

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Sadržaj predavanja:

1. DC analiza pojačala u spoju zajedničkog emitera sa naponskim djelilom na bazi
2. Egzaktna metoda DC analize pojačanja pojačala u spoju zajedničkog emitera sa naponskim djelilom na bazi
3. Aproksimativna metoda DC analize pojačanja pojačala u spoju zajedničkog emitera sa naponskim djelilom na bazi
4. Kolektorska povratna sprega
5. Darlingtonov sklop

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

U dosadašnjoj analizi struja kolektora  $I_{C_Q}$  u DC radnoj točki  $Q$  je funkcija pojačanja  $\beta$  tranzistora.

S obzirom da  $\beta$  tranzistora ovisi o temperaturi te s obzirom da  $\beta$  nije strogo definiran za pojedini tranzistor istog tipa (npr. BC107) bilo bi poželjno da je sklop manje ovisan o pojačanju  $\beta$  te da je po mogućnosti u potpunosti neovisan o pojačanju  $\beta$ .

Tranzistor u konfiguraciji zajedničkog emitera sa naponskim djeliteljem u krugu baze je jedan takav sklop.

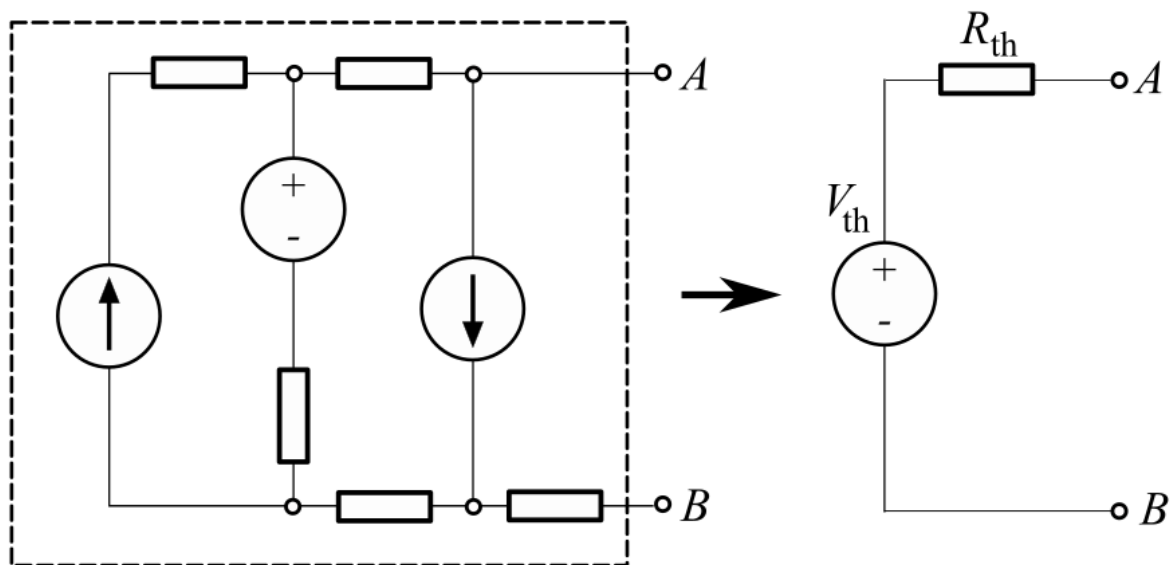
Osjetljivost takvog sklopa na promjenu parametra  $\beta$  je vrlo mala.

Ako se parametri takvog sklopa ispravno odaberu struja  $I_{C_Q}$  i napon  $V_{CE_Q}$  je praktički neovisan o pojačanju  $\beta$ .

Postoje dvije metode za analizu sklopa zajedničkog emitera sa naponskim djeliteljem u krugu baze: (a) *egzaktna metoda* i (b) *aproksimativna metoda*.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

Svaka linearna električna mreža koja se sastoji samo od otpora, naponskih i strujnih izvora može se zamijeniti ekvivalentnom mrežom koja se sastoji od Theveninovog otpora i Theveninovog izvora.

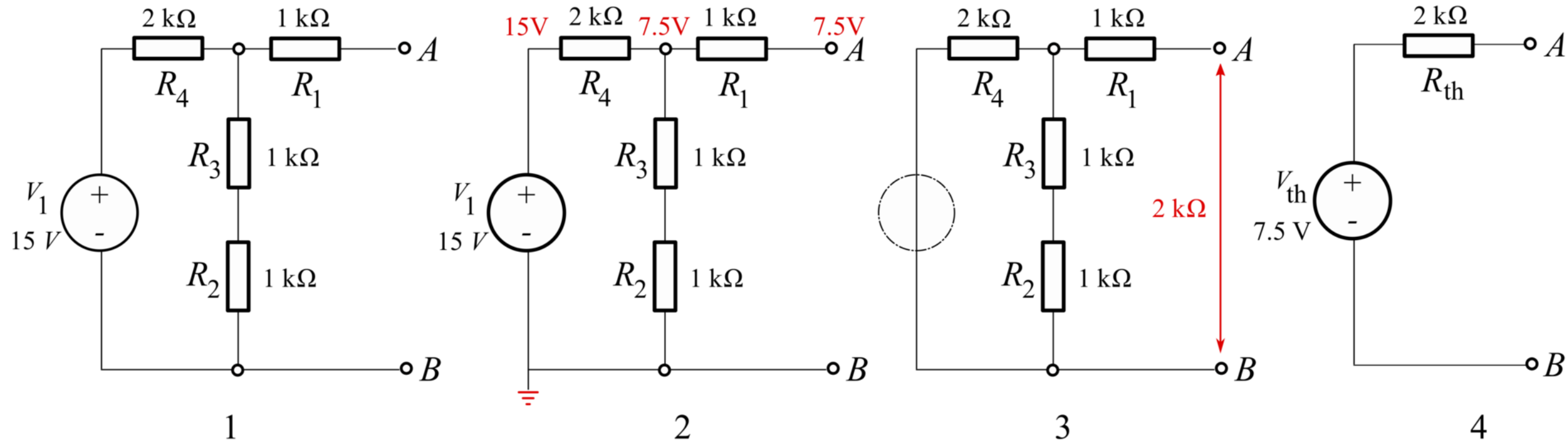


Theveninov napon je onaj napon izmjeren na stezaljkama A i B ako na stezaljke A i B nije spojen nikakav teret (otvoreni krug). Takav napon označavamo sa  $V_{TH}$ .

