

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. DC analiza pojačala u spoju zajedničkog emitera sa uzemljenim emiterom
2. Statička radna točka tranzistora u spoju zajedničkog emitera (uzemljeni emiter)
3. DC analiza pojačala u spoju zajedničkog emitera sa emitorskim otporom
4. Analiza stabilnosti statičke radne točke za sklop sa emitorskim otpornikom i sa uzemljenim emiterom

Elektronički Elementi i Sklopovi

Za DC analizu rada tranzistora koriste se slijedeće tri jednađbe:

$$(1) V_{BE} = 0.7 V$$

$$(2) I_E = (\beta + 1)I_B \cong I_C$$

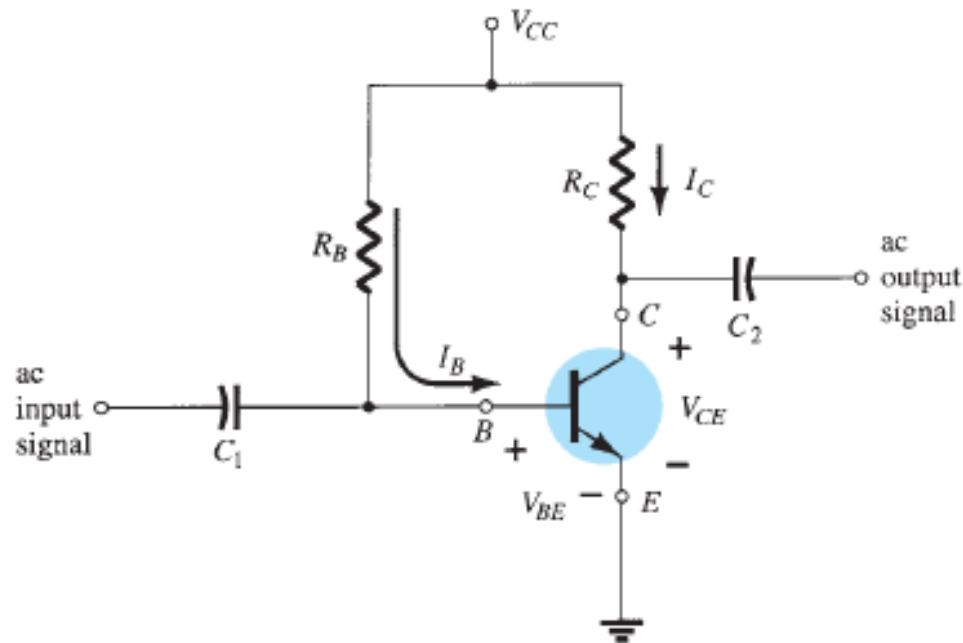
$$(3) I_C = \beta I_B$$

Najčešće u DC analizi rada tranzistora prvo treba naći struju baze I_B . Kada je poznata struja baze I_B pomoću jednađbi (1)-(3) odrede se i ostale struje tranzistora (I_C, I_E)

Slično kao i kod analize sklopova sa diodama, i kod tranzistora imamo statičku radnu točku ili Q-točku (lat. *quiescent* – mirna, neaktivna)

S obzirom da se vrijednosti β_{ac} i I_{CEO} mijenjaju s temperaturom, odabrana električna mreža u sklopu s tranzistorom mora biti tako odabrana da se Q-točka stabilizira. Ovakav odabir se naziva i *stabilizacija radne točke*.

Elektronički Elementi i Sklopovi



Na slici je spoje zajedničkog emitera sa uzemljenim emiterom.

Za DC analizu spoja sa zajedničkim emiterom uzimamo da je frekvencija $f = 0 \text{ Hz}$

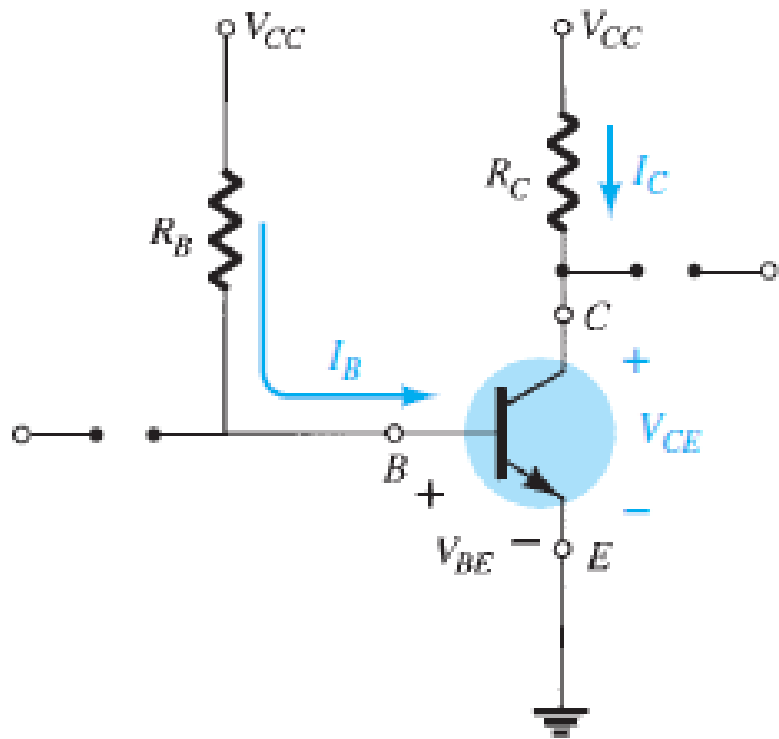
Impedancija kondenzatora je ovisna of frekvenciji i kapacitetu:

$$(4) Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

Budući da je $f = 0 \text{ Hz}$, impedancija kondenzatora postaje jednaka ∞ :

$$(5) Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j(0)C} = j\infty$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



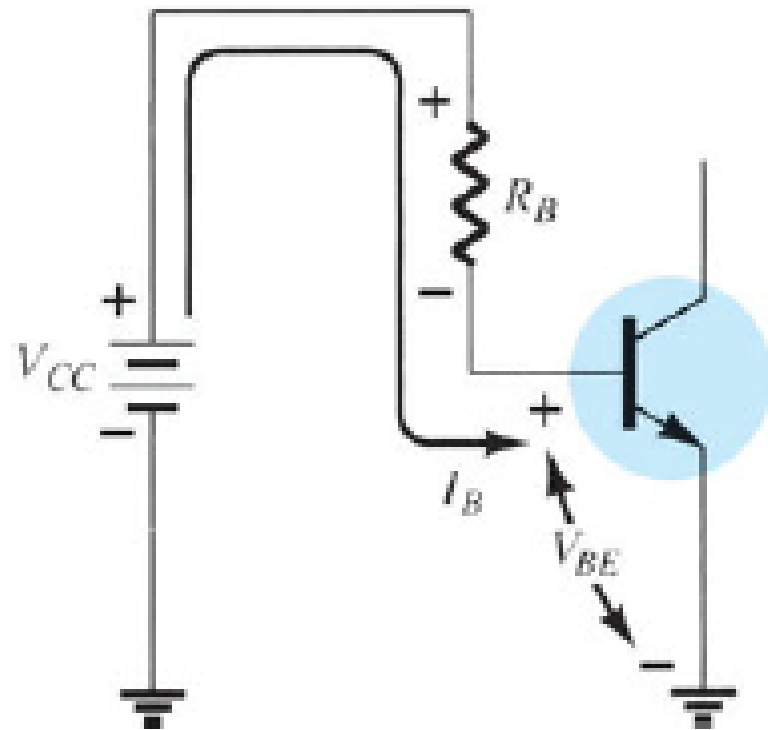
Budući da je impedancija kondenzatora jednaka ∞ , za DC analizu sve kondenzatore možemo zamijeniti otvorenim krugom.

Primjenom drugog Kirchoffovog zakona možemo pronaći struju baze I_B .

