

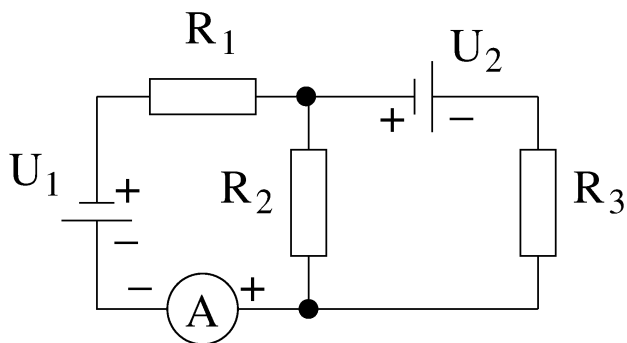
# Vaje pri predmetu Elektronika za študente FMT

Andrej Studen  
2015

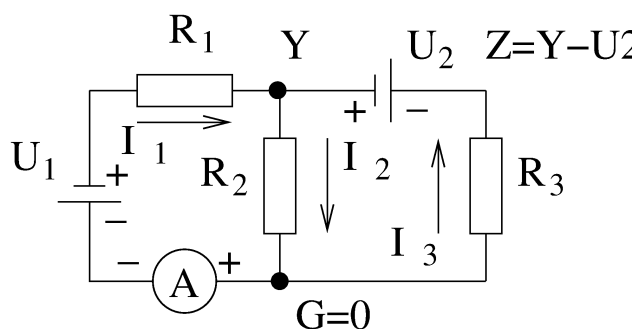
29. januar 2016

## 1 Napetost in tok, Theveninov zakon

1. Določi tok skozi 5 V baterijo, ko vežemo dva  $1k\Omega$  upornika
  - a) zaporedno ali
  - b) vzporedno
2. Določi nadomestno upornost para upornikov z upornostjo  $R$ , ki ju vežemo
  - a) zaporedno, oziroma
  - b) vzporedno.
3. Ohmov zakon: Določi tok, ki teče skozi ampermeter na sliki? Podatki  $U_1=5\text{ V}$ ,  $U_2=3\text{ V}$ ,  $R_1=32\ \Omega$ ,  $R_2=15\ \Omega$ ,  $R_3=72\ \Omega$ .



**Rešitev** To nalogo se da rešiti na tri načine. Ilustriram samo za prvi del naloge. Tokovi tečejo v smereh označenih na skici.



- Kirchoffov izrek za napetosti. Izvor  $U_1$ , upor  $R_1$  in  $R_2$  sestavljajo električni krog, zato bo vsota padcev napetosti na uporih enaka gonilni napetosti. Podobno velja za  $U_2$ ,  $R_2$  in  $R_3$ . Poleg tega imamo še Kirchoffov izrek za tokove v točki Y -  $I_1 + I_3 = I_2$ , kjer smo upoštevali, da je tok skozi upor  $R_3$  in napetostni izvor  $U_2$  enak. Imamo torej sistem treh enačb s tremi neznankami ( $I_1, I_2, I_3$ ):

$$U_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 = 0 \quad (1)$$

$$U_2 - R_2 I_2 - R_3 I_3 = 0 \quad (2)$$

$$I_1 + I_3 = I_2 \quad (3)$$

Zdaj rešimo za  $I_1$ :

$$(1) : R_2 I_2 = U_1 - R_1 I_1 \text{ in } (2) : R_2 I_2 = U_2 - R_3 I_3 \rightarrow U_1 - R_1 I_1 = U_2 - R_3 I_3$$

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 = U_1 - U_2 \quad (*)$$

$$(1) : R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_1 \text{ in } (3) : I_2 = I_1 + I_3 \rightarrow R_1 I_1 + R_2 (I_1 + I_3) = U_1$$

$$(R_1 + R_2) I_1 + R_2 I_3 = U_1 \quad (o)$$

$$(*) \cdot R_2 / R_3 \rightarrow \frac{R_1 R_2}{R_3} I_1 - R_2 I_3 = \frac{R_2}{R_3} (U_1 - U_2)$$

$$(*) \cdot R_2 / R_3 + (o) \rightarrow (R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}) I_1 = U_1 + \frac{R_2}{R_3} (U_1 - U_2)$$

$$\frac{32 \cdot 15}{72} = 6.7 \quad (32 + 15 + \frac{32 \cdot 15}{72}) \Omega I_1 = (5 + \frac{15}{72} (5 - 3)) V$$

$$(53.7 \Omega) I_1 = 5.42 V \rightarrow I_1 = \frac{5.42}{53.7} A = 101 \text{ mA}$$

- Kirchoffov izrek za tokove in Ohmov zakon. Postavimo še potencial točke G na 0, kot kaže slika, Y pa je hkrati ime in potencial točke Y. Premisliti velja še, da bo tok skozi napetostni izvor  $U_2$  enak toku  $I_3$  (Kirchoff za tokove v točki Z) in da bo potencial točke  $Z=Y-U_2$ . Začnemo s (3) prejšnje naloge in tokove napišemo kot razliko potencialov deljeno z upornostjo:

$$I_1 + I_3 = I_2 \quad (4)$$

$$\frac{U_1 - Y}{R_1} + \frac{0 - (Y - 3)}{R_3} = \frac{Y}{R_2} \quad (5)$$

Kar rešimo za Y:

$$\begin{aligned} \frac{U_1 - Y}{R_1} + \frac{3 - Y}{R_3} &= \frac{Y}{R_2} \rightarrow Y \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_3} \\ Y \left( \frac{1}{72} + \frac{1}{32} + \frac{1}{15} \right) \frac{1}{\Omega} &= \left( \frac{5}{32} + \frac{3}{72} \right) \frac{V}{\Omega} \rightarrow Y \frac{20 + 45 + 96}{1440} = \frac{5 \cdot 45 + 3 \cdot 20}{1440} V \\ Y &= \frac{285}{161} V = 1.77 V \end{aligned}$$