Theveninov otpor se dobije da se naponski izvori zamjene sa kratkim spojem za idealni naponski izvor (ili unutarnjim otporom naponskog izvora za neidealni naponski izvor)

# Elektronički Elementi i Sklopovi

Također, strujne izvore treba zamijeniti otvorenim krugom (ako su idealni). Theveninov otpor se tada može izračunati koristeći formule za otpor u seriji ili u paralelnom spoju.



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

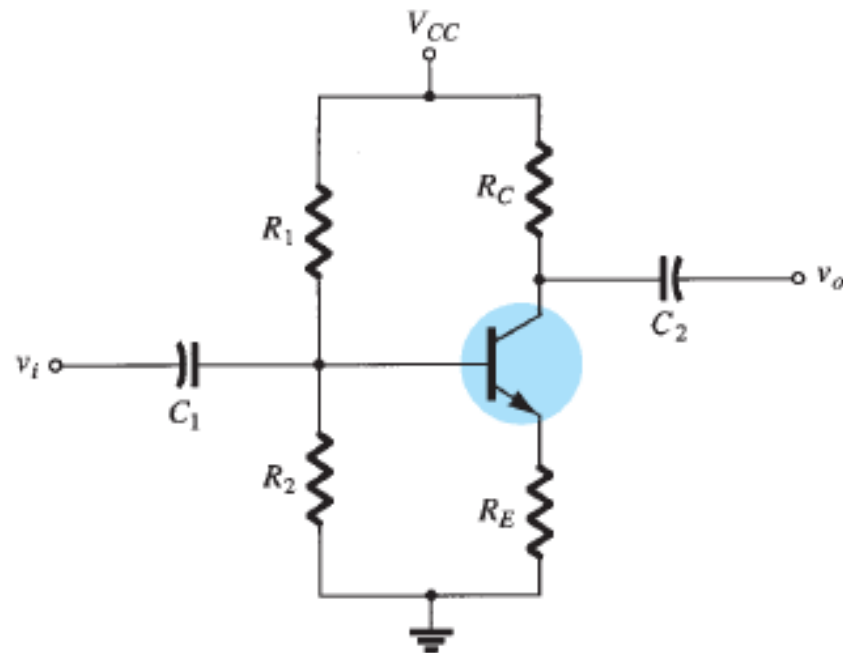
Na prethodom primjeru Theveninov napon se se dobije iz naponskog djelila:

$$(1) V_{Th} = \frac{R_2+R_3}{R_4+(R_2+R_3)} V_1 = \frac{1\text{ k}\Omega+1\text{ k}\Omega}{(1\text{ k}\Omega+1\text{ k}\Omega)+2\text{ k}\Omega} \cdot 15\text{ V} = \frac{1}{2} \cdot 15\text{ V} = 7.5\text{ V}$$

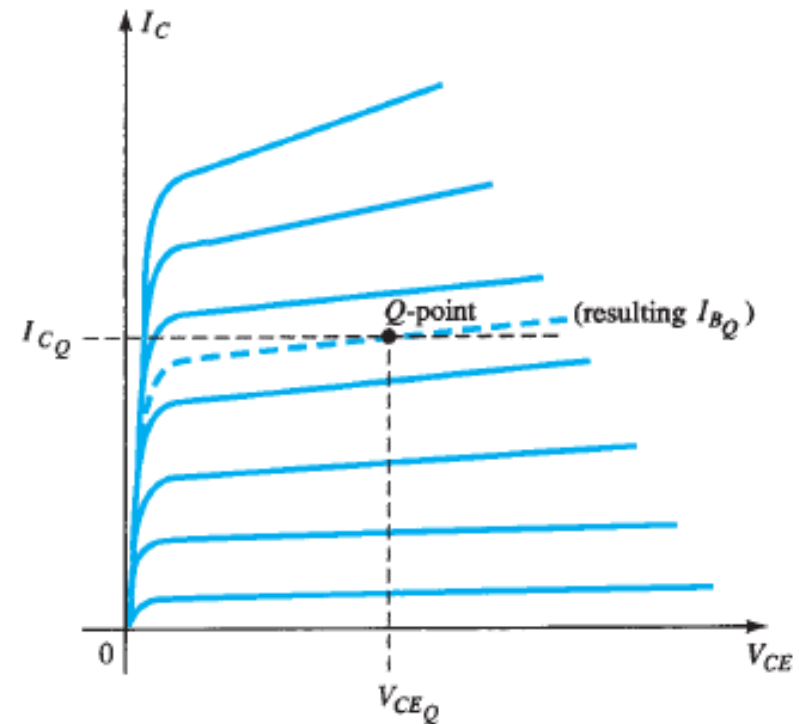
Theveninov otpor dobijemo ako naponski izvor zamijenimo kratkim spojem:

$$(2) V_{Th} = R_1 + (R_2 + R_3) \parallel R_4 = R_1 + \frac{(R_2+R_3) \cdot R_4}{R_2+R_3+R_4} = 2\text{ k}\Omega$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

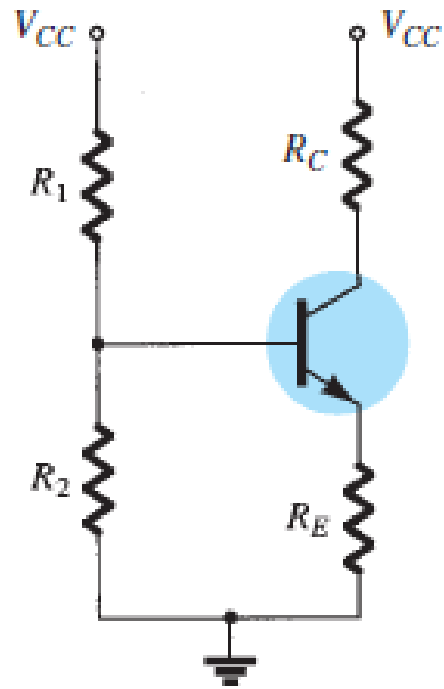


Sklop zajedničkog emitera sa naponskim djeliteljem u krugu baze



Statička radna točka

# Elektronički Elementi i Sklopovi



## Egzaktna metoda

Na slici je sklop zajedničkog emitera sa naponskim djelilom u krugu baze.

