

Održavanje Brodskih Elektroničkih Sustava

Sadržaj predavanja:

1. Upoznavanje s osnovnim sklopovima tranzistorskih pojačala
2. Upoznavanje s osnovnim sklopovima operacijskih pojačala
3. Analogni sklopovi posebne namjene

Klasifikacija Tranzistora

Low Frequency - za audio niskofrekventne primjene (ispod 100kHz)

High Frequency – za visokofrekventne primjene (iznad 100 kHz)

Switching – tranzistori za switching aplikacije

Low-noise – primarna namjena im je za pojačanje signala male amplitude (zbog niskog nivoa šuma)

High-voltage - tranzistori za visokonaponske aplikacije

Driver - tranzistori osrednje snage te za razmjerno niskonaponske aplikacije koji prethode sklopovima snage

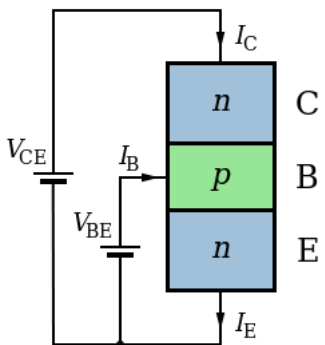
Small-signal – tranzistori za pojačanje signala niskog naponskog nivoa te se koriste u pojačalima te radio prijemnicima.

Power – tranzistori koji mogu podnijeti visoke nivoe napona i struje

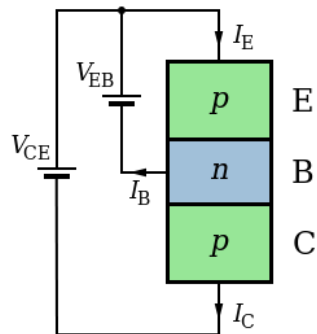
Tranzistor



- BC107 – NPN Silicon Epitaxial Transistor
- BJT – (Bipolar Junction Transistor) koristi dvije vrste nosioca naboja – elektrone i šupljine
- FET (Field Effect Transistor) koristi samo jednu vrstu nosilaca naboja
- BJT se sastoji od dva poluvodička P-N spoja između P i N tipa poluvodiča
- BJT tranzistori dolaze u formi NPN ili PNP spoja
- osnovna funkcija im je pojačanje struje
- koriste se kao pojačala ili kao sklopke
- složeni tranzistorski sklopovi koriste se u digitalnoj logici kao "I", "ILI", "NI" vrata te kao memorijske jedinice za pohranu bita memorije
- moderni integrirani krugovi (IC) su složeni tranzistorski sklopovi koji se sastoje od milijuna tranzistora integriranih na silikonskom čipu