Tok pa je  $I_1 = (U_1 - Y)/R_1 = 3.23 V/32 \Omega = 101 \text{ mA}$  (enako kot prej). Iz akademskih razlogov bomo pokazali, da pridemo do povsem iste enačbe za tok:

$$\begin{aligned} R_1 I_1 &= U_1 - Y = U_1 - \frac{\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{U_1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} + \frac{U_1}{R_3} - \frac{U_2}{R_3} \\ R_1 I_1 &= \frac{U_1 + \frac{R_2}{R_3}(U_1 - U_2)}{\frac{R_2}{R_1} + 1 + \frac{R_2}{R_3}} \rightarrow I_1 = \frac{U_1 + \frac{R_2}{R_3}(U_1 - U_2)}{R_2 + R_1 + \frac{R_1 R_2}{R_3}}, \end{aligned}$$

kar pa je enako kot poprej.

- Tretji način pa je tako imenovana superpozicija. Najprej določimo tok, ki ga skozi  $R_1$  poriva  $U_1$ , potem pa še prispevek baterije  $U_2$ . Ko računam prispevke posamezne baterije, moramo preostalo (ali preostale, če jih je več) kratko skleniti oziroma nadomestiti z žico.

Kakšen bo torej tok skozi  $R_1$ , ko je  $U_1$  priključena,  $U_2$  pa kratko sklenjena? Baterija  $U_1$  vidi upor  $R_1$  zaporedno vezan z vzporednima uporoma  $R_2$  in  $R_3$ . Nadomestna upornost bo torej:

$$R'_n = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 32 + \frac{15 \cdot 72}{87} \Omega = 44,4 \Omega \quad (6)$$

Zaradi tega pa bo tekel tok  $I'_1 = U_1 / R'_n = 5 V / 44,4 \Omega = 112,6 \text{ mA}$ .

Zdaj pa kratko sklenemo  $U_1$  in povežemo  $U_2$ . Nadomestna upornost sta vzporedno vezana  $R_1$  in  $R_2$  za njima pa zaporedno vezan  $R_3$ :

$$R''_n = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \left( \frac{15 \cdot 32}{47} + 72 \right) \Omega = 82,2 \Omega \quad (7)$$

in celoten tok  $I''_3 = U_2 / R''_n = 3 V / 82,2 \Omega = 36,5 \text{ mA}$ . Skozi  $R_1$  teče le del tega toka – ta se deli sorazmerno med  $R_1$  in  $R_2$ . Ker bo padec napetosti na  $R_1$  in  $R_2$  enak, bo  $R_1 I''_1 = R_2 I''_2$  in  $I''_2 = R_1 / R_2 \cdot I''_1$ , hkrati pa bo vsota enaka  $I''_1 + I''_2 = I''_3$ . Vstavimo izraz za  $I''_2$  in dobimo  $(1 + R_1 / R_2) I''_1 = I''_3$  in  $I''_1 = (R_2 / (R_1 + R_2)) I''_3 = (15 / 47) 36,5 \text{ mA} = 11,6 \text{ mA}$ .

Ko je priključena  $U_2$ , teče tok ravno v drugo smer kot takrat, ko je priključena  $U_1$ . Skupni tok bo torej razlika  $I'_1 - I''_1 = 112,6 - 11,6 \text{ mA} = 101 \text{ mA}$ . Rezultat je

spet enak. Spet preverimo še enakost enačb:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_1' - I_1'' = \frac{U_1}{R_n'} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{U_2}{R_n''} = \frac{U_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{U_2}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \\
 &= \frac{U_1(R_2 + R_3)}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} - R_2 \frac{U_2}{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2} \\
 &= \frac{U_1(R_2 + R_3)}{R_3(\frac{R_1 R_2}{R_3} + R_1 + R_2)} - R_2 \frac{U_2}{R_3(R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3})} = \\
 &= \frac{1}{R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}} \left( U_1 \frac{R_2 + R_3}{R_3} - U_2 \frac{R_2}{R_3} \right) = \frac{U_1 + \frac{R_2}{R_3}(U_1 - U_2)}{R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}},
 \end{aligned}$$

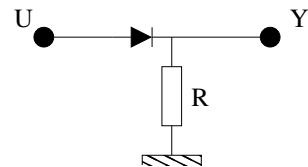
kar lahko primerjamo s prejšnjimi rezultati.

Ker sta tok skozi ampermeter in  $R_1$  enaka (Kirchoffov izrek za tokove), se odgovor glasi **Teči bi moral tok 101 mA..**

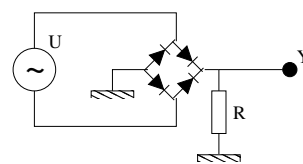
- Notranjo upornost in gonilno napetost baterije določimo tako, da nanjo najprej priključimo upor  $R_1=1 \Omega$ , nato pa še upor  $R_2=2 \Omega$ . V prvem primeru je tok  $I_1=3 \text{ A}$ , v drugem pa  $I_2=2 \text{ A}$ . Kolikšna je notranja upornost in kolikšna je gonilna napetost baterije?
- Theveninov izrek: Kakšna je notranja upornost in gonilna napetost izvora napetosti, ki ga dobimo kot delilnik napetost s  $5 \text{ V}$  (idealne) baterije, na katero sta vezana upora  $3$  in  $2 \text{ k}\Omega$ ?
- Kakšna je notranja upornost in gonilna napetost atenuatorja  $\pi$ , ki ga dobimo, ko vanj sestavimo  $47 \Omega$ ,  $10 \text{ k}\Omega$  in  $82 \Omega$  upore, izvor napetosti pa ima gonilno napetost  $X$  in notranjo upornost  $50 \Omega$ !
- Izrazi razmerje med vhodno in izhodno napetostjo v decibelih za atenuator  $\pi$  iz prejšnje naloge!

