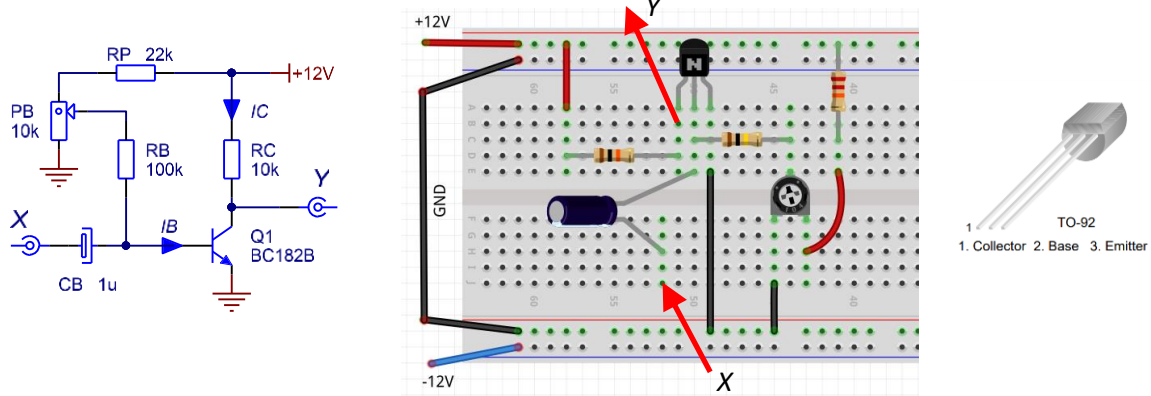


## 2.2 Tranzistor kot ojačevalnik

Tranzistor je tokovni ojačevalnik. Z majhnim tokom v bazni priključek tranzistorja lahko krmilimo mnogo večji tok skozi kolektorski priključek tranzistorja. Uporabili ga bomo za ojačenje izmeničnega električnega signala. Shema vezja je na sliki 1 levo, vezje pa boš sestavil na prototipni ploščici (»breadboard«). Predlog za sestavljanje je na sliki 1 sredi.

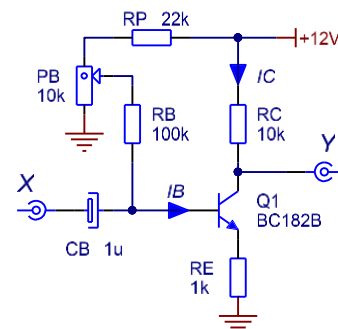


Slika 1: Vezje za poskušanje in predlog razporeda elementov na prototipni ploščici

### Naloga:

- Preskusi delovanje ojačevalnika s tranzistorjem s slike 1 levo. Najprej nastavi delovno točko tranzistorja s sukanjem trimerja (nastavni potenciometer  $P_B$ ) tako, da bo izhodna napetost  $Y$  vezja približno polovica napajalne napetosti, torej približno 6 V.
- Na vhod  $X$  priključi sinusni signal iz funkcijskega generatorja. Sam izberi velikost signala, frekvenca pa naj bo okoli 1 kHz. Opazuj napetost na izhodu  $Y$ . Ali vezje ojačuje signal?
- Za ojačevalnik mora veljati, da je izhodni signal po obliki enak vhodnemu; če je na vhod  $Y$  priključen sinusni signal, mora biti tudi izhodni signal enake oblike. Lahko je večji ali manjši, lahko je fazno premaknjen, a oblika mora biti enaka, sicer vezje ni dober ojačevalnik. Ker ojačevalnikova izhodna napetost lahko seže le do meja napajalne napetosti, se ob prevelikem vhodnem signalu sploščijo ekstremi sinusnega signala, ki je zaradi tega podoben pravokotnemu. Zmanjšaj vhodni signal; ojačevalnik je primeren za majhne vhodne signale. Spreminjaj frekvenco in obliko vhodnega signala. Ali se vezje obnaša kot ojačevalnik za vse vhodne signale?
- Izračunaj ojačenje vezja kot razmerje amplitud izhodnega proti vhodnemu signalu.
- Odklopi vhodni signal in opazuj izhodno napetost  $Y$ . Primi tranzistor z roko tako, da ga greješ a se pri tem ne dotikaš njegovih priključkov. Kako to vpliva na izhodno napetost  $Y$ ? Oцени velikost spremembe izhodne napetosti  $Y$ .

