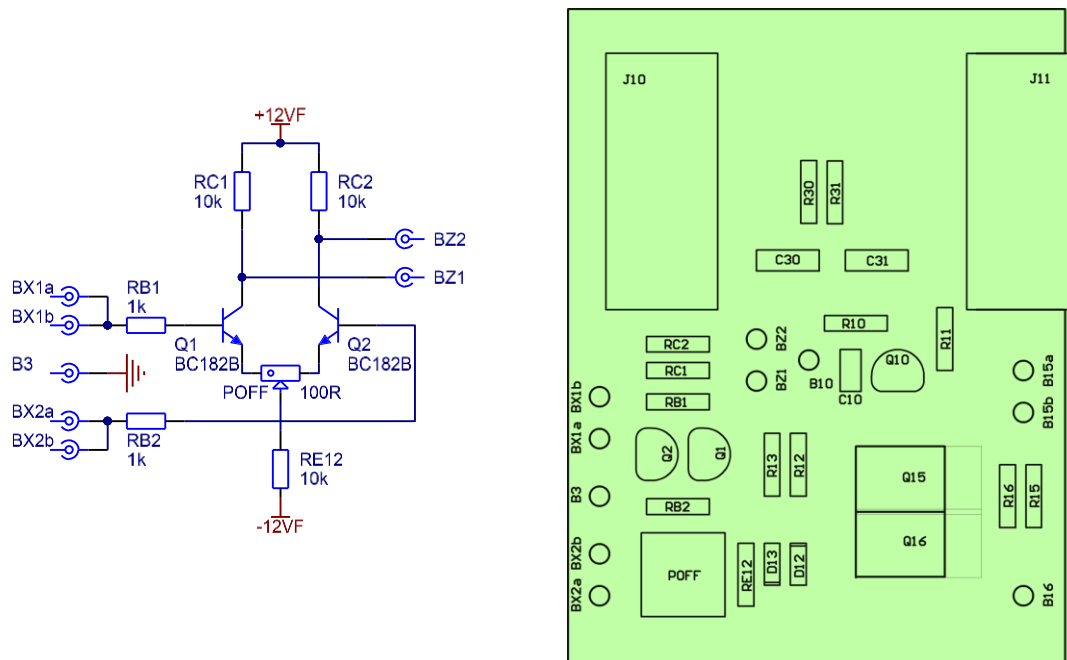


## 2.2 Diferenci par tranzistorjev in model OPAMP

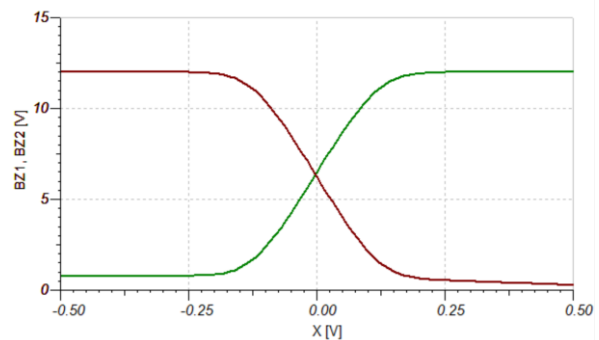
V prejšnjih vajah smo videli, da je delovanje tranzistorja odvisno tudi od temperature okolice. Vsak ojačevalnik je hkrati tudi termometer. Kadar nam to ni všeč, lahko poskusimo s parom tranzistorjev, ki je vezan tako, da se temperaturni odvisnosti med sabo odštevata. Vezje diferenčnega para tranzistorjev je na sliki 1 levo. Tokrat je vezje že pripravljeno v obliki tiskanega vezja, zato je na isti sliki desno tudi razpored elementov na ploščici tiskanega vezja; na tiskanem vezju so dodatni elementi, ki bodo predstavljeni v nadaljevanju te vaje.



Slika 1: Vezje diferenčnega para tranzistorjev in pripravljeno tiskano vezje

Naloga:

- Preskusi delovanje diferencialnega para tranzistorjev s slike 1 levo. Najprej poveži oba vhodna priključka na GND in zasuči trimmer  $P_{OFF}$  tako, da bosta napetosti  $BZ_1$  in  $BZ_2$  enaki. Tranzistorja  $Q_1$  in  $Q_2$  sta po imenu enaka, a zaradi proizvodnih toleranc malo različna. Z nastavljanjem trimerja  $P_{OFF}$  njuni lastnosti približamo, kar rezultira v enakem toku skozi oba tranzistorja in posledično enaki napetosti na obeh kolektorjih.
- Pogrej oba tranzistorja z roko. Ali se zaradi gretja razlika napetosti med izhodnima priključkoma kaj spremeni?
- Priključi sinusni signal s frekvenco okoli 1 kHz na enega od vhodov diferencialnega para tranzistorjev in opazuj izhodno napetost na obeh izhodnih priključkih. Kaj opaziš?
- Na zaslon osciloskopa izriši odvisnost izhodne napetosti od vhodne: osciloskop postavi v XY način delovanja, na X vhod osciloskopa priključi vhodni signal v vezje, na Y vhod pa izhodnega.