## 2 Dioda

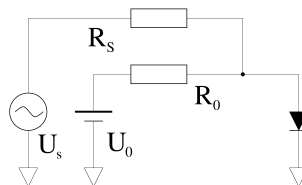
- Določi napetost preko diode, ko teče preko nje tok  $1, 10$  oziroma  $100 \text{ mA}$  v prevodni smeri.
- Skiciraj napetost  $Y(t)$ . Vhod  $U(t)=u(t)$  je sinusno nihanje z amplitudo  $15 \text{ V}$ .
- Kakšna bo časovna slika signala z amplitudo  $10 \text{ V}$ , ko ga peljemo skozi varovalni diodi, priključeni na  $+5$  oziroma  $-5 \text{ V}$ ?



4. Diodni most. Skiciraj napetost  $Y(t)$ . Vhod  $U(t)=u(t)$  je sinusna izmenična napetost z amplitudo 15 V.



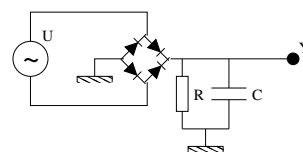
5. **Dinamična upornost diode.** Kakšna bo napetost prek diode v vezju na sliki? Vzemi, da je razmerje  $U_s/R_s$  mnogo manjše od  $U_0/R_0$  in glej samo časovno variabilni del signala!



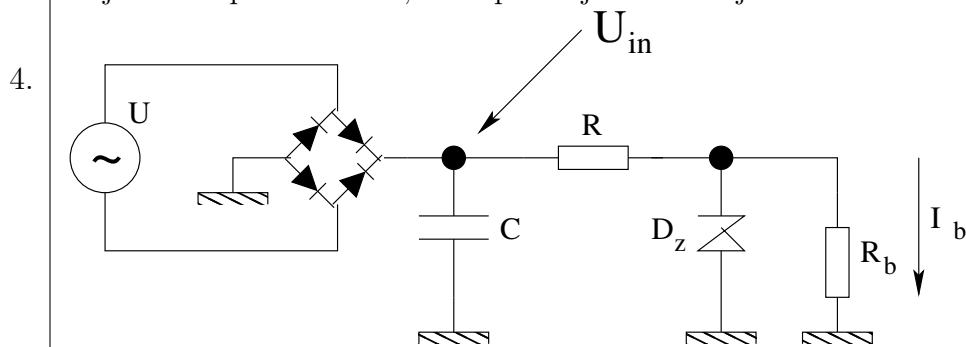
6. Izberi varovalni upor, da bo tok skozi diodo, ki jo napajamo s 3 V baterijo, pod 20 mA!

### 3 Ohmov zakon za kondenzator

1. Kako se spreminja napetost na kondenzatorju, ki je vezan na napetostni izvor zaporedno z uporom R, ko vključimo napetostni izvor?
2. Kako se spreminja napetost na kondenzatorju, ki vzporedno z uporom vežemo na napetostni izvor, ko izvor izključimo?
3. 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.



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 zgladi napetost  $U_{in}$  v območje med 20 in 25 V. Kakšna bo v najslabšem primeru moč, ki se porablja na Zenerjevi diodi?



### 4 RLC vezja v frekvenčni sliki

1. 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!

2. Naredi enako še za CR vezje!
3. In še za kombinacijo vezij CR-RC! Pri kateri frekvenci bo imelo to vezje najmanjšo slabitev?
4. 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!
5. Kako bo širina prepustnega pasu vezja (frekvenčnega pasu kjer je  $A(\omega) \approx A_{\max}/\sqrt{2}$ ) odvisna od vrednosti komponent? (se navezuje na prejšnjo nalogo)

## 5 Bipolarni tranzistor

1. Identificiraj kontakte tranzistorja in diode; za tranzistor določi tudi njegov tip!
2. Poveži tranzistorje na sliki s kontakti na bateriji, tako da bo skozi tranzistor tekel tok!
3. 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  $R_C$ .
4. 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 tekel skozi tranzistor?

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

5.
  - Samo notranjo upornost izvora na bazi!
  - Tako upornost izvora na bazi kot upornost izvora, na katerega je priključen tranzistor!

**Rešitev:** 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  $R_X$ :

$$R_{TH} = \frac{R_C (U_X - 0,7)}{U_+} \left( 1 - \frac{R_C (U_X - 0,7)}{R_X U_+} \right)$$

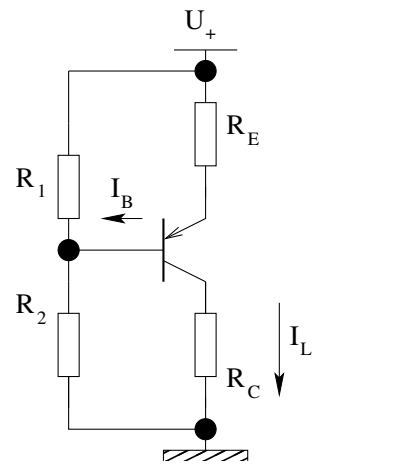
Lahko pa se nam zgodi še  $R_C > R_X$ , takrat nam emitorski sledilec ne pomaga, saj bo notranji upor kar  $R_X$ :

$$R_{TH} = R_X \left( 1 - \frac{R_X U_+}{R_X U_+ + R_C (U_X - 0,7)} \right)$$

6.