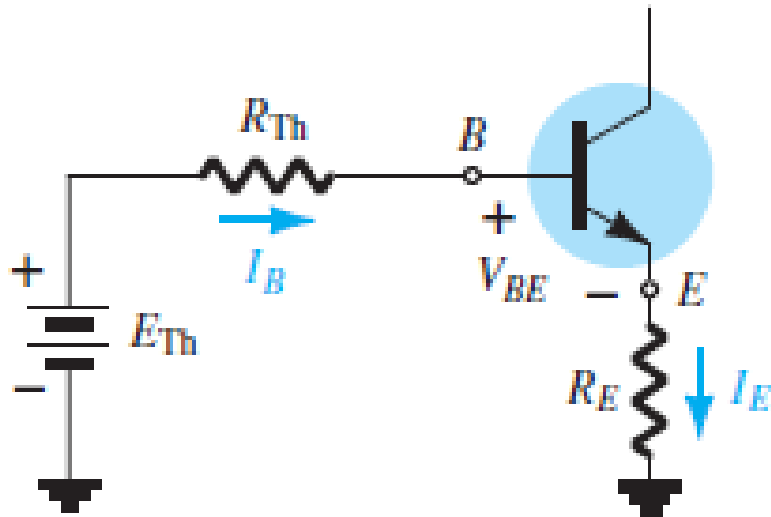
Naponsko djelilo u krugu baze možemo zamijeniti Theveninovim ekvivalentom:

$$(3) R_{Th} = R_1 \parallel R_2$$

Također možemo izračunati i napon Theveninovog izvora:

$$(4) E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi



Kada krug baze zamijenimo Theveninovim naponom i otporom dobijemo električnu mrežu na slici.

Sada korištenjem drugog Kirchhoffovog zakona možemo postaviti jednadžbu za krug baze:

$$(5) E_{Th} - I_B R_{Th} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Uvrštavajući od prije poznati izraz  $I_E = (\beta + 1)I_B$  u (5) dobije se:

$$(6) E_{Th} - I_B R_{Th} - V_{BE} - (\beta + 1)I_B R_E = 0$$

Iz izraza (6) može se naći struja  $I_B$  kao:

$$(7) I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Jednom kada znamo struju  $I_B$  možemo pronaći i ostale vrijednosti spoja zajedničkog emitera sa naponskim djelilom u krugu baze. Kao i kod spoja zajedničkog emitera sa emitterskim otpornikom napon  $V_{CE}$  možemo naći kao:

$$(8) V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

Poznajući struju baze  $I_B$ , struju kolektora je lako izračunati iz relacije:

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

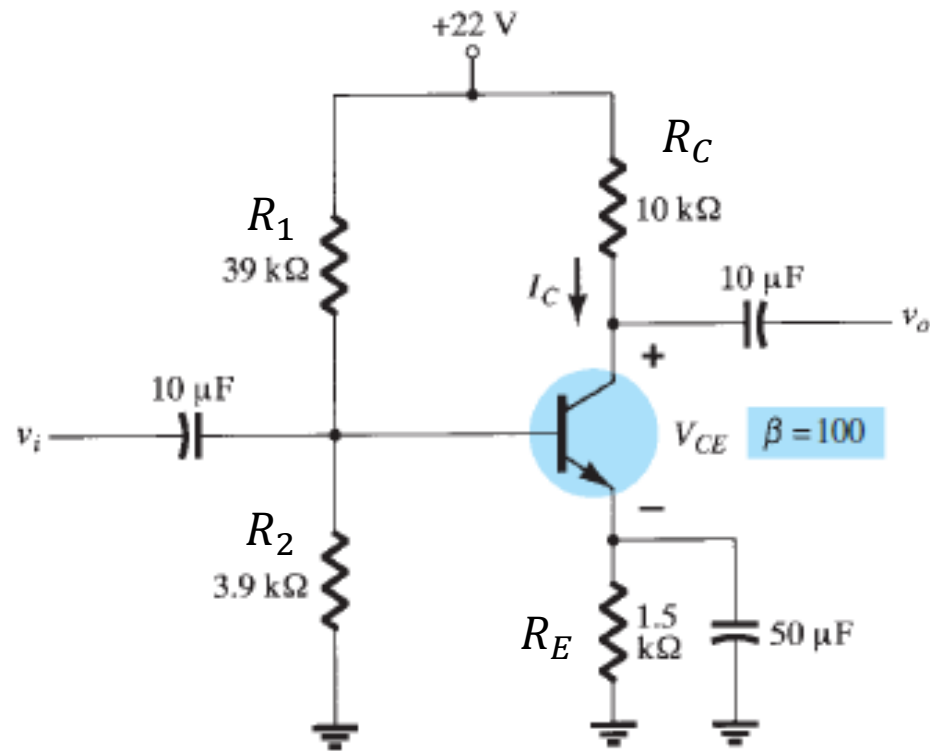
Struja emitera  $I_E \cong I_C$ , iako možemo koristiti i jednadžbu:

$$(10) I_E = (\beta + 1) I_B$$

Iz jednadžbi (7)-(10) možemo izračunati sve preostale veličine za sklop zajedničkog emitera sa naponskim djelilom u krugu baze ( $V_C, V_B, V_E, V_{CB}, \dots$ ).

# Elektronički Elementi i Sklopovi

**PRIMJER 1.** Za slop na slici treba naći napon  $V_{CE}$  i struju kolektora  $I_C$ .

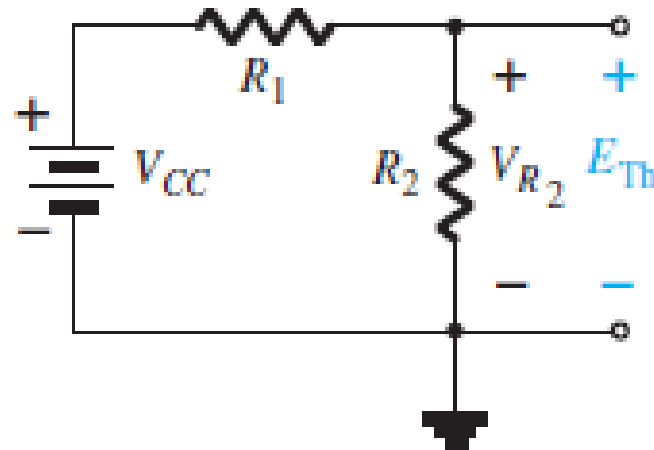


# Elektronički Elementi i Sklopovi

**Rješenje:** prvo treba pronaći Theveninov otpor i Theveninov napon za krug baze. To možemo koristeći jednačbe (3) i (4):

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(39 \text{ k}\Omega) \cdot (3.9 \text{ k}\Omega)}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} = 3.55 \text{ k}\Omega$$

$$E_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{(3.9 \text{ k}\Omega) \cdot (22 \text{ V})}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}$$



