}}{R_{ve}}} = \frac{u_z}{u_{ve}} \cdot \frac{R_{ve}}{R_T} = A_V \cdot \frac{R_{ve}}{R_T} = \underline{\underline{21,8}}$$

IZLAZNI OTPOR R_{iz} :

→ gasim sve neovisne izvore i stavljam pomoćni naponski izvor u koji tjera struju i . Provjeravam postoji li parametar o kojem ovisi ovisni strujni izvor $h_{fe} \cdot i_b$, odnosno struja baze i_b . Ako postoji, moram ostaviti izvor u u analizi izlaznog otpora



→ ako ugasimo izvor $h_{fe} \cdot i_b$, struja i_b i dalje postoji jer izlazni i ulazni krug nisu odvojeni. Dakle, moramo koristiti $h_{fe} \cdot i_b$ u proračunu izlaznog otpora!

Za čvor (E) pišemo 1. KZS:

$$i_{RE} = i + i_b(1+h_{fe}) \rightarrow \boxed{i = i_{RE} - (1+h_{fe})i_b}$$

Također: $i_{RE} = \frac{u}{R_E}$ (1) (jednostavno, Ohmov zakon)

Iz petlje IV dobivamo:

$$(IV) \quad u + i_b \cdot r_{be} + i_b \cdot (R_g \parallel R_B) = 0 \rightarrow \text{struja } i_b \text{ stvara pad napona na paraleli } R_g \parallel R_B \text{ označenoj na shemi!!!}$$

$$i_b = - \frac{u}{r_{be} + (R_g \parallel R_B)} \quad (2)$$

→ natrag u čvor (E):

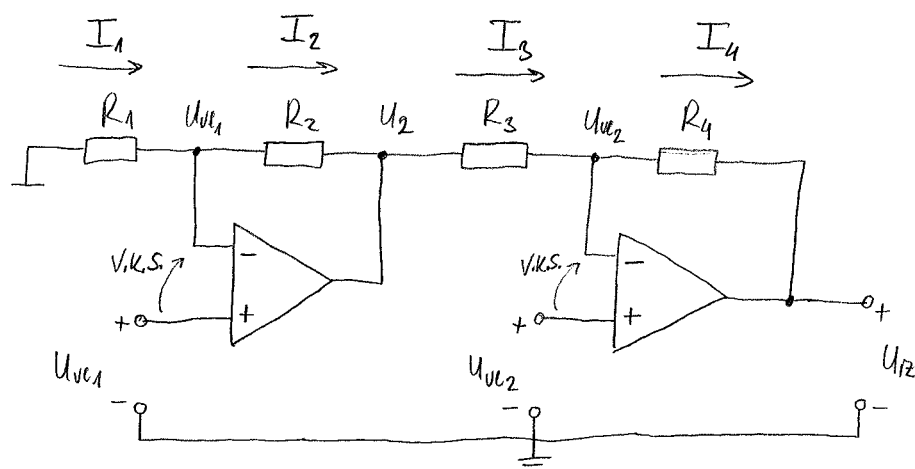
$$i = i_{RE} - i_b \cdot (1+h_{fe}) = (1) - (1+h_{fe}) \cdot (2) = \frac{u}{R_E} + (1+h_{fe}) \cdot \frac{u}{r_{be} + R_g \parallel R_B}$$

→ konačno, izlazni otpor glasi:

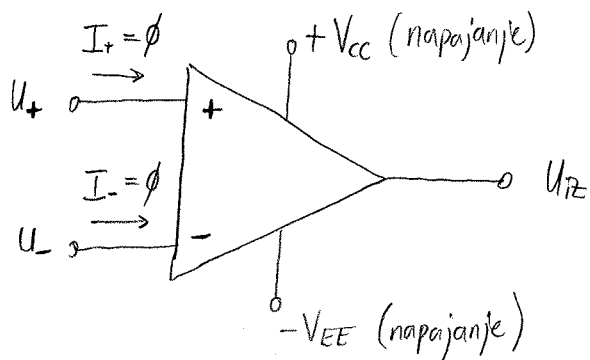
$$R_{iz} = \frac{u}{i} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1+h_{fe}}{r_{be} + R_g \parallel R_B}} = R_E \parallel \frac{r_{be} + R_g \parallel R_B}{(1+h_{fe})} = \underline{\underline{17,43 \Omega}}$$

↳ spoj zajedničkog kolektora ima JAKO MALI IZLAZNI OTPOR !!!

