

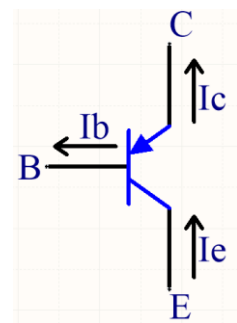
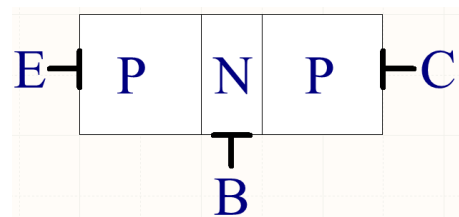
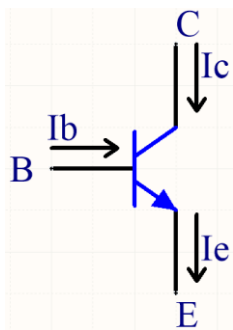
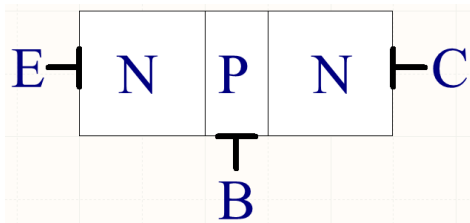
Hardverski interfejs

Vežbe 6

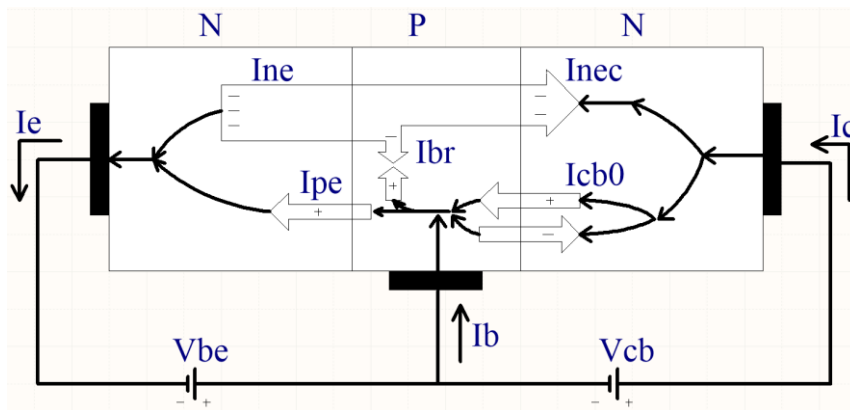
Tranzistori

Bipolarni tranzistor je komponenta sa tri elektrode. Konstrukcija tranzistora je izvedena tako što su dva dela poluprovodnika istog tipa – **emitor** i **kolektor**, spojena uskim poluprovodnikom suprotnog tipa, koji se naziva **baza**. Na ovaj način se formiraju dva p-n spoja u jednom komadu poluprovodnika. Postoje dve vrste bipolarnih tranzistora:

- npn (n-emitor, p-baza, n-kolektor)
- pnp (p-emitor, n-baza, p-kolektor)



Pojačavačko svojstvo tranzistora se izrazito ispoljava u aktivnom režimu, koji se postiže direktnom polarizacijom emitorskog i inverznom polarizacijom kolektorskog spoja. Tok struja u tranzistoru u aktivnom režimu prikazan je na slici ispod (za radoznale):



Rad tranzistora je određen konstrukcijom, izborom geometrije i koncentracije primesa, s jedne strane i polarizacijom odgovarajućim polaritetom i intenzitetom primenjenih napona sa druge. Za tranzistor koji radi u aktivnom režimu izvršiće se analiza raspodele struja pod sledećim pretpostavkama:

- emitor je najjače dopiran, baza najslabije, a kolektor jače od baze ali slabije od emitora
- širina baze, definisana kao najbliže rastojanje između emitorskog i kolektorskog spoja, je dovoljno mala