Drugi Kirchoffov zakon kaže da je suma svih napona u zatvorenoj petlji jednaka nuli:

$$(6) \sum_i E_i = 0$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



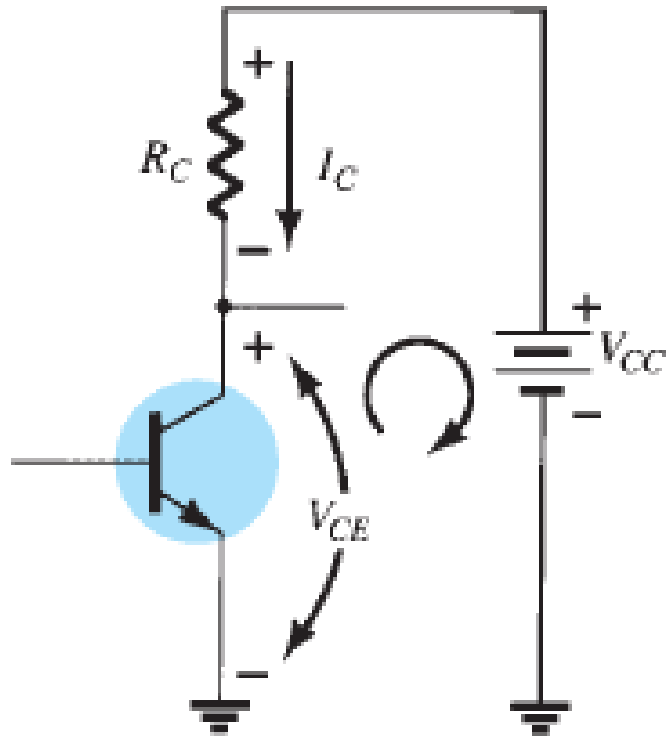
Petlju baza-emiter možemo nacrtati kao na slici. U tom slučaju, primjenom drugog Kirchoffovog zakona dobije se:

$$(7) V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Iz jednadžbe (7) dobije se da je struja baze I_B jednaka:

$$(8) I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Petlju kolektor-emiter možemo nacrtati kao na slici. Iz prethodnog predavanja imamo da je:

$$(9) I_C = \beta I_B$$

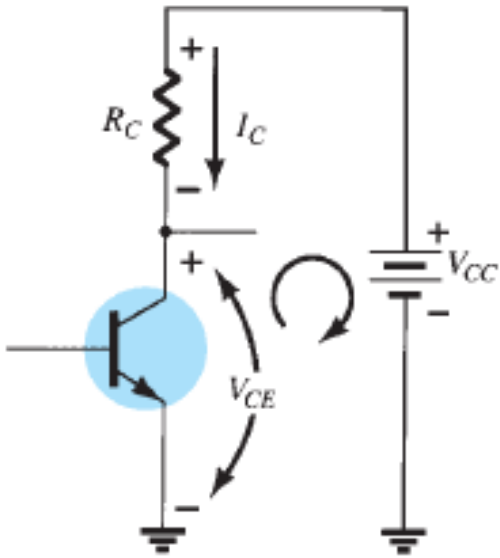
Zbog toga izbor otpora R_C nema uticaj na struju kolektora I_C .

Međutim, izbor otpora R_C utiče na napon V_{CE} što poslije utiče na položaj statičke radne točke tranzistora.

Uporabom drugog Kirchoffovog zakona možemo pisati za petlju kolektor-emiter:

$$(10) V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Iz jednadžbe (10) dobije se da je napon V_{CE} jednak:

$$(11) V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

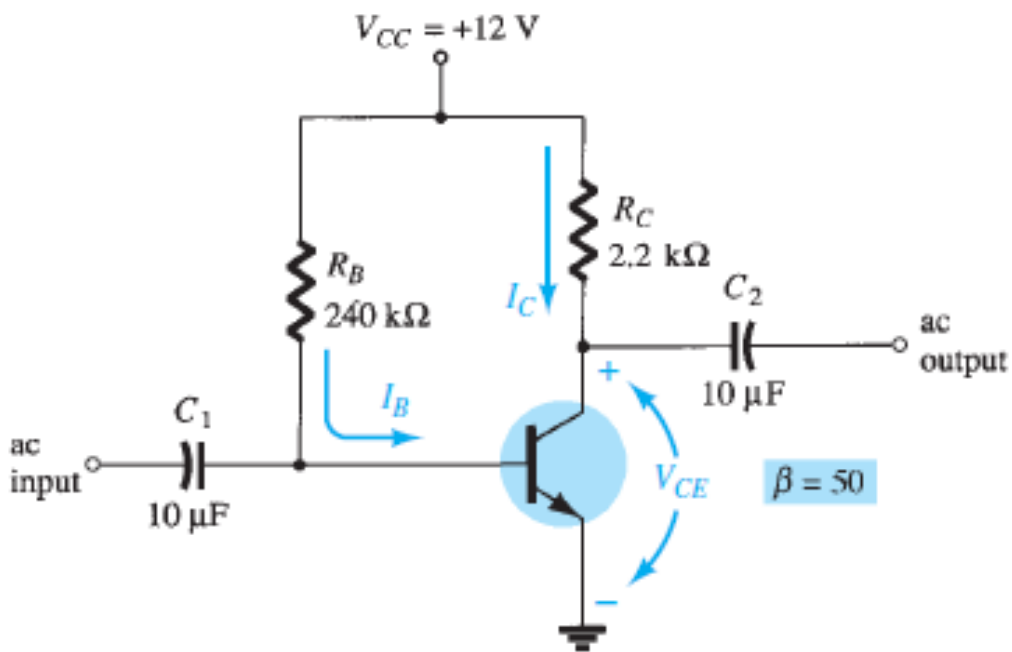
PRIMJER 1. Za mrežu na slici treba pronaći slijedeće:

a) I_{BQ} i I_{CQ}

b) V_{CEQ}

c) V_B i V_C

d) V_{BC}



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje:

$$a) I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12V - 0.7V}{240 \text{ k}\Omega} = 47.08 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \cdot 47.08 \mu A = 2.35 \text{ mA}$$

$$b) V_{CEQ} = V_{CC} - I_C R_C = 12V - (2.35 \text{ mA}) \cdot (2.2 \text{ k}\Omega) = 6.83 \text{ V}$$

$$c) V_B = V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

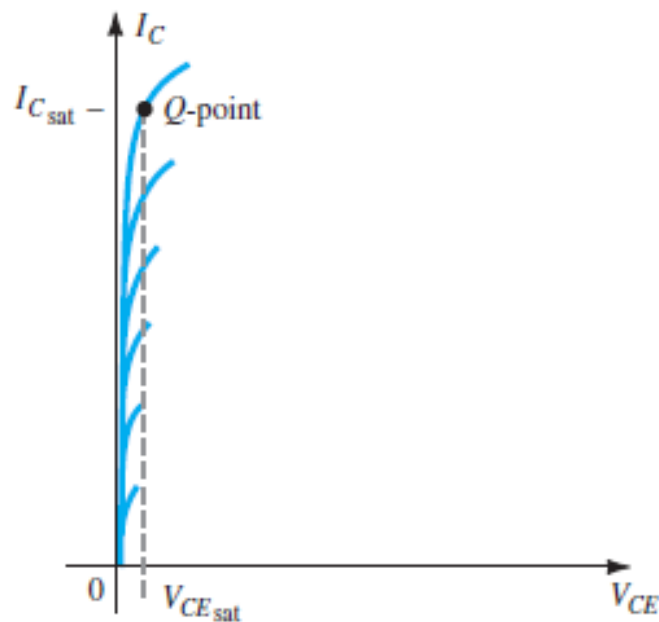
$$V_C = V_{CE} = 6.83 \text{ V}$$

$$d) V_{BC} = V_B - V_C = 0.7V - 6.83 \text{ V} = -6.13 \text{ V}$$

Spoj baza kolektor je reverzno polariziran, dakle transistor je u aktivnom području!

Elektronički Elementi i Sklopovi

Tranzistor može biti i u području *saturacije*. Termin *saturacija* odnosi se na bilo koji sustav gdje su varijable sustava dosegle svoje maksimalne veličine.



Tranzistor u saturaciji

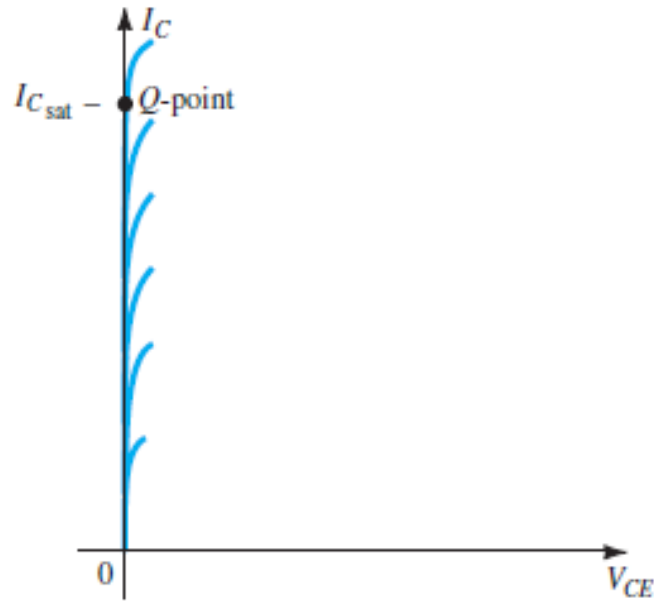
Kada tranzistor koristimo kao pojačalo područje saturacije se normalno izbjegava jer će signal koji pojačavamo biti distorziran.

