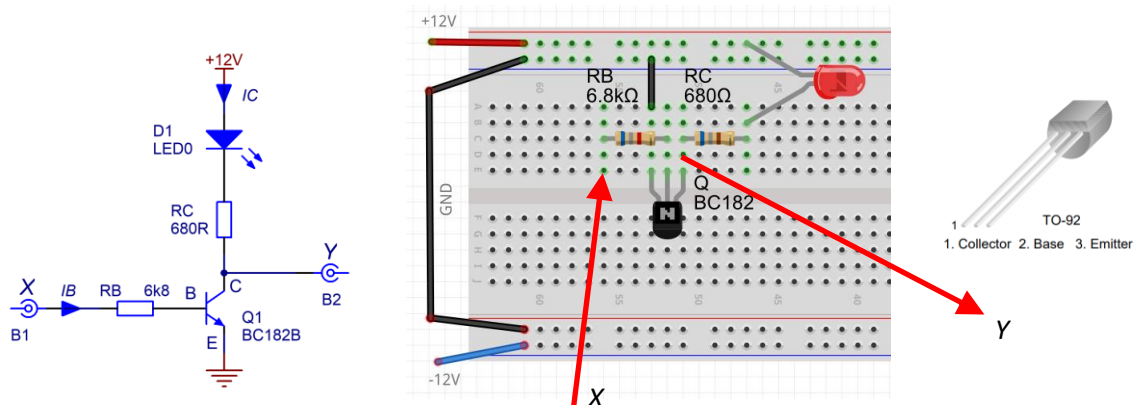


## 2.1 Tranzistor kot stikalo

Tranzistor je tokovni ojačevalnik. Z majhnim tokom v bazni priključek tranzistorja lahko krmilimo mnogo večji tok skozi kolektorski priključek tranzistorja. Uporabili ga bomo kot stikalo za vklopjanje bremena – LE diode. Shema vezja je na sliki 1 levo, vezje pa boš sestavil na prototipni ploščici (»breadboard«). Predlog za sestavljanje je na sliki 1 sredi. Na isti sliki je desno narisan tudi tranzistor in razpored njegovih priključkov. LE dioda naj bo obrnjena tako, kot je narisan na srednji sliki. Vhodni signal  $X$  naj bo 0 ali +12V.



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

### Naloga:

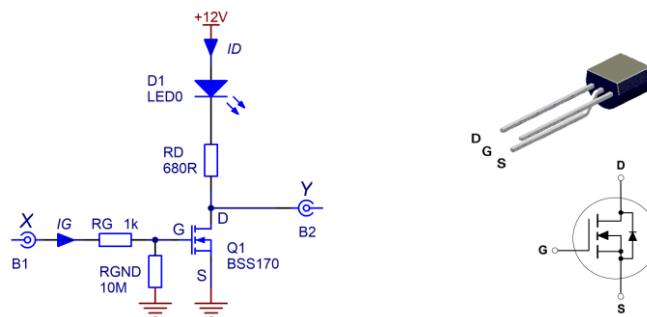
- Preskusi delovanje vezja s tranzistorjem s slike 1 levo. Na vhod  $X$  priključi GND ali +12 V in potrdi, da LED sveti za +12 V, za GND pa skozenj ni toka.
- Na vhod  $X$  priključi pravokotni signal, ki skače med 0 V in +10 V, frekvenco izberi sam. Opazuj obliko signala  $Y$  na kolektorju tranzistorja in pomeri hitrost naraščanja in padanja te napetosti. Kaj opaziš?
- Ponovi poskus iz točke b), tokrat vzporedno uporniku  $R_B$  dodaj kondenzator  $CB = 100$  pF. Kaj opaziš?
- Iztakni povezavo med LE diodo in +12 V in isto mesto veži merilnik toka. Pomeri tok  $I_C$  skozi LED ter izračunaj (lahko tudi pomeriš) vhodni tok  $I_B$  v bazni priključek tranzistorja, oboje za konstanten  $X = +12$  V. Izračunaj kvocient obeh tokov; primerjaj to z ojačevalnim faktorjem  $\beta$  tranzistorja.
- Pomeri napetost med kolektorjem in emitorjem takrat, ko LED sveti. Oцени moč, ki takrat greje tranzistor.

