

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

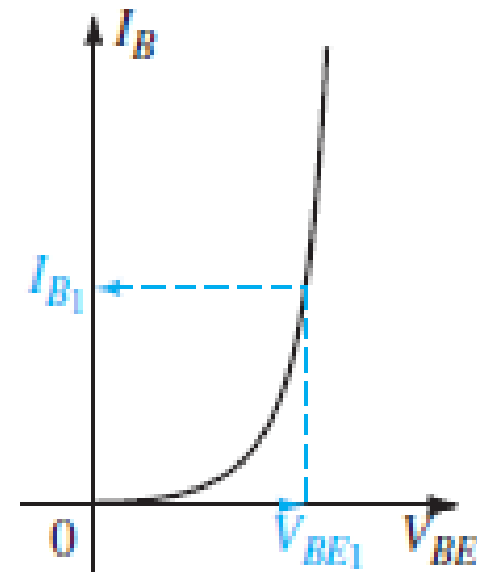
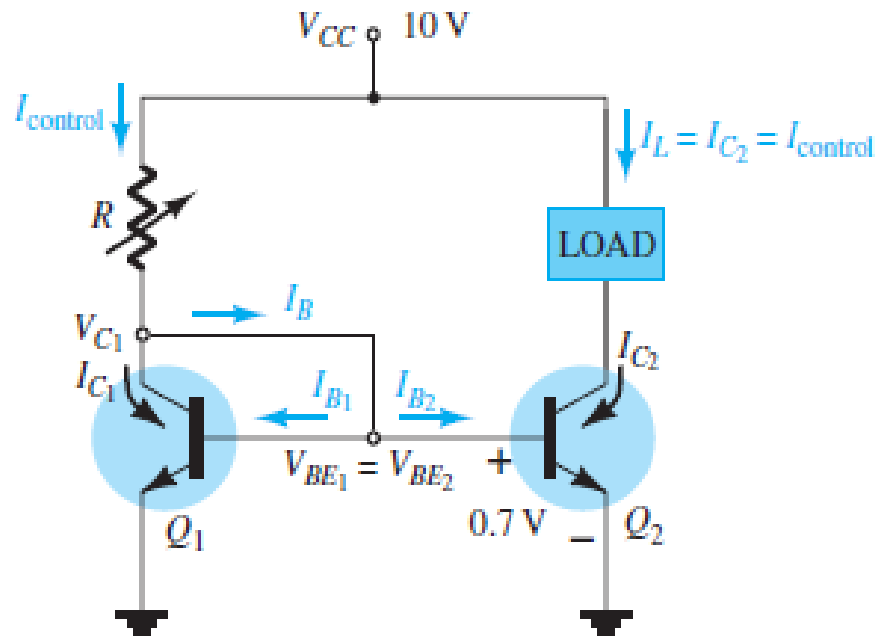
1. Strujna zrcala pomoću BJT tranzistora
2. Strujni izvori sa BJT tranzistorima
3. Tranzistor kao sklopka
4. Stabilizacija radne točke
5. Praktični sklopovi s tranzistorima

Elektronički Elementi i Sklopovi

Strujno zrcalo je električna mreža kod koje se struja kroz teret kontrolira pomoću upravljačke struje u nekoj drugoj točki električne mreže.

Ako povećamo ili smanjimo upravljačku struju, tada će se se struja kroz teret povećati ili smanjiti.

Osnovna konfiguracija strujnog zrcala i ulazna karakteristika tranzistora Q_1



Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako podrazumijevamo da su tranzistori Q_1 i Q_2 identični tada su naponi $V_{BE_1} = V_{BE_2}$ jednaki te su struje $I_{B_1} = I_{B_2}$ jednake.

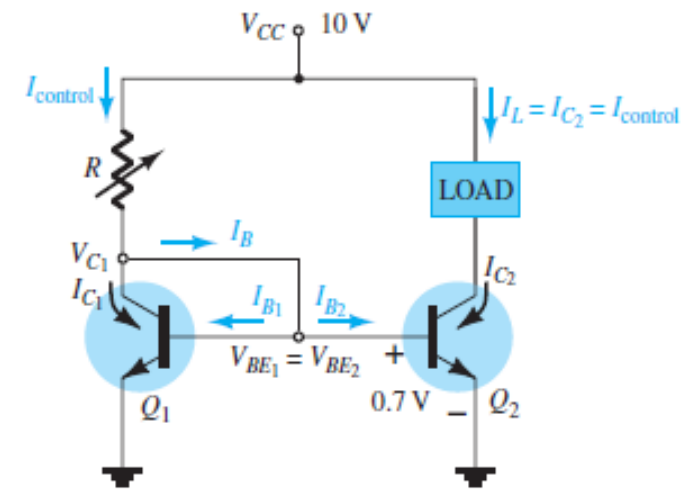
Ako povećamo napone V_{BE_1} i V_{BE_2} tada će se struje baze I_{B_1} i I_{B_2} povećati na istu vrijednost.

Iz prvog Kirchhoffovog zakona za konfiguraciju na slici imamo:

$$(1) I_B = I_{B_1} + I_{B_2}$$

Pošto su Q_1 i Q_2 identični imamo da je $I_{B_1} = I_{B_2}$ te zbog toga vrijedi:

$$(2) I_B = 2I_{B_1}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Upravljačku struju $I_{control}$ možemo izraziti pomoću prvog Kirchhoffovog zakona:

$$(3) I_{control} = I_{C_1} + I_B = I_{C_1} + 2I_{B_1}$$

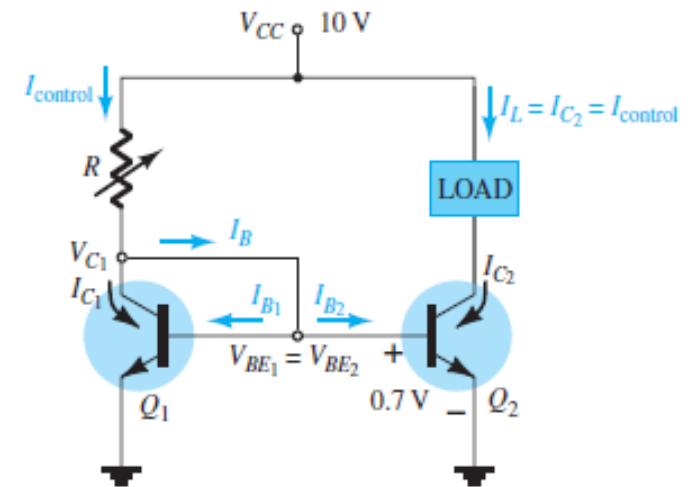
Budući da imamo $I_{C_1} = \beta I_{B_1}$ izraz (3) postaje:

$$(4) I_{control} = \beta I_{B_1} + 2I_{B_1} = (\beta + 2)I_{B_1}$$

Pošto je pojačanje β tipično takvo da je $\beta \gg 2$ izraz (4) se može pisati kao:

$$(5) I_{control} = \beta I_{B_1}$$

Kolika struja I_L teče kroz teret?