Na slici je vidljivo da je područje saturacije ono područje gdje se izlazne strujno-naponske karakteristike spajaju.

U području saturacije napon kolektor emiter je $V_{CE} < V_{CE_{sat}}$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Karakteristiku tranzistora u saturaciji možemo aproksimirati ako primjetimo da je $V_{CE_{sat}} \rightarrow 0$. Tada možemo uzeti da je $V_{CE_{sat}} = 0$ i dobije se slijedeća karakteristika:

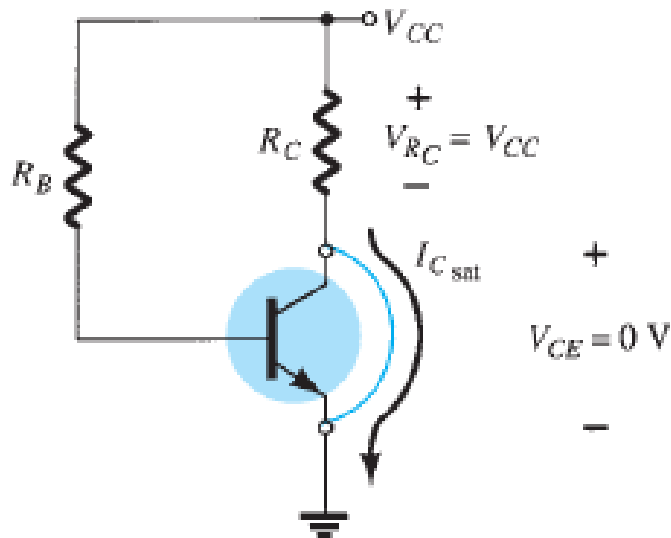


Sada možemo iz ove aproksimativne karakteristike odrediti otpor spoja kolektor-emiter kao:

$$(12) R_{CE} = \frac{V_{CE}}{I_C} = \frac{0 V}{I_{C_{sat}}} = 0 \Omega$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Dakle, ako nam je potrebno izračunati struju saturacije $I_{C_{sat}}$, iz jednadžbe (12) jasno je da možemo kolektor i emiter kratko spojiti:



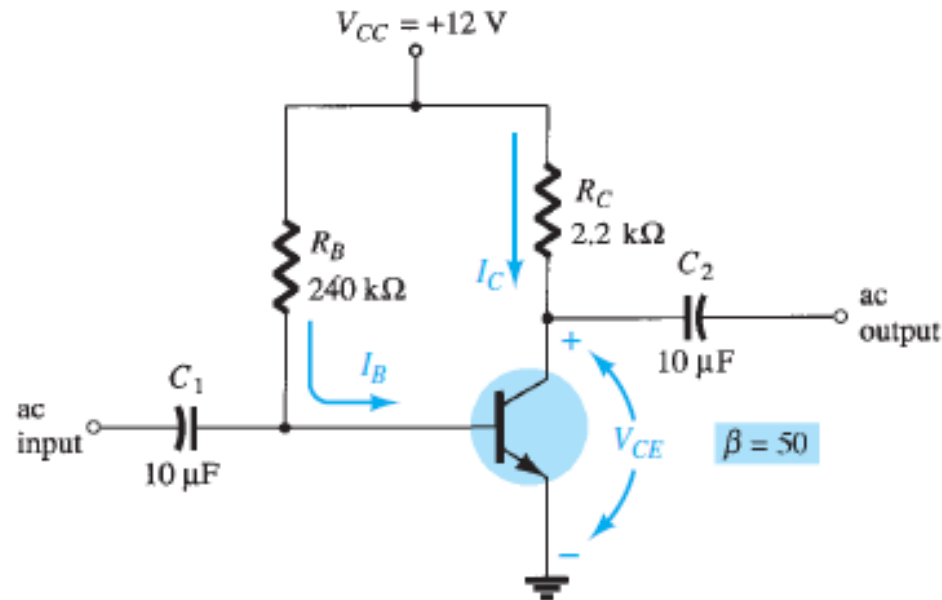
U tom slučaju struja saturacije ovisi o otporu R_C i naponu V_{CC} kao:

$$(13) I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Čim poznamo struju saturacije, onda i znamo kolika je maksimalna struja I_C potrebna da tranzistor ostane u aktivnom području (linearna amplifikacija).

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 2. Odrediti struju saturacije $I_{C_{sat}}$ za mrežu na slici.



Rješenje:

Iz jednadžbe (13) dobije se struja saturacije $I_{C_{sat}}$ kao:

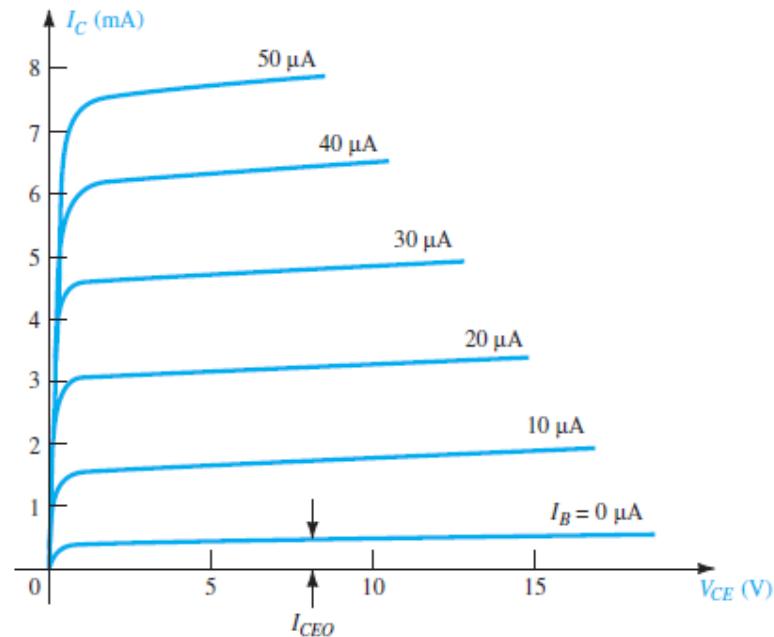
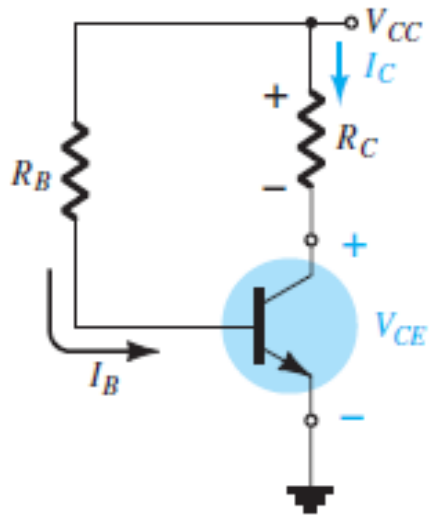
$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} = 5.45 \text{ mA}$$

S obzirom na prethodno izračunatu struju $I_{C_Q} = 2.35 \text{ mA}$ vidimo da je transistor u spoju na slici daleko od područja saturacije.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kod sklopova sa diodama, statička radna točka dobije se tako što se nađe presjek linije tereta i izlazne strujno-naponske karakteristike diode.