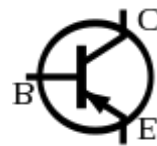
NPN



PNP



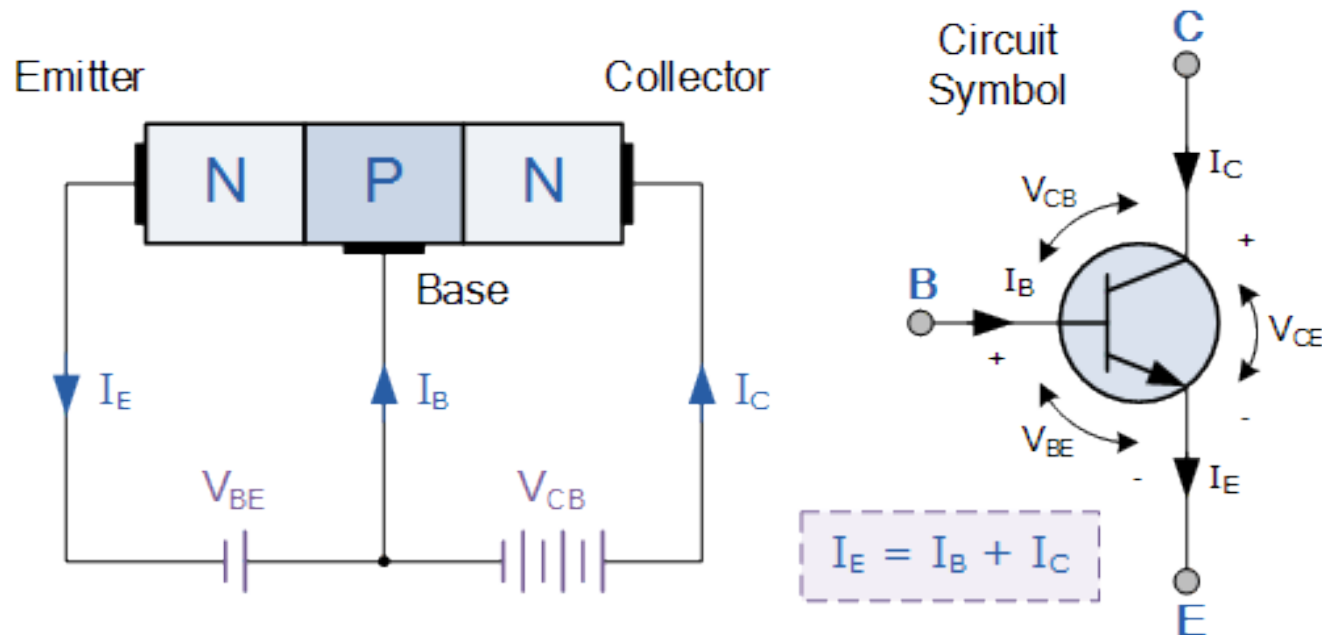
NPN



PNP

Bipolarni NPN Tranzistor-Konfiguracija

Napona na Tranzistoru

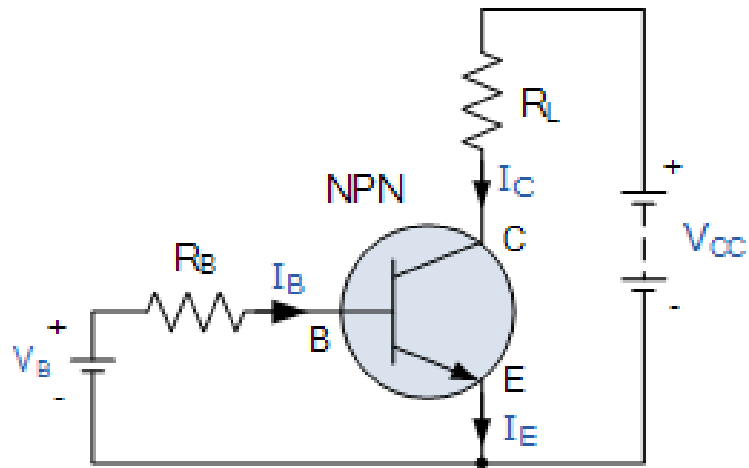


V_{BE} -napon baza-emitter je pozitivan na bazi i negativan na emiteru

V_{CE} -napon kolektor-emiter je pozitivan na kolektoru i negativan na emiteru

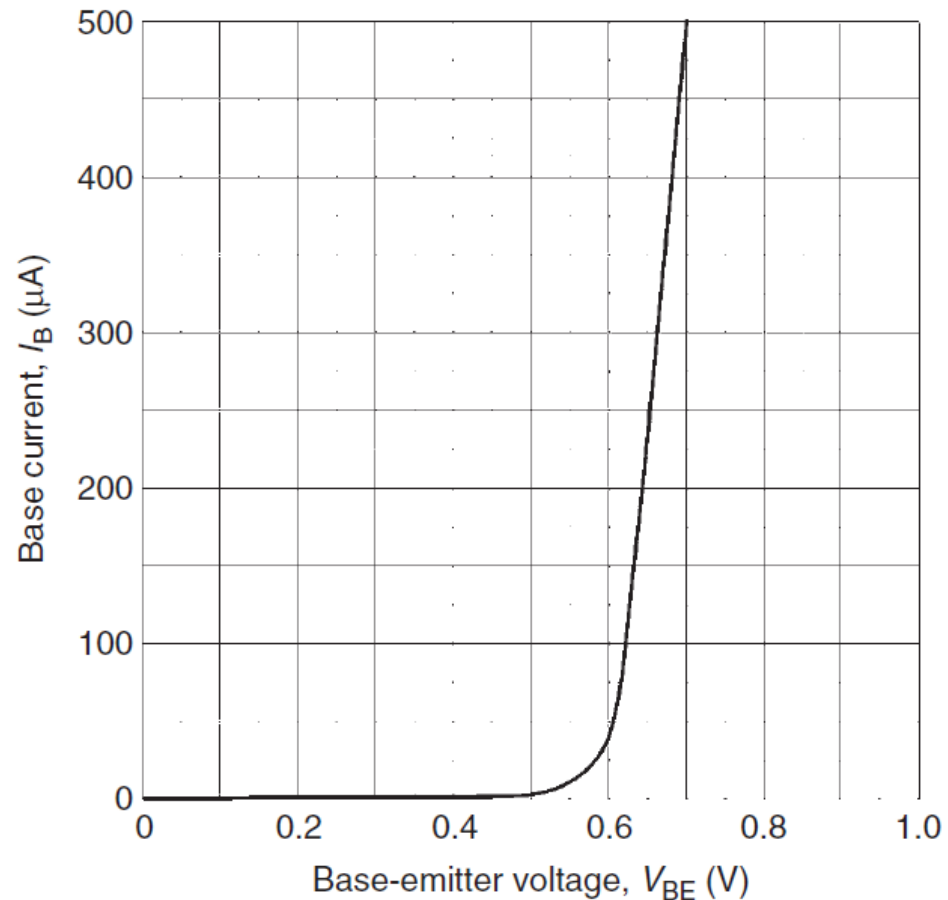
$V_{CE} > V_{BE}$ – zbog toga je $V_{CB} > 0$

Bipolarni NPN Tranzistor – Spoj zajedničkog emitera (ZE)



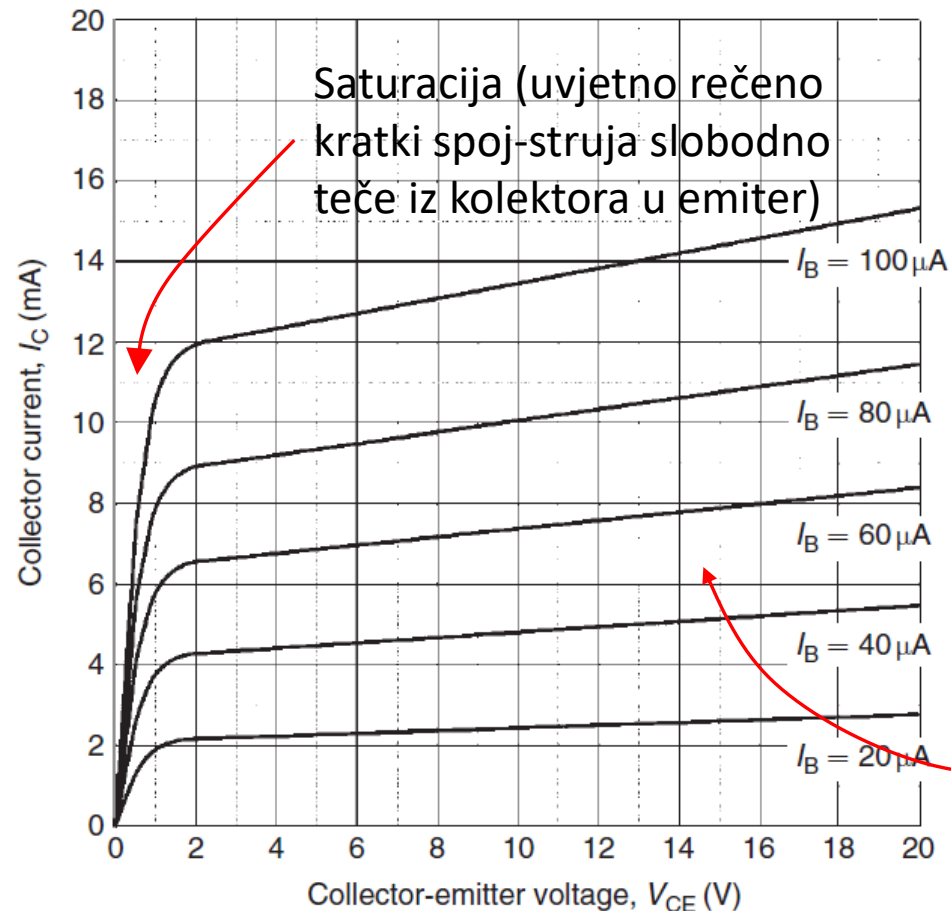
- Napon napajanje V_{CC} se spaja preko otpora tereta R_L na kolektor
- Otpor tereta R_L služi za limitiranje maksimalne struje kroz tranzistor
- Otpor baze R_B služi za limitiranje maksimalne struje baze