U tranzistoru je spoj emitor-baza direktno polarisan, pa stoga propušta glavne nosioce. To su elektroni iz emitora, koji čine struju I_{ne} i šupljine iz baze, koji čine struju I_{pe} . Stoga, ukupna emitorska struja ima vrednost:

$$I_e = I_{ne} + I_{pe}.$$

Zbog inverzne polarizacije spoja kolektor-baza, kroz njega prolaze sporedni nosioci naelektrisanja. Elektroni koji potiču iz baze prelaze u kolektor, a šupljine idu iz kolektora u bazu. Ove dve vrste nosilaca teku kroz kolektorski spoj i kada je emitorsko kolo otvoreno, čineći tako inverznu struju I_{cb0} . Treba uočiti da su pored ove dve vrste nosilaca, sporedni nosioci za inverzno polarisan kolektorski spoj takođe i elektroni koji su došli iz emitora, a koji se nisu rekombinovali u bazi. Ti elektroni čine komponentu kolektorske struje I_{nec} . Deo elektrona koji su došli iz emitora se rekombinuje u bazi sa šupljinama koje se tu nalaze. Time se formira struja I_{br} , odnosno struja rekombinacije. Prema tome, ukupna struja kolektora iznosi:

$$I_c = I_{nec} + I_{cb0}.$$

Bazna struja tranzistora sadrži tri komponente: struju šupljina I_{pe} , struju rekombinacije I_{br} i inverznu struju zasićenja kolektorskog spoja I_{cb0} :

$$I_b = I_{pe} + I_{br} - I_{cb0}.$$

Prema KZS, između struja tranzistora na spoljnim priključcima važi:

$$I_e = I_c + I_b.$$

Pojačavačko svojstvo bipolarnog tranzistora je zasnovano na principu da se malim promenama struje baze izazivaju velike promene struje kolektora. Da bi se to postiglo, treba prvo inverznu struju zasićenja kolektorskog spoja učiniti što manjom, jer se ona javlja kao konstantan član u izrazima za kolektorsku i baznu struju. Struju kolektora praktično čine elektroni koji dolaze iz emitora, koji prežive prolazak kroz bazu i stignu u kolektor. Ako je kolektorska struja bliža po vrednosti emitorskoj, onda je bazna struja manja. To znači da je odnos kolektorske struje i bazne veći, odnosno da je pojačavačko svojstvo tranzistora izraženije. Da bi se emitorska struja približila kolektorskoj, potrebno je da struja šupljina I_{pe} bude mnogo manja od struje elektrona I_{ne} na emitorskom spoju, kao i da struja rekombinacije u bazi I_{br} bude što manja, da bi struje I_{ne} i I_{nec} bile približno iste. Prvi uslov se kvantitativno izražava preko efikasnosti emitora γ , definisane odnosom elektronske i ukupne struje na emitorskom spoju:

$$\gamma = \frac{I_{ne}}{I_{ne} + I_{pe}}$$

Da bi efikasnost emitora bila što bliža jedinici, potrebno je znatno jače dopirati emitor u odnosu na bazu (prva pretpostavka). Da bi struja rekombinacije bila što manja, baza se pravi da bude što manje dužine, tako da se vreme boravka emitorovih elektrona u bazi, a time i verovatnoća rekombinacije, smanji. Ovaj efekat se izražava transportnim faktorom β , definisanim odnosom struje elektrona iz emitora koja izlazi i ulazi u bazu:

$$\beta = \frac{I_{nec}}{I_{ne}}$$

Vidi se da je transportni faktor bliži jedinici ako je rekombinacija u bazi manja.