Namesto bipolarnega tranzistorja lahko uporabimo unipolarni (MOS) tranzistor. Shema vezja je na sliki 2 levo, povezave pa so lahko enake kot za vezje s slike 1 sredi, le en upornik je treba dodati. Desno je narisan razpored priključkov za ta tranzistor. Upornik  $R_{GND}$  je dodan, ker je vhodni tok v MOS tranzistor zanemarljivo majhen in že minimalni influencirani naboj iz okolice vezja lahko povzroči na elektrodi »G« dovolj veliko napetost, da MOS tranzistor prevaja. Temu se želimo ogniti, zato take naboje odvedemo z upornikom na GND; elektrode G ne smemo pustiti nepriključene.

### Naloga:

- Preskusi delovanje vezja z MOS tranzistorjem s slike 2 levo. Na vhod  $X$  priključi GND ali +12 V in potrdi, da LED sveti za +12 V, za GND pa skozenj ni toka.

- b) Na vhod X priključi pravokotni signal, ki skače med 0 V in +10 V, frekvenco izberi sam. Opazuj obliko signala Y na elektrodi »drain« tranzistorja in pomeri hitrost naraščanja in padanja te napetosti. Kaj opaziš?
- c) Ponovi poskus iz točke b), tokrat vzporedno uporniku  $R_G$  dodaj kondenzator  $C_B = 100$  pF. Kaj opaziš?
- d) Iztakni povezavo med LE diodo in +12 V in isto mesto veži merilnik toka. Pomeri tok  $I_D$  skozi LED ter izračunaj (lahko tudi pomeriš) vhodni tok  $I_G$  v priključek »gate« tranzistorja, oboje za konstanten  $X = +12$  V. Izračunaj kvocient obeh tokov.
- e) Pomeri napetost med kolektorjem in emitorjem takrat, ko LED sveti. Oцени moč, ki takrat greje tranzistor.



Slika 2: Vežje za poskušanje z MOS tranzistorjem in njegov razpored nožic

### Za motivacijo:

Elektronska vezja, ki opravljajo računanje, analogno ali digitalno, sicer obvladajo potrebno matematiko, a ne zmorejo poganjati bremen, ki potrebujejo veliko toka ali napetosti. Digitalna vezja v osebnem računalniku, na primer, delajo pri napajalni napetosti 5 V ali celo manj. Sposobna so dajati tokove do nekaj mA in s takimi šibkimi (po napetosti in po toku) signali ne moremo niti spodobno poganjati LE diode, kaj šele običajne žarnice ali električnega motorčka. Zato potrebujemo vezja, ki šibke električne signale iz digitalnih vezij po moči ojačijo do te mere, da z njimi lahko poganjamo na primer LE diodo.

Pri vezjih te vrste si želimo potrebnega ojačenja toka in napetosti. Za napetostno povečanje poskrbimo s primerno napajalno napetostjo, v našem primeru +12 V, izberemo pa tak tranzistor, ki napajalno napetost prenese. Skozi tranzistor bo med prevajanjem tekla tok, ki teče tudi skozi breme; izbrati moramo tranzistor, ki tak tok prenese. Ko tranzistor prevaja tok je med njegovima priključkoma C in E (D in S za MOS tranzistor) nekaj malega napetosti, produkt toka skozi tranzistor in napetosti na njem pa je električna moč, ki se na tranzistorju pretvarja v toploto. Izbrati moramo tranzistor, ki tako moč prenese ali pa tranzistor hladiti.