# Elektronički Elementi i Sklopovi

Zatim naponsko dijelilo baze zamijenimo Theveninovim ekvivalentom te izračunamo struju  $I_B$  iz jednadžbe (7):

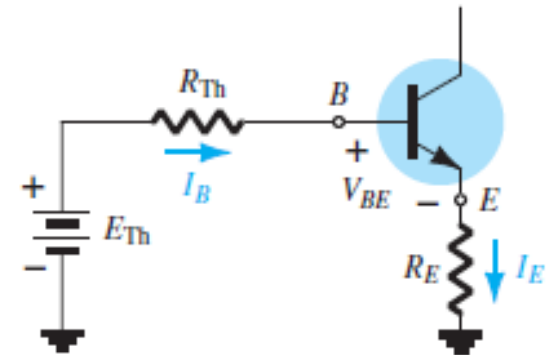
$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} = \frac{2V - 0.7V}{3.55k\Omega + (101)(1.5k\Omega)} = \frac{1.3V}{3.55k\Omega + 151.5k\Omega} = 8.38 \mu A$$

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

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 8.38 \mu A = 0.84 \text{ mA}$$

Napon  $V_{CE}$  kolektor-emitter može se naći iz (8) kao:

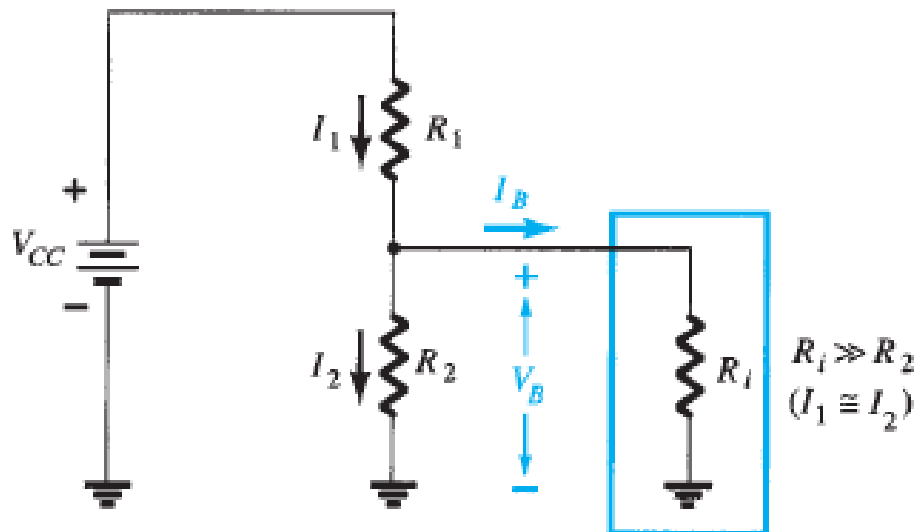
$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 22V - 0.84 \text{ mA} \cdot (10k\Omega + 1.5k\Omega) \\ &= 22V - 9.66V \\ &= 12.34V \end{aligned}$$



# Elektronički Elementi i Sklopovi

## Aproksimativna metoda

Ulazni krug spoja zajedničkog emitera može se zamijeniti na način kao na slici:



Ulazni otpor  $R_i$  je ulazni otpor spoja zajedničkog emitera sa emitterskim otporom definiran na prethodnom predavanju kao:

$$(11) R_i = (\beta + 1)R_E \cong \beta R_E$$

Da bi aproksimativna metoda funkcionirala treba biti zadovoljeno:

$$(12) \beta R_E > 10 R_2$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Ako je zadovoljena jednačina (12)  $\beta R_E > 10 R_2$  tada je struja koja teče kroz ulazni otpor  $R_i$  bitno manja od struje  $I_1$  i  $I_2$  prikazane na slici te se može zanemariti.

U tom slučaju napon na bazi  $V_B$  je jednak:

$$(13) V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

Napon na emiteru možemo izraziti kao:

$$(14) V_E = V_B - V_{BE}$$

Struja emitera može se naći iz izraza:

$$(15) I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

Struja kolektora  $I_C$  jest otprilike jednaka struji emitera  $I_E$ :

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

$$(16) I_{CQ} \cong I_E$$

Napon kolektor-emitter  $V_{CE}$  može se naći iz izraza:

$$(17) V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

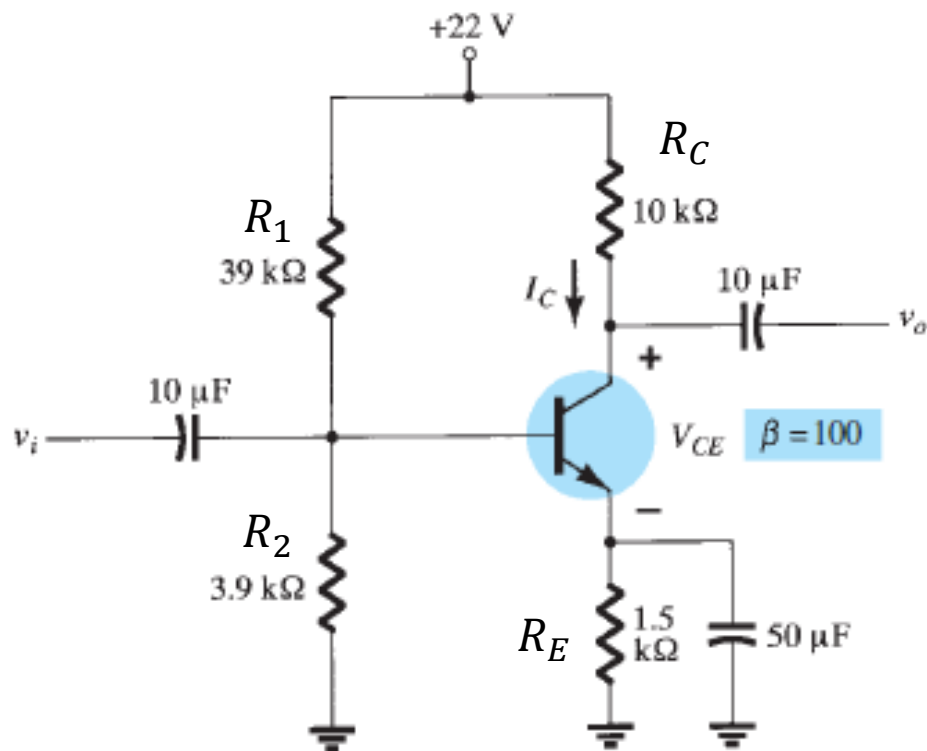
Budući da vrijedi jednačba (16)  $I_{CQ} \cong I_E$  izraz (17) postaje:

$$(18) V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Treba primjetiti da kod aproksimativnog načina nismo koristili pojačanje  $\beta$  te nismo računali struju baze  $I_B$  te je proračun [neovisan o pojačanju  \$\beta\$](#) .