9.) Idealna, simetrično napajana operacijska pojačala



IDEALNO OPERACIJSKO POJAČALO:



$$R_{ve} = \infty$$

$$R_{iz} = 0$$

$$A_{v.o.p} = \infty$$

$$\left. \begin{array}{l} I_- = I_+ = 0 \\ U_+ = U_- \end{array} \right\} \text{ "VIRTUALNI KRATKI SPOJ" }$$

$$U_{iz} = A_v \cdot (U_+ - U_-)$$

U realnim slučajevima:

$$R_{ve} = 100 \text{ M}\Omega$$

$$R_{iz} = 0,1 \Omega$$

$$A_{v.o.p} = 10^6$$

→ u operacijsko pojačalo koje je idealno ne teče struja zbog beskonačnog ulaznog otpora koji ono ima.

a) Izračunaj ovisnost U_{iz} o ulazima ($U_{iz} = f[U_{ve1}, U_{ve2}]$)
 Pošto su OP-AMP idealna, vrijedi:

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = \frac{0 - U_{ve1}}{R_1} \\ I_2 = \frac{U_{ve1} - U_2}{R_2} \\ I_3 = \frac{U_2 - U_{ve2}}{R_3} \\ I_4 = \frac{U_{ve2} - U_{iz}}{R_4} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_1 = I_2 \\ I_3 = I_4 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} I_1 = \frac{0 - U_{ve1}}{R_1} \\ I_2 = \frac{U_{ve1} - U_2}{R_2} \\ I_3 = \frac{U_2 - U_{ve2}}{R_3} \\ I_4 = \frac{U_{ve2} - U_{iz}}{R_4} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{u idealno OP-AMP} \\ \text{ne teče struja!!} \end{array}$$

→ Iz prethodnog poteza dobivamo 2 jednačine s 2 nepoznanice:

$$(1) \frac{\phi - U_{ve1}}{R_1} = \frac{U_{ve1} - U_2}{R_2} \rightarrow \text{izrazi } U_2 \text{ pomoću } U_{ve1}$$

$$(2) \frac{U_2 - U_{ve2}}{R_3} = \frac{U_{ve2} - U_{Iz}}{R_4}$$

$$Iz (1): \frac{-U_{ve1}}{R_1} = \frac{U_{ve1} - U_2}{R_2}$$

$$-\frac{U_{ve1}}{R_1} = \frac{U_{ve1}}{R_2} - \frac{U_2}{R_2} \rightarrow \underline{U_2 = U_{ve1} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)} \rightarrow \text{ubaci u (2)}$$

$$Iz (2): \frac{U_2 - U_{ve2}}{R_3} = \frac{U_{ve2} - U_{Iz}}{R_4}$$

$$\left[U_{ve1} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{R_3} - \frac{U_{ve2}}{R_3} = \frac{U_{ve2}}{R_4} - \frac{U_{Iz}}{R_4}$$

$$U_{ve1} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 \cdot R_3} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{U_{ve2}}{R_3} - \frac{U_{ve2}}{R_4} = - \frac{U_{Iz}}{R_4}$$

$$- U_{ve1} \left(\frac{R_2}{R_1 \cdot R_3} + \frac{1}{R_3} \right) + U_{ve2} \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = \frac{U_{Iz}}{R_4} \quad / \cdot R_4$$