NPN Tranzistor (ZE)-ulazna karakteristika



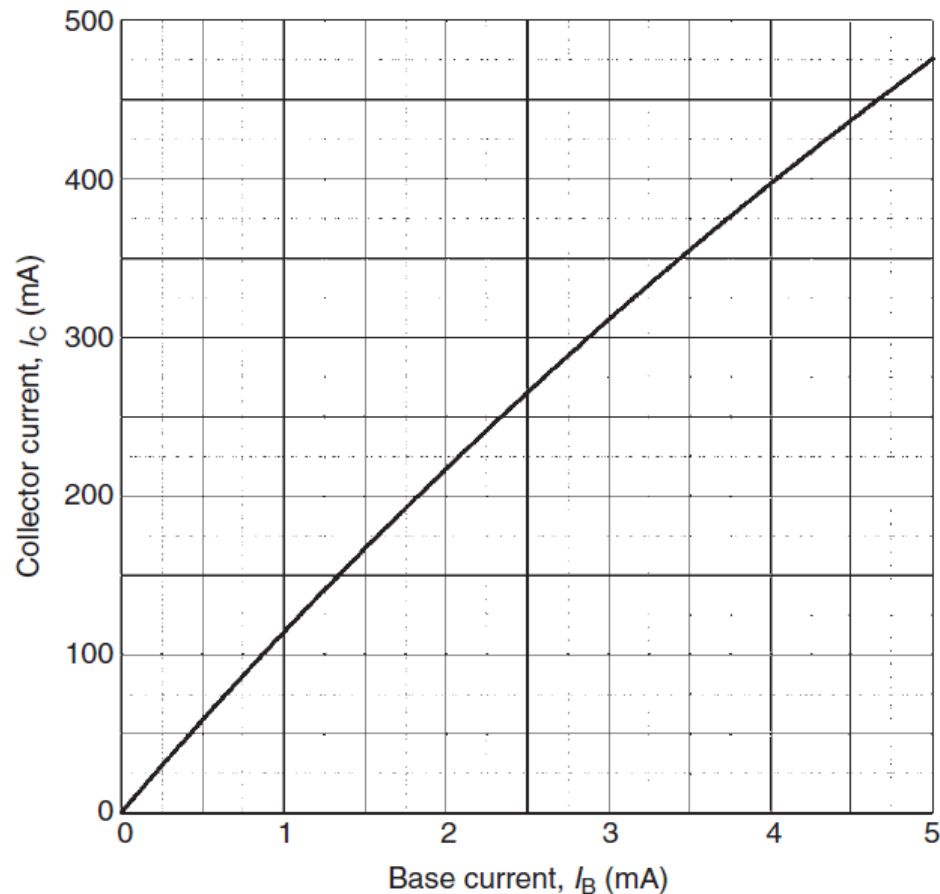
- Na slici se nalazi ulazna karakteristika tranzistora u spoju zajedničkog emitera
- Na ulaznoj karakteristici se vidi da dok napon V_{BE} ne dosegne 0.6V kroz bazu teče vrlo mala struja

NPN Tranzistor (ZE)-izlazna karakteristika



- Na slici se nalazi izlazna karakteristika tranzistora u spoju zajedničkog emitera
- Koljeno na izlaznoj karakteristici se nalazi otprilike za napon $V_{CE}=2V$
- Za $V_{CE}>2V$ krivulje su dosta ravne i struja kolektora se ne mijenja bitno sa naponom V_{CE}
- Režim rada tranzistora prikazan na slici naziva se i aktivna regija tranzistora
- Napon V_{CE} se ne može beskonačno povećavati, nakon određene vrijednosti napona V_{CE} dolazi do izgaranja tranzistora (breakdown voltage)

NPN Tranzistor (ZE)-prijenosna karakteristika



- Na slici se nalazi prijenosna karakteristika tranzistora u spoju zajedničkog emitera
- Krivulja na slici predstavlja ovisnost struje kolektora I_C o struji baze I_B za mali signalni tranzistor
- Nagib krivulje je jednak strujnom pojačanju tranzistora β

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

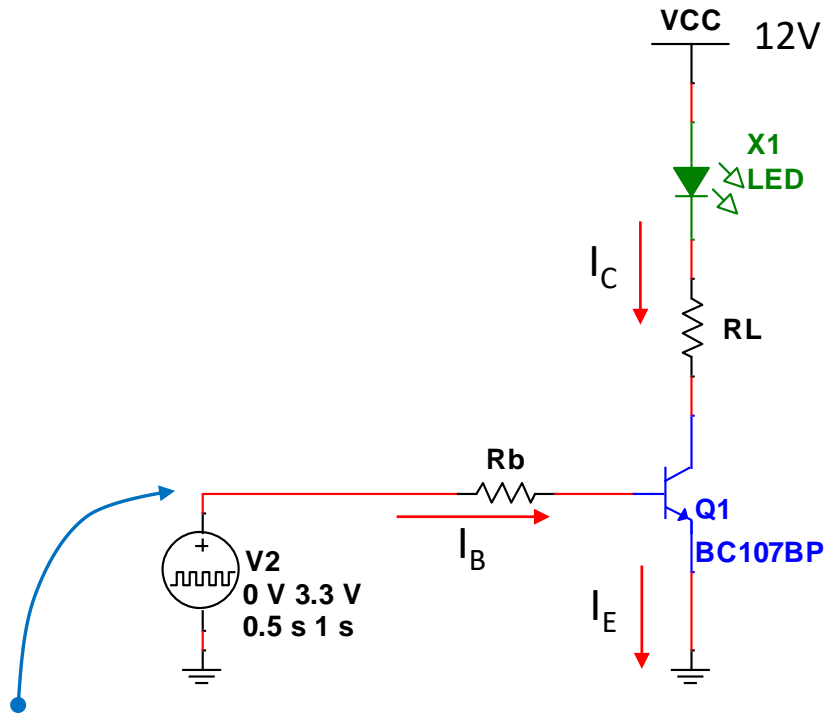
- Tipične vrijednosti strujnog pojačanja β su 100 – 150 (BC108 ~125)

Tranzistor kao Sklopka-Primjer

CMOS Mikrokontroler ima 3.3V izlaz te treba paliti i gasiti LED diodu.

