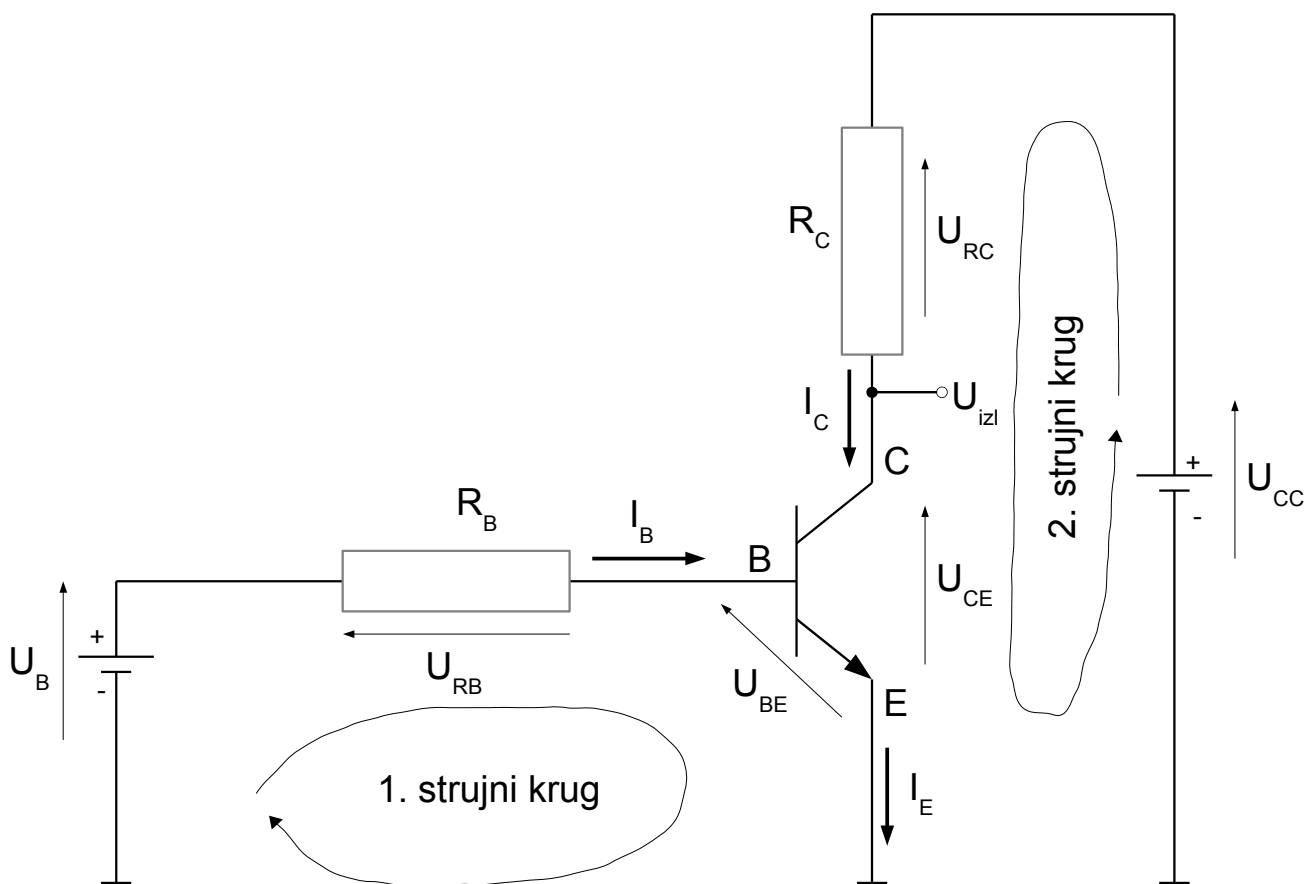


Tranzistori u digitalnoj logici

Za studente koji žele znati malo detaljnije koja je funkcija tranzistora u digitalnim sklopovima, u nastavku je opisan pojednostavljen način rada tranzistora. Pri tome je puno pojava pri radu s tranzistorima zanemareno – detaljniji tretman tranzistora (proizvodnja, vrste, fizikalni principi i način rada te uporaba) tema je drugih kolegija FER-a.

Bipolarni NPN tranzistor

Jednostavan sklop koji se sastoji od jednog bipolarnog tranzistora tipa NPN prikazan je u nastavku.



Bipolarni tranzistor ima tri kontakta: bazu (na slici označena s B), kolektor (na slici označen s C) te emiter (na slici označen s E). Naponi U_{BE} i U_{CE} su pri tome nenegativni. Struja označena s I_C ulazi u kolektor, prolazi kroz tranzistor i izlazi van kroz emiter. Struja označena s I_B ulazi u bazu, prolazi kroz tranzistor i također izlazi kroz emiter. Sve ostale situacije u ovom pojednostavljenom modelu možemo zanemariti, pa ćemo pisati da vrijedi:

$$I_E = I_C + I_B \quad (1)$$

Za razliku od otpornika za koje kažemo da su linearni elementi jer mali inkrement napona dovodi uvijek do proporcionalnog inkrementa struje, tranzistor je nelinearni element. Što to točno znači u razmatranom slučaju bipolarnog NPN tranzistora sa slike? Opis koji slijedi pojednostavljenje je stvarnog ponašanja ali može poslužiti kako bismo ugrubo stekli predodžbu o radu bipolarnog NPN tranzistora.