Za bipolarni tranzistor moramo še izbrati upornik  $R_B$ . Če vemo, da vir signala daje napetost  $X$  in največji tok  $I_{xmax}$ , lahko izračunamo najmanjšo dopustno upornost  $R_B \geq (X - 0.65)/I_{xmax}$ . Skozi breme potem lahko teče največ tok  $I_{xmax} \cdot \beta$ . Faktor  $\beta$  je za tranzistor podan v širokem tolerančnem območju, zato je varneje pričakovati največ nekako 75% tega toka skozi breme. Tranzistorji, ki so delani za majhne moči, kot je tudi uporabljeni BC182B, imajo faktor  $\beta$  blizu 100. Za močnostne tranzistorje, ki so delani za tokove nad 1 A in/ali večje napetosti med kolektorjem in emitorjem, je isti faktor navadno med 10 in 100, takrat lahko zvežemo dva ali več tranzistorjev v tako imenovano Darlingtonovo vezavo, za katero se  $\beta$  vseh tranzistorjev zmnožijo, slika 3. Za posebej narejene ojačevalne tranzistorje malih signalov je faktor  $\beta$  lahko tudi do 1000.

Takih težav ni pri MOS tranzistorjih, kjer je vhodni tok zanemarljivo majhen. MOS tranzistorji reagirajo na napetost na krmilni elektrodi »gate«, zato so idealni za ojačevanje digitalnih signalov iz logičnih vezij.

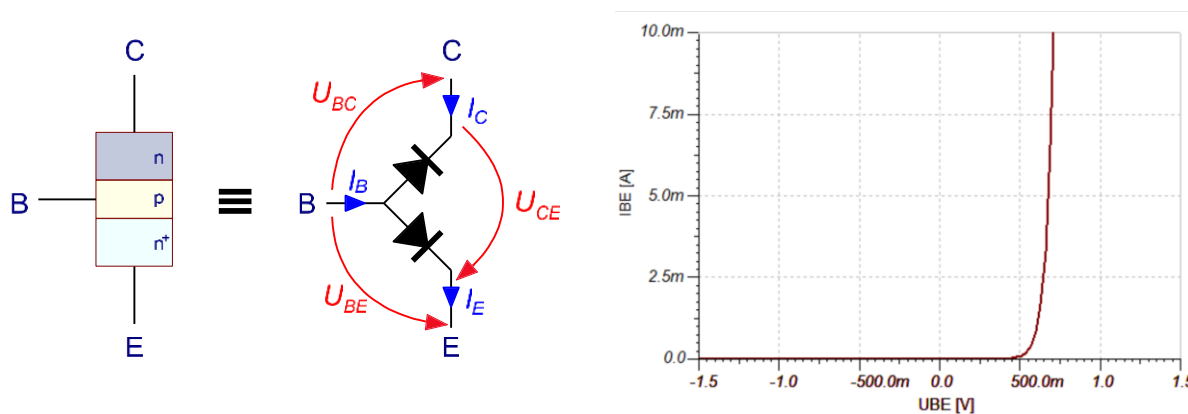
Današnja elektronska vezja so hitra, frekvence urinih signalov v osebnih računalnikih so reda GHz. Zato morajo tudi izhodni ojačevalni elementi, kot smo jih preskušali med to vajo, hitro preklapljati. Pri bipolarnem tranzistorju je hitrost preklopa močno poskočila ob dodatku kondenzatorja k uporniku RB, vezje z MOS tranzistorjem pa je že samo po sebi dovolj hitro.

### Nekaj malega o tranzistorjih

Tranzistor je polprevodniški element s tremi priključki. Glede na tehnologijo izdelave je tranzistor lahko bipolarni sorte (narejen iz P in N tipa polprevodnika) ali unipolarne sorte (pri prevajanju toka sodeluje le ena vrsta polprevodniškega materiala). Poglejmo najprej bipolarni tranzistor.