Elektronički Elementi i Sklopovi

Kroz teret LOAD teče struja I_L koja je jednaka struji kolektora kroz tranzistor Q_2 :

$$(6) I_L = I_{C_2}$$

Struja kolektora I_{C_2} tranzistora Q_2 može se naći iz izraza:

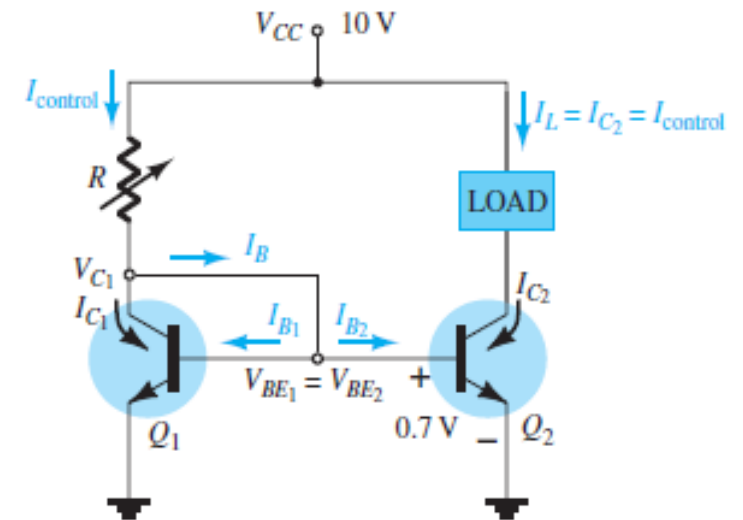
$$(7) I_{C_2} = \beta I_{B_2}$$

Budući da smo već utvrdili da je $I_{B_1} = I_{B_2}$ onda (7) postaje:

$$(8) I_{C_2} = \beta I_{B_1}$$

Pošto iz (5) imamo da $I_{control} = \beta I_{B_1}$ onda iz (8) imamo da:

$$(9) I_L = I_{C_2} = \beta I_{B_1} = I_{control}$$



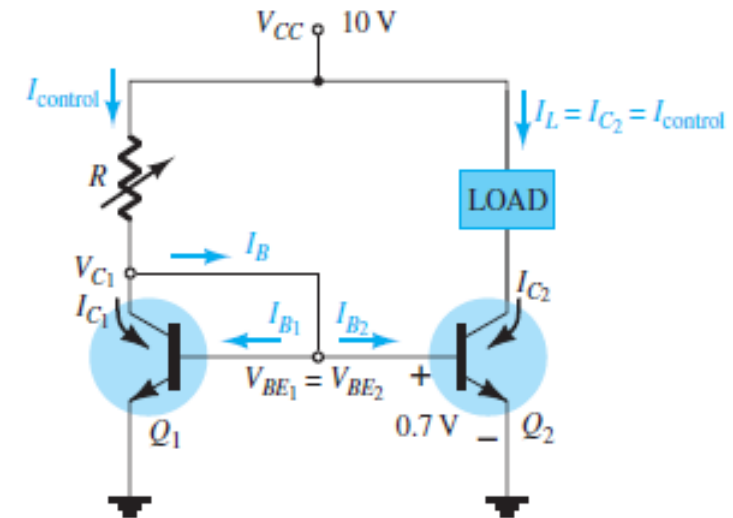
Elektronički Elementi i Sklopovi

Struju $I_{control}$ možemo naći i iz drugog Kirchhoffovog zakona:

$$(10) I_{control} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

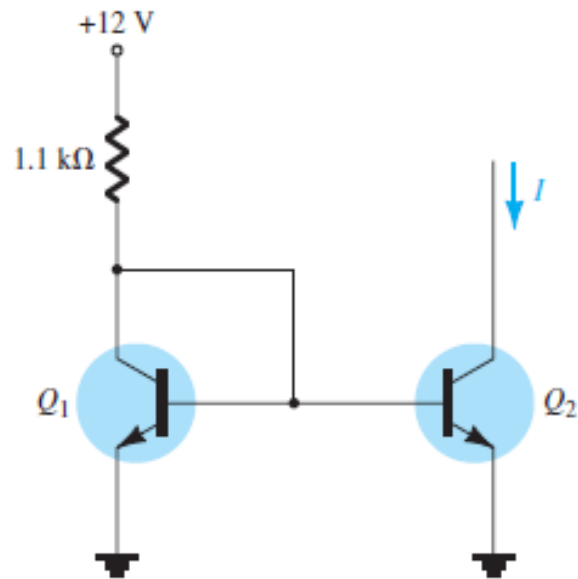
Dakle otpor R možemo koristiti kao upravljački element za upravljanje strujom $I_{control}$.

Strujno zrcalo ima i određen nivo samoregulacije. Ako se struja I_L poveća iz bilo kojeg razloga struja baze I_{B_2} će se povećati zbog relacije $I_L = I_{C_2} = \beta I_{B_2}$. Povećanje struje baze I_{B_2} će uzrokovati povećanje napona V_{BE_2} , te posljedično napona V_{CE_1} . Ovo povećanje uzrokuje da se napon na otporu R umanja te se posljedično smanjuje struja I_R kroz otpor R . Ako struja I_R opadne tada opadaju struje I_{B_1} i I_{B_2} što opet uzrokuje smanjenje struje I_L te se na taj način stabilizira sklop.