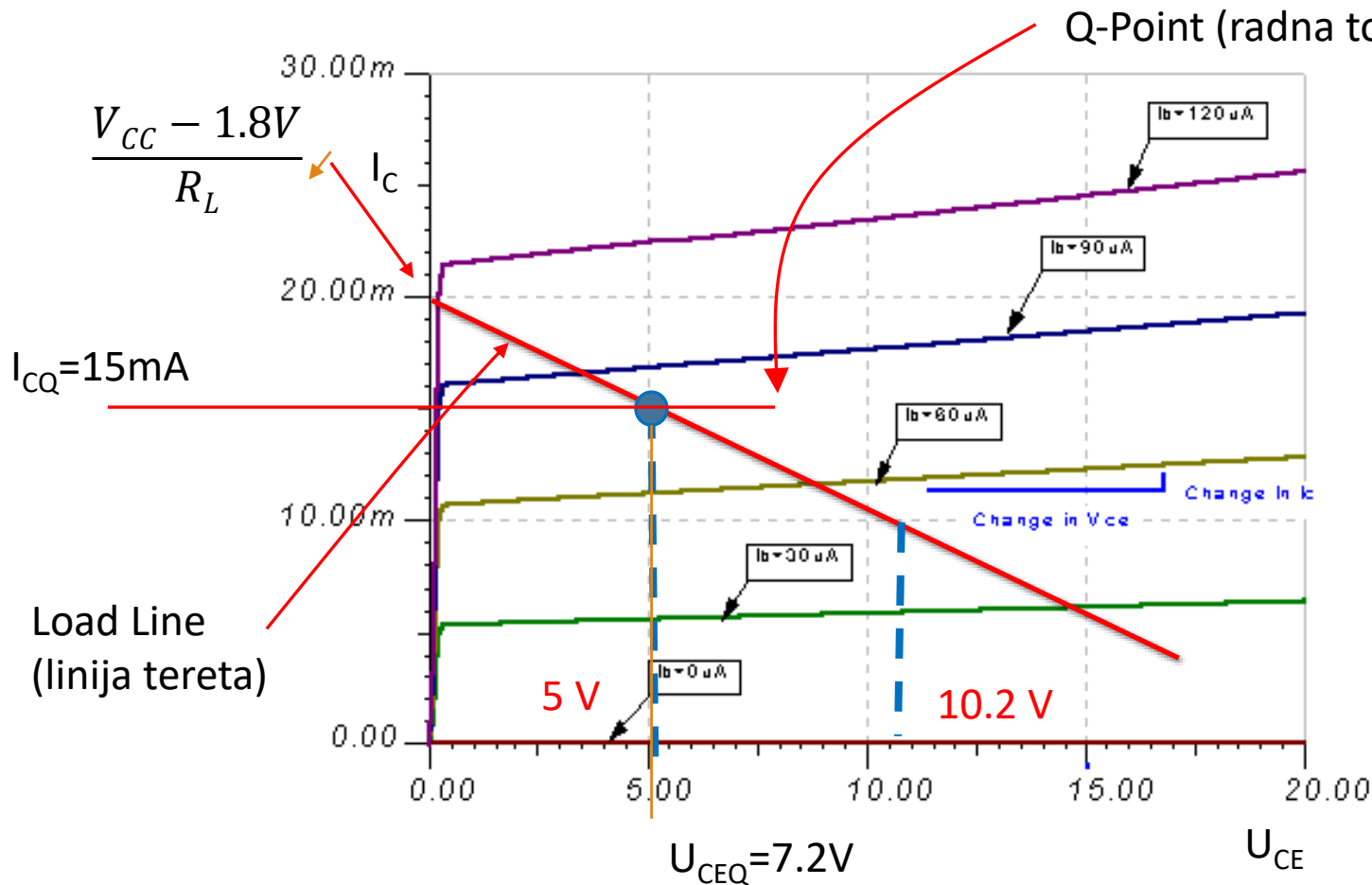
Parametri:

- Na ulaz tranzistora dolazi 3.3 V signal (izlaz modernih CMOS digitalni ICa)
- Kad LED dioda svijetli idealno kroz nju teče struja od oko 15mA ($I_C=15\text{mA}$)
- Raspon struje I_C treba biti $10\text{mA} < I_C < 20\text{mA}$
- Kad LED dioda svijetli na LED diodi je pad napona oko 1.8V (crveni LED) ili 3.3V (plavi LED)



Modern IC (ARM)
3.3V CMOS output
(lower power consumption)

Tranzistor kao Sklopka – Odabir radne točke (Q-Point)



Q-Point –je DC radna točka tranzistora.

Otpor R_L se proračunava iz linije tereta:

$$R_L = \frac{V_{CC} - 1.8V}{I_C} = \frac{12V - 1.8V}{20\text{mA}} = 510 \Omega \approx 500 \Omega$$

Struja baze I_B u radnoj točki Q je:

$$I_B = 80 \mu\text{A}$$

Tranzistor kao Sklopka – Odabir radne točke

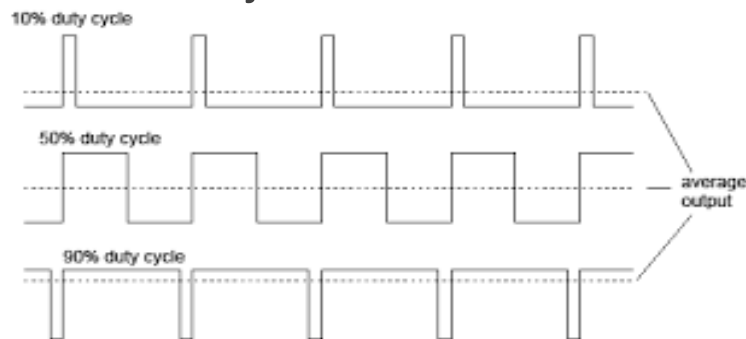
Iz poznate struje baze I_B može se odrediti otpor baze R_B putem relacije:

$$3.3V = I_B R_B + 0.6V$$

Pošto smo iz radne točke Q odredili struju baze $I_B=80\mu A$ otpor baze R_B je:

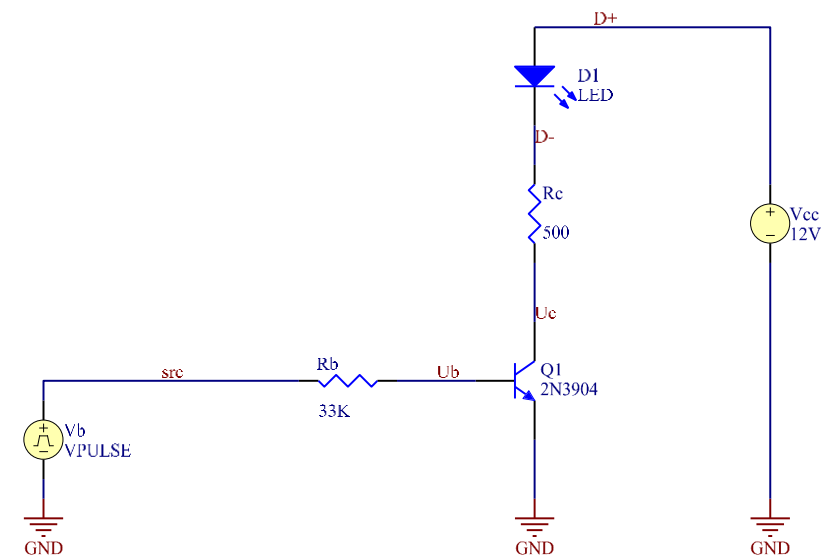
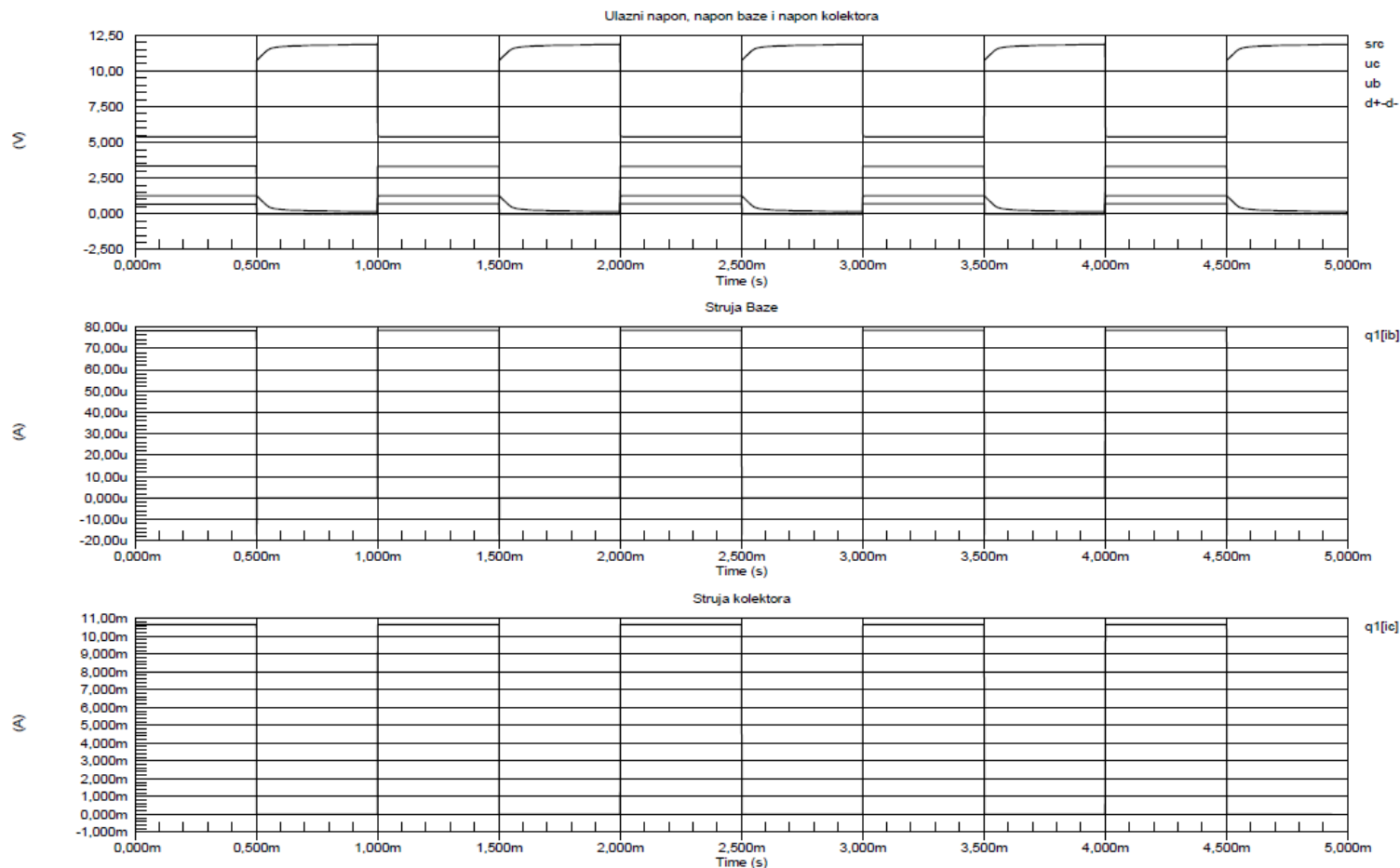
$$R_B = \frac{3.3V - 0.6V}{I_B} = 33 k\Omega$$

Intenzitet svijetla kroz diodu se može podesiti pomoću PWM tehnike (Pulse Width Modulation)



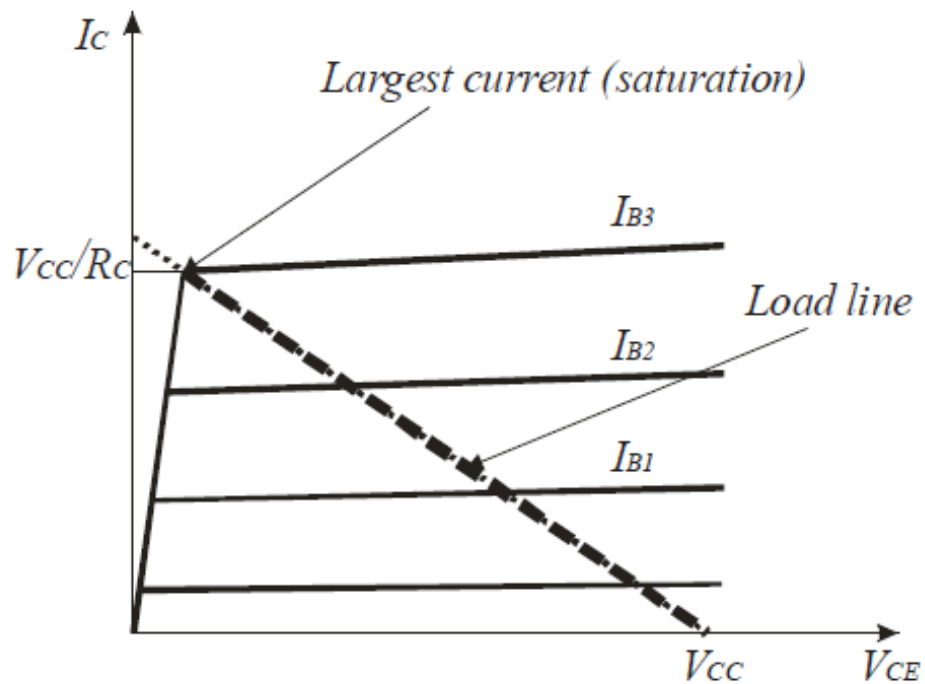
Intenzitet svijetla kroz diodu ovisi srednjem nivou signala na ulazu.