Delovna točka tranzistorja v preskusnem vezju je, žal, odvisna od temperature tranzistorja. Ker se nekatere elektronske naprave močno grejejo je treba poskrbeti, da se zaradi spremenjene temperature delovna točka ne odmakne daleč od nastavljene vrednosti. Zato vezje ojačevalnika s tranzistorjem dopolnimo z upornikom  $R_E = 1k$ , ki ga dodamo med priključek emitorja in GND, slika 2. Na sestavljenem vezju na prototipni ploščici nadomestimo žično povezavo med emitorjem in GND z upornikom  $R_E$ .

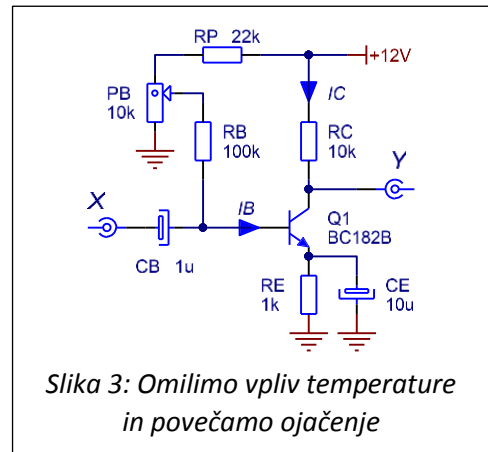


Slika 2: Omilimo vpliv temperature

### Naloga:

- Vezje je bilo spremenjeno, zato boš moral ponovno nastaviti delovno točko. Enako kot prej zasukaj trimmer  $P_B$  v položaj, kjer je izhodna napetost  $Y$  približno polovica napajalne napetosti.
- Spet opazuj izhodno napetost  $Y$  in pogrej tranzistor z roko. Ali zdaj segrevanje manj vpliva?
- Priključi spet signal iz funkcijskega generatorja. Kaj opaziš? Spreminjaj velikost in frekvenco vhodnega signala.

Zaradi dodanega upornika  $R_E$  se močno zmanjša ojačenje, ki je zdaj približno enako razmerju  $R_C/R_E$ . Pri manjšem ojačenju pa je manjši tudi vpliv segrevanja, kar je dobro. A vendarle od ojačevalnika pričakujemo veliko ojačenje vhodnega signala. Na srečo je naš vhodni signal izmeničen in se torej hitro spreminja, spremembe delovne točke zaradi temperature pa so počasne. Zato lahko naredimo upornost med emitorjem in GND veliko za počasne in majhno za hitre spremembe. Prek upornika  $R_E$  vežimo še kondenzator  $C_E$ . Že iz fizike v fiziki vemo, da je upornost kondenzatorja odvisna od frekvence priključenega signala, za konstantne signale je upornost neskončna. Torej bo vezje na sliki 3 natanko tisto, kar rabimo: močno bo ojačilo vhodni izmenični signal in bo le malo občutljivo za spremembe temperature.



### Naloga:

- Tokrat se pogoji delovanja zaradi dodajanja kondenzatorja  $C_E$  niso spremenili, zato ne bo potrebno popravljati nastavljanja delovne točke.
- Priključi spet signal iz funkcijskega generatorja. Kaj opaziš? Spreminjaj velikost in frekvenco vhodnega signala. Ne pozabi: oblika izhodnega signala mora biti za ojačevalnik enaka obliki vhodnega signala.