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Za sklop na slici treba odrediti zrcalnu struju I .

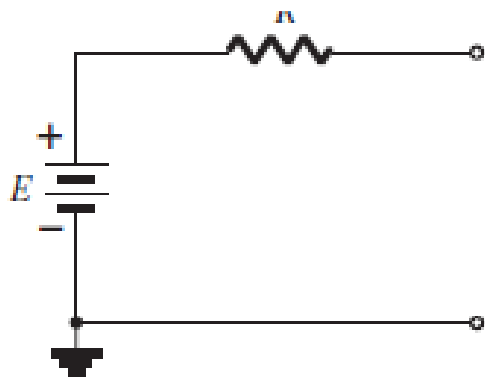


Rješenje: zrcalna struja se može odrediti iz jednačbe (10) kao:

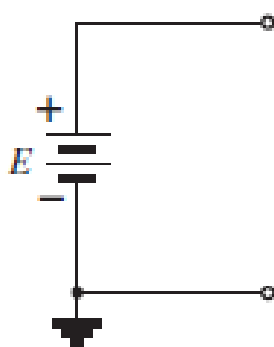
$$I_{control} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} = \frac{12V - 0.7V}{1.1 k\Omega} = 10.27 mA$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

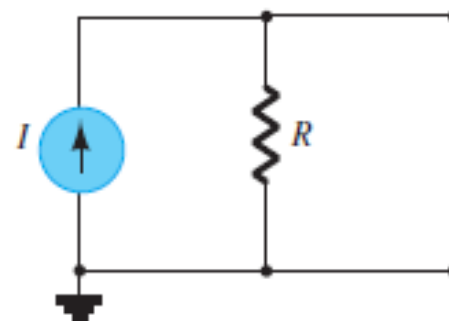
Stvarni naponski izvori imaju spojen otpor R u seriju dok idealni naponski izvori imaju otpor $R = 0$



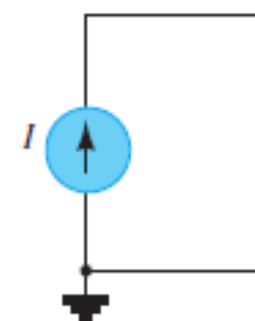
Practical
voltage source



Ideal
voltage source



Practical
current source



Ideal
current source

Stvarni strujni izvori imaju otpor R u paralelnom spoju dok je kod idealnih strujnih izvora ovaj otpor $R = \infty$. Idealni strujni izvori daju konstantu struju bez obzira kakav je teret spojen na izvor.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Bipolarni tranzistori mogu se koristiti kao strujni izvori na veliki broj načina. Jedan od načina je prikazan na slici.

Pod pretpostavkom da je otpor između baze i emitera velik, napon V_B se može naći kao:

$$(11) V_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{EE})$$

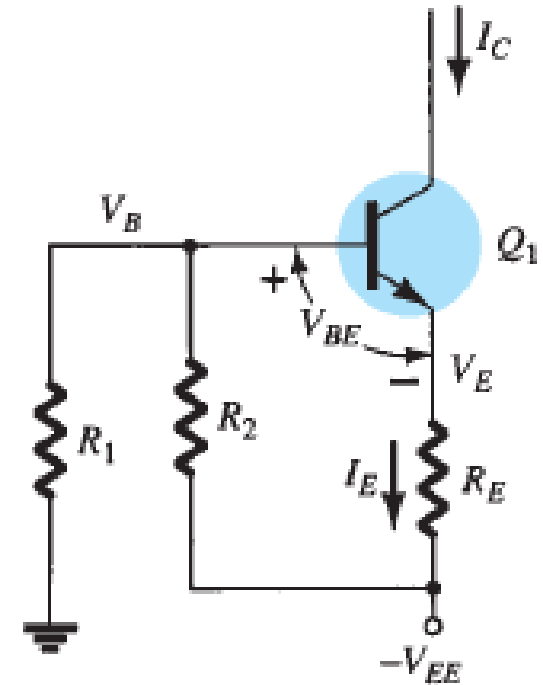
Ako je transistor u aktivnom području onda vrijedi:

$$(12) V_E = V_B - 0.7V$$

Sada možemo odrediti struju emitera I_E i I_C :

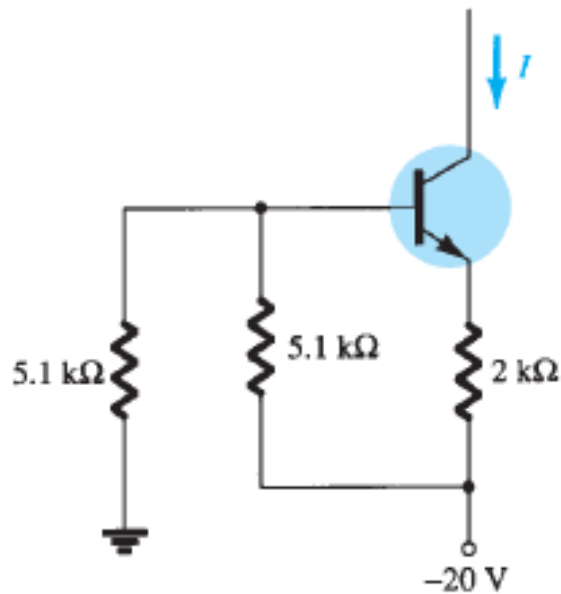
$$(13) I_E = \frac{V_E - (-V_{EE})}{R_E} \cong I_C$$

Gdje je I_C struja konstantnog strujnog izvora na slici.



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 2. Izračunati struju I konstantnog strujnog izvora na slici.