$$\underline{U_{Iz} = U_{ve2} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3} + 1 \right) - U_{ve1} \left(\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_1} + \frac{R_4}{R_3} \right)}$$

b) Izračunaj U_{ve2} , ako je zadano:

$$R_1 = 1,8 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 3,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 5,4 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 7,2 \text{ k}\Omega$$

$$U_{Iz} = 1 \text{ V}$$

$$U_{ve1} = 0,25 \text{ V}$$

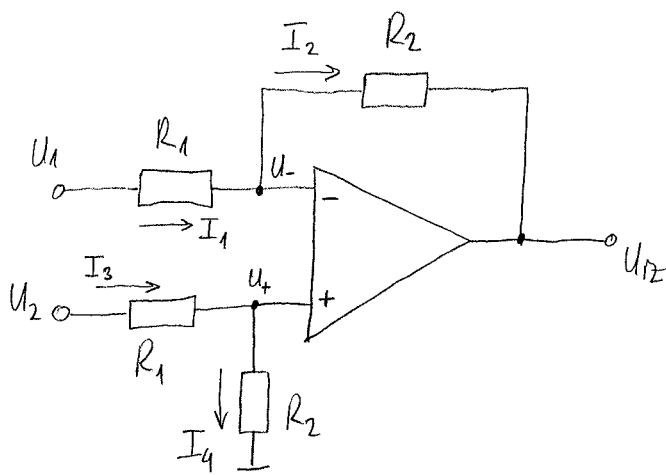
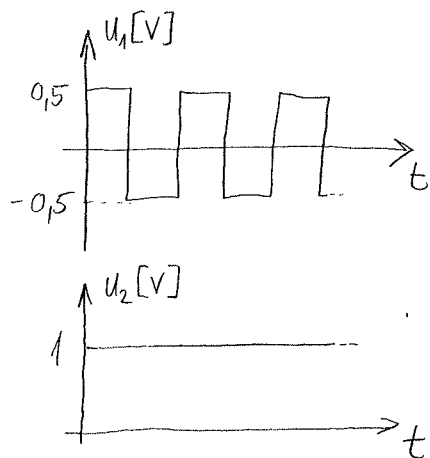
$$U_{ve2} = ?$$

$$U_{Iz} = U_{ve2} \left(\frac{R_4}{R_3} + 1 \right) - U_{ve1} \left(\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_1} + \frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$\hookrightarrow U_{ve2} = \frac{U_{Iz} + U_{ve1} \cdot \left(\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_1} + \frac{R_4}{R_3} \right)}{\frac{R_4}{R_3} + 1}$$

$$U_{ve2} = \frac{6}{7} \text{ V} = \underline{\underline{0,857 \text{ V}}}$$

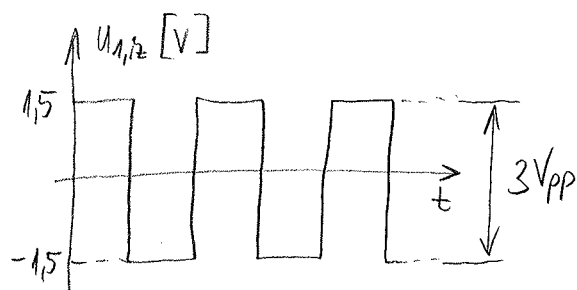
10. OP-AMP je idealno
 $R_1 = 1\text{ k}\Omega$



a) $R_2 = ?$ takav da u_{1z} bude $3V_{pp}$

↳ V_{pp} znači "voltage peak to peak", odnosno iznos razlike maksimalne i minimalne vrijednosti signala.