### Za motivacijo:

Tranzistor je za današnjo elektroniko osnovni ojačevalni element. Vedno ga uporabljamo tako, da skozenj teče tok, včasih več, včasih manj, sledeč vhodnemu signalu. Z nastavitvijo delovne točke nastavimo povprečni tok skozi tranzistor.

Vezja s tranzistorji vedno bolj zamenjujejo vezja z operacijskimi ojačevalniki, kjer težav z nastavljanjem delovne točke ni, pa še izhodna napetost je zaradi napajanja operacijskih ojačevalnikov lahko pozitivna ali negativna. A tudi operacijski ojačevalniki imajo svoje slabosti, tule bi omenili le frekvenčno odvisnost njihovega ojačenja: operacijski ojačevalniki na zmorejo ojačenja signalov velikih frekvenc, uporabni so le do nekaj deset MHz (so pa tudi izjeme). Vezja s tranzistorji so lahko prirejena tudi za večje frekvence, poleg tega pa so vezja s tranzistorji zaradi enostavnejšega napajanja tudi bolj racionalna tam, kjer želimo poenostaviti in poceniti elektroniko.

### Nekaj malega o ojačevalnikih s tranzistorji

Tranzistor bi lahko uporabili za ojačevanje signalov že po shemi na sliki 4. Za tako shemo lahko zapišemo vhodni tok  $I_B$  v tranzistor:

$$I_B = \begin{cases} 0, & x < 0.65 \text{ V} \\ \frac{x - 0.65}{R_B}, & x \geq 0.65 \text{ V} \end{cases}$$

Za pozitivne vhodne signale, ki so večji od 0.65 V, teče v bazo tranzistorja tok; 0.65 V je dogovorjena vrednost napetosti med bazo in emitorjem (na silicijevi diodi), ki požene v bazo ne-zanemarljiv tok. Tranzistor je ojačevalnik toka, zaradi toka  $I_B$  teče skozi kolektorski priključek tok  $I_C$ :

$$I_C = \beta \cdot I_B, \quad \beta \approx 100$$

Napetost  $Y$  na kolektorskem priključku izračunamo:

$$Y = +12 - R_C I_C = +12 - X \beta \frac{R_C}{R_B} + 0.65 \beta \frac{R_C}{R_B}$$

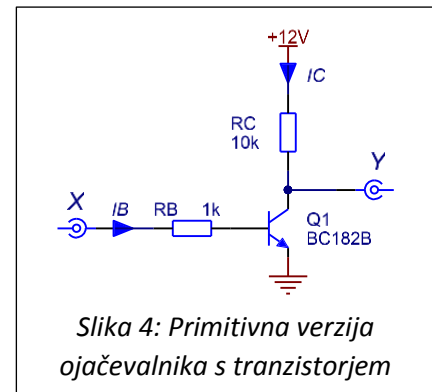
Izhodni signal  $Y$  je torej odvisen od signala  $X$ , pravzaprav je vhodni signal pomnožen s faktorjem  $\beta \frac{R_C}{R_B}$  in ima nasprotni predznak. Vedno lahko izberemo taka upornika  $R_C$  in  $R_B$ , da je izhodni signal  $Y$  večji od vhodnega. Žal je izhodni signal odvisen tudi od napajalne napetosti in od temperature; napetost med bazo in emitorjem, ki smo jo zapisali z 0.65 V, je namreč močno odvisna od temperature (-2 mV/K). Zato ima vezje dve težavi:

- ojačuje le napetosti  $X > 0.65 \text{ V}$ ,
- za omenjene vhodne napetosti je hkrati ojačevalnik in termometer.

Prvo težavo rešimo tako, da vhodni napetosti  $X$ , ki se suka okoli nič, prištejemo malo več kot 0.65 V, oziroma toliko, kot je potrebno, da vsota vhodne napetosti in prištete vrednosti nikoli ne pade pod 0.6 V. Pravimo, da tranzistorju nastavimo delovno točko. Najenostavneje gre, če vhod  $X$  ozemljimo in s potenciometrom nastavimo vrednost za prištevanje tako, da je izhodna napetost vezja enaka polovici napajalne napetosti. Potem bo simetrično spreminjajoča se vhodna napetost spreminjala izhodno napetost nekako od nič do napajalne napetosti. Ker želimo ojačevati spreminjajoč se (izmeničen) vhodni signal, ga raje pripeljimo na bazni priključek preko kondenzatorja zato, da ne zmotimo nastavljenih delovnih točk. Tako pridemo do vezja s slike 1 tega poglavja.