Rješenje: prvo treba naći napon V_B iz izraza (11)

$$V_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{EE}) = \frac{5.1k\Omega}{5.1k\Omega + 5.1k\Omega} (-20V) = -10V$$

Iz napona V_B možemo naći napon V_E :

$$V_E = V_B - 0.7V = -10V - 0.7V = -10.7V$$

Struja emitera I_E jest:

$$I_E = \frac{V_E - (-V_{EE})}{R_E} = \frac{-10.7V - (-20V)}{2k\Omega} = \frac{9.3V}{2k\Omega} = 4.65mA$$

Struja emitera je otprilike jednaka struji kolektora, tj. struji konstantnog strujnog izvora:

$$I = I_E \cong I_C = 4.65mA$$

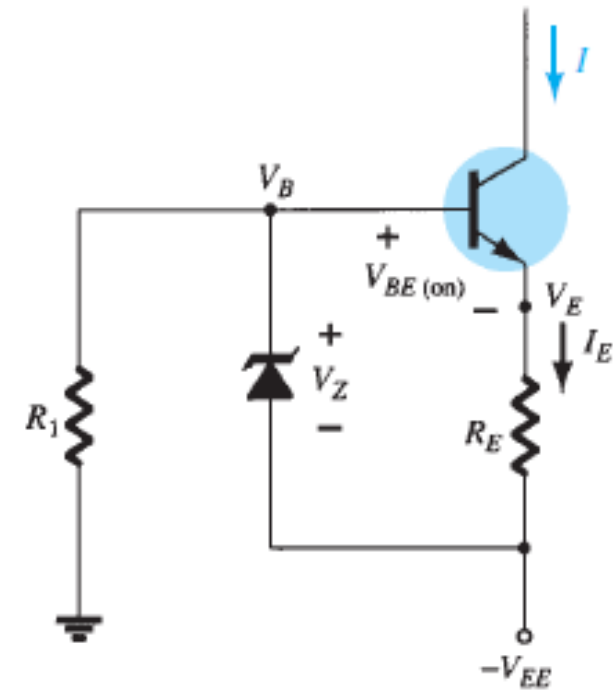
Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako se otpornik R_1 zamijeni sa Zenner diodom dobije se poboljšani strujni izvor.

Struja konstantnog strujnog izvora daje se izračunati iz drugog Kirchhoffovog zakona:

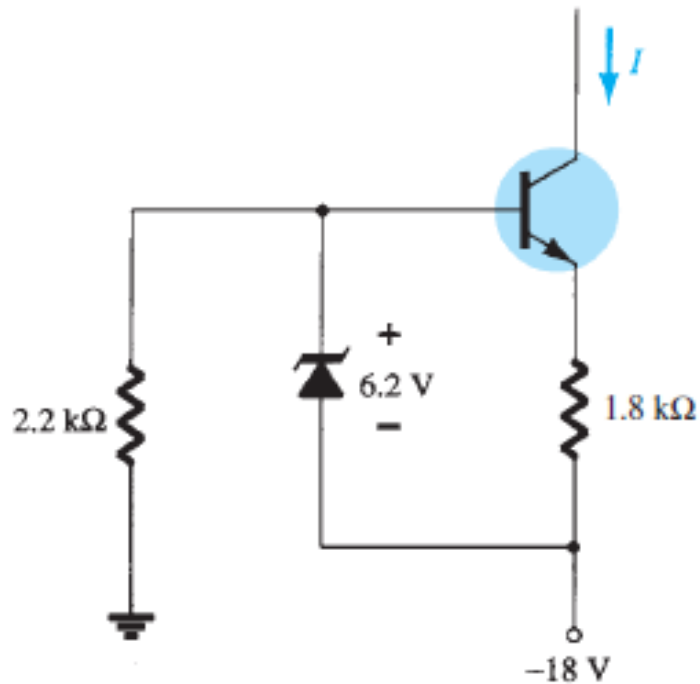
$$(14) I \approx I_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E}$$

U ovom sklopu struja konstantnog strujnog izvora I ne ovisi o naponu V_{EE} nego o naponu na Zenner diodi V_Z .



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 3. Za sklop na slici treba izračunati struju konstantnog strujnog izvora I .



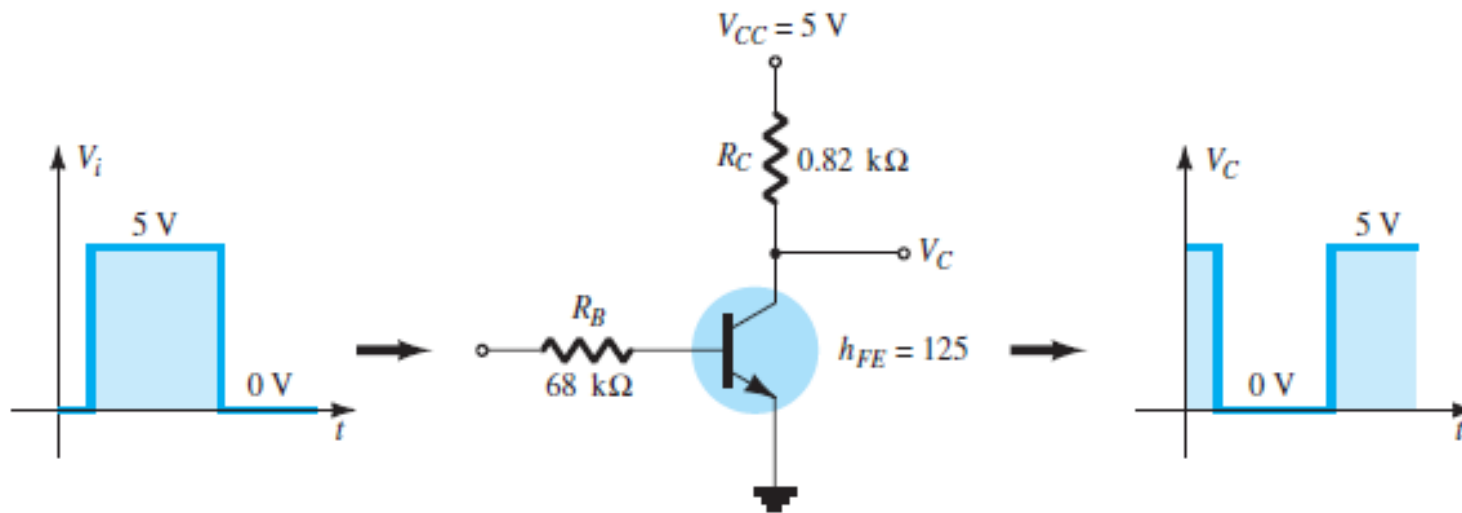
Rješenje: koristeći jednadžbu (14) dobije se struja konstantnog strujnog izvora:

$$I = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E} = \frac{6.2 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.8 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

BJT tranzistori se ne koriste samo u svrhu pojačanja signala. Sklopovi s tranzistorima mogu se dizajnirati tako da se mogu koristiti kao prekidači (za upravljačke aplikacije).