# Elektronički Elementi i Sklopovi

**PRIMJER 2.** Za slop na slici treba naći napon  $V_{CE}$  i struju kolektora  $I_C$  koristeći aproksimativnu metodu te usporediti sa vrijednostima iz primjera 1.





# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

**Rješenje:** prvo treba provjeriti da li je zadovoljeno  $\beta R_E > 10 R_2$ . Uvrštavajući vrijednosti otpora iz zadatka te koristeći zadani  $\beta = 100$  dobije se:

$$\beta R_E = 100 \cdot 1.5 \text{ k}\Omega = 150 \text{ k}\Omega$$

$$10 R_2 = 10 \cdot 3.9 \text{ k}\Omega = 39 \text{ k}\Omega$$

$$150 \text{ k}\Omega > 39 \text{ k}\Omega$$

Dakle uvjet  $\beta R_E > 10 R_2$  je zadovoljen. Iz jednadžbe (13) možemo naći napon na bazi  $V_B$  kao:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{3.9 \text{ k}\Omega}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} \cdot 22 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

Sada možemo naći napon na emiteru  $V_E$  koristeći jednadžbu (14)

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 1.3 \text{ V}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Iz poznatog napona emitera  $V_E = 1.3 V$  dobijemo struju emitera  $I_E$  korištenjem jednadžbe (15):

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3 V}{1.5 k\Omega} = 0.867 mA$$

Struja emitera  $I_E$  je približno jednaka struji kolektora  $I_C$  pa tako imamo:

$$I_C \cong I_E = 0.867 mA$$

U primjeru 1, korištenjem egzaktna analize dobili smo  $I_C = 0.84 mA$  što je približno jednako rezultatu aproksimativne analize. Napon  $V_{CE}$  možemo dobiti iz izraza (18) kao:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 22V - (0.867 mA)(10 k\Omega + 1.5 k\Omega) = 12.03 V$$

U primjeru 1, uporabom egzaktna analize dobili smo da je  $V_{CE} = 12.34 V$ . Vidimo da ako je zadovoljen uvjet  $\beta R_E > 10 R_2$  korištenjem obje metode (aproksimativna i egzaktna) dobijemo otprilike isti rezultat.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

**PRIMJER 3.** Za mrežu iz primjera 1, treba naći napon  $V_{CE}$  i struju kolektora  $I_C$  koristeći egzaktnu metodu ako je pojačanje  $\beta$  tranzistora 50 te usporediti rezultate.

**Rješenje:** Theveninov otpor i Theveninov napon su jednaki kao i u primjeru 1:

$$R_{Th} = 3.55k\Omega$$

$$E_{Th} = 2V$$

Struja baze  $I_B$  kod ekzaktne metode ovisi o pojačanju  $\beta$  i može se naći iz (7) kao:

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} = \frac{2V - 0.7V}{3.55k\Omega + (50 + 1)(1.5k\Omega)} = \frac{1.3V}{3.55k\Omega + 76.5k\Omega} = 16.24 \mu A$$

Struja kolektora  $I_C = \beta I_B$  te imamo:

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 16.24 \mu A = 0.81 \text{ mA}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Napon  $V_{CE}$  može se dobiti iz jednadžbe (8) kao:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 22V - 0.81 \text{ mA} \cdot (10 \text{ k}\Omega + 1.5 \text{ k}\Omega) = 12.69 \text{ V}$$

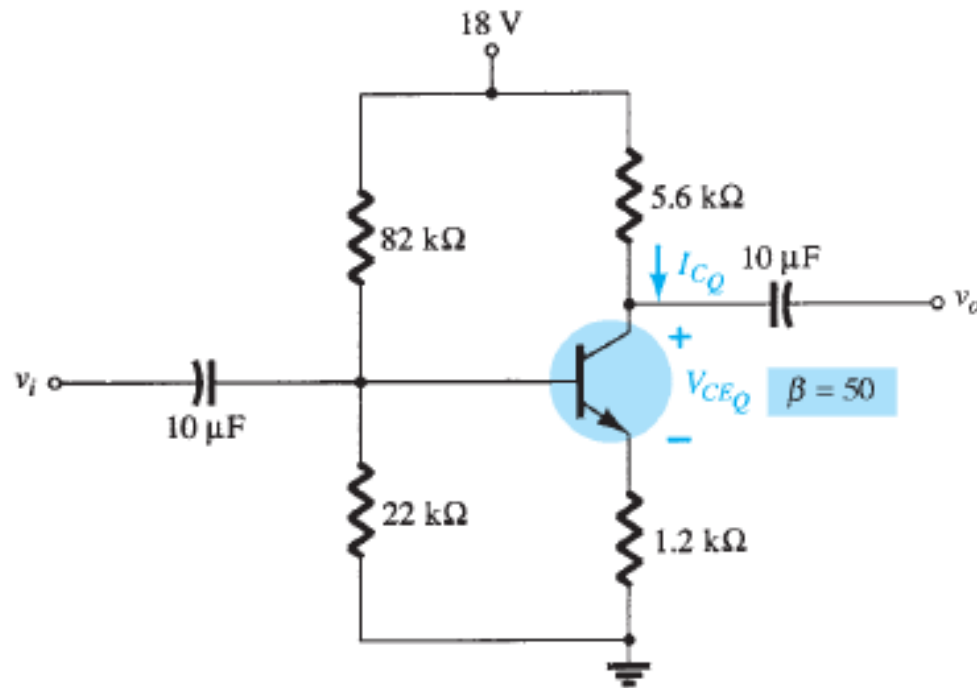
Uspoređujući rezultate sa onima u primjeru 1 dobije se slijedeća tablica:

$\beta$	$I_{CQ} \text{ (mA)}$	$V_{CEQ} \text{ (V)}$
100	0.84 mA	12.34 V
50	0.81 mA	12.69 V

Iz rezultati vidimo da su struja  $I_C$  i napon  $V_{CE}$  relativno neosjetljivi na promjene u pojačanju tranzistora  $\beta$ .