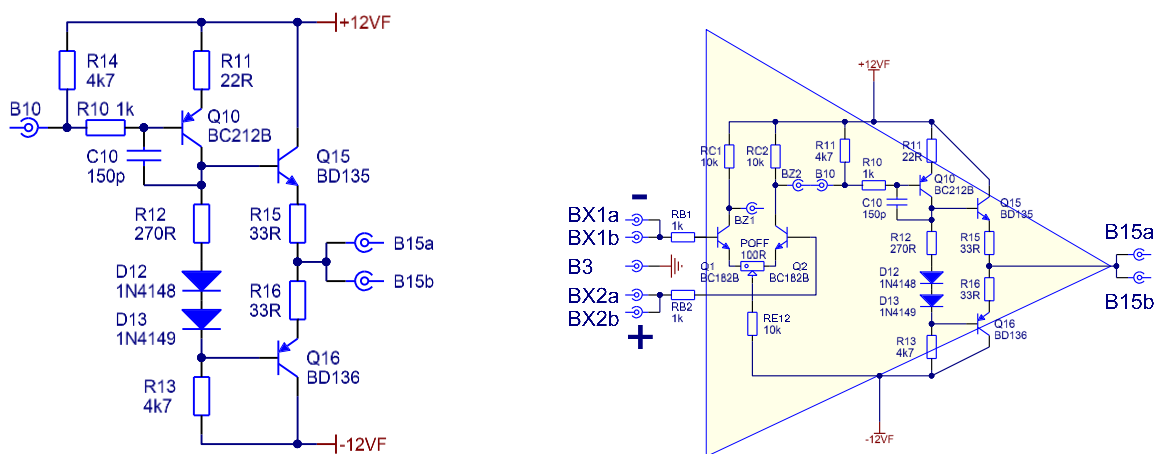


Slika 2: Odvisnost izhodne od vhodne napetosti

Dobil boš graf, ki je podoben tistemu na sliki 2.

- Zdi se smiselno uporabljati tak ojačevalnik le v linearnem območju vhodnih napetosti, v katerem je izhodni signal linearno odvisen od vhodnega, torej v srednjem delu XY grafa. Če je vhodni signal prevelik, je izhodni signal omejen z mejama napajalne napetosti; zmanjšaj vhodni signal, nato prestavi osciloskop v običajni način delovanja in izračunaj ojačenje te stopnje kot razmerje amplitud izhodnega proti vhodnemu signalu.
- Kot pri vezju z enim tranzistorjem je tudi tokrat treba upoštevati izhodno upornost vezja; ko vezje diferenčnega ojačevalnika obremenimo, se izhodna napetost sesede. Opazuj izhodni signal in obremenjeni opazovani signal z zaporedno vezanima kondenzatorjem in upornikom ( $C = 10\mu\text{F}$ ,  $R = 1\text{k}\Omega$ ). Kaj se zgodi?

Vezje s slike 1 zmore veliko ojačenje in njegova izhodna napetost je le malo odvisna od temperature okolice. Žal je njegova izhodna upornost tako velika, da vezje ne zmore poganjati bremena. To težavo odpravimo z dodajanjem vezja s slike 3 levo, ki ga povežemo na vezje s slike 1 po desni skici na sliki 3; vhodni priključek  $B_{10}$  s slike 3 povežemo z izhodnim priključkom  $BZ_2$  s slike 1.

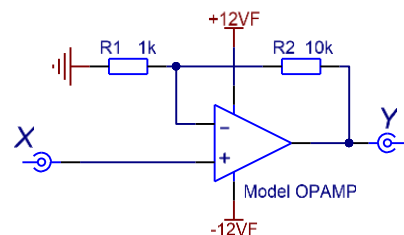


Slika 3: Vezje močnostnega ojačevalnika in vezava obeh vezij v model operacijskega ojačevalnika

#### Naloga:

- Preskusi delovanje sestavljenega vezja s slike 3 desno. Najprej poveži oba vhodna priključka na GND in zasuci trimer  $P_{OFF}$  tako, da bo izhodna napetost blizu nič.
- Na vhod  $BX_2$  priključi majhen sinusni signal s frekvenco okoli 1 kHz ter opazuj izhodni signal  $B_{15a}$ . Osciloskop postavi v XY način delovanja in preveri odvisnost z grafa na sliki 2. Kaj opaziš?
- Zmanjšaj amplitudo vhodne napetosti tako, da je izkoriščen le srednji, linearni, del XY grafa s prejšnje točke. Nato vrni osciloskop v običajen način delovanja in potrdi, da sta si izhodni in vhodni signal podobna.
- Obremenjeni izhodni priključek enako, kot si ga obremenil v točki f) prejšnjega paketa nalog. Kaj opaziš tokrat?

