

# Vaje pri predmetu Elektronika za študente FMT

Andrej Studen

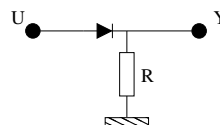
April 17, 2013

## 5.marec 2013

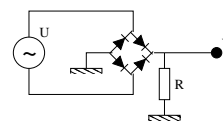
- Določi tok skozi 5 V baterijo, ko vežemo dva  $1k\Omega$  upornika
  - a) zaporedno ali
  - b) vzporedno
- Določi nadomestno upornost para upornikov z upornostjo R, ki ju vežemo
  - a) zaporedno [Sara Kebe], oziroma
  - b) vzporedno [Tadej Kirašič].
- Notranjo upornost in gonilno napetost baterije določimo tako, da nanjo najprej priključimo upor  $R_1=1\ \Omega$ , nato pa še upor  $R_2=2\ \Omega$ . V prvem primeru je tok  $I_1=3\ \text{A}$ , v drugem pa  $I_2=2\ \text{A}$ . Kolikšna je notranja upornost in kolikšna je gonilna napetost baterije? [Grega Horvat]
- Theveninov izrek: Kakšna je notranja upornost in gonilna napetost izvora napetosti, ki ga dobimo kot delilnik napetost s 5 V (idealne) baterije, na katero sta vezana upora 3 in 2 k $\Omega$ ? [Tjaš Savarin]
- Kakšna je notranja upornost in gonilna napetost atenuatorja  $\pi$ , ki ga dobimo, ko vanj sestavimo 47  $\Omega$ , 10 k $\Omega$  in 82  $\Omega$  upore, izvor napetosti pa ima gonilno napetost X in notranjo upornost 50  $\Omega$ ! [Anton Rovanshek] [Urban Malovič]

## 6. marec 2013

- Izrazi razmerje med vhodno in izhodno napetostjo v decibelih za atenuator  $\pi$  iz prejšnje naloge! [Jure Bijec]
- Določi napetost preko diode, ko teče preko nje tok 1, 10 oziroma 100 mA v prevodni smeri. [Žiga Čikič]
- Skiciraj napetost Y(t). Vhod  $U(t)=u(t)$  je sinusno nihanje z amplitudo 15 V. [Matej Knenjc]



- Diodni most. Skiciraj napetost  $Y(t)$ . Vhod  $U(t)=u(t)$  je sinusna izmenična napetost z amplitudo 15 V. [Grega Hrovat]

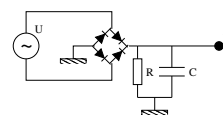


- Kakš se spreminja napetost na kondenzatorju, ki je vezan na napetostni izvor zaporedno z uporom R, ko vključimo napetostni izvor? [Jure Novak]

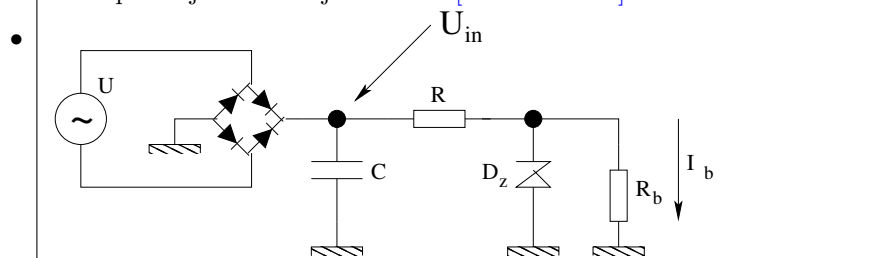
## 12. marec 2013

- Kako se spreminja napetost na kondenzatorju, ki vzporedno z uporom vezan na napetostni izvor, ko izvor izključimo? [Matjaž Kotar]

- Diodni most s kondenzatorjem. Skiciraj napetost  $Y(t)$ . Vhod  $U(t)=u(t)$  je še vedno sinusna izmenična napetost z amplitudo 15 V. Kakšen kondenzator moramo vzeti, če hočemo da je  $Y(t)$  vedno nad 12 V? Upor  $R=1\text{ k}\Omega$ , frekvenca izmenične napetosti je 50 Hz. [Marko Makuc]