↳ Signal u_2 u ovom dijelu zadatka ne igra nikakvu ulogu, moramo postići da u_1 na izlazu izgleda na sljedeći način:



↳ Izvedimo najprije izraz za kompletni u_{1z} . Vrijedi:

(1) $I_1 = I_2$

$$I_z (1): \frac{u_1 - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_{1z}}{R_2}$$

(2) $I_3 = I_4$

$$\frac{u_1}{R_1} - \frac{u_-}{R_1} = \frac{u_-}{R_2} - \frac{u_{1z}}{R_2}$$

$$u_{1z} = u_- \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) - u_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$I_z (2): \frac{u_2 - u_+}{R_1} = \frac{u_+ - 0}{R_2}$$

$$\frac{u_2}{R_1} - \frac{u_+}{R_1} = \frac{u_+}{R_2} \rightarrow u_+ = u_2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$$

$$\begin{aligned} \hookrightarrow U_{Iz} &= U_- \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) - U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} \\ U_+ &= U_2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \end{aligned}$$

$$\boxed{U_+ = U_-} \quad \nabla$$

$$\begin{aligned} U_{Iz} &= U_2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \cdot \left(\frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) - U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} \\ &= U_2 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_1} - U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

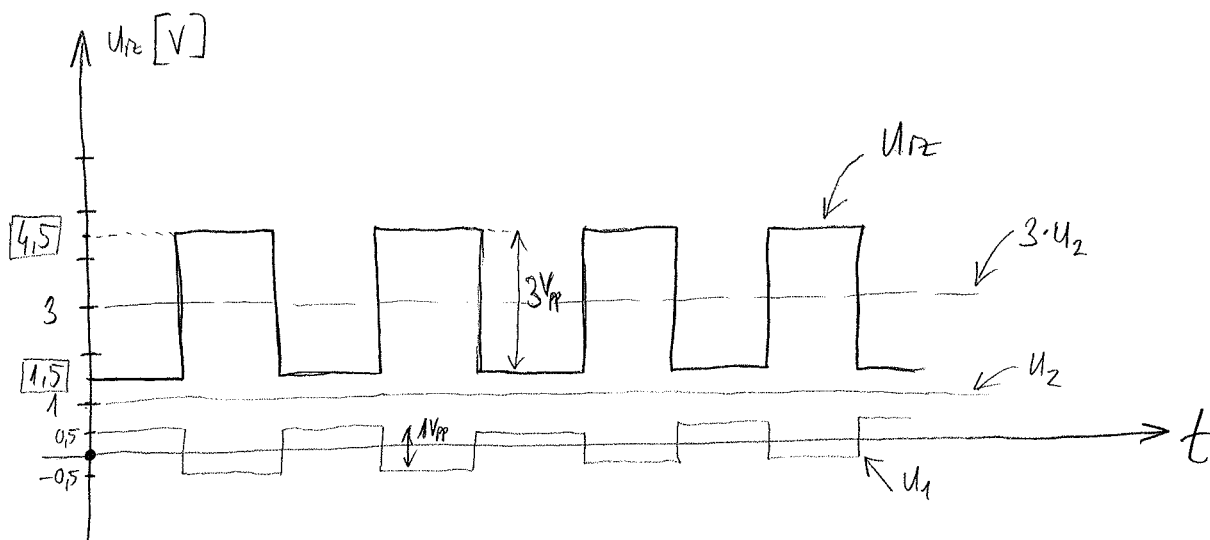
$$\underline{\underline{U_{Iz} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_2 - U_1)}}$$

→ član $-\frac{R_2}{R_1} U_1$ predstavlja izmjenični dio izlaznog napona. da bi on bio veličine $3V_{pp}$, R_2 mora biti 3 puta veći od R_1 (jer $U_1 = 1V_{pp}$)

$$\underline{\underline{R_2 = 3k\Omega}}$$

b) Valni oblik izlaznog napona U_{Iz} ?

$$U_{Iz} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_2 - U_1) = 3(U_2 - U_1) = \underline{\underline{3 \cdot U_2 - 3 \cdot U_1}}$$



→ zbog negativnog predznaka ispred U_1 u izrazu za izlazni napon, izmjenična veličina je obrnuta u fazi!