# Elektronički Elementi i Sklopovi

**PRIMJER 4.** Za mrežu na slici treba odrediti napon  $V_{CE}$  i struju kolektora  $I_C$  koristeći egzaktnu i aproksimativnu metodu i usporediti rezultate. Ovaj put uvjet  $\beta R_E > 10 R_2$  nije zadovoljen!



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Rješenje:

Egzaktna metoda

Prvo nađemo Theveninov napon  $E_{Th}$  i Theveninov otpor  $R_{Th}$  :

$$E_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{(22 \text{ k}\Omega) \cdot (18 \text{ V})}{82 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega} = 3.81 \text{ V}$$

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(82 \text{ k}\Omega) \cdot (22 \text{ k}\Omega)}{82 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega} = 17.35 \text{ k}\Omega$$

Struju baze  $I_B$  pronađemo iz izraza (7):

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} = \frac{3.81 - 0.7 \text{ V}}{17.35 \text{ k}\Omega + (50 + 1)(1.2 \text{ k}\Omega)} = \frac{3.11 \text{ V}}{78.55 \text{ k}\Omega} = 39.6 \mu\text{A}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Struja kolektora  $I_C$  se pronade iz  $I_C = \beta I_B$

$$I_C = \beta I_B = 50 \cdot 39.6 \mu A = 1.98 \text{ mA}$$

Napon  $V_{CE}$  dobije se iz jednadžbe (8) :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 18V - 1.98 \text{ mA} \cdot (5.6 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega) = 4.54 \text{ V}$$

## Aproksimativna metoda

Kod aproksimativne metode provo provjerimo je li uvjet  $\beta R_E > 10 R_2$  zadovoljen:

$$\beta R_E = 50 \cdot 1.2 \text{ k}\Omega = 60 \text{ k}\Omega$$

$$10 R_2 = 10 \cdot 22 \text{ k}\Omega = 220 \text{ k}\Omega$$

$60 \text{ k}\Omega < 220 \text{ k}\Omega$  uvjet  $\beta R_E > 10 R_2$  nije zadovoljen!

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Zatim, za aproksimativnu metodu treba naći napon  $V_B$  na bazi tranzistora:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{(22 \text{ k}\Omega) \cdot (18 \text{ V})}{82 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega} = 3.81 \text{ V}$$

Iz napona  $V_B$  možemo naći napon na emiteru  $V_E$ :

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.81 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 3.11 \text{ V}$$

Struja emitera  $I_E$  je jednaka:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.11 \text{ V}}{1.2 \text{ k}\Omega} = 2.59 \text{ mA}$$

Struja emitera je otprilike jednaka struji kolektora tako da imamo:

$$I_C \cong I_E = 2.59 \text{ mA}$$



# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Napon  $V_{CE}$  opet dobijemo iz jednadžbe (8) :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 18V - 2.59 \text{ mA} \cdot (5.6 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega) = 3.88 \text{ V}$$

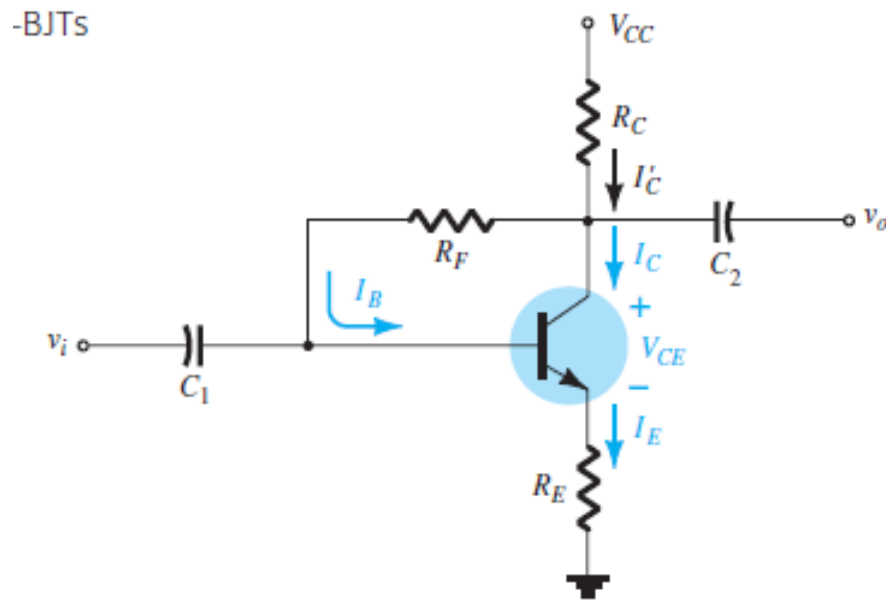
Uspoređujući egzaktnu i aproksimativnu metodu dobije se tablica:

	$I_{CQ} \text{ (mA)}$	$V_{CEQ} \text{ (V)}$
Exact	1.98	4.54
Approximate	2.59	3.88

Iz tablice se vidi da ako nije zadovoljen uvjet  $\beta R_E > 10 R_2$  da je struja  $I_C$  30% veća od one dobivene egzaktnom metodom dok je vrijednost  $V_{CE}$  oko 10% manja.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

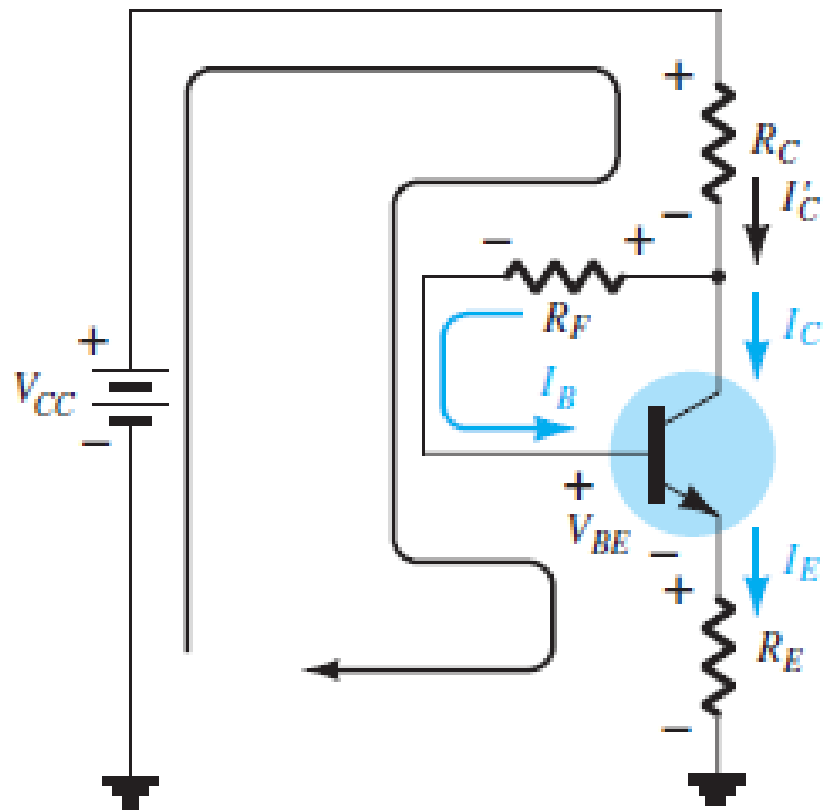
Još bolja stabilnost sklopa u spoju zajedničkog emitera se može postići pomoću povratne sprege između baze i kolektora. Povratna veza se ostvaruje preko otpornika  $R_F$  (eng. *feedback resistor*).