Pred breme dodamo vzporedno vezano Zenerjevo diodo z napetostjo  $U_Z=10\text{ V}$ . Če naj bo tok skozi diodo vsaj  $I_{Z,\min}=10\text{ mA}$  - kakšen je največ lahko predupor R med kondenzatorjem in bremenom? Na bremenu teče tok med 0 in  $I_{b,\max}=100\text{ mA}$ , kondenzator pa nam zglati napetost  $U_{in}$  v območje med 20 in 25 V. Kakšna bo v najslabšem primeru moč, ki se porablja na Zenerjevi diodi? [David Resnik]



- Kakšna bo časovna slika signala z amplitudo 10 V, ko ga peljemo skozi varovalni diodi, priključeni na +5 oziroma -5 V? [Alen Bedek]

## 13. marec 2013

- Določi dinamično upornost diode, vezane zaporedno z uporom  $50\ \Omega$ , za majhne signale, naložene na nosilno napetost 0.1 oziroma 1 V! (To je enako kot iskanje amplitude sinusnega dela signala po prehodu skozi vezje)
- Izberi varovalni upor, da bo tok skozi diodo, ki jo napajamo s 3 V baterijo, pod 20 mA!
- Izrazi razmerje med vhodno in izhodno napetostjo v decibelih za napetostni merilnik z  $R_1=1\text{ k}\Omega, 10\text{ k}\Omega, 100\text{ k}\Omega, R_2=10\text{ k}\Omega$ !

- Pokaži frekvenčno odvisnost razmerja med amplitudo izhodnega in vhodnega signala za RC vezje! Načrtaj odvisnost razmerja v decibelih od logaritma produkta frekvence signala in RC konstante  $t = \log_{10}(\omega RC)$ ! Pojasni tehnični izraz -20 dB na dekada! [Tjaš Savarin]
- Naredi enako še za CR vezje! [Grega Horvat]

## 19. marec 2013

- In še za kombinacijo vezij CR-RC! Pri kateri frekvenci bo imelo to vezje najmanjšo slabitev? [Anton Rovansšek]
- Primerjaj log-log sliko (decibeli napram logaritmu  $\omega RC$ ) CR-RC vezja in RLC, R vezan zaporedno, L in C pa vzporedno proti zemlji, gledamo napetost za uporom napram zemlji! [Andreja Hiti]

## 26. marec 2013

- Od zadnjič: Kako bo širina prepustnega pasu vezja (frekvenčnega pasu kjer je  $A(\omega) \propto A_{\max}/\sqrt{2}$ ) odvisna od vrednosti komponent? [Matic Smodiš]
- Identificiraj kontakte tranzistorja in diode; za tranzistor določi tudi njegov tip! [Rok Zelinsček][Alen Bedek]
- Poveži tranzistorje na sliki s kontakti na bateriji, tako da bo skozi tranzistor tek tok! [David Resnik]
- Kako bodo naslednje napake vplivale na tok skozi tranzistor (pnp,  $R_B$ ,  $R_C$ ):
  - $R_B$  pregori, torej ne prevaja več toka
  - $R_C$  pregori
  - Imamo nam kratek stik preko  $R_B$  (recimo, zaradi napake pri lotanju)
  - Imamo kratek stik preko  $R_C$ .

[Andreja Hiti]

## 2. april

- Napetost na bazi npn tranzistorja spreminjamo od 0 do  $U_+ = 15$  V. Upor  $R_C = 1$  k $\Omega$ , upor  $R_E = 1$  k $\Omega$ . Kakšna bo napetost na kolektorju, kakšna na emitorju in kakšen tok bo tek skozi tranzistor? [Marko Mahne]

Kakšna bo notranja (Theveninova) upornost emitorskega sledilca. Upoštevaj:

- - Samo notranjo upornost izvora na bazi! [Jure Novak]
  - Tako upornost izvora na bazi kot upornost izvora, na katerega je priključen tranzistor!