Primjerice, sklop na slici se može koristiti kao NOT vrata (negacijski sklop) koji *invertira* signal na ulazu.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Kod tranzistorske sklopke treba voditi računa da je tranzistor u saturaciji kad vodi te da je tranzistor u cutoff području kada ne vodi.

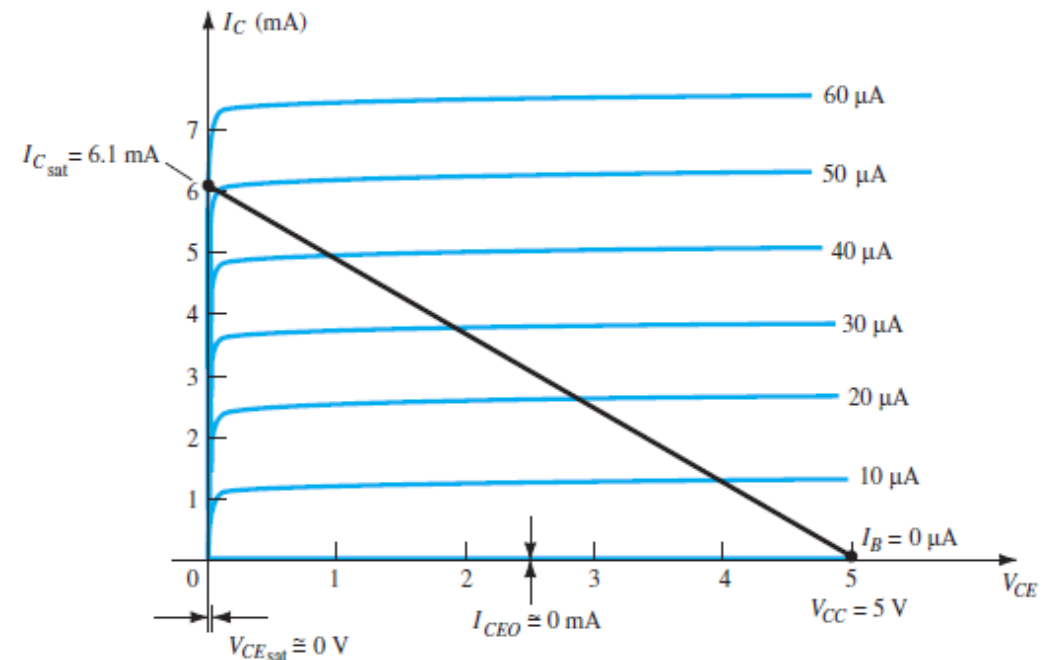
Kada je sklopka uključena, tranzistor mora biti u području saturacije. Kada je tranzistor u području saturacije možemo uzeti da je napon:

$$(15) V_{CE} = V_{CE_{sat}} \cong 0$$

Za transistor na prethodnoj slici, kada je u području saturacije, sa karakteristike vidimo da je struja $I_B > 50 \mu A$

Struja saturacije kolektora se odredi pomoću:

$$(16) I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz relacije $I_C = \beta I_B$ možemo postaviti jednadžbu struju saturacije baze:

$$(17) I_B = \frac{I_{C_{sat}}}{\beta}$$

Dakle da bi tranzistor bio u saturaciji struja baze I_B mora zadovoljiti uvjet:

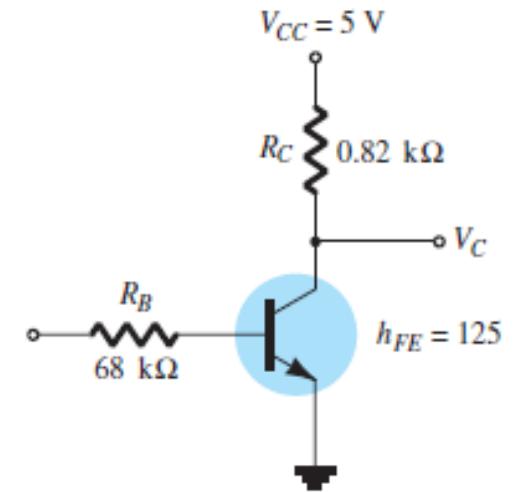
$$(18) I_B > \frac{I_{C_{sat}}}{\beta}$$

Za mrežu na slici, kada je ulazni napon $V_i = 5 V$ rezultirajuća struja baze je:

$$I_B = \frac{V_i - 0.7 V}{R_B} = \frac{5V - 0.7V}{68 k\Omega} = 63 \mu A$$

Te je struja saturacije:

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{5V}{0.82 k\Omega} = 6.1 mA$$



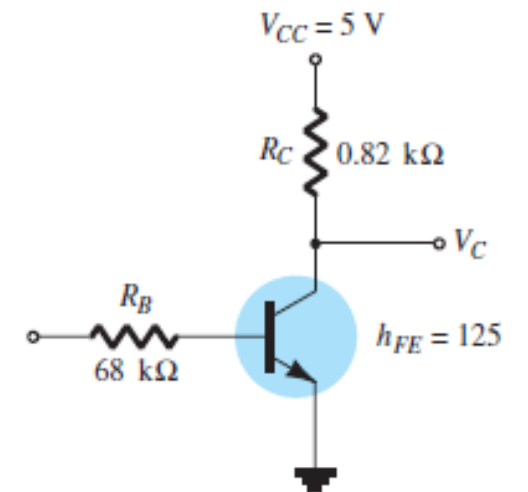
Elektronički Elementi i Sklopovi

Sada možemo provjeriti da li je uvjet (18) $I_B > \frac{I_{C_{sat}}}{\beta}$ zadovoljen.