Dobljena kombinacija vezij je model operacijskega ojačevalnika. Ima dva vhodna priključka, invertiranega (-) in ne-invertiranega (+) ter en izhodni priključek. Potrebuje tudi napajanje +12 V in -12 V. S takim (močno poenostavljenim) modelom operacijskega ojačevalnika lahko zgradimo ojačevalno stopnjo s poljubnim majhnim ojačenjem, ki ga definira razmerje dveh upornikov. Na sliki



Slika 4: Vezava za ojačevalnik z ojačenjem 11

4 je podana vezava dveh upornikov in modela operacijskega ojačevalnika s slike 3 v stopnjo z ojačenjem 11.

#### Naloga:

- Preskusi delovanje ojačevalne stopnje po predlogi na sliki 4. Je izhodni signal vezja res enajstkratnik vhodnega signala?
- Obremeni izhodni signal enako, kot si ga obremenil v prvem in drugem paketu nalog. Kako breme vpliva na velikost izhodnega signala vezja?

#### Za motivacijo:

Operacijski ojačevalnik je za današnjo elektroniko, ki se ukvarja z merjenji, osnovni gradnik. Zagotavlja veliko ojačenje signala v razmeroma širokem frekvenčnem razponu. Skoraj vedno ga uporabljamo tako, da del njegovega izhodnega signala vodimo nazaj na enega od vhodov, kot smo to storili v vezju na sliki 4. Z negativno povratno vezavo naredimo vezje linearno, z vrednostmi elementov v tej povezavi pa definiramo lastnosti vezja; operacijski ojačevalnik je potem le še ojačevalni element z velikim ojačenjem, lastnosti vezja pa so pod nadzorom (večinoma) pasivnih elementov, ki jih je mogoče izdelati bistveno točneje in bolj ponovljivo od polprevodniških tranzistorjev.

Vsak operacijski ojačevalnik je sestavljen iz vhodnega diferenčnega para tranzistorjev in izhodne močnostne stopnje. Uporabimo lahko različne vrste tranzistorjev ter tako dosežemo optimizacijo delovanja OPAMP v določen namen. Zmanjšamo lahko vhodni tok, pospešimo lahko delovanje, zmanjšamo lahko odvisnost od temperature ali simetričnost vhodnih tranzistorjev. Zato je danes na tržišču mnogo različnih operacijskih ojačevalnikov, pomembne pa so njihove lastnosti, ki jih preberemo iz kataloga proizvajalca.

V tipičnem operacijskem ojačevalniku, ki ga na tržišču kupimo v obliki integriranega vezja, je precej več tranzistorjev, tipično nekaj deset. Poleg tranzistorjev je tam še nekaj upornikov ter kondenzatorjev. Ostale elemente po potrebi dodamo s priključevanjem na proste nožice integriranega vezja.

#### Poenostavljena izračun diferenčnega para tranzistorjev

Za tranzistor velja znana enačba:

$$I_B = I_{B0} \left( e^{U_{BE}/U_T} - 1 \right) \quad \text{ter} \quad I_C = \beta I_B$$

Pri tem je  $I_{B0}$  tok nasičenja za izbrani tranzistor in znaša od  $1^{-10}$  A do  $1^{-18}$  A,  $U_{BE}$  je napetost med bazo in emitorjem (0.65 V),  $U_T$  pa termična napetost (25 mV pri sobni temperaturi).

Analizo diferenčnega para tranzistorjev s slike 1 začnimo z tako, da oba vhodna priključka ozemljimo. Zanimarimo lahko vpliv trimmer potenciometra  $P_{OFF}$  v emitorjih diferenčnega para. Ker sta tranzistorja (to pričakujemo) enaka, sta na obeh spojih med bazo in emitorjem enaki napetosti, zato oba tranzistorja prevajata enak tok, ki znaša polovico tistega, ki teče kozi upornik  $R_{E12}$ . Ta tok je za vhodne napetosti, ki so blizu nič, podan s kvocientom  $U_{RE12}/R_{E12} = I_k \cong 1 \text{ mA}$  in je približno konstanten. Skozi vsakega od tranzistorjev torej teče približno 0.5 mA, zato sta padca napetosti na obeh kolektorskih upornikih  $R_{C1}$  in  $R_{C2}$  enaka (5 V), razlika napetosti med kolektorskima priključkoma tranzistorjev pa je nič. Upornika  $R_{C1}$  in  $R_{C2}$  smo izbrali tako, da sta padca napetosti na njiju ob omenjenih pogojih približno polovico napajalne napetosti, zato je njuna upornost 10 k $\Omega$ .