Sličan pristup koristi se i kod tranzistora. Linija tereta crta se na izlaznoj strujno-naponskoj karakteristici tereta, dok iznos otpora R_C definira nagib linije tereta.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Već prije smo napisali jednadžbu za napon kolektor emiter:

$$(14) V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

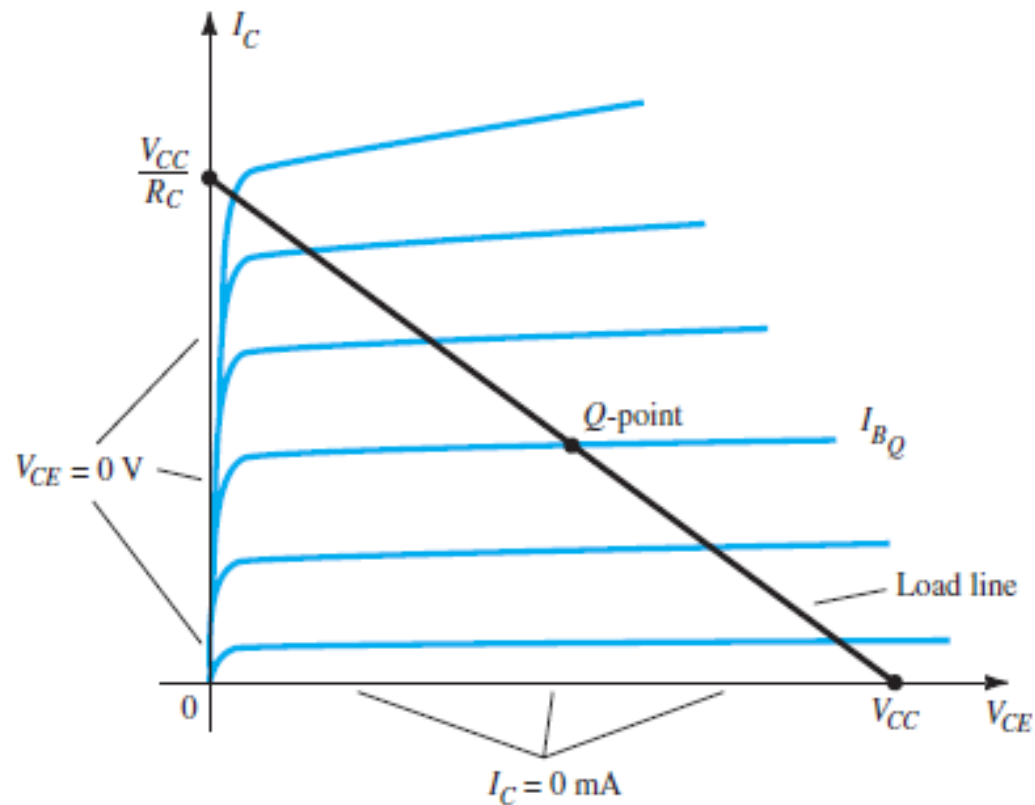
Jednadžba (14) je linija tereta za spoj zajedničkog emitera (u slučaju kada je emiter uzemljen). Ako postavimo da je napon $V_{CE} = 0$ tada se dobije prva točka jednadžbe pravca (linije tereta):

$$(15) V_{CC} - I_C R_C = 0 \quad \Leftrightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Drugu točku linije tereta dobijemo tako što postavimo da je struja $I_C = 0$:

$$(16) V_{CE} = V_{CC}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



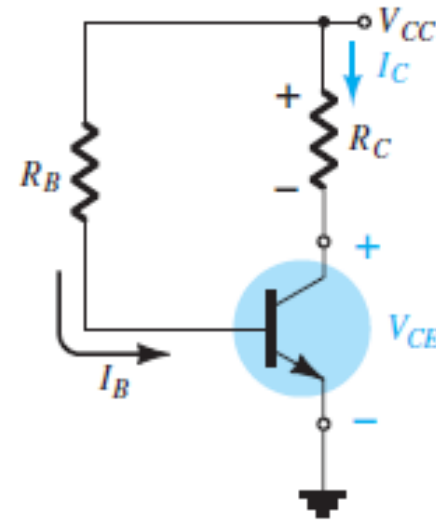
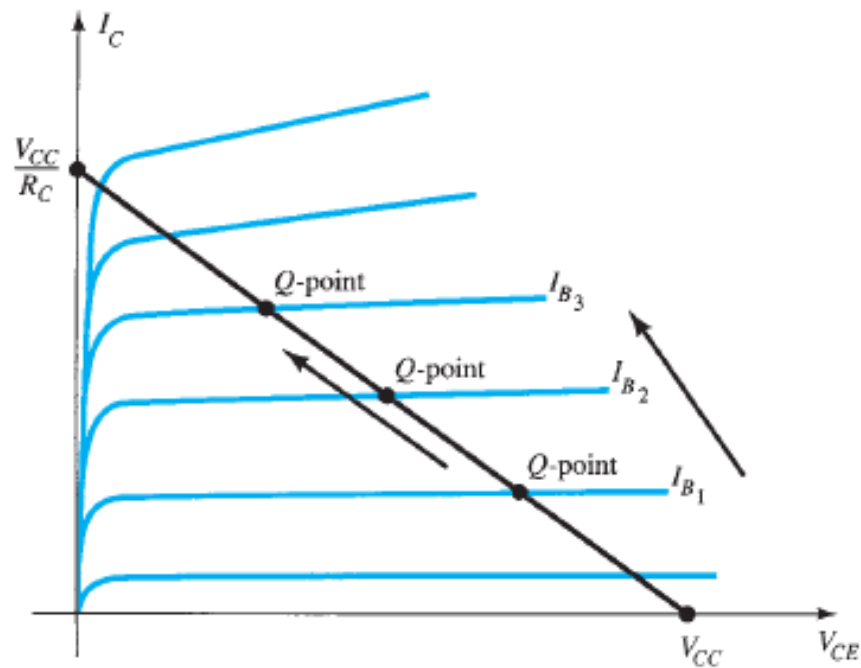
Linija tereta tranzistora u spoju zajedničkog emitera.

Razlika u određivanju statičke radne točke Q za sklopove sa diodama i za sklop zajedničkog emitera je u tome što dioda ima jednu fiksnu izlaznu karakteristiku, dok tranzistor ima mnoge izlazne karakteristike koje ovise o struji baze I_B .

Statičku radnu točku Q odredimo kao u primjeru 1. Da bismo jedinstveno odredili statičku radnu točku Q treba odrediti struju baze I_{BQ} .

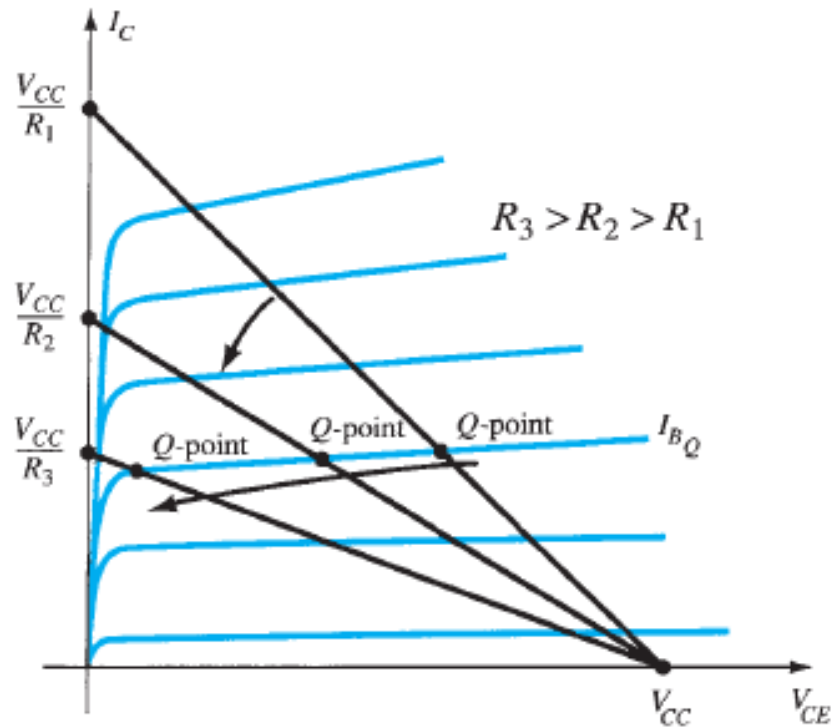
Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako mijenjamo otpor R_B u spoju zajedničkog emitera tada se statička radna točka miče po liniji tereta (jer se mijenja struja I_{BQ}).