Samo izvor ( $U_X, R_X$ ) na bazi:

$$U_{TH} = (U_X - 0.7) \cdot \left(1 - \beta \frac{R_X}{R_E}\right),$$

$$I_{TH} = \frac{U_X - 0.7}{R_X}$$

$$R_{TH} = \frac{R_X}{\beta}$$

Še izvor ( $U_+, R_+=R_C$ ) za tranzistor:

$$U_{TH} \text{ enaka, če } U_+ - R_C I_C > U_X - 0.7 \rightarrow \frac{R_C}{R_E} < \frac{U_+ - U_X + 0.7}{U_X - 0.7}$$

$$I_{TH} \text{ enak, če } U_+ - R_C \beta I_B > U_E \sim 0 \rightarrow \frac{R_C}{R_X} < \frac{1}{\beta} \frac{U_+}{U_X - 0.7}$$

Lahko pa se zgodi, da ima izvor  $U_+$  večjo notranjo upornost kot  $R_X/\beta$ ; takrat bo šel tranzistor v nasičenje, ko bomo računali Theveninov tok:

$$I_{TH} = \frac{U_+}{R_C} + \frac{U_X - 0.7}{R_X};$$

$$R_{TH} = \frac{R_C R_X (U_X - 0.7)}{R_X U_+ + R_C (U_X - 0.7)}$$

Ločimo dva primera;  $R_X/\beta < R_C < R_X$ . Takrat bomo zanemarili člen v imenovalcu ulomka za  $R_{TH}$  in je upornost izvora povezana z  $R_C$  namesto z  $R_X$ :

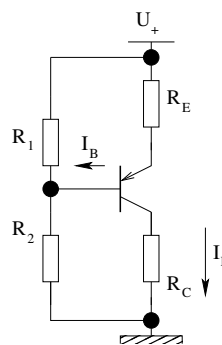
$$R_{TH} = \frac{R_C (U_X - 0.7)}{U_+} \left(1 - \frac{R_C (U_X - 0.7)}{R_X U_+}\right)$$

Lahko pa se nam zgodi še  $R_C > R_X$ , takrat nam emitorski sledilec ne pomaga, saj bo notranji upor kar  $R_X$ :

$$R_{TH} = R_X \left(1 - \frac{R_X U_+}{R_X U_+ + R_C (U_X - 0.7)}\right)$$

**Tokovni izvor:**

Določi  $R_1$  in  $R_2$  v delilniku napetosti za bazo, da bo skozi porabnik ( $R_C$ ) tek el tok 1 mA,  $U_+=15$  V in  $R_E=1$  k $\Omega$ . Pri izbiri  $R_1$  in  $R_2$  pazi, da bo bazni tok dovolj majhen v primerjavi s tokom skozi  $R_1$  in  $R_2$ ! Določi največjo upornost, pri kateri tokovni izvor še vedno deluje! [\[Grega Horvat\]](#)



Iz drugega stavka bomo sklepali, da je tok skozi bazo,  $I_B$  majhen. Potem bo napetost na bazi določena iz napetostnega delilnika  $R_1$  in  $R_2$ :

$$U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_+$$

Tok skozi breme bo  $I_L=I_C=I_E-I_B$ ; ob majhnem  $I_B$  bo  $I_L=I_E$  in zaradi Ohmovega zakona:

$$I_E = \frac{U_+ - (U_B + 0,7)}{R_E} \rightarrow U_B = U_+ - R_E I_L - 0,7 = 13,3 \text{ V}$$