Pritisnimo zdaj vhodno napetost  $\Delta$  med priključka tako, da se potencial na priključku  $BX_1$  malo zveča, potencial na priključku  $BX_2$  pa malo zmanjša. Zaradi tega se napetost na spoju med bazo in emitorjem tranzistorja  $Q_1$  poveča za  $\Delta/2$ , napetost med bazo in emitorjem  $Q_2$  pa zmanjša za isto mero. Levi tranzistor zaradi tega bolj prevaja in prevzame glavnino toka, ki prihaja skozi upornik  $R_{E12}$ , za desni tranzistor pa ostane manj toka. Povečan tok skozi levi tranzistor povzroči povečan padec napetosti na uporniku  $R_{C1}$ , zmanjšan tok skozi desni tranzistor pa zmanjšan padec napetosti na uporniku  $R_{C2}$ . Zato namerimo razliko napetosti med priključkoma  $BZ_1$  in  $BZ_2$ . Majhna vhodna napetost  $\Delta$  povzroči znatno razliko napetosti na obeh kolektorjih, naredili smo ojačevalnik.

Za ta primer zapišimo kolektorska tokova za oba tranzistorja:

$$I_{CQ1} = \beta_{Q1} I_{BQ10} \left( e^{\frac{U_{BE} + \frac{\Delta}{2}}{U_T}} - 1 \right) \quad \text{in} \quad I_{CQ2} = \beta_{Q2} I_{BQ20} \left( e^{\frac{U_{BE} - \frac{\Delta}{2}}{U_T}} - 1 \right)$$

Ker teče skozi oba tranzistorja znaten tok 0.5 mA, lahko enki v zgornjih enačbah zanemarimo. Kratek račun nam da razmerji obeh tokov. Pri tem privzamemo, da sta tranzistorja enaka in imata enaki ojačeni  $\beta$ , tokova nasičenja  $I_{B0}$ , temperaturi in posledično  $U_{BE}$  in  $U_T$ :

$$\frac{I_{CQ1}}{I_{CQ2}} = e^{\frac{\Delta}{U_T}}$$

Zaradi vhodne napetosti  $\Delta = 25 \text{ mV}$ , za primer, postane razmerje tokov 2.71. To pomeni, da se tok skozi  $Q1$  poveča na  $I_{Q1} = 1.45 \cdot I_k/2$ , tok skozi  $Q2$  pa zmanjša na  $I_{Q1} = 0.54 \cdot I_k/2$ . Izhodna napetost znaša:

$$U_{C1} - U_{C2} = R_C (I_{Q1} - I_{Q2}) = 4.55 \text{ V}$$

Majhna vhodna napetost torej povzroči veliko izhodno. Ojačenje znaša  $4.55/0.025 = 182$ . Ker nismo upoštevali vpliva upornosti trimera  $P_{OFF}$ , bo izmerjeno ojačenje vezja malo manjše. Izhodna upornost diferenčnega para tranzistorjev je enaka upornosti  $R_C$  kot pri tranzistorskem ojačevalniku.

Ker je izhodna upornost velika, diferenčni par tranzistorjev ne zmore toka za poganjanja večjih bremen. Še več: upornost priključenega bremena močno spremeni delovanja para in njuno ojačenje. Potrebujemo močnostni ojačevalnik, ki majhen izhodni tok diferenčnega para poveča na mero, ki je primerna za poganjanje bremena. Močno poenostavljena verzija takega vezja je na sliki 3 levo. Vhodni priključek tega vezja povežemo z enim ob izhodnih priključkov vezja s slike 1. Tranzistor  $Q10$  je PNP tipa in iz njegovega baznega priključka teče tok, ki ga zahteva eden od tranzistorjev diferenčnega para. Zaradi tega teče skozi kolektor  $Q10$  in naprej skozi upornik  $R12$ , diodi  $D12$  in  $D13$  ter upornik  $R13$  beta krat tolikšeren tok. To povzroči padce napetosti na vseh navedenih elementih. Izhodna tranzistorja  $Q15$  in  $Q16$  sta vezana kot emitorska sledilnika; ker sta komplementarna (NPN in PNP), zgornji deluje takrat, ko je treba izhodno napetost dvigniti nad nič voltov, spodnji pa v obratnem primeru. Zaradi obeh diod in upornika  $R12$  teče skozi oba emitorska sledilnika tudi majhen konstantni tok, ki omogoča gladek prehod od prevajanja zgornjega tranzistorja k spodnjemu in obratno. Upornika  $R15$  in  $R16$  sta dodana v vezje zato, da preprečita poškodbe izhodnih tranzistorjev ob morebitnem kratkem stiku izhodne sponke na GND.

Podrobno pojasnilo o delovanju vezja lahko dobiš med praktikumom.