Pri bipolarnem tranzistorju so sloji polprevodniškega materiala nanešeni drug na drugega, pri tem je srednji sloj, ki ga imenujemo baza (B), zelo tanek. V spodnjem sloju, ki ga imenujemo emitor (E), je običajno več nečistoč kot v zgornjem sloju, ki ga imenujemo kolektor (C). Če izdelamo sloj emitorja iz n<sup>+</sup> (močno onesnažen n-tip polprevodnika) tipa polprevodnika, je sloj baze iz p tipa polprevodnika, sloj kolektorja pa spet iz n tipa. Tako je zgrajen NPN tranzistor, slika 4 levo. Spoja med bazo in preostalima elektrodama obravnavamo kot običajni pn diodi (ista slika v sredini), za kateri zapišemo odvisnost toka ( $I_{BE}$ : tok skozi spoj med B in E,  $I_{BC}$ : tok skozi spoj med B in C) od priključene napetosti.

$$I_{BE} = I_{BE0} \left( e^{\frac{e_0 U_{BE}}{kT}} - 1 \right) = I_{BE0} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \quad \text{in} \quad I_{BC} = I_{BC0} \left( e^{\frac{e_0 U_{BC}}{kT}} - 1 \right) = I_{BC0} \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right)$$



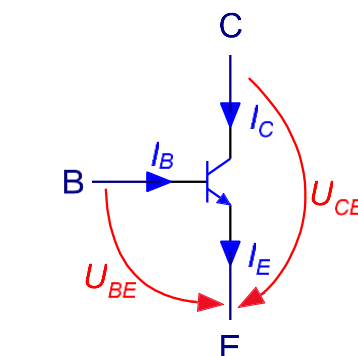
Slika 4: Močno poenostavljena notranjost bipolarnega tranzistorja in oznake tokov in napetosti

V zgornji enačbi sta  $I_{BE0}$  in  $I_{BC0}$  konstanti, ki povzemata lastnosti polprevodniškega materiala, njuni tipični vrednosti pa sta od  $10^{-10}$  do  $10^{-18}$  A. Konstanta  $e_0$  je osnovni naboj elektrona  $1.6e-19$  As,  $k$  je Boltzmanova konstanta  $1.38e-23$  J/K,  $T$  pa absolutna temperatura. Termična napetost  $U_T$  znaša pri sobni temperaturi približno 25 mV. Na sliki 4 desno je podana odvisnost toka skozi diodo BE od napetosti na njej za sobno temperaturo. Do napetosti nekako 650 mV je tok skozi diodo zanemarljivo majhen, pri večjih napetostih pa hitro narašča. Pravimo, da ima karakteristika koleno in pri poenostavljenem razumevanju in računanju privzamemo, da je takrat, ko teče skozi diodo tok, na njej

napetost 650 mV; za natančnejše računanje je treba upoštevati eksponentno odvisnost toka od napetosti po formuli zgoraj.

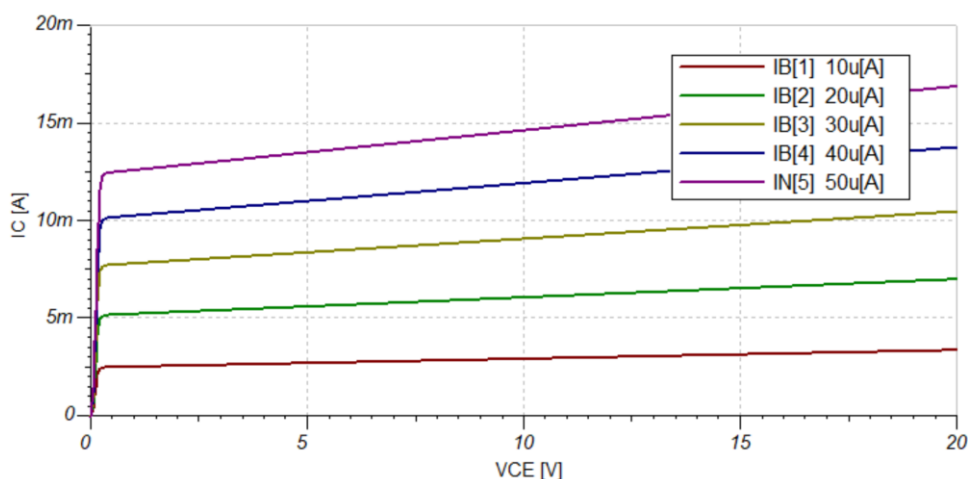
Če priključimo pozitivno napetost na bazo, ostali dve elektrodi pa ozemljimo, se tok v bazo  $I_B$  razveji proti ostalima elektrodama. Razvejitev preprečimo s priključevanjem primerne pozitivne napetosti  $U_{CE}$  med kolektor in emitor, kar povzroči zaporno polarizacijo spoja med kolektorjem in bazo, slika 5. Pričakovali bi, da zdaj teče tok le skozi spoj med bazo in emitorjem, kar pa zaradi minimalne debeline sloja baze ne drži. Skozi diodo med bazo in kolektorjem, ki je na videz polarizirana v zaporni smeri, se pojavi tok, ki je precej večji od toka skozi spoj med bazo in emitorjem. Veljata relaciji:

$$I_C = \beta I_B \quad \text{ter} \quad I_E = I_C + I_B$$



Slika 5: Priklučevanje tranzistorja

Pri tem je konstanta  $\beta$  tokovno ojačenje tranzistorja in znaša tipično 100, lahko pa se giblje od okoli 10 ta tranzistorje večje moči do preko 1000 za šibkejšje tranzistorje.



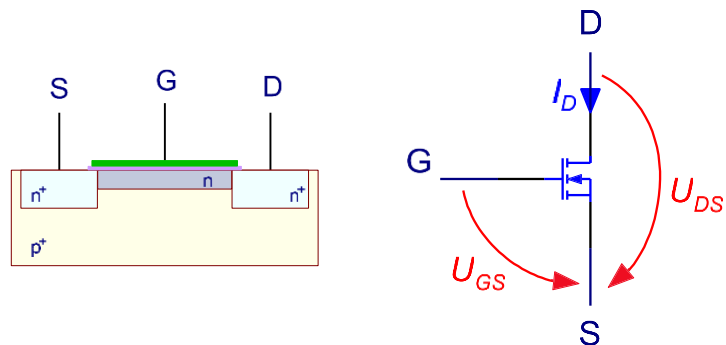
Slika 6: Odvisnost toka  $I_C$  od toka  $I_B$  in napetosti  $U_{CE}$  za tipičen transistor BC182B,  $\beta \approx 250$

Zapisana formula za  $I_C$  ni povsem točna, saj je tok skozi kolektor odvisen tudi od napetosti med kolektorjem in emitorjem, odvisnost najlepše podaja karakteristika za tipičen tranzistor na sliki 6.

V dosedanjem zapisu smo omenjali le NPN strukturo. Seveda ni ovire, da ne bi zamenjali tipa polprevodniških plasti in naredili tranzistorja s PNP strukturo. Za tak tranzistor velja vse do sedaj povedano, le polariteto vseh napetosti in smeri tokov se obrnejo.

Pri unipolarnem tranzistorju (MOS) so plasti razporejene drugače, slika 7 levo. Osnovni element strukture je rahlo dopirana (onesnažena) plast polprevodniškega materiala tipa n, ki jo imenujemo kanal. Na koncih kanala sta dva otoka močno dopiranega polprevodnika  $n^+$ , ta dva otoka sta priključka za elektrodi D (»drain«) in S (»source«). Pod to strukturo je močno dopiran sloj polprevodnika tipa  $p^+$ , ki je električno povezan z enim od otokov (D); imenujemo ga podlaga (»bulk« ali »substrate«). Ker je kanal dovolj tanek, se nosilci naboja iz njega rekombinirajo z nosilci naboja nasprotnega predznaka v podlagi. Ker zdaj v kanalu ni več prostih nosilcev naboja, tok med otokoma D in S ne more teči. Nad kanalom je sloj silicijevega oksida, ki je izolator. Na izolator je nanešena krmilna elektroda G (»gate«). Če na to elektrodo priključimo dovolj veliko pozitivno napetost  $V_{TH}$  ( $V_{TH}$  popisuje lastnosti tranzistorja in tipično znaša nekaj voltov), ta ustvari električno polje preko kanala proti podlagi, ki iz podlage