Koristeći prethodne relacije, odnos između struja tranzistora se izražava u obliku:

$$I_c = \alpha \cdot I_e + I_{cb0},$$

gde je

$$\alpha = \beta \cdot \gamma = \frac{I_{nec}}{I_e} = \frac{I_c - I_{cb0}}{I_e}.$$

Koeficijent α se naziva **faktor strujnog pojačanja od emitora do kolektora**. On ima vrednost manju od 1 i pokazuje odnos kolektorske i emitorske struje kada se zanemari inverzna struja zasićenja kolektorskog spoja.

$$I_c = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_b + \frac{1}{1 - \alpha} \cdot I_{cb0}$$

$$I_c = \beta \cdot I_b + (1 + \beta) \cdot I_{cb0}.$$

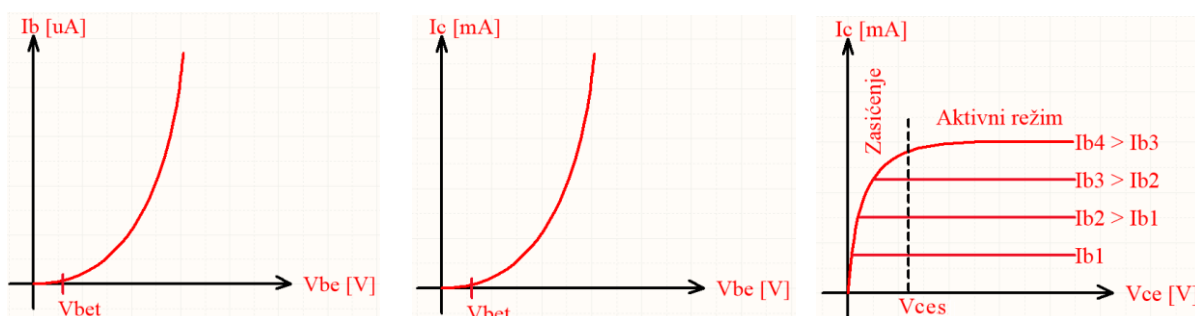
Dakle, koeficijent strujnog pojačanja je:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\beta = \frac{I_c - I_{cb0}}{I_b + I_{cb0}}$$

Koeficijent β se naziva **faktor strujnog pojačanja od baze do kolektora**, i on je jednak odnosu kolektorske i bazne struje kada se zanemari I_{cb0} . Njegova vrednost je mnogo veća od jedinice. Ukoliko je α bliže jedinici vrednost koeficijenta β je veća. U literaturi se često faktor strujnog pojačanja od baze kolektora β označava sa h_{FE} , te ćemo ga i mi tako u nastavku označavati.

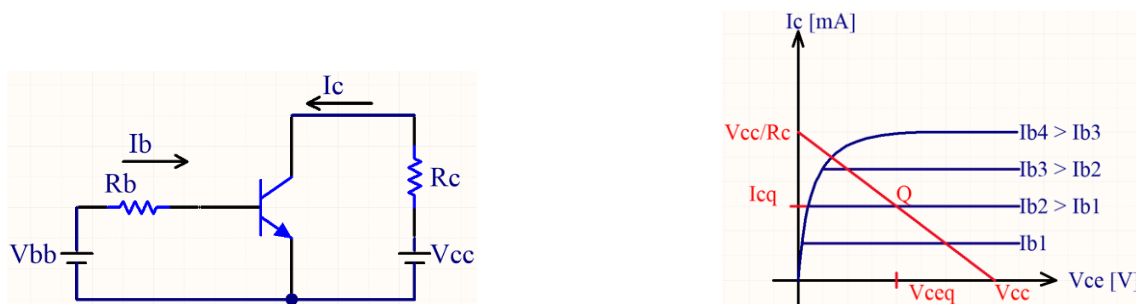
Statičke karakteristike tranzistora



Kolektorska struja, I_c opisuje se pomoću relacije:

$$I_c = I_s \cdot e^{\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right)}.$$