Vsaki elektronski enoti pripišemo še vhodno in izhodno upornost, tako lahko ovrednotimo vpliva opazovane enote na tisto, s katere prihaja signal za ojačevanje ter naslednje enote na opazovano.

Vhodna upornost je podana kot kvocient spremembe napetosti na vhodu v vezje in spremembe toka v vezje:  $R_{IN} = dX/dI_B$ . Za vezje s slike 1, kjer je vhodni tok kar tok v diodo med priključkoma baze in emitorja, vhodna napetost pa kar napetost prek iste diode, je mogoče vhodno upornost (grobo) določiti kot:  $R_{IN} = U_T/I_B$ . Za vezje s slike 1 lahko s potenciometrom nastavimo delovno točko tako, da je izhodna napetost  $Y$  približno polovica napajalne napetosti, nato z voltmetrom pomerimo padec napetosti  $U_{RB}$  na uporniku  $R_B$ , izračunamo tok v bazo tranzistorja  $I_B = U_{RB}/R_B$  in na koncu še vhodno upornost  $R_{IN}$ . Pri tem računu je  $U_T$  približno 25 mV pri sobni temperaturi. Za naše vezje je rezultat pri nekaj k $\Omega$ , torej vezje kar precej obremenjuje vir signala. Ker pa ima naš vir signala, to je funkcijski generator, izhodno upornost le 50  $\Omega$ , njegovega obremenjevanja z nekaj k $\Omega$  ni opaziti. Za večje izhodne upornosti vira signala pa bi bila izguba ojačenja opazna; poskusiš lahko tako, da zaporedno s funkcijskim generatorjem, torej med funkcijski generator in naše vezje, vstaviš upornik  $R_G = 5.6 \text{ k}\Omega$ . Ali amplituda signala  $Y$  pade? Če pade na polovico, je vhodna upornost vezja 5.6 k $\Omega$ .



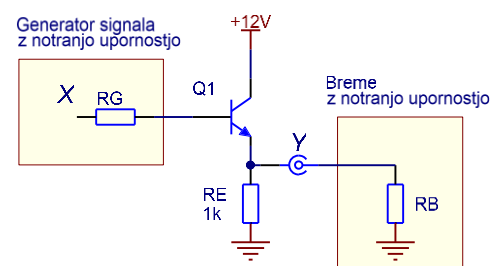
Izhodna upornost  $R_{OUT}$  vezja s tranzistorjem po sliki 1 je kar enaka upornosti v kolektorju. Tranzistor je tokovni ojačevalnik, tok skozenj v prvem približku ni odvisen od bremena, pač pa le od toka v bazo in ojačevalnega faktorja  $\beta$ . Sonda osciloskopa ima notranjo upornost vsaj 1 M $\Omega$ . Ko izhodni signal vezja s slike 1 opazujemo z osciloskopom, ga hkrati obremenjujemo z 1 M $\Omega$ , kar ne spremeni amplitude izhodne napetosti. Če bi bila notranja upornost osciloskopove sonde manjša, bi se amplituda izhodnega signala lahko bistveno zmanjšala; tranzistorski ojačevalnik s slike 1 ne zmore poganjanja bremen z majhno notranjo upornostjo. Poskusiš lahko tako, da od kolektorja tranzistorja  $Q_1$  priti GND vežeš zaporedno vezana kondenzator in upornik (10  $\mu$ F in 1 k $\Omega$ , kondenzator preprečuje premik delovne točke). Kako se spremeni amplituda izhodne napetosti?