Simulacija Tranzistora kao Sklopke

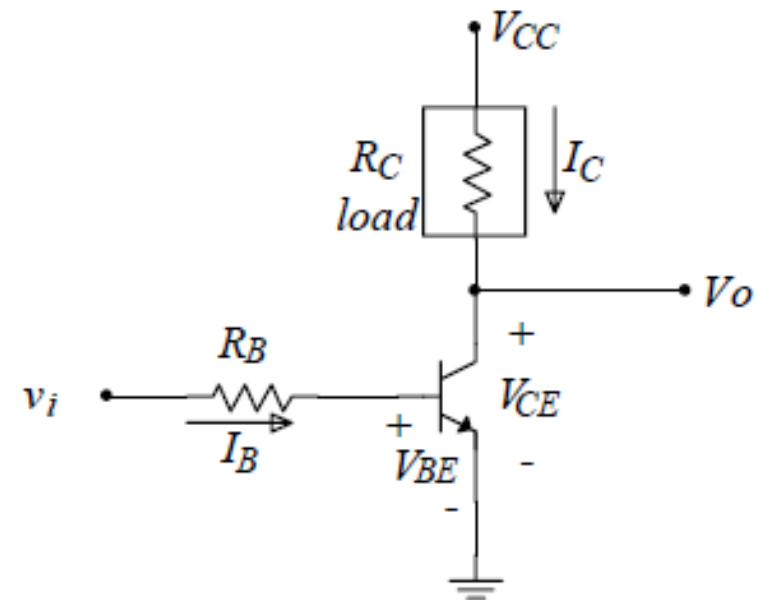


Simulacija u programskom paketu
Altium – Tranzijentna Analiza

Radna Točka Tranzistora



Linija tereta u aktivnom području



Spoj zajedničkog emitera

Radna Točka Tranzistora - Jednadžbe

Ako je ulazni napon v_i takav da $V_{BE} \geq 0.6V$ onda je transistor “uključen”. Struja kroz bazu I_B se dobije iz izraza:

$$(1) I_B = \frac{v_i - V_{BE}}{R_B}$$

Ako je tranzistor u aktivnom području, možemo računati da je $V_{BE} \approx 0.6V$. Kada je tranzistor “uključen”, još uvijek ne znamo da li je u aktivnom području ili je u saturaciji. Kirchoffov zakon nam pak daje:

$$(2) V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

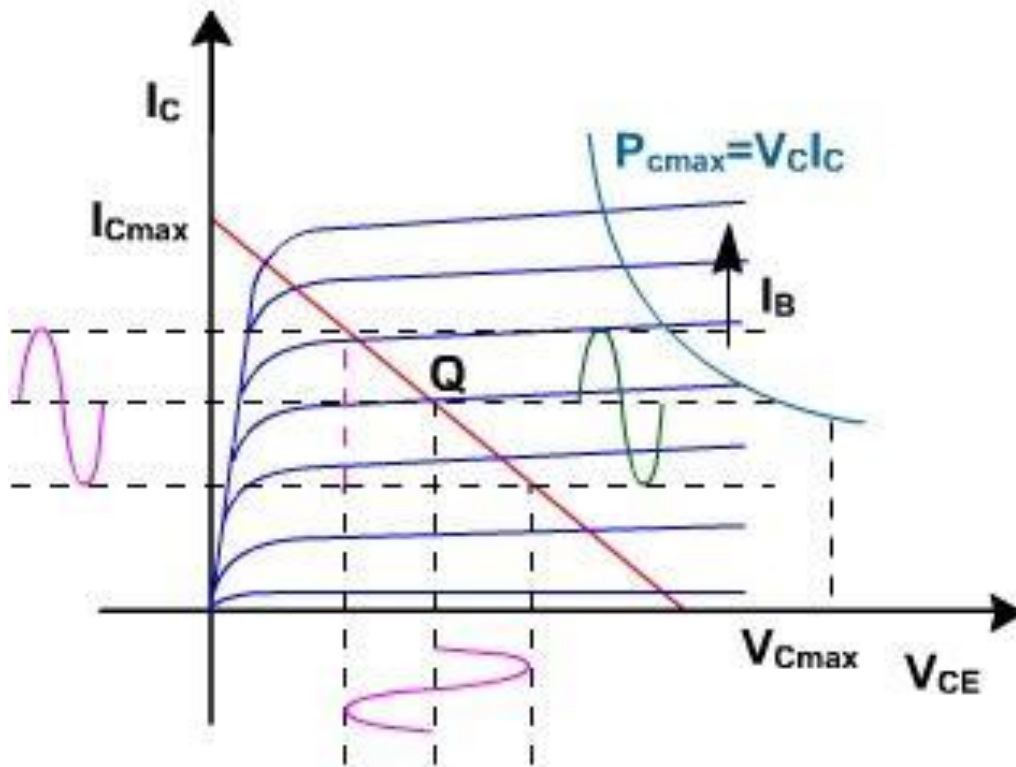
Povećanjem struje baze, povećava se napon kolektor-emiter (V_{CE}) te se smanjuje struja I_C kroz kolektor. Struja kroz kolektor u saturaciji može se naći iz izraza:

$$(3) I_C(sat) = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

Kod saturacije, $V_{CE} < V_{BE}$ te je napon kolektor emiter $V_{CE} \approx 0.2V$

Radnu točku odabiremo pomoću otpora R_B koji posledično diktira struju baze I_B

Radna točka tranzistora –tranzistor kao pojačalo signala male amplitude



Struja baze I_B varira amplitudom izraženoj u mikroamperima (μA)

Struja kolektora I_C varira amplitudom izraženom u miliamperima (mA)

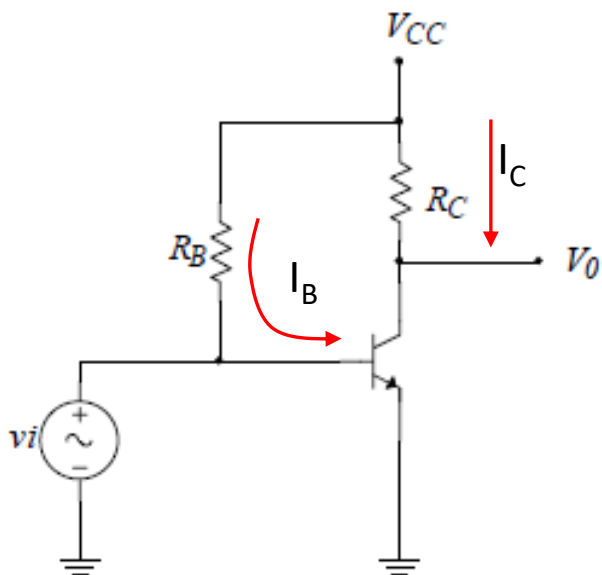
U suštini imamo:

$$I_C = \beta I_B$$

Ulazni signal male amplitude varira oko Q-točke. Bitno je da se Q-točka odabere tako da s obzirom na ulazni signal tranzistor uvijek bude u aktivnom području.

Tranzistorska pojačala se nikada ne projektiraju na način da ovise samo o strujnom pojačanju β .