Elektronički Elementi i Sklopovi

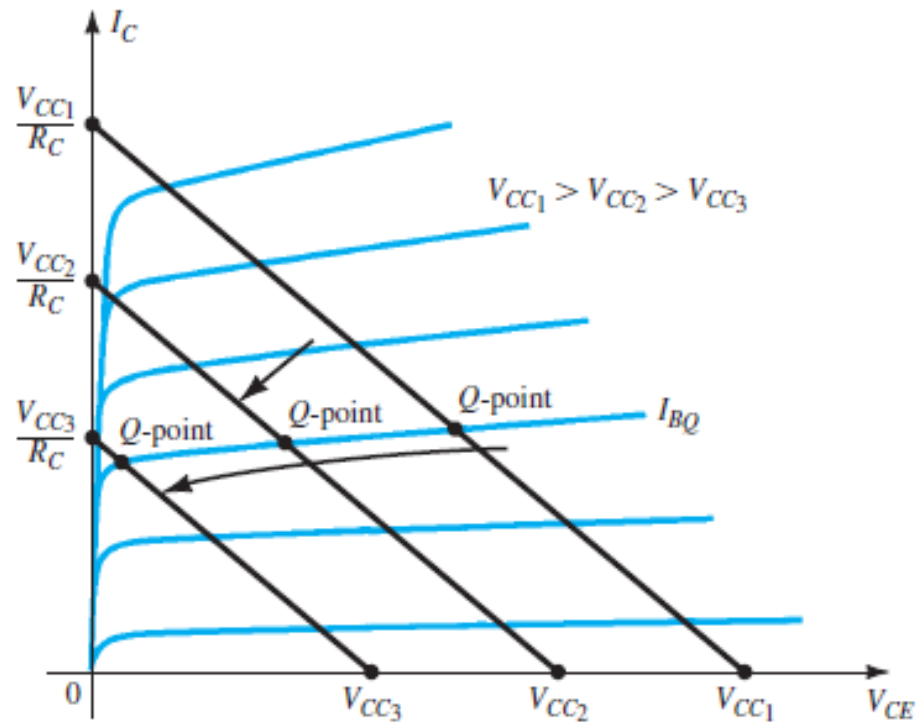
S druge strane ako mijenjamo vrijednosti otpora $R_C = R_1, R_2, R_3$ gdje je $R_1 < R_2 < R_3$ tada se dobije:



Povećanjem otpora R_C nagib linije tereta se smanjuje.

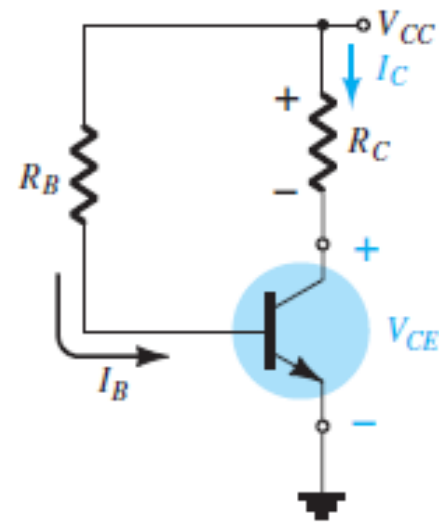
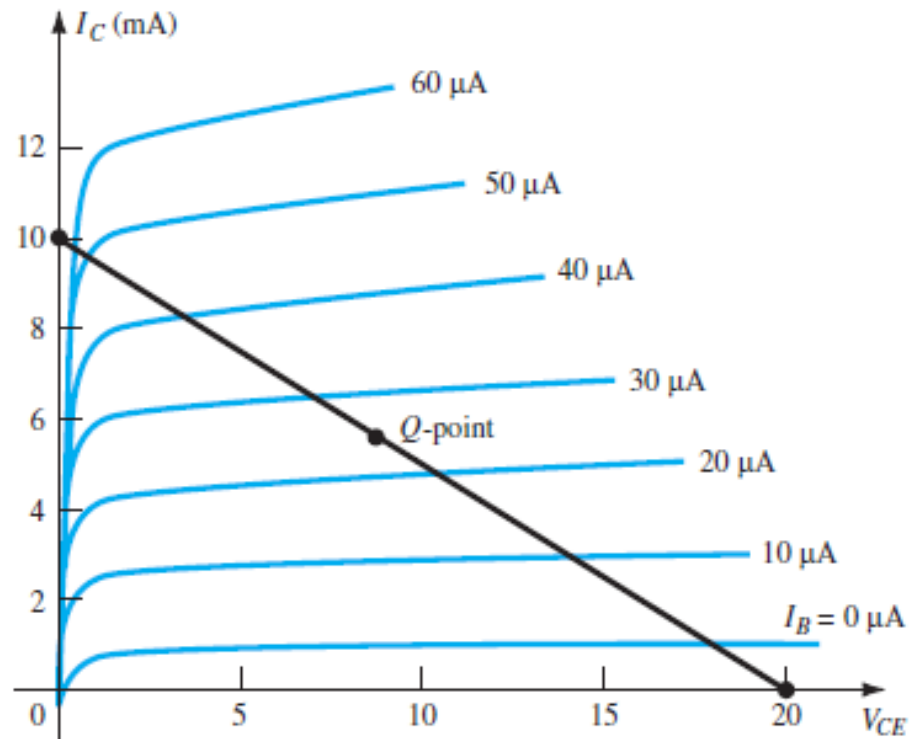
Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako smanjujemo ili povećavamo napon V_{CC} dok otpor R_C držimo fiksnim tada nagib ostaje isti a linija tereta se pomiče kao na slici:



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 3. Iz linije tereta na slici i Q točke tranzistora treba odrediti vrijednost napona V_{CC} kao i vrijednosti otpora R_B i R_C .



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: $V_{CC} = V_{CE} = 20\text{ V}$ kada je $I_C = 0\text{ A}$.

za $V_{CE} = 0\text{ V}$ imamo struju $I_C = 10\text{ mA}$.

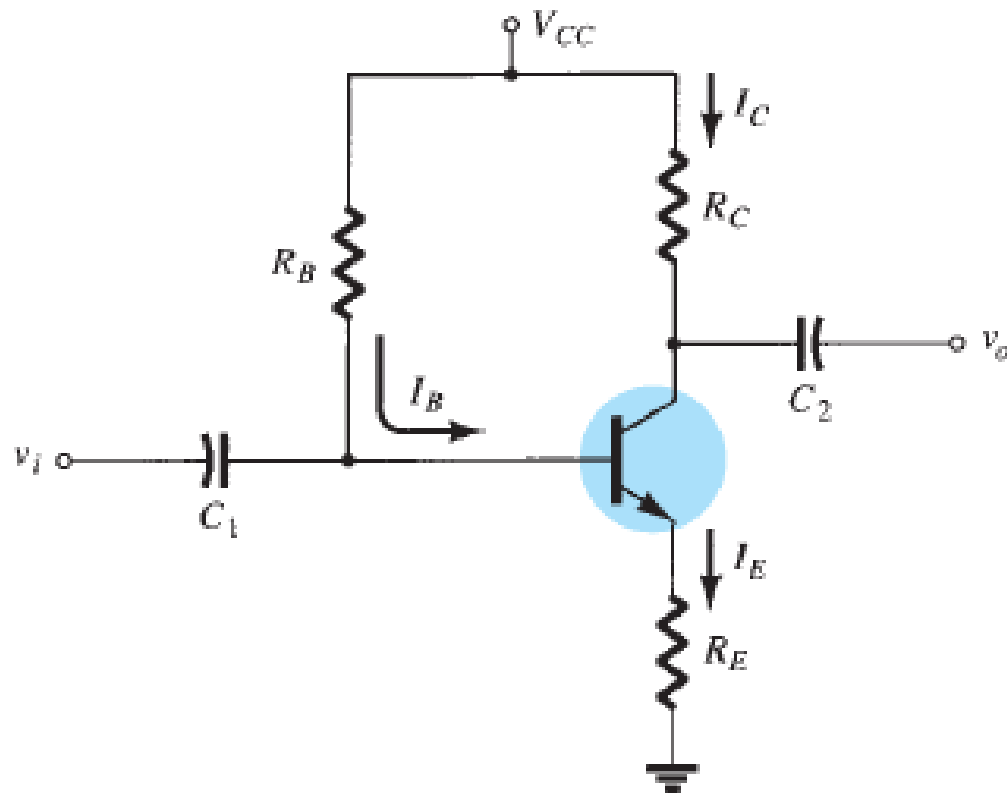
iz linije tereta imamo da je:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \longrightarrow R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{20\text{ V}}{10\text{ mA}} = 2\text{ k}\Omega$$

Sa prethodne slike imamo da je struja baze u Q točki $I_B = 25\text{ }\mu\text{A}$. Otpor R_B možemo izračunati iz (8) kao:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \longrightarrow R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{20\text{ V} - 0.7\text{ V}}{25\text{ }\mu\text{A}} = 772\text{ k}\Omega$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

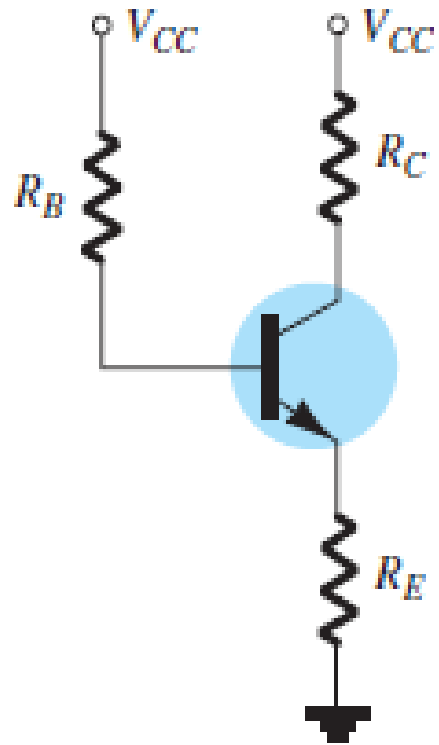


Na slici je spoj zajedničkog emitera sa emitterskim otporom.