$$I_B = 63 \mu A > \frac{I_{C_{sat}}}{\beta} = \frac{6.1 mA}{125} = 48.8 \mu A$$

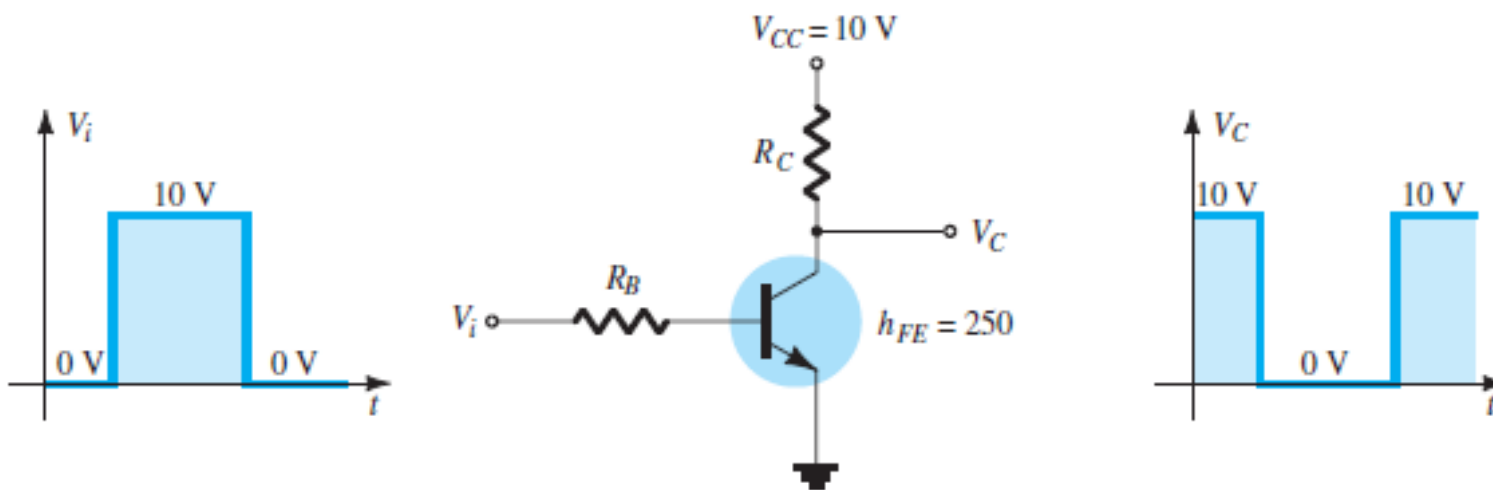
Kada je ulazni napon $V_i = 0 V$, sklopka mora biti u cutoff području. Ako je tranzistor u cutoff području tada $I_C = I_{CEO} \cong 0 mA$. Ako je $I_C = 0$ onda je pad napona na otporu R_C jednak nuli. Zbog toga je izlazni napon $V_C = 0$. Izlazni otpor R_{iz} je jednak:

$$(19) R_{iz} = \frac{V_{CE}}{I_C}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 4. Za tranzistorsku sklopku na slici treba odrediti otpore R_B i R_C ako je kolektorska struja u saturaciji $I_{C_{sat}} = 10 \text{ mA}$.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje: prvo iz zadane struje saturacije možemo odrediti otpor R_C . Iz jednadžbe (16) imamo da je:

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

Zbog toga vrijedi i izraz:

$$R_C = \frac{V_{CC}}{I_{C_{sat}}} = \frac{10V}{10 mA} = 1 k\Omega$$

Sada možemo izračunati i nužnu struju I_B u saturaciji iz $I_C = \beta I_B$:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10 mA}{250} = 40 \mu A$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Da bi tranzistor garantirano bio u saturaciji moramo odabrati struju I_B da bude nešto veća od struje I_B iz prethodnog izraza. Dakle biramo struju I_B da bude:

$$I_B \approx 60 \mu A$$

Sada pomoću izraza $I_B = \frac{V_i - 0.7 V}{R_B}$ možemo naći otpor R_B kao:

$$R_B = \frac{V_i - 0.7 V}{I_B} = \frac{10V - 0.7V}{60 \mu A} = 155 k\Omega$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

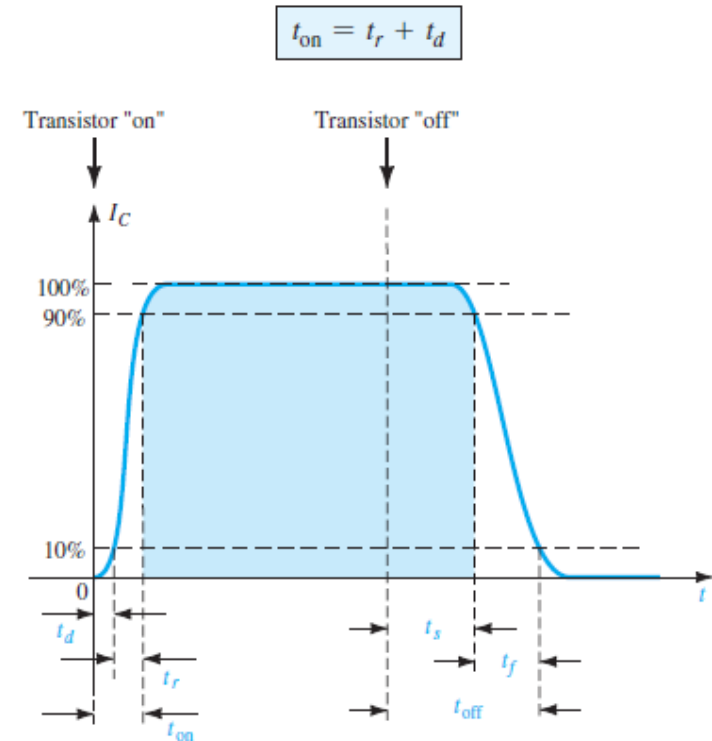
Postoji i cijela klasa tranzistora koje koristimo kao prekidače, to su tzv. *switching tranzistori*. Naziv dolazi iz činjenice da su ovi tranzistori brzi u odnosu na primjerice signalne tranzistore.