Tranzistor kao Pojačalo – Osnovni Sklop



Osnovni krug tranzistorskog pojačala u spoju zajedničkog emitera

- Najprije se selektira Q točka neovisno o ulaznom signalu v_i
- Drugi Kirchhoffov zakon za napone u petlji baza-emiter nam daje izraz:

$$(1) V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} \leftrightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

- U aktivnom području struja kolektora I_C ovisi o pojačanju β te o struji baze I_B kao:

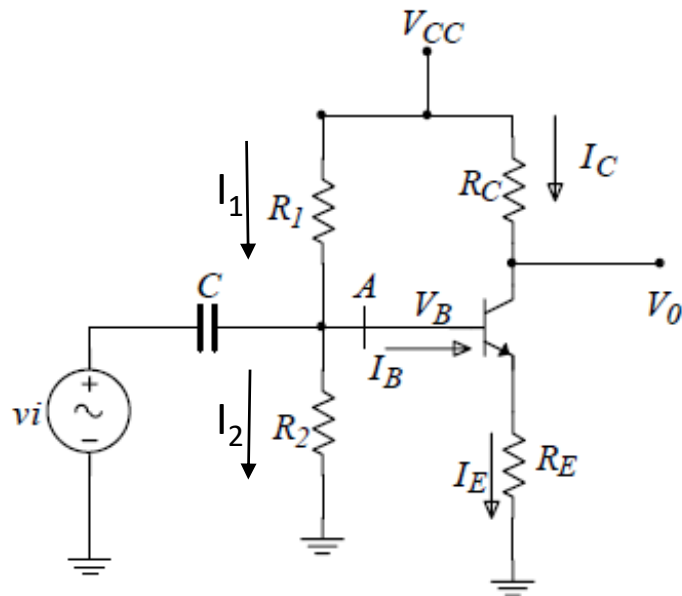
$$(2) I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

- Drugi Kirchhoffov za petlju kolektor emitter nam daje:

$$(3) V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

- Desna strana jednadžbe (3) je linija tereta ovog tranzistorskog pojačala.
- Pojačanje i dalje ovisi o strujnom pojačanju β !

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke



Stabilizirani krug tranzistorskog pojačala u spoju zajedničkog emitera

Stabilizacija radne točke je način kako ukloniti ovisnost o strujnom pojačanju (parametar β)

Kondenzator C služi da ukloni eventualne DC komponente sa ulaznog signala v_i .

Pod pretpostavkom da ulazni signal v_i može biti pozitivan i negativan, za ulazni napon $v_i=0$ postavljamo izlazni napon V_0 :

$$V_0 = \frac{V_{CC}}{2}$$

(otprilike na polovici raspona $0 < V_0 < V_{CC}$).

Ako je napon $V_0 = V_{CC}/2$ onda je napon na otporniku R_C također jednak $V_{CC}/2$.

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Ako je napon na otporniku R_C jednak $V_{CC}/2$ onda je struja kroz otpor R_C jednaka struji kroz radnu točku Q i dana je izrazom:

$$(1) I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2 R_C}$$

Podrazumijevajući da je tranzistor u aktivnoj regiji, struja baze I_{BQ} u radnoj točki Q može se naći pomoću izraza:

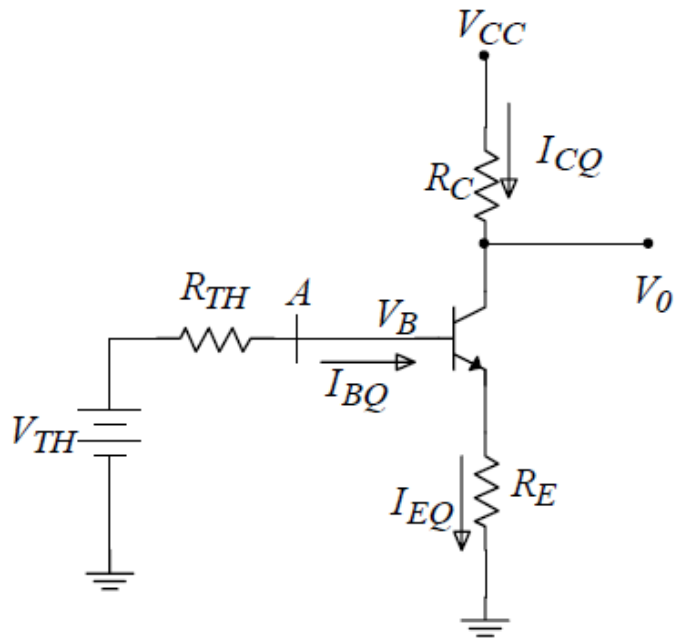
$$(2) I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{V_{CC}}{2 \beta R_C}$$

Zbog naponskog djelila R_1/R_2 napon na bazi (V_B) je jednak:

$$(3) V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Koristeći Theveninov teorem možemo izraditi nadomjesnu shemu



Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Struja baze u radnoj točki I_{BQ} može se izraziti kao razlika struja I_1 i I_2 :

$$(4) I_{BQ} = I_1 - I_2$$

Korištenjem drugog Kirchhoffovog zakona mogu se izraziti tri jednostavne jednačbe:

$$(5) I_2 R_2 - U_{BE} - I_{EQ} R_E = 0$$

$$(6) I_2 R_2 = V_B$$

Uvrštavanjem izraza (6) u (5) dobijamo:

$$(7) V_B - U_{BE} - I_{EQ} R_E = 0$$

Za petlju kolektora možemo napisati:

$$(8) U_{CC} = I_1 R_1 + V_B$$

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Uvrštavanjem izraza (4) u (8) se dobije:

$$(9) U_{CC} = (I_{BQ} + I_2)R_1 + V_B$$

Nadalje uvrštavanjem izraza (6) u (9) dobije se:

$$(10) U_{CC} = \left(I_{BQ} + \frac{V_B}{R_2}\right)R_1 + V_B \longrightarrow U_{CC} = I_{BQ}R_1 + \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)V_B$$

Nakon sređivanja jednačbe (10) dobije se:

$$(11) V_B = \frac{U_{CC} - I_{BQ}R_1}{\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)}$$

Uvrštavajući izraz (11) u izraz (7) dobiva se jednačba:

$$(12) \frac{U_{CC} - I_{BQ}R_1}{\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)} - U_{BE} - I_{EQ}R_E = 0$$

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Ako podrazumijevamo da je tranzistor u aktivnom području onda zbog toga što je $I_E = I_B + I_C$ te $I_C = \beta I_B$ možemo za struju emitera pisati:

$$(13) I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ}$$

Uvrštavajući izraz (13) u (12) dobije se:

$$(14) \frac{U_{CC} - I_{BQ}R_1}{\left(\frac{R_1+1}{R_2}\right)} - U_{BE} - (1 + \beta)I_{BQ}R_E = 0$$

Nakon sređivanja izraza (14) dobije se izraz za struju baze I_{BQ} u radnoj točki Q:

$$(15) I_{BQ} \left(R_E(1 + \beta) + \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} \right) = \frac{U_{CC}R_2}{R_1+R_2} - U_{BE}$$

Iz izraza $I_C = \beta I_B$ dobijemo struju I_{CQ} u radnoj točki Q:

$$(16) I_{CQ} = \frac{\beta \left(\frac{U_{CC}R_2}{R_1+R_2} - U_{BE} \right)}{R_E(1+\beta) + \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}$$