Iz povedanega je razbrati, da je ojačevalna stopnja z dovolj veliko vhodno upornostjo in hkrati dovolj majhno izhodno upornostjo najprimernejša za ojačevanje signalov, saj povzroči le majhen upadek amplitude pri vhodnem signalu, velikost izhodnega signala take stopnje pa ni odvisna od bremena.

Iz pravkar povedanih razlogov pogosto uporabljamo vezja s tranzistorji, ki imajo veliko vhodno upornost in majhno izhodno upornost; z njimi prilagodimo vir signala na ojačevalnik in ojačevalnik na breme. Tako vezje imenujemo sledilnik napetosti (emitorski sledilnik) in ne spreminja velikosti signala. Vezje je na sliki 5. Za tako vezje približno izračunamo:

- $Y = X - 0.65 V$
- $R_{OUT} \cong R_E \parallel R_G / \beta$
- $R_{IN} = \beta(R_E \parallel R_B)$

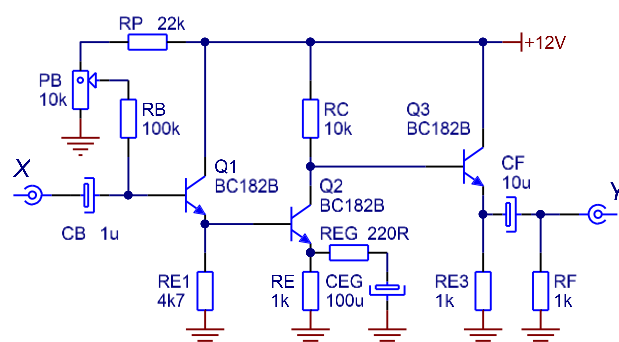
Pri tem sta  $R_G$  upornost vira signala in  $R_B$  upornost bremena. Izhodna upornost je torej manjša od  $R_E$ , vhodna upornost pa je manjša  $\beta$  krat upornost vzporedno vezanih  $R_E$  in  $R_B$ .



Slika 5: Emitorski sledilnik

Posledično lahko za vezje s slike 2 sklepamo, da je njegova vhodna upornost približno  $\beta R_E$ , izhodna upornost pa ostaja 10 k $\Omega$ . Za vezje s slike 3 je vhodna upornost za izmenične signale spet manjša, saj je upornik  $R_E$  za izmenične signale premoščen s kondenzatorjem  $C_E$ , katerega upornost je za izmenične signale majhna. Izhodna upornost ostaja 10 k $\Omega$ .

Čeprav se je med vajo pokazalo, da premoščanje upornika  $R_E$  s kondenzatorjem poveča ojačenje, podrobnejša analiza razkrije, da premoščanje s kondenzatorjem povzroči tudi večje popačenje signala. Do tega pride zato, ker se ob premoščanem  $R_E$  močneje izrazi eksponentna odvisnost spoja baza-emitor. Morda bi bilo bolje vezje kvalitetnejšega ojačevalnika zato sestaviti na način, ki ga prikazuje slika 6. Prvi tranzistor služi kot emitorski sledilnik in zveča vhodno upornost vezja. Drugi tranzistor opravi dejansko ojačenje, pri tem je približno ojačenje določeno z razmerjem upornikov  $R_C / (R_{EG} \parallel R_E)$  (to ojačenje velja le v območju frekvenc, kjer je upornost kondenzatorja  $C_E$  zanemarljiva proti upornosti  $R_{EC}$ , drugje je ojačenje manjše). Ker je izhodna upornost te stopnje relativno velika, je dodana še ena stopnja emitorskega sledilnika, ki izhodno upornost zmanjša na okoli 100  $\Omega$ . Tej stopnji sledi še visokoprepustni filter s



Slika 6: Predlog za vezje: ojačevalnik z dodanima emitorskima sledilnikoma

komponentama  $C_F$  in  $R_F$ , zaradi katerega izhodni signal nima več enosmerne komponente in opleta le okoli nič.