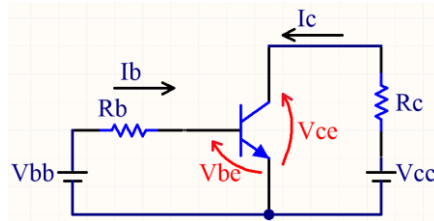
Radna tačka tranzistora



Baterija V_{bb} direktno polariše spoj baza-emitor, a intenzitet struje baze se određuje izborom otpornika R_b . Preko baterije V_{cc} i otpornika R_c definiše se radna tačka Q, određena naponom V_{ce} i strujom I_c , tako da kolektorski spoj bude inverzno polarisan, odnosno da tranzistor radi u aktivnom režimu. Radna tačka se nalazi u preseku radne prave (definisane okolnim kolom) i karakteristike tranzistora.

Napomena: Sve što je označeno plavom bojom na crtežima u sklopu zadatka je deo postavke zadatka, a sve što je označeno crvenom bojom dodato je u postupku rešavanja zadatka.

Primer 1: U kolu sa slike odrediti radnu tačku tranzistora u aktivnom režimu (V_{ceQ} , I_{cQ}) ako je $V_{be} = 0.6V$, $h_{FE} = 100$, $V_{cc} = 6V$, $V_{bb} = 3.1V$, $R_b = 250\ k\Omega$, $R_c = 3\ k\Omega$.



$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = 10\ \mu A$$

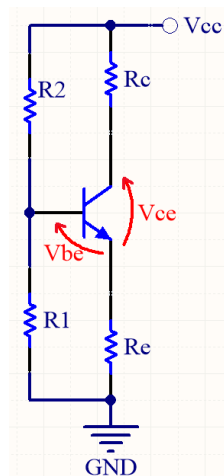
$$I_c = h_{FE} \cdot I_b = 1\ mA$$

$$V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c = 3\ V$$

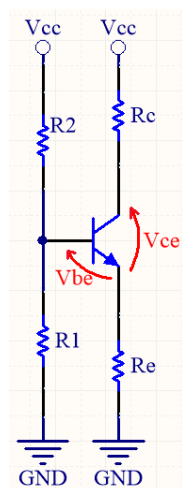
$$V_{cb} = V_{ce} - V_{be} = 2.4\ V$$

$Q(3V, 1mA)$ – emitterski spoj je direktno polarisan, a kolektorski inverzno, pa tranzistor radi u aktivnom režimu.

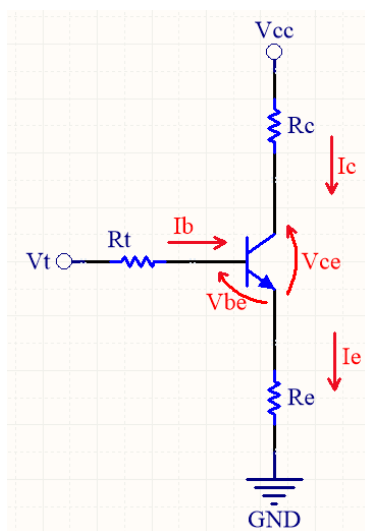
Primer 2: U kolu sa slike odrediti radnu tačku tranzistora u aktivnom režimu (V_{ceQ} , I_{cQ}) ako je $V_{cc} = 12V$, $R_1 = 18\ k\Omega$, $R_2 = 36\ k\Omega$, $R_c = 22\ k\Omega$, $R_e = 16\ k\Omega$, $h_{FE} = 75$, $V_{be} = 0.7V$.