**Tokovni izvor:**

Določi  $R_1$  in  $R_2$  v delilniku napetosti za bazo, da bo skozi porabnik ( $R_C$ ) tekkel 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!



**Rešitev** 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

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

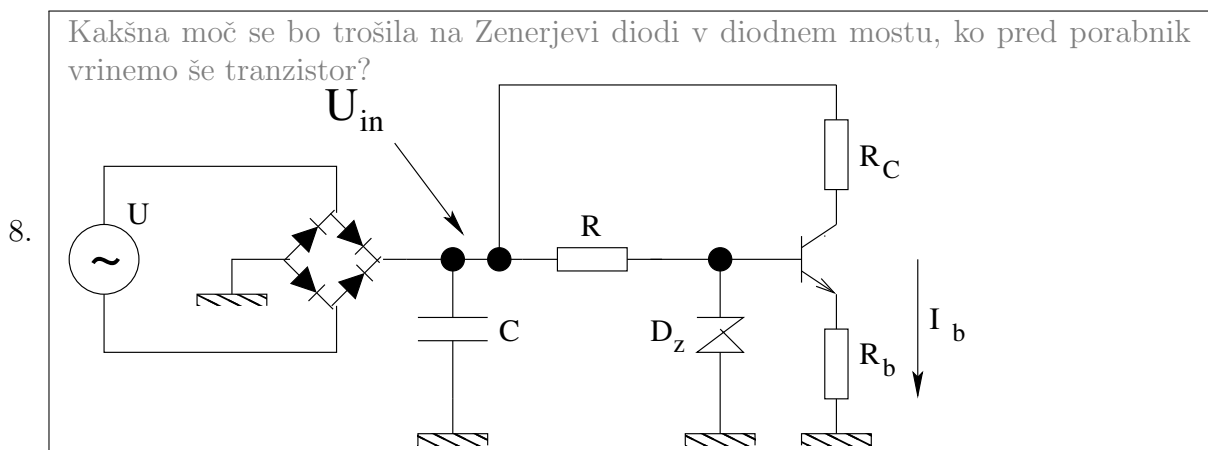
Skozi upor  $R_C$  bo tekel tok 1 mA, dokler bo  $U_C < U_E$  (pnp!). Upornik:

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

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 ostrejša kot prej!), bo

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

7. Določi še največji upornik, pri katerem bo tekel navedeni tok in nariši odvisnost toka od upornosti bremena!



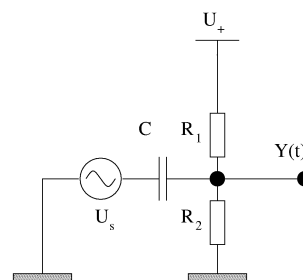
**Rešitev**  $R = 0.9 \text{ k}\Omega$ ,  $I_{\max} = 11 \text{ mA}$ ,  $P_{\max} = 0.165 \text{ W}$ ,  $P_{\text{upor}} = 0.165 \text{ W}$ ,  $P_{\text{tranz}} = 1.57 \text{ W}$ .



Kakšna bo napetost  $Y(t)$  v vezju na sliki? Izmenična napetost  $U_s$  je oblike:

$$U_s(t) = U_0 \sin \omega t$$

9. S primerno izbiro kapacitete  $C$  lahko dosežemo, da je časovno variabilni del  $Y(t)$  enak kot  $U_s$ . Kakšno kapaciteto naj izberemo? Posebej za  $R_1=R_2=1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_0=1 \text{ V}$ ,  $U_+=15 \text{ V}$ ,  $\omega=50 \text{ krad/s}$ . Skiciraj  $Y(t)$  za izbrani  $C$ !



**Rešitev** V vozlišču z napetostjo  $Y(t)$  mora veljati Kirchoffov zakon;

$$I_1 + I_C = I_2$$

Potencial v levem krajišču kondenzatorja  $C$ : Ker je napetostni izvor  $U_s$  na levem koncu ozemljen, bo njegovo desno krajišče na potencialu  $U_s$ , ki je enak potencialu v levem krajišču  $C$ . Uporabimo torej Ohmov zakon za vse elemente v vezju in jih dodajmo v Kirchoffov zakon:

$$\frac{U_+ - Y}{R_1} + C \frac{d(U_s - Y)}{dt} = \frac{Y}{R_2} \quad (8)$$

Od tod zapišemo diferencialno enačbo:

$$\frac{Y}{R^*} + C \frac{dY}{dt} = \frac{U_+}{R_1} + C \frac{dU_s}{dt} \quad (9)$$

kjer smo z  $R^*$  označili upornost, ki jo dobimo kot:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Rešitev diferencialne enačbe (9) je kombinacija homogene in partikularne rešitve. Homogena rešitev je kar:

$$Y_h = Y_0 e^{-t/R^*C}$$

in po času, velikem v primerjavi z  $R^*C$  povsem zamre. Ostane nam le partikularna rešitev, za katero uporabimo nastavek:

$$Y_p = A + A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t$$

Vstavimo v (9):

$$\frac{A}{R^*} + \frac{A_1}{R^*} \sin \omega t + \frac{A_2}{R^*} \cos \omega t + CA_1 \omega \cos \omega t - CA_2 \omega \sin \omega t = \frac{U_+}{R_1} + CU_0 \omega \cos \omega t$$