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Dijeleći izraz (16) sa strujnim pojačanjem β dobije se:

$$(17) I_{CQ} = \frac{\frac{U_{CC}R_2}{R_1+R_2} - U_{BE}}{R_E \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} \frac{1}{\beta}}$$

Ako uzmemo da $\beta \gg 1$ onda slijedi:

$$(17) I_{CQ} \approx \frac{\frac{U_{CC}R_2}{R_1+R_2} - U_{BE}}{R_E}$$

U praksi se može uzeti da je omjer R_1 i R_2 jednak:

$$(18) \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} = \frac{1}{10} (1 + \beta)R_E$$

Tranzistor kao Pojačalo – Stabilizacija Radne Točke

Napon kolektor emitter u radnoj točki Q se može naći iz izraza:

$$(19) U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_E$$

Koristeći izraze $I_E = (1 + \beta)I_B$ te $I_C = \beta I_B$ jednačba (19) se može napisati kao:

$$(20) U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - \frac{1+\beta}{\beta} I_{CQ}R_E$$

Ako $\beta \gg 1$ onda slijedi:

$$(21) U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$$

Radna točka je dakle definirana jednačbama (17) i (21). Pojačanje više ne ovisi o strujnom pojačanju β . Može se pokazati da je pojačanje tranzistorskog pojačala proporcionalno:

$$(22) A = \frac{V_o}{v_i} = -\frac{R_C}{R_E}$$

Primjer – Konstrukcija Pojačala Pojačanja A=6

Parametri:

- Pojačanje $A = -6$
- Ulazni signal je +/- 1V
- Napon $V_{CC} = 12V$

Rješenje:

Odaberemo $I_{CQ} = 10\text{mA}$. Zbog izraza (1) (i.e. $I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_C}$) imamo:

$$(23) R_C = 600\Omega$$

Zbog zahtjeva za pojačanjem $A = -2$ iz izraza (22) slijedi:

$$(24) R_E = -\frac{R_C}{A} = 100\Omega$$

Ako uzmemo da je pojačanje $\beta \approx 100$ onda iz izraza (18) imamo:

$$(24) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{10} (1 + \beta) R_E = 10\text{ k}\Omega$$

Primjer – Konstrukcija Pojačala Pojačanja A=6

Iz jednadžbe (17) i (24) može se dobiti slijedeći izraz:

$$(25) I_{CQ}R_E \approx \frac{U_{CC}R_2}{R_1+R_2} - U_{BE} = \frac{U_{CC}}{R_1} \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} - U_B = \frac{12V}{R_1} 10 k\Omega - 0.6V = 0.6V$$

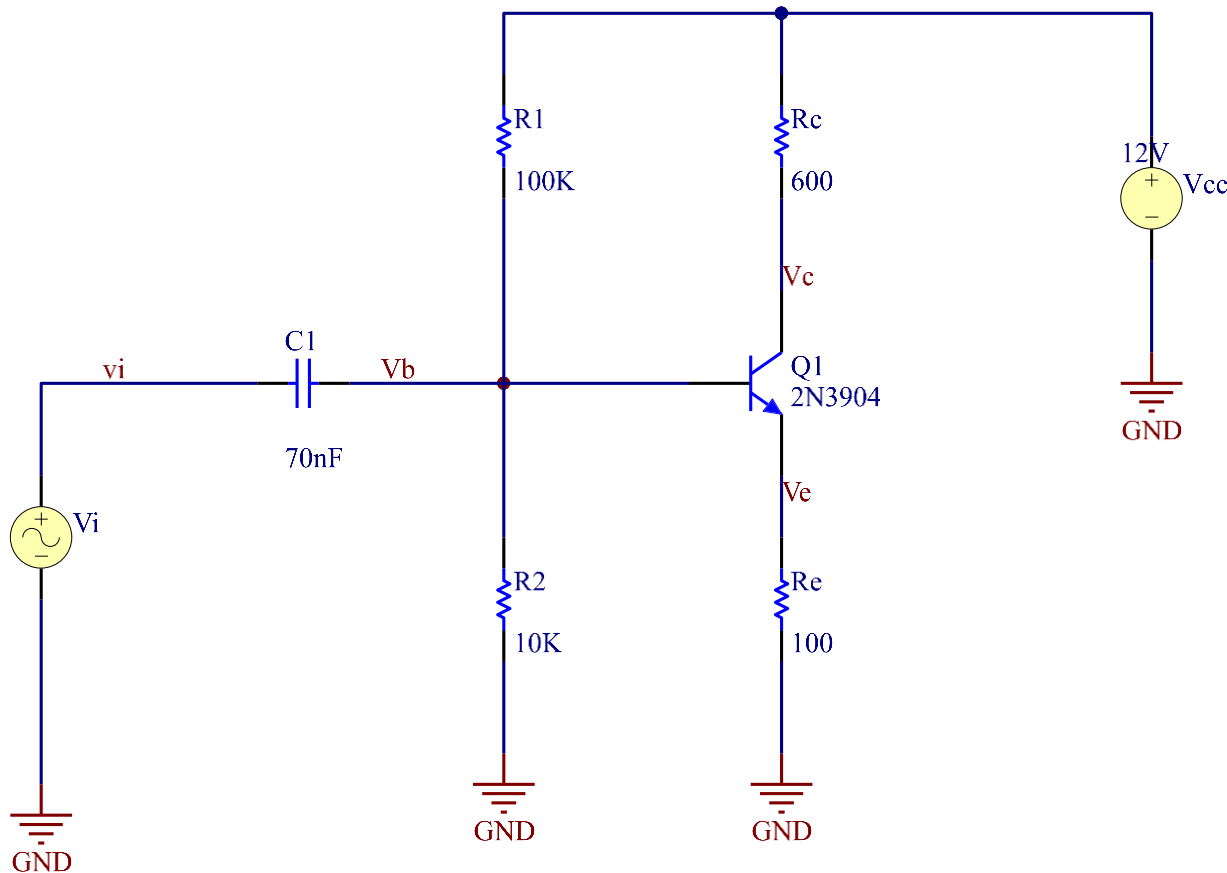
Iz gornjeg izraza može se dobiti otpor R_2 :

$$(26) R_1 = 100 k\Omega$$

Iz izraza (24) dobivamo I otpor R_1 :

$$(27) R_2 = 11.11k \Omega$$

Primjer – Konstrukcija Pojačala Pojačanja A=6



Električna shema simulacije u programskom paketu Altium

Kondenzator C_1 se odabire prema jednadžbi:

$$C_1 = \frac{1}{2 \pi R_p f}$$

Gdje je R_p otpor dan izrazom:

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Primjer – Konstrukcija Pojačala Pojačanja

$A=6$