Ekvivalentno kolo izgleda:



Odnosno, primenom Tevenenove teoreme:



$$V_t = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{cc} = 4 \text{ V}$$

$$R_t = R_1 \parallel R_2 = 12 \text{ k}\Omega$$

$$V_t = R_t \cdot I_b + V_{be} + I_e \cdot R_e$$

$$I_e = I_b + I_c = I_b + h_{FE} \cdot I_b = I_b \cdot (1 + h_{FE})$$

$$I_b = \frac{V_t - V_{be}}{R_t + (1 + h_{FE}) \cdot R_e} = 2.73 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_c = h_{FE} \cdot I_b = 205 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_e = I_b \cdot (1 + h_{FE}) = 208 \text{ }\mu\text{A}$$

$$V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c - R_e \cdot I_e = 4.17 \text{ V}$$

$$V_{cb} = V_{ce} - V_{be} = 3.67 \text{ V}$$

$Q(4.17 \text{ V}, 205 \mu\text{A})$ – emitorski spoj je direktno polarisan, a kolektorski inverzno, pa tranzistor radi u aktivnom režimu.

Oblasti rada tranzistora

1. **Direktno aktivna oblast:** $V_{be} > 0$ i $V_{cb} > 0$.

Emitorski spoj je polarizovan direktno, a kolektorski spoj inverzno. Kada tranzistor radi kao pojačavač onda je normalno da je na taj način polarisan.

$$\begin{aligned} I_c &= h_{FE} \cdot I_b \\ V_{be} &> V_{bet} \\ V_{ces} &< V_{ce} < V_{cc} \\ I_c &> 0 \\ I_b &> 0 \end{aligned}$$

2. **Inverzno aktivna oblast:** $V_{be} < 0$ i $V_{cb} < 0$.

Emitorski spoj je polarizovan inverzno, a kolektorski spoj direktno. Uloge emitora i kolektora su izmenjene. Može se pokazati da tranzistor može da radi u toj oblasti kao pojačavač. Međutim, tranzistori su tako konstruisani da su transportni faktor i efikasnost emitora, a time i strujna pojačanja u ovoj oblasti rada, izrazito mali. Stoga se tranzistor retko koristi u ovoj oblasti rada.

3. **Oblast zasićenja:** $V_{be} > 0$ i $V_{cb} < 0$.

Oba spoja su direktno polarisana. Naponi direktnih polarizacija su mali, tako da je otpornost između bilo kojih elektroda tranzistora mali, a naročito između emitora i kolektora.

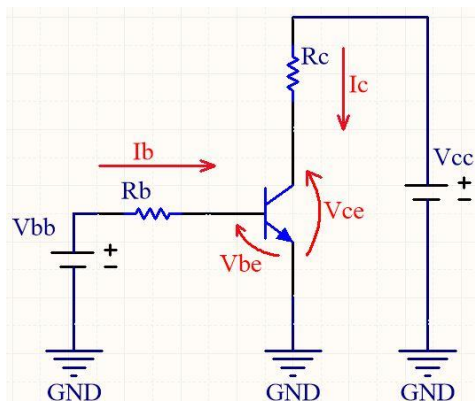
$$\begin{aligned} I_c &< h_{FE} \cdot I_B \\ V_{be} &= V_{bes} (\approx 0.7 \text{ V}) \\ V_{ce} &= V_{ces} (\approx 0.2 \text{ V}) \end{aligned}$$

4. **Oblast zakočenja:** $V_{be} < 0$ i $V_{cb} > 0$.

Oba spoja su inverzno polarisana. Struje elektroda su veoma male, reda I_{cb0} , a otpornost između bilo kojih elektroda velika. Kada tranzistor radi kao prekidač u impulsnim kolima, onda se on obično prebacuje iz oblasti zakočenja u oblast zasićenja i obrnuto.

$$\begin{aligned} V_{be} &< V_{bet} \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \\ I_e &= 0 \\ V_{ce} &= V_{cc} \end{aligned}$$

Primer 3: Za kolo sa slike odrediti da li je tranzistor u zasićenju. Poznato je: $V_{bb} = 3V$, $V_{cc} = 10V$, $R_b = 10\text{ k}\Omega$, $R_c = 1\text{ k}\Omega$, $V_{be} = 0.7V$, $V_{ces} = 0.2V$, $h_{FE} = 50$.