Lahko izberemo poljuben par  $R_1$  in  $R_2$ , tako da bomo zadostili prvi enačbi. Ena izbira bi bila  $R_2=1,33 \text{ M}\Omega$ ,  $R_1=170 \text{ k}\Omega$ . Takrat teče skozi  $R_1$  tok

$$I_1 = \frac{U_+ - U_B}{R_1} = 0,01 \text{ mA},$$

tok skozi bazo pa je  $I_B=I_C/\beta \sim 0,01 \text{ mA}$ , in ni več majhen v primerjavi z  $I_1$ , zato enačba z delilnikom napetosti ne velja več! Lahko sicer izračunamo  $U_B$  tudi z upoštevanjem  $I_B$ , no lahko pa izberemo take upore  $R_1$  in  $R_2$ , da bo  $I_1 \gg I_B$ . Že red velikosti *manjša* upora,  $R_2=133 \text{ k}\Omega$  in  $R_1=17 \text{ k}\Omega$  bosta dala

$$I_1 (R_1 = 17 \text{ k}\Omega) = 0.1 \text{ mA}$$

Skozi upor  $R_C$  bo tekel tok 1 mA, dokler bo  $U_C < U_E$  (pnp!). Upornik:

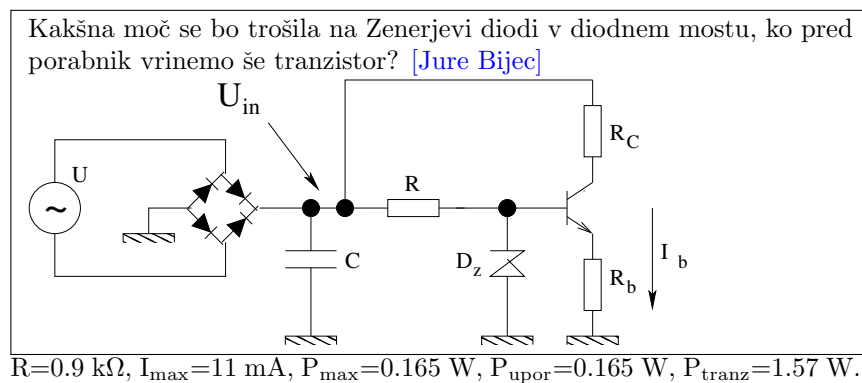
$$R_C = \frac{U_E}{I_L} = 14 \text{ k}\Omega$$

bo *največji*, pri katerem bo to še veljalo. Za upore, večje od mejnega, bo tranzistor v nasičenju, ob predpostavki  $R_1, R_2 \ll R_C, R_E$  (malce ostrejšje kot prej!), bo

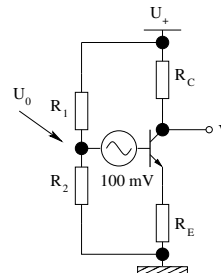
$$I_L = \frac{U_B + 0,7}{R_C}$$

## 16. april

- Določi še največji upornik, pri katerem bo tekel navedeni tok in nariši odvisnost toka od upornosti bremena![\[Rovanšek\]](#)



Določi upornika  $R_1$  in  $R_2$ , ter  $R_C$  in  $R_E$ , da bo amplituda izmenične napetosti na izhodu (V) enaka 1 V! Pri  $R_E=1\text{ k}\Omega$ , določi največji tok, ki teče skozi izvor izmenične napetosti. [Jure Novak]



Če je tok skozi bazo dovolj majhen, bo  $U_0$  kar napetost napetostnega delilnika:

$$U_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_+$$

Levi konec napetostnega izvora bo tako na dobro določeni napetosti, desnega pa bo izvor premikal; veljalo bo:

$$U_B = U_0 + U_x \sin \omega t$$

kjer je  $U_X$  amplituda napetostnega izvora, 100 mV,  $\omega$  pa je njegova krožna frekvenca. Potencial  $U_B$  je sestavljen iz časovno neodvisnega dela, premika  $U_0$ , ki mu včasih rečemo tudi *delovna napetost*, in časovno spremenljivega dela, signala. Potem bo:

$$U_E = U_B - 0,7 = U_0 - 0,7 + U_X \sin \omega t$$

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{U_0 - 0,7}{R_E} + \frac{U_X}{R_E} \sin \omega t$$

Ob majhnem  $I_B$  bo  $I_C \approx I_E$ :

$$I_C = \frac{U_0 - 0,7}{R_E} + \frac{U_X}{R_E} \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} U_C &= U_+ - R_C I_C \\ &= U_+ - \frac{R_C}{R_E} (U_0 - 0,7) - \frac{R_C}{R_E} U_X \sin \omega t \end{aligned}$$