prikliče (od-rekombinira) nosilce naboja, zato se v kanalu pojavijo prosti nosilci električnega naboja in med elektrodama D in S tok lahko steče. Jakost toka je odvisna od števila prostih nosilcev in napetosti  $U_{DS}$  dokler niso porabljeni vsi prosti nosilci v kanalu; tak režim delovanja imenujemo »ohmsko«. Za večje  $U_{DS}$  je jakost toka odvisna le še od števila prostih nosilcev, torej od napetosti  $U_{GS}$ ; režim delovanja imenujemo »nasičenje«. Obe področji delovanja popisujeta (poenostavljeni) enačbi za tok skozi elektrodo D;  $k$  je odvisen od lastnosti in dimenzij polprevodniške strukture:

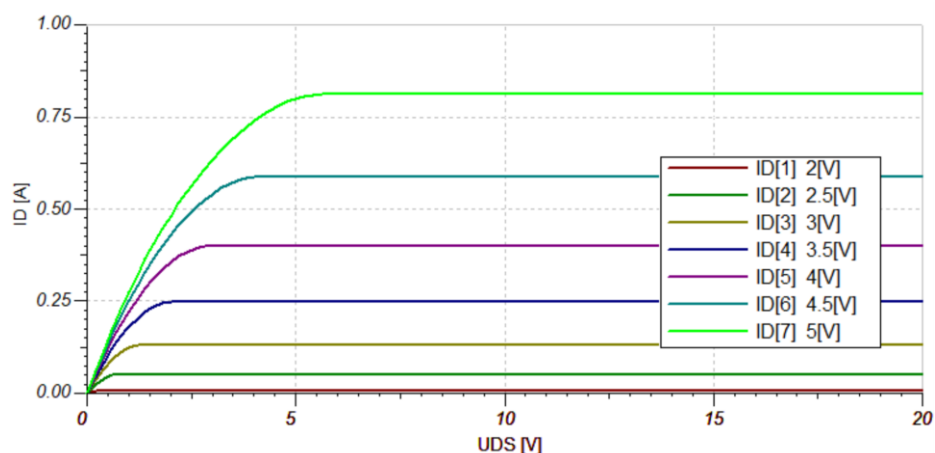


Slika 7: Poenostavljen prerez unipolarnega MOS tranzistorja in njegov simbol

- Ohmski režim velja ob pogojih:  $U_{GS} > U_{TH}$  in  $U_{DS} < U_{GS} - U_{TH}$ :  

$$I_D = k \left[ (U_{GS} - U_{TH})U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$
- Režim nasičenja velja ob pogojih:  $U_{GS} > U_{TH}$  in  $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{TH}$ :  

$$I_D = \frac{k}{2} [U_{GS} - U_{TH}]^2$$



Slika 8: Odvisnost toka  $I_D$  od napetosti  $U_G$  in napetosti  $U_{DS}$  za MOS BSS123

Opisana struktura predstavlja N-MOS tranzistor. Če zamenjamo tipe polprevodnikov, dobimo P-MOS tranzistor, za katerega velja isti opis, le smeri tokov in napetosti je treba obrniti.

Ker lahko plasti polprevodnikov močnejše ali šibkeje dopiramo ter se poigramo z debelino in obliko kanala, se odpirajo še dodatne možnosti za raznovrstno izdelane tranzistorje poleg pravkar opisane za N-MOS tranzistor, za katero tok  $I_{DS}$  steče šele za pozitivne napetosti na krmilni elektrodi. Če je dopiranje podlage šibkejša, ta iz kanala ne posrka vseh nosilcev naboja in kanal prevaja že za  $U_{GS} = 0$ . Nosilce naboja iz kanala odstranimo in s tem preprečimo tok skozi kanal s priklučevanjem negativne napetosti na krmilno elektrodo. Na soroden način se da manipulirati tudi delovanje P-MOS tranzistorja.