Za levi deo kola važi relacija:

$$V_{bb} = R_b \cdot I_b + V_{be}$$

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = \frac{3 - 0.7}{10 \cdot 10^3} = 0.23\text{ mA}$$

Za desni deo kola važi relacija:

$$V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ces}$$

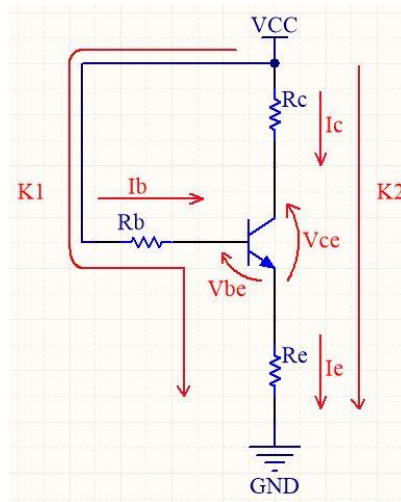
$$I_{Csat} = \frac{V_{cc} - V_{ces}}{R_c} = \frac{10 - 0.2}{1000} = 9.8\text{ mA}$$

Da bi se utvrdilo da li se tranzistor nalazi u zasićenju mora se proveriti da li je ispunjen uslov zasićenja $I_{Csat} < h_{FE} \cdot I_b$

$$9.8\text{ mA} < 50 \cdot 0.23\text{ mA} \rightarrow 9.8\text{ mA} < 11.5\text{ mA}$$

Može se zaključiti da se tranzistor nalazi u zasićenju.

Primer 4: Odrediti radnu tačku (V_{ce} , I_c) za tranzistorsko kolo prikazano na slici. Poznato je: $V_{cc} = 12V$, $R_c = 560\Omega$, $R_b = 330\text{ k}\Omega$, $R_e = 1\text{ k}\Omega$, $V_{be} = 0.7V$, $h_{FE} = 100$.



Posmatrano kroz konturu 1 može se napisati:

$$V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot I_e$$

$$I_e = I_b + I_c$$

$$V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot (I_b + I_c)$$

Kako je $I_c = h_{FE} \cdot I_b$, sledi:

$$V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot (h_{FE} I_b + I_b)$$

$$V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot I_b \cdot (h_{FE} + 1)$$

$$V_{cc} = I_b \cdot (R_b + R_e \cdot (h_{FE} + 1)) + V_{be}$$

Stoga, struja I_b dobija se kao:

$$I_b = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_b + R_e \cdot (h_{FE} + 1)} = \frac{12 - 0.7}{330 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 \cdot (100 + 1)} = 26.2 \mu A$$

$$I_c = h_{FE} \cdot I_b = 100 \cdot 26.2 \mu A = 2.62 \text{ mA}$$

$$I_e = I_b + I_c = 2.62 \text{ mA} + 26.2 \mu A = 2.6462 \text{ mA}$$

Posmatrano kroz konturu 2 može se napisati jednačina:

$$V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce} + R_e \cdot I_e$$

$$V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c - R_e \cdot I_e$$

$$V_{ce} = 12 - 560 \cdot 2.62 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^3 \cdot 2.6462 \cdot 10^{-3} = 7.8866 \text{ V}$$

Radna tačka tranzistora je:

$$(V_{ce}, I_c) = (7.8V, 2.62 \text{ mA})$$

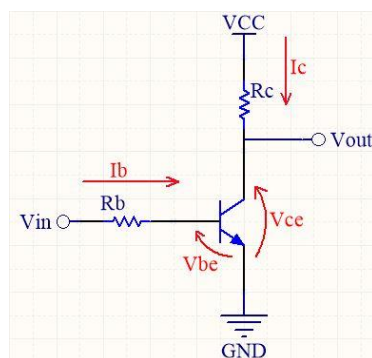
Primer 5: Za kolo na slici u kome tranzistor radi kao prekidač odrediti:

a) Napon V_{out} kada je $V_{in} = 0V$.

b) Najmanju vrednost struje baze za koju će tranzistor ući u zasićenje, ako je $h_{FE} = 125$ i $V_{ces} = 0.2V$.

c) Maksimalnu vrednost R_b za koju je obezbeđen uslov zasićenja ako je $V_{in} = 5V$.