Ker mora enačba veljati ob vseh trenutkih, mora veljati posebej za (časovno) konstantne člene, člene pred  $\sin \omega t$  in člene pred  $\cos \omega t$ . Tako dobimo tri enačbe, ki veljajo

hkрати:

$$\begin{aligned} \frac{A}{R^*} &= \frac{U_+}{R_1} && \text{konst} \\ \frac{A_1}{R^*} - CA_2\omega &= 0 && \sin \omega t \\ \frac{A_2}{R^*} + CA_1\omega &= CU_0\omega && \cos \omega t \end{aligned}$$

Iz prve dobimo napetostni delilnik:

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

iz drugih dveh pa:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 \cdot R^* C\omega \\ A_2 &= \frac{R^* C\omega}{1 + R^*{}^2 C^2\omega^2} U_0 \\ A_1 &= \frac{R^2 C^2\omega^2}{1 + R^*{}^2 C^2\omega^2} U_0 \end{aligned}$$

In skupna rešitev:

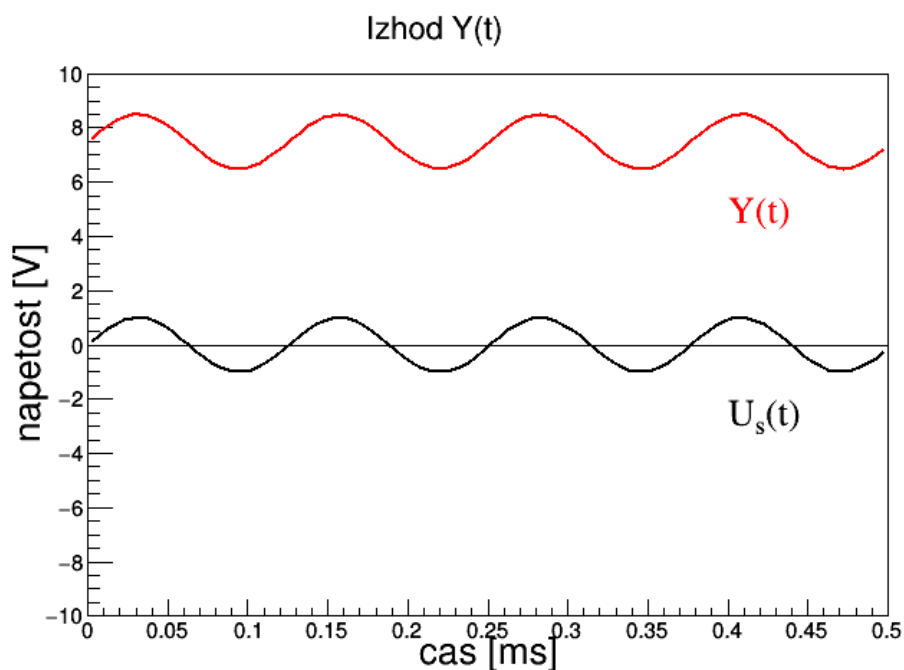
$$Y(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_+ + U_0 \frac{R^*{}^2 C^2\omega^2}{1 + R^*{}^2 C^2\omega^2} \left( \sin \omega t + \frac{1}{R^* C\omega} \cos \omega t \right) \quad (10)$$

Ko izberemo C, da je  $R^* C\omega \gg 1$ , pa nam ostane le še:

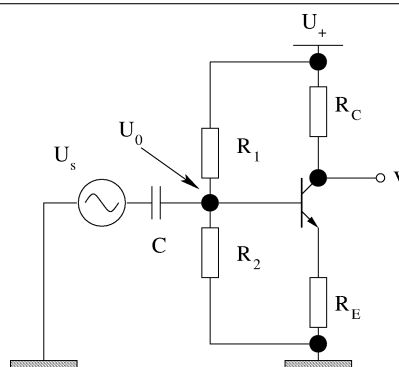
$$Y(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_+ + U_0 \sin \omega t \quad (11)$$

Posebej za  $R_1=R_2=1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_0=1 \text{ V}$ ,  $U_+=15 \text{ V}$ ,  $\omega=50 \text{ krad/s}$  dobimo  $R^*=0,5 \text{ k}\Omega$ ,  $C \gg 40 \text{ nF}$ , torej  $C=400 \text{ nF}$ . Takrat bo:

$$Y(t) = 7,5 \text{ V} + 1 \text{ V} \sin \omega t$$

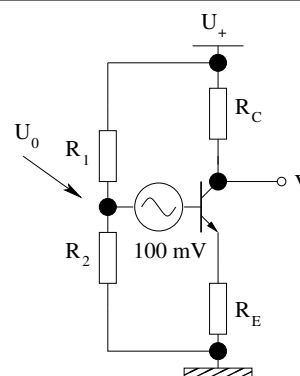


10. Določi upornika  $R_1$  in  $R_2$ , ter  $R_C$  in  $R_E$ , da bo amplituda izmenične napetosti na izhodu (V) enaka 1 V! Amplituda izvora  $U_s$  je 100 mV, kondenzator  $C$  pa je izbran tako,  $R * C \gg 1$ , kjer je  $1/R^* = 1/R_1 + 1/R_2$ .



**Rešitev** Glej naslednjo nalogo.

11. 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.