Napetost na izhodu  $V=U_C$  bo torej:

$$V = V_0 + V_X \sin(\omega t - \delta)$$

z delovno napetostjo:

$$V_0 = U_+ - \frac{R_C}{R_E} (U_0 - 0,7),$$

in amplitudo signala:

$$V_X = \frac{R_C}{R_E} U_X$$

Negativni znak pred časovno odvisnim delom predelamo v fazni zamik  $\delta=\pi$ . Hkrati rečemo, da je ojačevalec s skupnim emitorjem invertirajoči ojačevalec.

Nazaj k nalogi. Iz pogoja  $V_X=1$  V bo:

$$\frac{R_C}{R_E} = \frac{V_X}{U_X} = 10$$

da pa bodo veljale predpostavke (predvsem tista o majhnem baznem toku), pa mora veljati:

$$\begin{aligned} U_C &> U_E \\ V_0 + V_X \sin(\omega t - \delta) &> U_0 - 0,7 + U_X \sin \omega t \\ \min\left(V_0 + V_X \sin(\omega t - \delta)\right) &> \max\left(U_0 - 0,7 + U_X \sin \omega t\right) \\ V_0 - V_X &> U_0 - 0,7 + U_X \\ U_+ - \frac{R_C}{R_E}(U_0 - 0,7) - \frac{R_C}{R_E}U_X - U_X &> U_0 - 0,7 \\ U_+ - 11U_X &> 11(U_0 - 0,7) \\ U_0 &< \frac{U_+}{11} - U_X + 0,7 = 1,97 \text{ V} \end{aligned}$$

Seveda mora veljati tudi:

$$\begin{aligned} U_C &< U_+ \\ \max\left(V_0 + V_X \sin(\omega t - \delta)\right) &< U_+ \\ V_0 + V_X &< U_+ \\ U_+ - \frac{R_C}{R_E}(U_0 - 0,7) + \frac{R_C}{R_E}U_X &< U_+ \\ U_0 - 0,7 &> U_X \\ U_0 &> U_X + 0,7 = 0,8 \text{ V} \end{aligned}$$

Torej lahko za  $U_0$  izberemo poljubno napetost med 0,8 V in 1,97 V. Izberemo povprečje, vendar s tem ne izključujemo pravilnosti katerekoli vrednosti v tem intervalu. Ob  $U_0=1,4$  V pa bo:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1,4}{15}$$

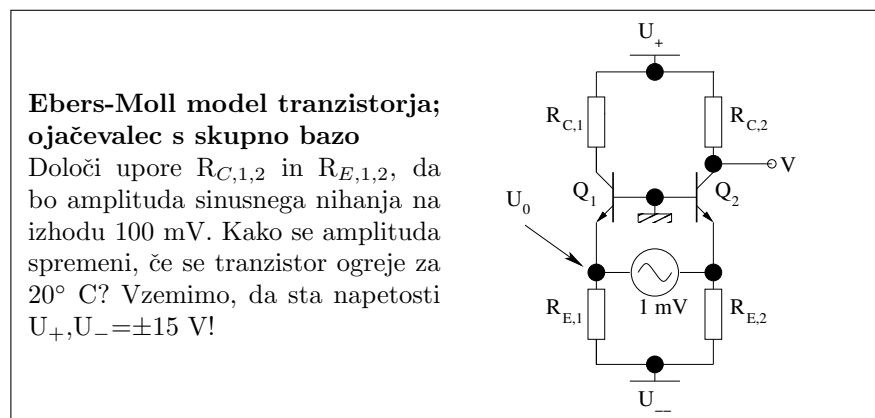
Recimo, da izberemo  $R_E=1$  k $\Omega$ . Potem bo:

$$\begin{aligned} R_C &= 10 \text{ k}\Omega & R_C &= \frac{R_C}{R_E} 1 \text{ k}\Omega \\ R_1 &= 13,6 \text{ k}\Omega & R_1 &\approx 10R_E \\ R_2 &= 1,4 \text{ k}\Omega & \frac{R_2}{R_1 + R_2} &= \frac{1,4}{15} \\ I_E &= 0,7 \pm 0,1 \text{ mA} & I_E &= \frac{U_E}{R_E} = \frac{U_0 - 0,7}{R_E} \pm \frac{U_X}{R_E} \\ I_2 &= 1 \text{ mA} & & \\ I_B &= 0,007 \pm 0,001 \text{ mA} & I_B &= I_E/\beta \end{aligned}$$

Tok skozi napetostni izvor izmenične napetosti bo tako vedno manjši od 0,008 mA.

??

- Določi tok skozi izvor napetosti (glej prejšnjo nalogo)!



Napetosti na bazah tranzistorjev  $Q_1$  in  $Q_2$  sta enaki, obe sta 0 V napram zemlji. Zato bo  $U_0 = -0,7 \text{ V}$ . Poskrbimo, da bo tok skozi  $Q_1 \gg$  tok skozi  $Q_2$ . Potem bo tok na povezavi, ki gre skozi izvor izmenične napetosti majhen in bo levi krak izvora zasidran na  $U_0$ , desni krak pa bo nihal okrog njega z amplitudo  $U_X = 1 \text{ mV}$ . Napetost na emitorju  $Q_2$  bo tako:

$$U_{E,2} = U_0 + U_X \sin \omega t$$

Po Ebers-Mollu bo emitorski tok skozi desni tranzistor  $I_{E,2}$  povezan z napetostjo med bazo in emitorjem:

$$I_{E,2} = I_{ES,2} \left( e^{\frac{U_{BE,2}}{U_T}} - 1 \right)$$

Kot pri diodi, je saturiran tok  $I_{ES,2}$  reda velikosti fA-pA, in ob  $U_{BE} \sim 0,7 \text{ V}$  velja:

$$\frac{U_{BE,2}}{U_T} \gg 1 \rightarrow I_{E,2} = I_{ES,2} e^{\frac{U_{BE,2}}{U_T}}$$

Poglejmo, kako je z  $U_{BE,2}$ :

$$U_{BE,2} = U_{B,2} - U_{E,2} = 0 - U_0 - U_X \sin \omega t$$

Torej bo tok nekaj takega:

$$I_{E,2} = I_{ES,2} e^{-\frac{U_0}{U_T}} e^{-\frac{U_X}{U_T} \sin \omega t}$$

Funkcija  $\exp(A \sin \omega t)$  je dokaj zlobna zadeva, no k sreči je konstanta A dovolj majhna, da lahko uporabimo Taylorjevo vrsto:

$$e^x = 1 + x + \mathcal{O}(x^2),$$



torej:

$$I_{E,2} = I_{ES,2} e^{-\frac{U_0}{U_T}} \left(1 - \frac{U_X}{U_T} \sin \omega t\right) = I_{E,2,0} + \Delta I_{E,2} \quad (1)$$

Za lažjo ponazoritev si lahko mislimo, da bo dodaten tok  $\Delta I_{E,2}$  nastal kot posledica povečanja padca napetosti na virtualnem, dinamičnem uporu  $r_E$  med bazo in emitorjem, ki ga upoštevamo le za majhne signale naložene vrh konstantne napetosti  $U_0$ :

$$\Delta I_{E,2} = \frac{\Delta U_{BE,2}}{r_E} \quad (2)$$

pri čemer je v našem primeru:

$$\Delta U_{BE,2} = U_{BE,2} - (-U_0) = -U_X \sin \omega t$$

in iz primerjave izrazov v (1) in definicije  $r_E$  (2) dobimo:

$$\Delta I_{E,2} = -I_{E,2,0} \frac{U_X}{U_T} \sin \omega t \quad \rightarrow \quad r_E = \frac{\Delta U_{BE,2}}{\Delta I_{E,2}} = \frac{U_T}{I_{E,2,0}}$$