Ovaj spoj se koristi iz dva razloga:

- da se poboljša temperaturna stabilnost
- da se smanji uticaj varijacije parametara tranzistora

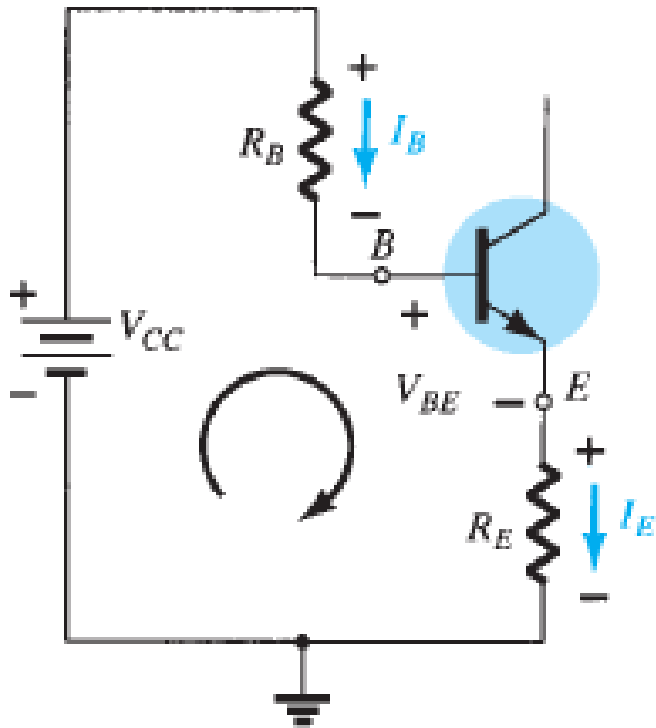
Elektronički Elementi i Sklopovi



Slično kao i kod spoja zajedničkog emitera sa uzemljenom emitterskom elektrodom, DC ekvivalent dobijemo tako što su kondenzatori u spoju otvorenog kruga.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Radi olakšane primjene drugog Kirchoffovog zakona, krug baza-emiter se može crtati kao na slici:



Primjenom drugog Kirchhoffovog zakona dobije se:

$$(17) V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Od prije smo struju emitera I_E doveli u vezu sa strujom baze I_B :

$$(18) I_E = (\beta + 1)I_B$$

Uvrštavanjem (17) u (18) dobijemo da:

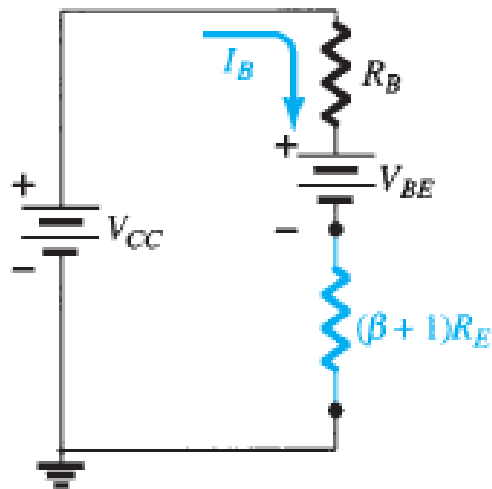
$$(19) V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - (\beta + 1)I_B R_E = 0$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz izraza (19) možemo izlučiti struju baze I_B te se dobije:

$$(20) I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

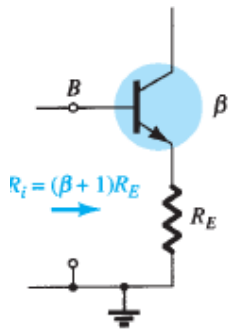
Treba primjetiti da je jedina razlika između jednadžbe za sklop zajedničkog emitera sa uzemljenom emitterskom elektrodom u članu $(\beta + 1)R_E$. Sada petlju emiter-baza možemo nadomjestiti nadomjesnom shemom:



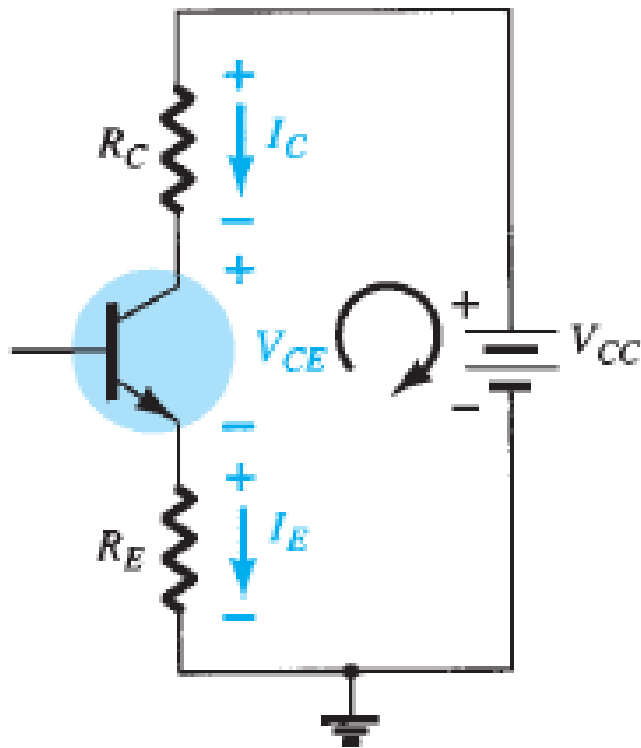
Kada bi primjenili drugi Kirchoffov zakon za nadomjesnu shemu na slici dobili bi isti rezultat za struju baze I_B kao i u izrazu (20).

Otpor emitera R_E se pojavljuje u ulaznom krugu tranzistora uvećan za faktor $(\beta + 1)$. Zbog toga možemo zanemariti otpor baze R_B i možemo izračunati ulazni otpor R_i kao:

$$(21) R_i = (\beta + 1)R_E$$



Elektronički Elementi i Sklopovi



Petlju kolektor-emitter možemo analizirati opet uz uporabu drugog Kirchhoffovog zakona:

$$(22) +I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

Iz jednadžbe (2) imamo da $I_E = (\beta + 1)I_B \cong I_C$. Stoga možemo pisati:

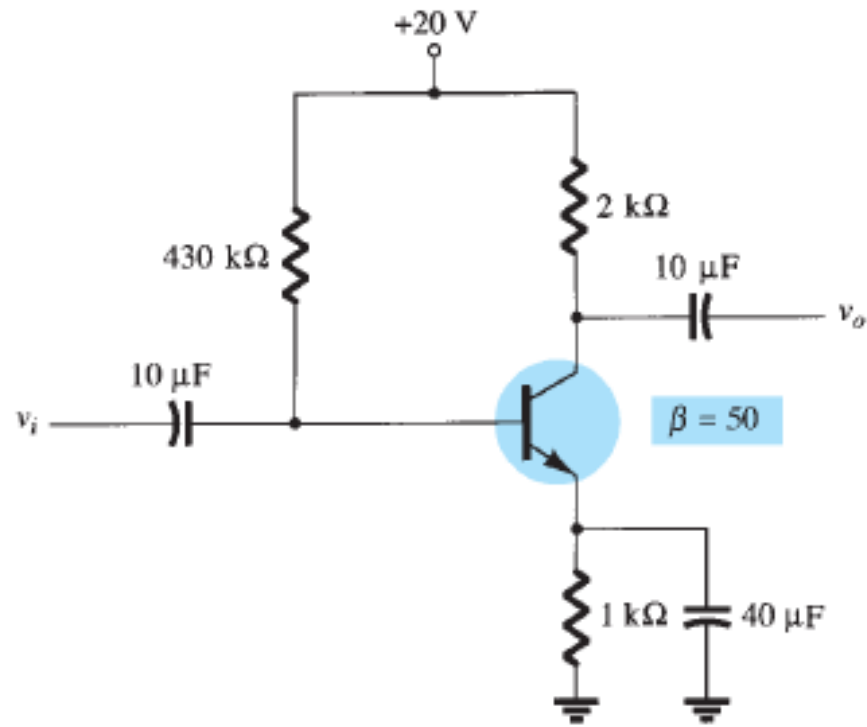
$$(22) V_{CE} - V_{CC} + I_C (R_C + R_E) = 0$$

tj. iz (22) imamo da:

$$(23) V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 4. Za sklop na slici treba odrediti struje I_B i I_C te napone V_{CE} , V_{BC} , V_C , V_B , V_E .