Na karakteristici na slici vremena t_d , t_r , t_s i t_f su zadana u odnosu na kolektorsku struju I_C . Ukupno vrijeme potrebno da tranzistor pređe iz isključenog stanja u uključeno je dano jednadžbom:

$$(20) t_{on} = t_d + t_r$$

Vrijeme t_d je vrijeme potrebno da transistor reagira na promjenu sa "off" na "on" stanje. Ukupno vrijeme potrebno da transistor iz uključenog stanja prijeđe u isključeno jest:

$$(21) t_{off} = t_s + t_f$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Stabilnost električne mreže je mjera koja kaže koliko je električna mreža osjetljiva s obzirom na varijacije u električnim parametrima.

Kod svih tranzistorskih pojačala, struja kolektora ovisi o slijedećim parametrima:

β : se povećava sa temperaturom

$|V_{BE}|$: opada za oko 2.5 mV po stupnju Celzija ($^{\circ}\text{C}$) povećanja temperature

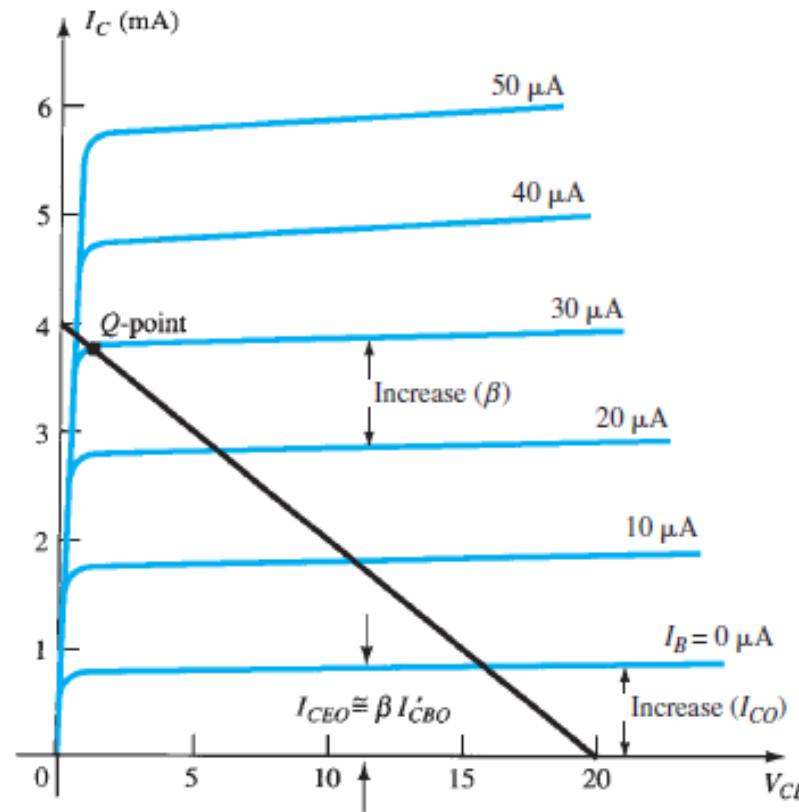
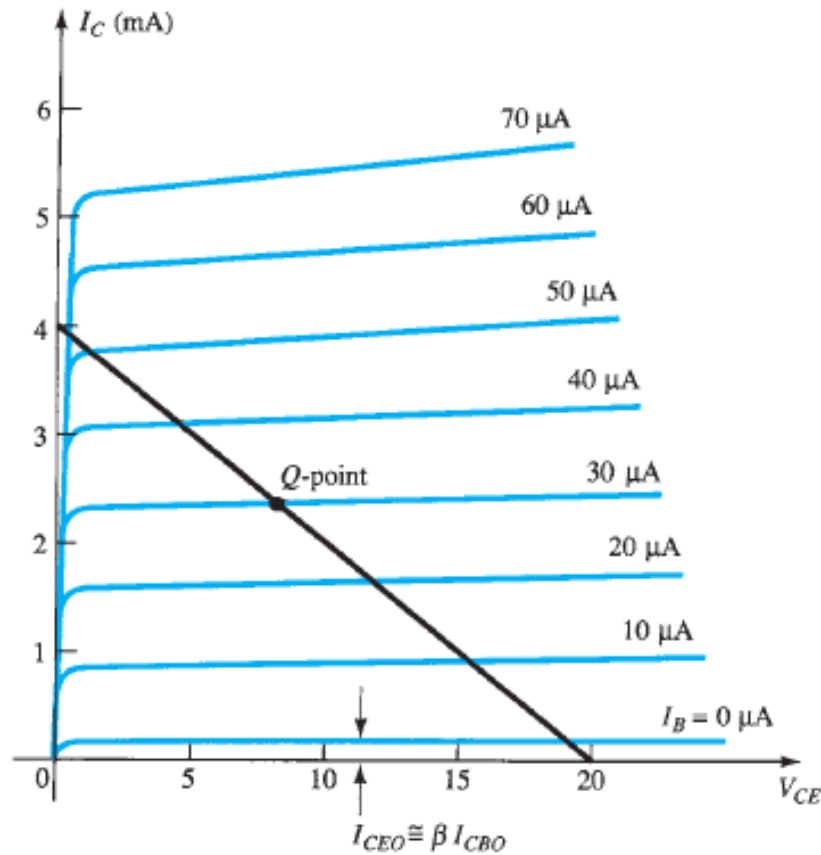
I_{CO} (reverzna struja zasićenja): se udvostruči za svakih 10°C porasta temperature

Svaki od ovih faktora može izazvati neželjeno pomicanje radne točke.

$T (^{\circ}\text{C})$	I_{CO} (nA)	β	V_{BE} (V)
-65	0.2×10^{-3}	20	0.85
25	0.1	50	0.65
100	20	80	0.48
175	3.3×10^3	120	0.3

Promjena parametara tranzistora u ovisnosti o temperaturi.