**Rešitev** 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  $I_C \approx I_E$ :

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

$$U_C = U_+ - R_C I_C$$

$$= U_+ - \frac{R_C}{R_E} (U_0 - 0,7) - \frac{R_C}{R_E} U_X \sin \omega t$$

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:

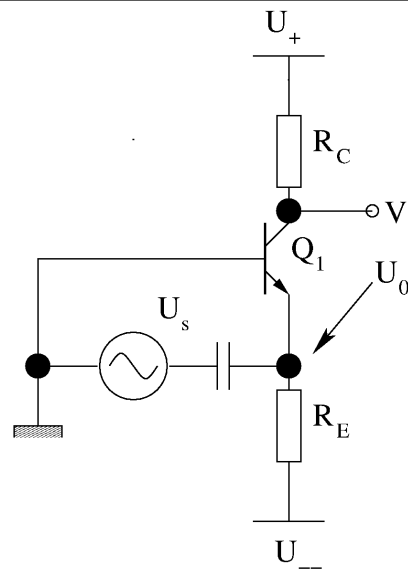
$$\begin{aligned}
 R_C &= 10 \text{ k}\Omega & R_C &= \frac{R_C}{R_E} 1 \text{ k}\Omega \\
 R_1 &= 13,6 \text{ k}\Omega & R_1 &\approx 10R_E \\
 R_2 &= 1,4 \text{ k}\Omega & \frac{R_2}{R_1 + R_2} &= \frac{1,4}{15} \\
 I_E &= 0,7 \pm 0,1 \text{ mA} & I_E &= \frac{U_E}{R_E} = \frac{U_0 - 0,7}{R_E} \pm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

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

12.

**Ebers-Moll model tranzistorja;  
ojačevalec s skupno bazo**

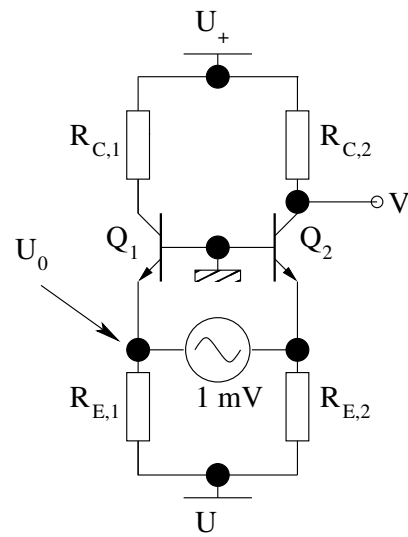
Določi upore  $R_C$  in  $R_E$ , da bo amplituda sinusnega nihanja na izhodu 100 mV. Vzemi, da sta napetosti  $U_+, U_- = \pm 15$  V,  $U_s = U_0 \sin \omega t$ ,  $U_0 = 1$  mV, kondenzator C je izbran tako, da je časovno variabilni del signala na emitorju kar  $U_s$ . Kako se amplituda spremeni, če se tranzistor ogreje za  $20^\circ$  C?



13.

**Ebers-Moll model tranzistorja;  
ojačevalec s skupno bazo**

Določi upore  $R_{C,1,2}$  in  $R_{E,1,2}$ , da bo amplituda sinusnega nihanja na izhodu 100 mV. Kako se amplituda spremeni, če se tranzistor ogreje za  $20^\circ$  C? Vzemimo, da sta napetosti  $U_+, U_- = \pm 15$  V!



**Rešitev** Napetosti na bazah tranzistorjev  $Q_1$  in  $Q_2$  sta enaki, obe sta 0 V napram zemlji. Zato bo  $U_0 = -0,7$  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  $U_X = 1$  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  $U_{BE} \sim 0,7$  V velja:

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

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:

$$I_{E,2} = I_{ES,2} e^{-\frac{U_0}{U_T}} \left( 1 - \frac{U_X}{U_T} \sin \omega t \right) = I_{E,2,0} + \Delta I_{E,2} \quad (12)$$

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  $U_0$ :

$$\Delta I_{E,2} = \frac{\Delta U_{BE,2}}{r_E} \quad (13)$$

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 (12) in definicije  $r_E$  (13) 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  $U_{C,2,0}$ :

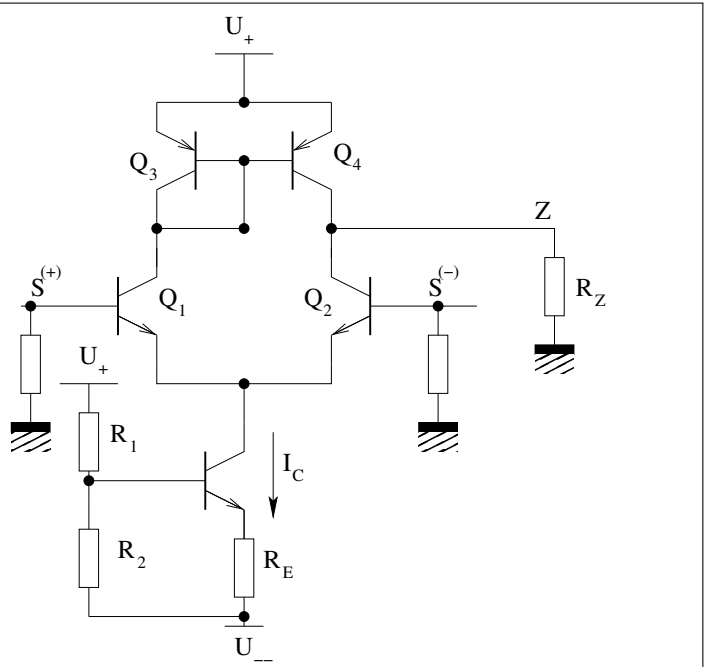
$$U_{C,2,0} = U_+ - R_{C,2} I_{E,2,0} = 15 \text{ V} - 2,5 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ mA} = 12,5 \text{ V}$$

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  $20^\circ$  C, bo  $r_E$  zrasel za 10%. Ker se  $R_{C,2}$  ne spreminja s temperaturo, bo tudi ojačanje manjše za taistih 10 %!