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: iz jednadžbe (29) možemo odrediti struju baze I_B kao:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{20V - 0.7V}{430 k\Omega + (51) \cdot (1k\Omega)} = \frac{19.3 V}{481k\Omega} = 40.1 \mu A$$

Struja kolektora I_C se odredi iz izraza $I_C = \beta I_B$:

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 40.1 \mu A = 2.01 \text{ mA}$$

Napon kolektor-emitter V_{CE} odredi se iz izraza (23):

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 20V - (2.01 \text{ mA}) \cdot (2k\Omega + 1 k\Omega) = 20V - 6.03V = 13.97 V$$

Napon V_C na kolektorskoj elektrodi je:

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 20V - (2.01 \text{ mA}) \cdot (2k\Omega) = 20V - 4.02V = 15.98V$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Napon V_E na emitterskoj elektrodi jest:

$$V_E = V_C - V_{CE} = 15.98V - 13.97V = 2.01V$$

ili ekvivalentno:

$$V_E = I_E R_E \cong I_C R_E = (2.01 \text{ mA}) \cdot (1k\Omega) = 2.01V$$

Napon na bazi V_B jest:

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0.7V + 2.01V = 2.71V$$

Napon baza-kolektor je:

$$V_{BC} = V_B - V_C = 2.71V - 15.98V = -13.27V$$

spoj baza kolektor je reverzno polariziran kao što je i potrebno za aktivno područje!

Elektronički Elementi i Sklopovi

Dodavanjem emitterskog otpora postigli smo da sklop u spoju zajedničkog emitera bude stabilniji ako se promjene temperatura ili parametri tranzistora.

U primjeru 1, izračunali smo vrijednosti I_B , I_C i V_{CE} za $\beta = 50$ za spoj zajedničkog emitera sa uzemljenom emitterskom elektrodom. Ako sada izračunamo I_B , I_C i V_{CE} za $\beta = 100$ dobijemo slijedeće vrijednosti:

β	I_B (μA)	I_C (mA)	V_{CE} (V)
50	47.08	2.35	6.83
100	47.08	4.71	1.64

Vrijednost struje kolektora I_C se promijenila za 100%. Napon V_{CE} se smanjio za 76% kada se β promijeni sa 50 na 100 (spoj zajedničkog emitera sa uzemljenom elektrodom).

Elektronički Elementi i Sklopovi

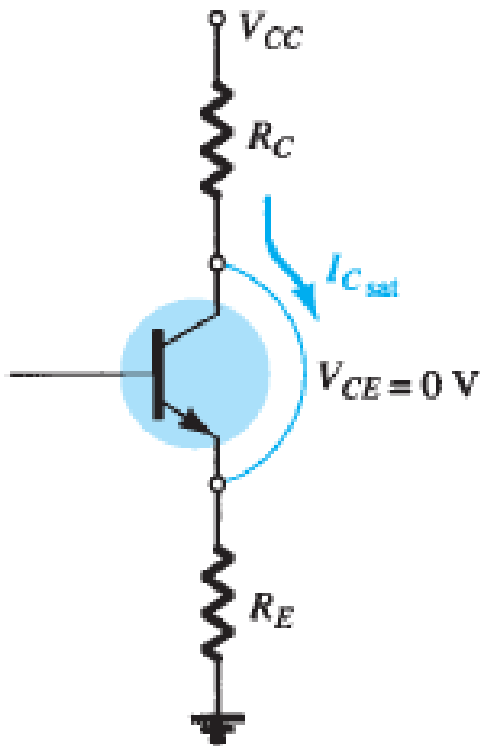
Ako sada ponovimo primjer 4 (spoj zajedničkog emitera sa emitorskim otpornikom) sa pojačanjem $\beta = 100$ dobiju se slijedeće vrijednosti:

β	I_B (μA)	I_C (mA)	V_{CE} (V)
50	40.1	2.01	13.97
100	36.3	3.63	9.11

Sada se vrijednost struje kolektora I_C se promijenila za 81% zbog povećanja β od 100%. Napon V_{CE} se smanjio za oko 35% kada se β promijeni sa 50 na 100.

Zbog toga je sklop zajedničkog emitera sa emitorskim otporom stabilniji nego sklop zajedničkog emitera sa uzemljenom emitorskom elektrodom!

Elektronički Elementi i Sklopovi



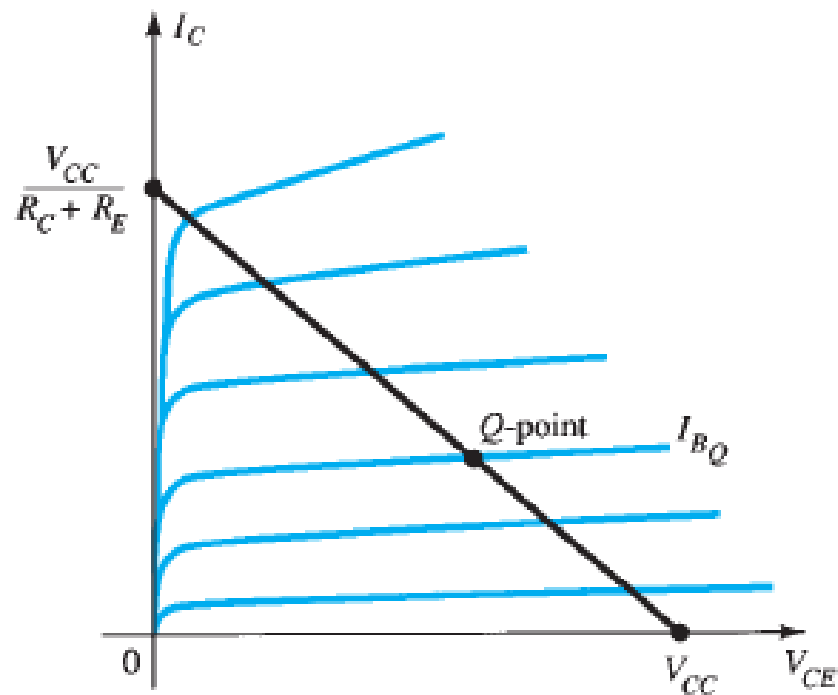
Struja saturacije $I_{C_{sat}}$ se može naći ako kratko spojimo kolektor i emiter:

$$(24) I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

Može se primjetiti da se dodavanjem emitterskog otpora struja saturacije smanjuje u odnosu na sklop zajedničkog emitera sa uzemljenom emitterskom elektrodom.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Liniju tereta za sklop zajedničkog emitera sa emitterskim otporom možemo crtati iz jednadžbe (23) $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$



Da bi dobili liniju tereta prvo postavimo da je $V_{CE} = 0$ te se dobije:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

Druga točka se dobije postavljanjem I_C te imamo:

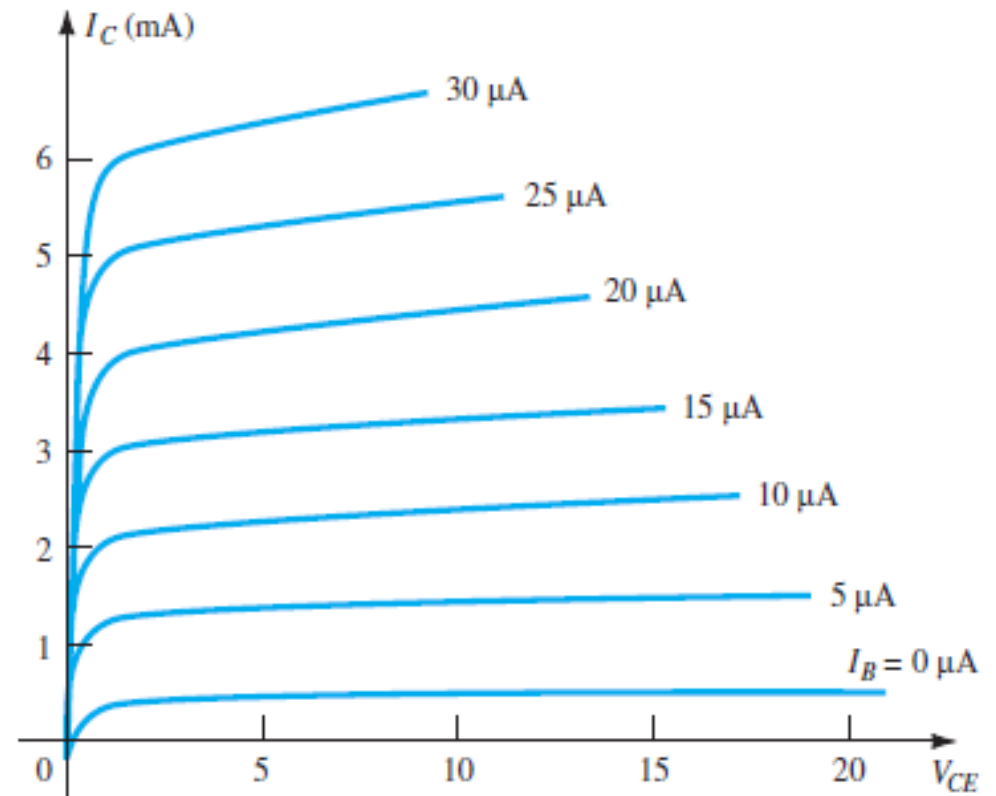
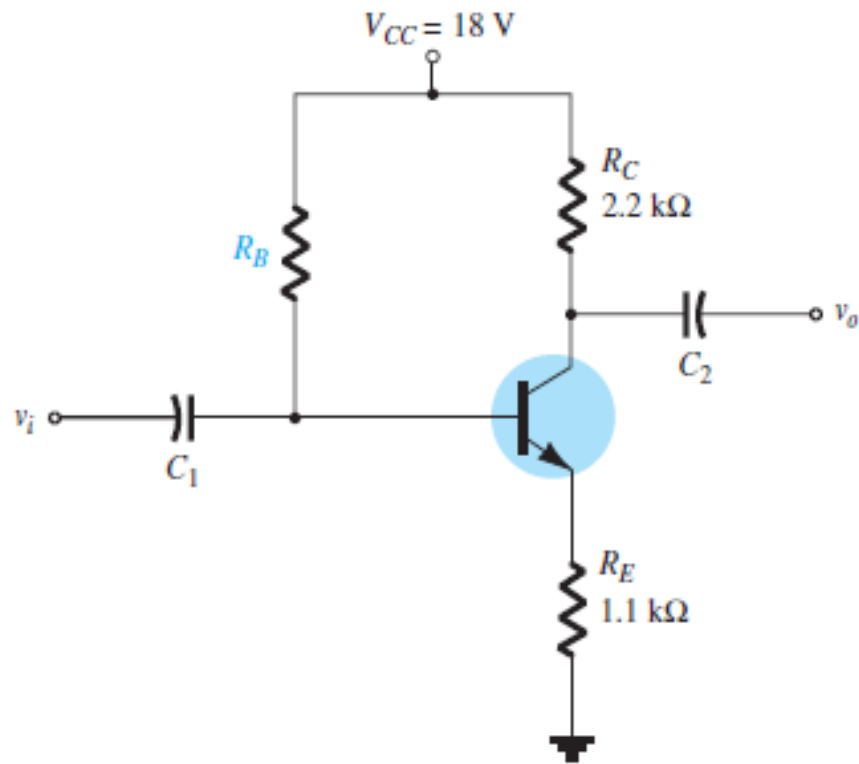
$$V_{CE} = V_{CC}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 5. Za sklop na slici je potrebno:

- a) nacrtati liniju tereta na karakteristici sa slike
- b) za Q točku koja se nalazi na sijecištu linije tereta i struje $I_{BQ} = 15 \mu A$ treba odrediti struju I_{CQ} te napon V_{CEQ}
- c) Treba odrediti DC pojačanje β u statičkoj radnoj točki Q
- d) Koristeći β izračunat u c) treba odrediti vrijednost otpora R_B te sugerirati moguću standardnu vrijednost otpora R_B

Elektronički Elementi i Sklopovi



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje:

a) da bi se nacrtala linija tereta potrebno je odrediti dvije točke na pravcu danom jednačbom (23), tj. $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$

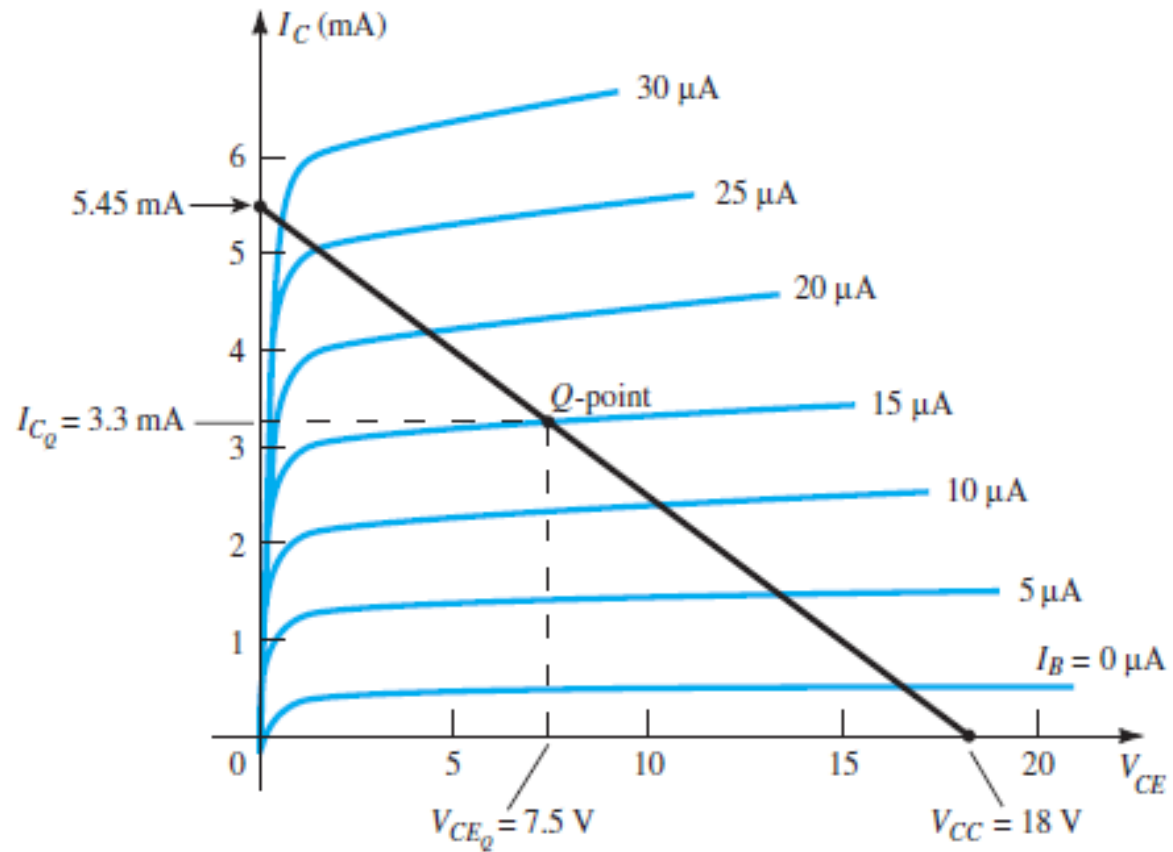
Prvu točku dobijemo kada postavimo da je napon $V_{CE} = 0$ tada je struja $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{18V}{2.2 k\Omega + 1.1 k\Omega} = \frac{18V}{3.3 k\Omega} = 5.45 mA$

Drugu točku dobijemo kada postavimo da je struja $I_C = 0$ dobije se $V_{CE} = V_{CC}$

Iz ove dvije točke nacrtta se pravac $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$ na izlaznoj strujno-naponskoj karakteristici.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Q točka tranzistora.



Elektronički Elementi i Sklopovi

b) Sa izlazne strujno-naponske karakteristike iz sjecišta linije tereta i struje $I_{BQ} = 15 \mu A$ dobije se da je struja I_{CQ} i napon V_{CEQ} jednak:

$$V_{CEQ} \cong 7.5V \quad I_{CQ} \cong 3.3 mA$$

c) Pojačanje tranzistora β odredimo kao:

$$\beta = \frac{V_{CEQ}}{I_{CQ}} = \frac{3.3 mA}{15 \mu A} = 220$$

d) Otpor R_B se može izračunati iz izraza (20) ako znamo pojačanje β :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \leftrightarrow R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} - (\beta + 1)R_E = \frac{18V - 0.7V}{15 \mu A} - (220 + 1) \cdot 1.1 k\Omega = \frac{17.3V}{15 \mu A} - 221 \cdot 1.1 k\Omega = 1.153 M\Omega - 0.243 M\Omega = 910 k\Omega$$