Elektronički Elementi i Sklopovi



Pomak Q točke za porast temperature sa 25°C na 100°C za spoj zajedničkog emitera sa uzemljenom emitterskom elektrodom.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Faktore stabilnosti možemo definirati kao omjer promjene struje kolektora u odnosu na neku od veličina koje utječu na stabilnost: I_{CO} , β , V_{BE}

$$(22) S(I_{CO}) = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CO}}$$

$$(23) S(V_{BE}) = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$$

$$(24) S(\beta) = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta}$$

Simbol Δ označuje promjenu u datoj veličini. Što je manji faktor stabilnosti $S(I_{CO})$, $S(V_{BE})$, $S(\beta)$ to znači da mjerena veličina manje utječe na promjenu struje kolektora I_C .

Elektronički Elementi i Sklopovi

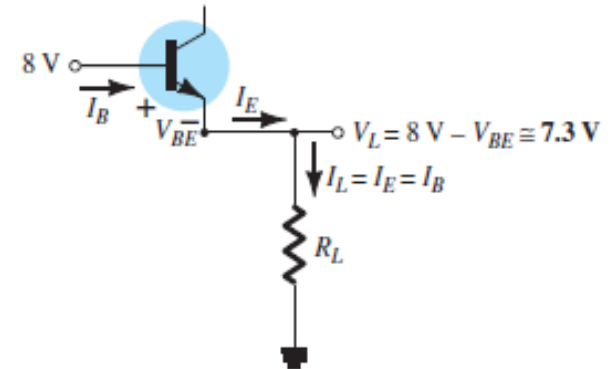
Prelazna pojava na induktivitetu se može minimizirati korištenjem tranzistora i diode te takve sklopove koristimo kod releja.

Ako je na ulazu $0V$ tada je struja kroz zavojnicu jednaka 0 te relej nije energiziran. Kada na ulaz dovedemo pozitivni impuls, tranzistor se uključi te elektromagnet "uključi" relej.

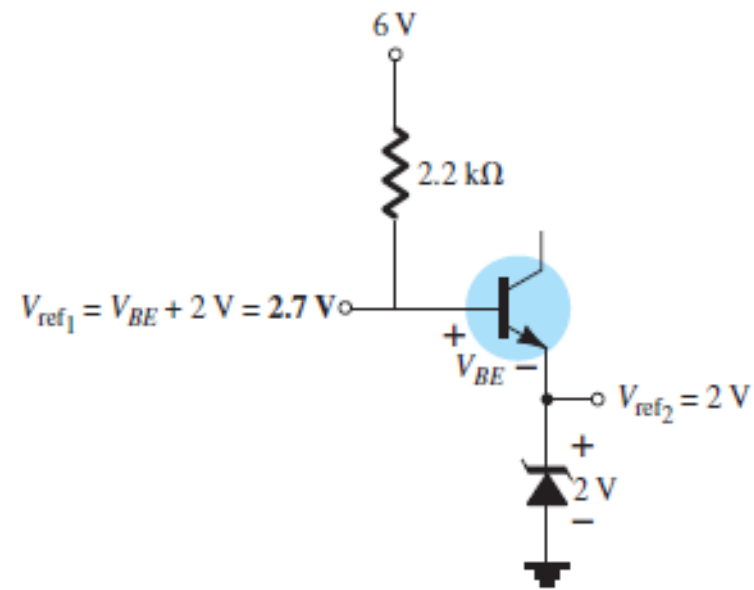
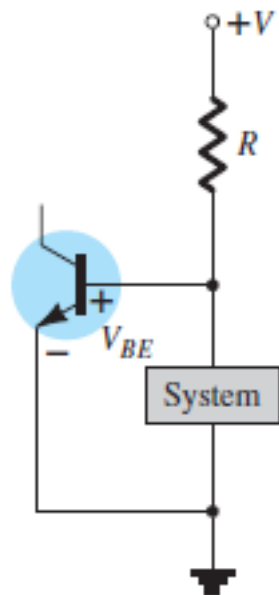
Problemi se mogu javiti kada ponovo isključimo tranzistor. Idealno, struja kroz zavojnicu (relej) bi trebala trenutno pasti na nulu.

Poznato je se struja kroz zavojnicu ne može trenutno promijeniti te da što se brže mijenja to se veći napon inducira na zavojnici:

$$(25) v_L = L \frac{dI}{dt} \quad \rightarrow \text{ovaj inducirani napon može oštetiti tranzistor!}$$

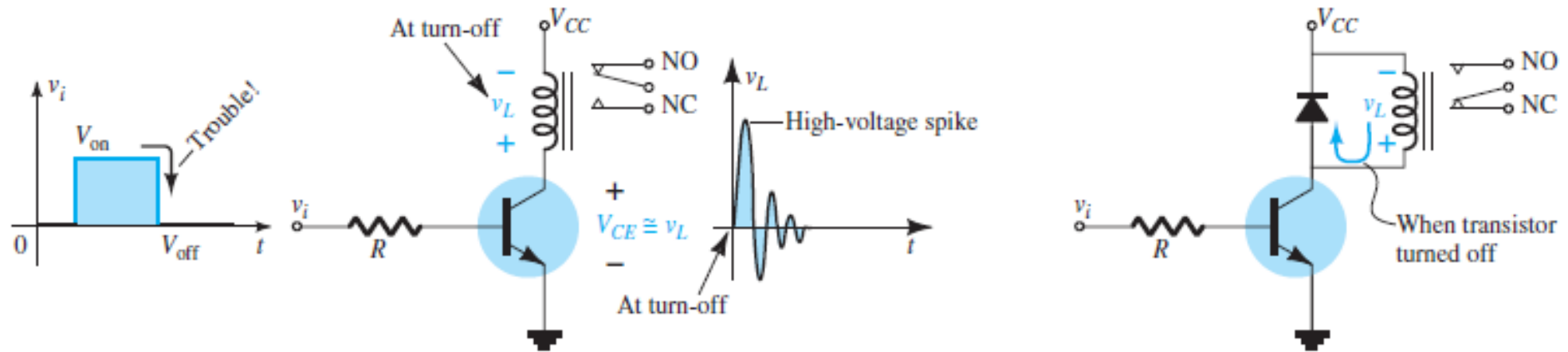


Elektronički Elementi i Sklopovi



Zaštita sklopa za
upravljanje relejem
pomoću 2V zenner diode.

Elektronički Elementi i Sklopovi



Zaštita sklopa za upravljanje relejem pomoću diode u krugu kolektora.