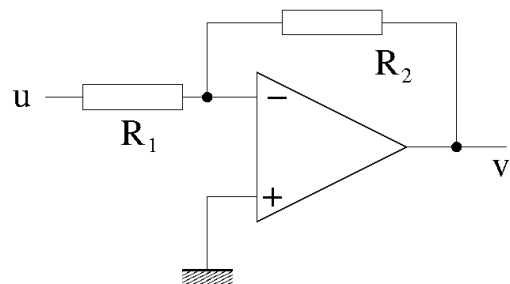
14.

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  $U_{\pm} = \pm 15$  V.



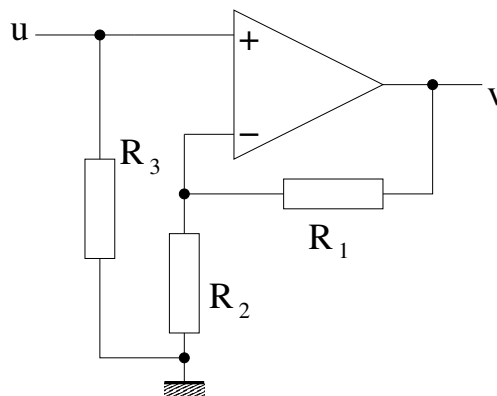
## 6 Operacijski ojačevalec

1. Določi  $R_1$  in  $R_2$ , tako da bo ojačanje 10!

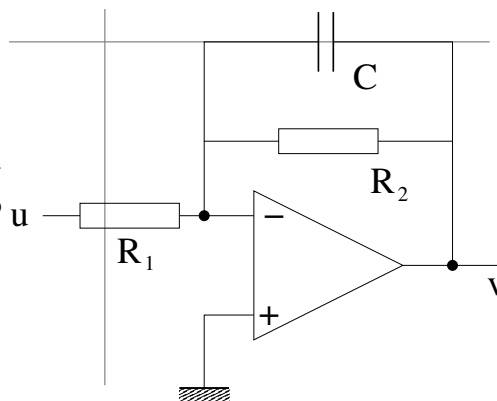




2. Kakšno je ojačanje vezja? Zakaj rabimo  $R_3$ ?

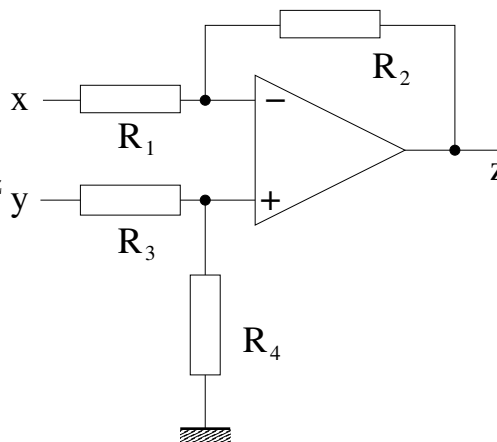


3. Določi prenosno funkcijo vezja na sliki. Za frekvenčno okno široko 100 kHz določi kapaciteto C, če je upornost  $R_2=10\text{ k}\Omega$ .



4. Določi upore  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  in  $R_4$ , da bo izhod z enak:

$$z = 2(y - x) \quad (14)$$



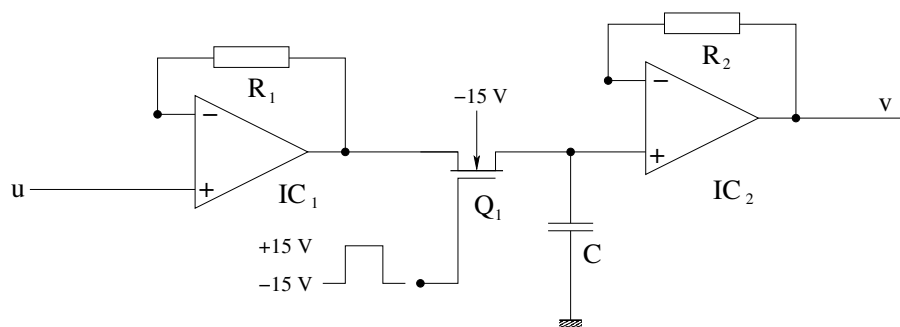
## 7 Unipolarni tranzistor

Določi odvisnost spreminjanja toka  $I_{DS}$  v odvisnosti od  $U_{DS}$  za majhne napetosti

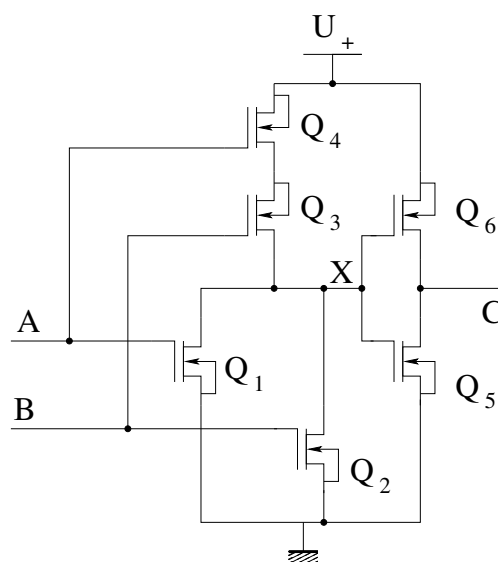
1.  $U_{DS}$ . Predpostavi kvadratično odvisnost do meje  $U_{DS}=U_{GS}-U_T=\Delta$  in konstanten tok  $I_{DS}=k(U_{GS}-U_T)^2$  za večje napetosti  $U_{DS}$ .
2. Določi upor  $R_S$ , da bo tokovni izvor iz n-kanalnega JFET požiral tok 1 mA. Podatki za tranzistor  $I_{DSS}=0.5\text{ mA}$ ,  $U_T=-2\text{ V}$ .