Iako Q-točka ( $I_{CQ}, U_{CEQ}$ ) nije u potpunosti neovisna o pojačanju  $\beta$ , osjetljivost na promjene  $\beta$  zbog temperature ili tehnologije izrade tranzistora je daleko manja nego u spoju zajedničkog emitera sa uzemljenim emiterom.

Kao i u prethodnim konfiguracijama, analizu započinjemo analizom petlje baza-emiter te tako dobivene rezultate primjenjujemo na petlju kolektor-emiter.

# Elektronički Elementi i Sklopovi



Na slici su prikazane dvije petlje: petlja baza-emiter i petlja kolektor-emiter.

Koristeći drugi Kirchhoffov zakon za petlju baza emiter možemo pisati:

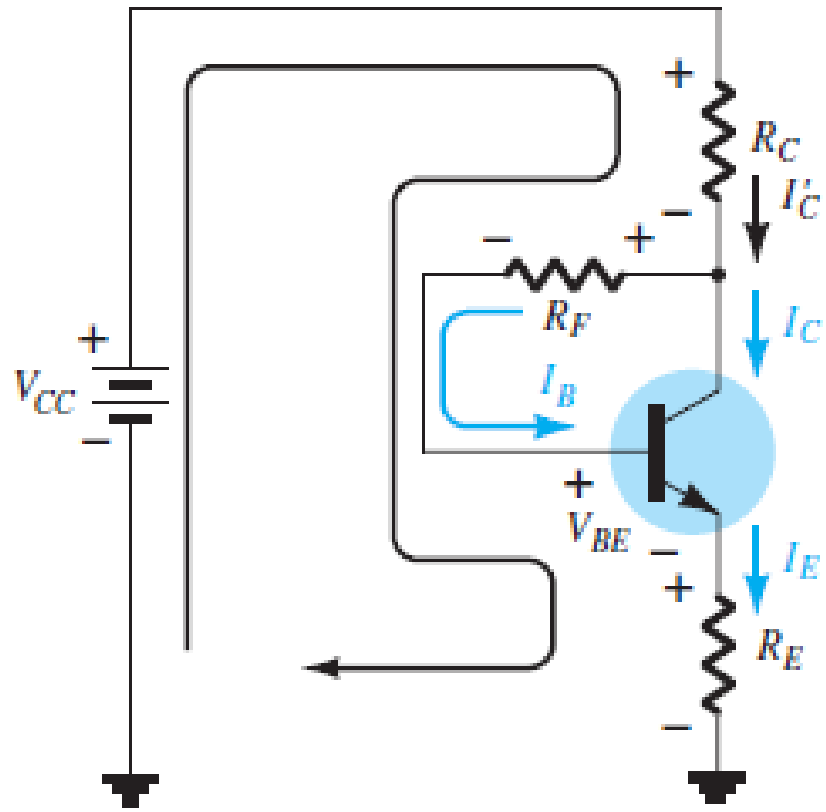
$$(19) V_{CC} - I'_C R_C - I_B R_F - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Treba primjetiti da struja kroz otpornik  $R_C$  nije  $I_C$  već je to struja  $I'_C$ .

Iz slike je vidljivo da za struju  $I'_C$  možemo primjeniti prvi Kirchhoffov zakon:

$$(20) I'_C = I_C + I_B$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi



Objektive struje  $I'_C$  i  $I_C$  su daleko veće od struje baze  $I_B$  te možemo koristiti aproksimaciju  $I'_C \cong I_C = \beta I_B$  te  $I_E = I_C$ . Koristeći ove dvije aproksimacije, iz (19) dobijemo:

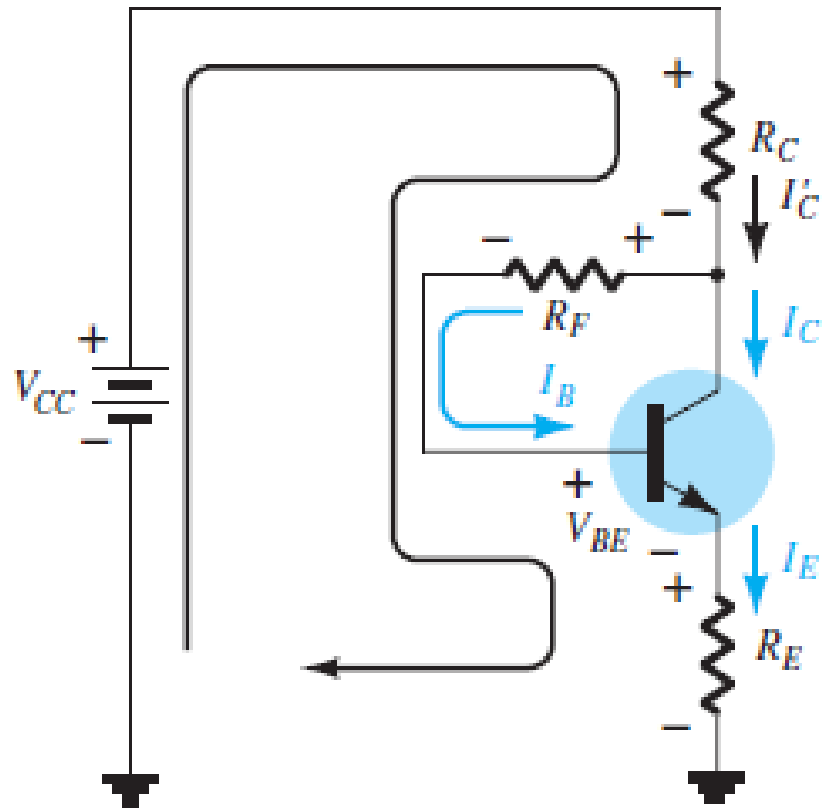
$$(21) V_{CC} - \beta I_B R_C - I_B R_F - V_{BE} - \beta I_B R_E = 0$$

Rješavanjem jednačbe (21) po varijabli  $I_B$  (struji baze) dobije se:

$$(22) I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + \beta(R_C + R_E)}$$

Rezultat (22) je sličan prethodnim rezultatima za spoj zajedničkog emitera.