kjer je  $I_{E,2,0}$  kar tok, ki teče skozi  $Q_2$ , če imamo namesto izvora izmenične napetosti kar kratkostično povezavo med emitorjema  $Q_1$  in  $Q_2$ . Na izhodu  $V$ , ki je  $U_{C,2}$ , bo napetost:

$$\begin{aligned} V = U_{C,2} &= U_+ - R_{C,2} I_{C,2} = U_+ - R_{C,2} I_{E,2} = U_+ - R_{C,2} I_{E,2,0} - R_{C,2} \Delta I_{E,2} \\ &= U_{C,2,0} - \frac{R_{C,2}}{r_E} \Delta U_{BE,2} \\ &= U_{C,2,0} + \frac{R_{C,2}}{r_E} U_X \sin \omega t \end{aligned}$$

Da bo torej amplituda 100 mV, bo moral biti  $R_{C,2}$ :

$$R_{C,2} = 100 r_E = 100 \frac{U_T}{I_{E,2,0}}$$

Denimo, da je  $I_{E,2,0} = 1$  mA. Potem bo veljalo za  $R_{E,2}$ :

$$I_{E,2,0} = \frac{U_0 - U_-}{R_{E,2}} \quad \rightarrow \quad R_{E,2} = \frac{14,3 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 14,3 \text{ k}\Omega$$

Ob  $U_T = 0,025$  V pri 300 K,

$$R_{C,2} = 100 \frac{0,025 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 2,5 \text{ k}\Omega$$

Preverimo še  $U_{C,2,0}$ :

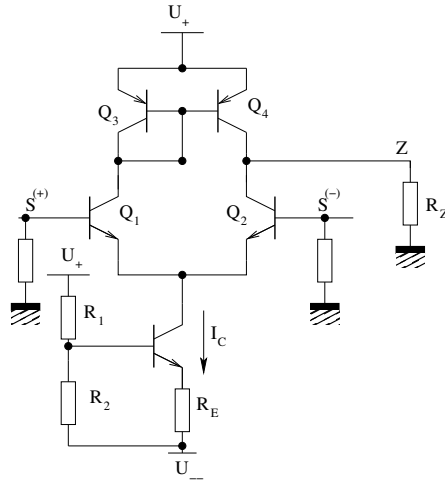
$$U_{C,2,0} = U_+ - R_{C,2} I_{E,2,0} = 15 \text{ V} - 2,5 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ mA} = 12,5 \text{ V}$$

kar postavlja tranzistor v pravilno območje delovanja ( $U_{C,2} > U_{E,2}$ ), tako da vse zgornje trditve držijo.

*Preprosta rešitev, ki ne upošteva premika  $U_0$  zaradi hkratnega gretja obeh tranzistorjev!* Ko segrejemo tranzistor za 20° C, bo  $r_E$  zrasel za 10%. Ker se  $R_{C,2}$  ne spreminja s temperaturo, bo tudi ojačanje manjše za taistih 10 %!

?? april

Določi upore  $R_E$ ,  $R_1$  in  $R_2$ , da bo izhodni signal  $Z$  za  $100 \times$  povečana razlika med (majhnima) signaloma  $S^{(+)}$  in  $S^{(-)}$ ! Upor  $R_Z$  je enak  $50 \Omega$ , napajalni napetosti  $U_{\pm} = \pm 15 \text{ V}$ .



Določi odvisnost spreminjanja toka  $I_{DS}$  v odvisnosti od  $U_{DS}$  za majhne napetosti  $U_{DS}$ . Predpostavi kvadratično odvisnost do meje  $U_{DS} = U_{GS} - U_T = \Delta$  in konstanten tok  $I_{DS} = k(U_{GS} - U_T)^2$  za večje napetosti  $U_{DS}$ .

Določi upor  $R_S$ , da bo tokovni izvor iz n-kanalnega JFET požiral tok  $1 \text{ mA}$ . Podatki za tranzistor  $I_{DSS} = 0.5 \text{ mA}$ ,  $U_T = -2 \text{ V}$ .