Poznato je: $V_{cc} = 10V$, $R_c = 1\text{ k}\Omega$, $V_{be} = 0.7V$.



a)

Kako je ulazni napon $V_{in} = 0V$, sledi da je struja $I_b = 0$. Time sledi i da je struja $I_c = 0$, jer je

$$I_c = h_{FE} \cdot I_b$$

Posmatrano kroz granu kolektora može se napisati izraz:

$$V_{out} = V_{cc} - R_c \cdot I_c = 10 - 1 \cdot 10^3 \cdot 0 = 10\text{ V}$$

b)

Da bi tranzistor radio u zasićenju potrebno je da je ispunjen uslov $I_{Csat} < h_{FE} \cdot I_b$

Posmatrano kroz granu kolektora, struja zasićenja može se izračunati kao:

$$I_{Csat} = \frac{V_{cc} - V_{ces}}{R_c} = \frac{10 - 0.2}{1000} = 9.8\text{ mA}$$

Najmanja vrednost struje baze pri kojoj će tranzistor ući u zasićenje dobija se kao:

$$I_{Csat} < h_{FE} \cdot I_b \rightarrow I_b > \frac{I_{Csat}}{h_{FE}}$$

$$I_b > \frac{9.8\text{ mA}}{125}$$

$$I_b > 78.4\text{ }\mu\text{A}$$

c)

Posmatrano kroz granu baze može se napisati izraz:

$$V_{in} = R_b \cdot I_b + V_{be}$$

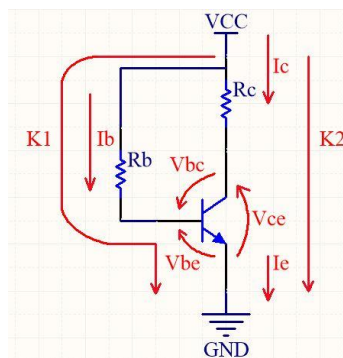
Maksimalna vrednost otpora pri kojoj će tranzistor i dalje raditi u zasićenju je:

$$R_{bmax} = \frac{V_{in} - V_{be}}{I_{bmin}} = \frac{5 - 0.7}{78.4 \cdot 10^{-6}} = 54.85 \text{ k}\Omega$$

Primer 6: Za električno kolo sa tranzistorom sa slike treba odrediti:

- a) napon na otporniku R_c
- b) napone V_{bc} i V_{ce}
- c) emitorsku struju I_e
- d) snagu koju troši tranzistor
- e) iznos otpora R_b da bi tranzistor radio u zasićenju

Poznato je $V_{CC} = 12V$, $h_{FE} = 100$, $R_c = 1 \text{ k}\Omega$, $R_b = 150 \text{ k}\Omega$, $V_{be} = 0.7V$, $V_{ces} = 0.2V$.



a)

Posmatrano kroz K1:

$$V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be}$$

$$I_b = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{150 \cdot 10^3} = 75.3 \mu A$$

$$I_c = h_{FE} \cdot I_b = 100 \cdot 75.3 \mu A = 7.53 \text{ mA}$$

Napon na otporniku R_c iznosi:

$$V_{R_c} = I_c \cdot R_c = 7.53 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 7.53 \text{ V}$$

b)