# Elektronički Elementi i Sklopovi

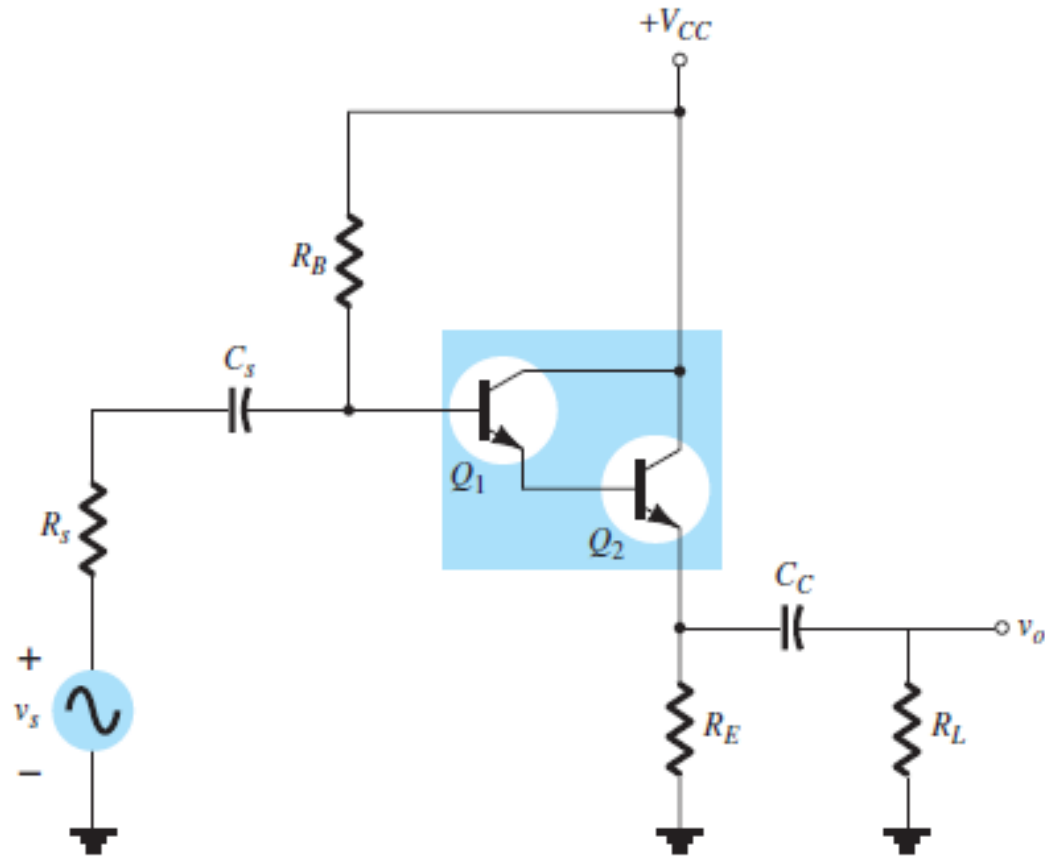


U izlaznom krugu, zbog toga što je  $I'_C \cong I_C$  te  $I_E = I_C$  imamo da:

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

što je ista jednađžba koju smo dobili za konfiguracije zajedničkog emitera s emitorskim otpornikom te zajedničkog emitera s naponskim djeliteljem.

# Elektronički Elementi i Sklopovi



Darlingtonov sklop je sklop sa dva tranzistora gdje se izlaz tranzistora  $Q_1$  koristi kao ulaz tranzistora  $Q_2$ .

Za Darlingtonov sklop možemo pisati da je struja baze tranzistora  $Q_2$  jednaka struji emitera tranzistora  $Q_1$ :

$$(24) I_{B_2} = I_{E_1} = (\beta_1 + 1)I_{B_1}$$

Struja emitera tranzistora  $Q_2$  jest:

$$(25) I_{E_2} = (\beta_2 + 1)I_{B_2} = \\ = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{B_1}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Pod pretpostavkom da je  $\beta \gg 1$  za svaki od tranzistora onda je ukupni  $\beta$  Darlingtonovog sklopa:

$$(26) \beta_D = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1) \cong \beta_1\beta_2$$

Korištenjem drugog Kirchhoffovog zakona možemo pisati:

$$(27) V_{CC} - I_{B_1}R_B - V_{BE_1} - V_{BE_2} - I_{E_2}R_E = 0$$

Uvrštavanjem (25) u (27) dobije se:

$$(28) V_{CC} - I_{B_1}R_B - V_{BE_1} - V_{BE_2} - (\beta + 1)(\beta + 1)I_{B_1}R_E = 0$$

Te se iz (28) struja baze  $I_{B_1}$  može naći kao:

$$(29) I_{B_1} = \frac{V_{CC} - V_{BE_1} - V_{BE_2}}{R_B - (\beta + 1)(\beta + 1)R_E} = \frac{V_{CC} - V_{BE_1} - V_{BE_2}}{R_B - \beta_D R_E}$$

# Elektronički Elementi i Sklopovi

---

Ukupni napon baza-emitter za Darlingtonov sklop označavamo sa  $V_{BE_D}$  te se može pisati kao:

$$(30) V_{BE_D} = V_{BE_1} + V_{BE_2}$$

Za struju kolektora i struju emitera tranzistora  $Q_2$  možemo pisati:

$$(31) I_{C_2} \cong I_{E_2} = \beta_D I_{B_1}$$

Napon na emitterskom terminalu tranzistora  $Q_2$  jest:

$$(32) V_{E_2} = I_{E_2} R_E$$

Napon na kolektoru tranzistora  $Q_2$  je očito  $V_{C_2} = V_{CC}$ . Zbog toga je napon kolektor-emitter za tranzistor  $Q_2$ :

$$(33) V_{CE_2} = V_{CC} - V_{E_2}$$