Vezje na sliki predstavlja preprosto realizacijo principa VZORČI IN DRŽI (ang. SAMPLE & HOLD). Oцени:

3. (a) Kakšna je največja strmina, ki ji vezje še lahko sledi, če je največji tok, ki ga daje  $IC_1$ , omejen na 10 mA?  $C=0.01 \mu\text{F}$ .
- (b) Če je  $R_{(ON)}=50 \Omega$ , kakšna je napaka na signalu, ko ima ta strmino  $0,1 \text{ V}/\mu\text{s}$ ?
- (c) Če  $IC_2$  in  $Q_1$  v zaprtem načinu prepuščata 1 nA, koliko bo padel signal v 1 ms?



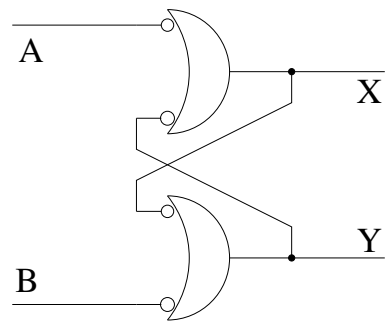
4. MOSFET kot digitalno stikalo: Na sliki je vezje ki vhodoma A in B priredi vrednost izhoda C. Signali A,B in C so logični signali - napetost okrog 0 V pripada logični vrednosti 0, napetost okrog  $U_+$  pa je logična 1. Transistorji Q so MOSFETi;  $Q_1, Q_2$  in  $Q_5$  so tipa n,  $Q_3, Q_4$  in  $Q_6$  pa tipa p. Za MOSFET tipa n je  $U_T$  pozitivna, za tip p je negativna; po velikosti je ravno med 0 in  $U_+$ . Zapiši logično funkcijo za C. Za katera logična vrata gre?



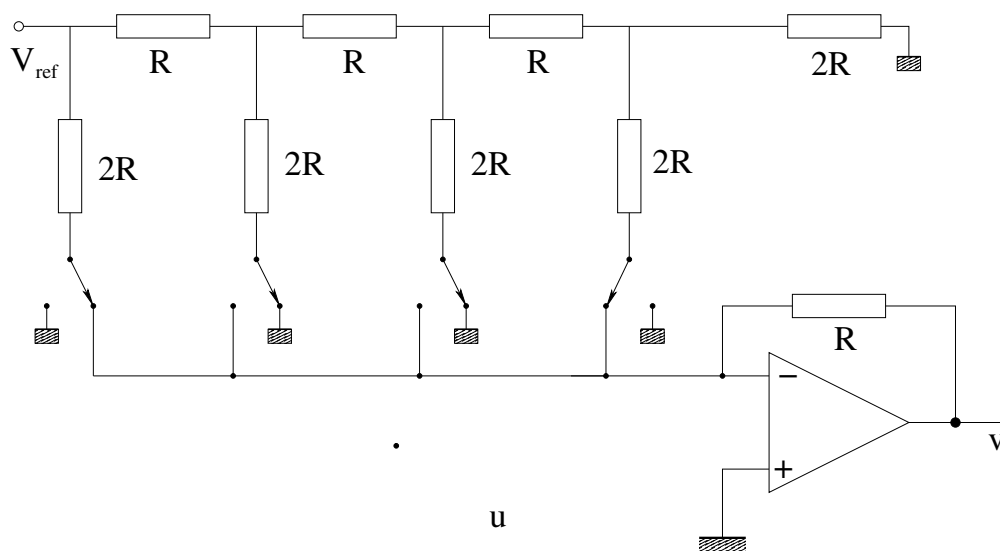
## 8 Digitalna elektronika

1. Z uporabo Karnaughjevih diagramov sestavi vezje, ki od vseh 3-bitnih števil izbere praštevila!

2. Vezje na sliki je preprosta realizacija RS flip-flopa. Zapiši resničnostno tabelo in identificiraj vhode R in S ter izhode Q in  $\bar{Q}$ .



3. Naredi dvo-bitni števec s kontrolo. Ko je kontrola 0, šteje števec običajno ( $00 \rightarrow 01 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 11 \rightarrow \dots$ ). Če pa je kontrola 1, šteje števec nazaj ( $11 \rightarrow 10 \rightarrow 01 \rightarrow 00 \rightarrow 00 \rightarrow \dots$ ). Uporabi par D flip-flopov in si pomagaj s Karnaughjevimi diagrami.



4. Določi vse tokove v vezju na sliki! Katero funkcijo opravlja vezje za različne lege stikal?
5. Sinusni signal z amplitudo 1 V in krožno frekvenco 500 krad/s vzorčimo z 8-bitnim ADC pretvornikom z vhodnim intervalom med -1.5 V in 1.5 V s hitrostjo vzorčenja milijon vzorcev na sekundo (1 MSample/s). Zapiši prvih 10 pretvorb, ki jih obdela pretvornik. Kako naj ADC predstavi negativna števila?