Napone V_{bc} i V_{ce} možemo izračunati kao:

$$V_{ce} = V_{cc} - V_{R_c} = 12 - 7.53 = 4.47 \text{ V}$$

$$V_{bc} = -(V_{ce} - V_{be}) = V_{be} - V_{ce} = 0.7 - 4.47 = -3.77 \text{ V}$$

c)

$$I_e = I_b + I_c$$

$$I_e = I_b + I_c = 75.3 \mu\text{A} + 7.53 \text{ mA} = 7.6053 \text{ mA}$$

d)

$$P_T = V_{be} \cdot I_b + V_{ce} \cdot I_c = 0.7 \cdot 75.3 \cdot 10^{-6} + 4.47 \cdot 7.53 \cdot 10^{-3} = 33.71 \text{ mW}$$

e)

Posmatrano kroz K2 i K1 možemo napisati jednačine:

$$I_{Csat} = \frac{V_{cc} - V_{ces}}{R_c} = \frac{12 - 0.2}{1000} = 11.8 \text{ mA}$$

$$I_b = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{R_b} = \frac{11.3}{R_b}$$

Da bi tranzistor radio u zasićenju potrebno je da je ispunjen uslov $I_{Csat} < h_{FE} \cdot I_b$

$$I_{Csat} < h_{FE} \cdot I_b \rightarrow I_{Csat} < h_{FE} \cdot \frac{11.3}{R_b}$$

$$11.8 \text{ mA} < 100 \cdot \frac{11.3}{R_b} \rightarrow R_b < \frac{1130}{11.8 \cdot 10^{-3}} = 95.76 \text{ k}\Omega$$

Primer 7: U kolu sa silicijumskim tranzistotom kroz LE Diodu teče struja jačine 5mA, dok je napon na diodi $V_D = 1.6\text{V}$. Poznato je $V_{be} = 0.7\text{V}$, $h_{FE} = 200$, $V_{cc} = 6\text{V}$. Izračunati:

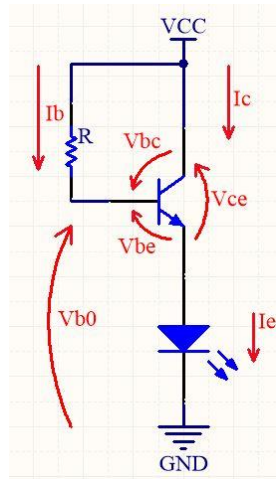
a) vrednost otpornika R

b) napone V_{b0} , V_{ce} , V_{bc} i V_{cb}

c) snagu tranzistora

Napomena:

Zanemariti struju baze I_b prema emitorskoj struji I_e (ona se najčešće zanemaruje kod velikog strujnog pojačanja h_{FE} kao što je to ovde slučaj).



a)

Ukoliko se zanemari vrednost bazne struje u odnosu na emittersku kao što je navedeno, sledi da je:

$$I_e = I_b + I_c \rightarrow I_e = I_c$$

Kako je struja emitera I_e u isto vreme i struja kroz LE diodu, sledi da je:

$$I_e = I_c = I_D = 5 \text{ mA}$$

$$I_c = h_{FE} \cdot I_b$$

$$5 \text{ mA} = 200 \cdot I_b \rightarrow I_b = 25 \mu\text{A}$$

Posmatrano kroz baznu granu kola sledi da je:

$$R = \frac{V_{cc} - V_{be} - V_D}{I_b} = \frac{6 - 0.7 - 1.6}{25 \cdot 10^{-6}} = 148 \text{ k}\Omega$$

b)

Naponi V_{b0} , V_{ce} , V_{bc} i V_{cb} dobijaju se kao:

$$V_{b0} = V_{be} + V_D = 0.7 + 1.6 = 2.3 \text{ V}$$

$$V_{ce} = V_{cc} - V_D = 6 - 1.6 = 4.4 \text{ V}$$

$$V_{cb} = V_{ce} - V_{be} = 4.4 - 0.7 = 3.7 \text{ V}$$

$$V_{bc} = -V_{cb} = -3.7 \text{ V}$$

c)

$$P_T = V_{be} \cdot I_b + V_{ce} \cdot I_c = 0.7 \cdot 25 \cdot 10^{-6} + 4.4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 22.02 \text{ mW}$$