Za rad tranzistora važno je razmotriti napon U_{BE} (na slici prikazan kao dio 1. strujnog kruga). U skladu s Kirchhoffovim zakonima, možemo pisati:

$$U_B = U_{RB} + U_{BE} \quad (2)$$

pri čemu će napon U_{RB} postojati ako teče struja I_B kako je prikazano na slici i u tom slučaju će biti pozitivan. Pri tome struja I_B ili ulazi u bazu tranzistora ili je jednaka nuli. Međutim, ovdje do izražaja dolazi nelinearnost tranzistora: kroz bazu tranzistora struja neće poteći sve dok napon U_{BE} ne dosegne takozvani napon praga, nakon čega će napon U_{BE} dalje ostati praktički konstantan i neće više rasti. Za silicijske tranzistore možemo uzeti da je taj napon jednak 0.7V.

Što to znači za naš 1. strujni krug? S obzirom da vrijedi izraz (2), to znači da će se podizanjem napona U_B s vrijednosti 0V prema pozitivnim vrijednostima na početku sav napon U_B prenositi na napon U_{BE} . Naime, tako dugo dok se na U_{BE} ne dosegne 0.7V, struja koja teče prema bazi tranzistora jednaka je 0A pa je time i pad napona na otporniku R_B jednak 0V. Posljedica je da u tom području približno vrijedi:

$$U_{BE} = U_B \quad \text{za} \quad U_B \in [0V, 0.7V] \quad (3)$$

Jednom kada U_{BE} dosegne 0.7V, daljnji porast više neće biti moguć, pa će se sav preostali napon trošiti upravo na otporniku R_B . U tom će području vrijediti:

$$U_{RB} = U_B - U_{BE} = U_B - 0.7V \quad \text{za} \quad U_B > 0.7V \quad (4)$$

Struja koja će tada teći u bazu tranzistora određena je Ohmovim zakonom:

$$I_B = \frac{U_{RB}}{R_B} = \frac{U_B - 0.7V}{R_B} \quad (5)$$

Struja I_B direktno određuje događanja u 2. strujnom krugu. Naime, bipolarni NPN tranzistor ponaša se kao sklop koji radi pojačanje struje; ako je struja kroz bazu jednaka I_B , kod ovog će tranzistora kroz kolektor poteći h_{FE} puta veća struja (ako je to moguće). Faktor h_{FE} stoga se naziva faktor strujnog pojačanja. Primjerice, za bipolarni NPN tranzistor oznake BC107 taj se faktor kreće u granicama između 110 i 220 (prema podacima iz kataloga proizvođača). Stoga možemo pisati da je maksimalna struja koja uz zadanu struju I_B može teći kroz kolektor jednaka:

$$I_{C,max} = I_B \cdot h_{FE} \quad (6)$$

Čime je određena stvarna struja koja teče kroz kolektor? Pogledajmo 2. strujni krug. U tom strujnom krugu vrijedi sljedeća naponska jednadžba:

$$U_{CC} = U_{RC} + U_{CE} \quad (7)$$

Kako je U_{CC} fiksna (to je napon izvora), te kako struja može samo teći od kolektora prema emiteru (pa je time U_{RC} uvijek veći ili jednak 0V te je U_{CE} također uvijek veći ili jednak 0V), slijedi da postoje dva slučaja:

1. struja kroz kolektor je jednaka izračunatoj maksimalnoj struji prema izrazu (6) ili
2. struja kroz kolektor je manja od izračunate maksimalne struje prema izrazu (6).

Da bismo ovo vidjeli, raspišimo izraz (6) preko struje kolektora:

$$U_{CC} = I_C \cdot R_C + U_{CE} \quad (7)$$

Uočimo, s porastom struje I_C raste pad napona na otporniku R_C ; međutim, u sumi pad napona na otporniku R_C i napon U_{CE} daju upravo napon napajanja U_{CC} . To znači da kako napon na otporniku R_C raste, napon U_{CE} se mora smanjivati za isti iznos kako bi suma ostala jednaka naponu U_{CC} . Međutim, tranzistor neće dopustiti da napon U_{CE} padne na manje od napona zasićenja (koji je, za tranzistor

BC107 jednak 0.25V; taj napon još označavamo s U_{CES}). To pak znači da će maksimalni napon koji se može pojaviti na otporniku R_C biti jednak upravo:

$$U_{RC,max} = U_{CC} - 0.25V \quad (8)$$

i tada će kroz taj otpornik teći struja:

$$I'_C = \frac{U_{RC,max}}{R_C} = \frac{U_{CC} - 0.25V}{R_C} \quad (9)$$

Neovisno o struji baze i faktoru strujnog pojačanja, kolektorska struja neće moći biti veća od struje izračunate prema izrazu (9). Time smo dobili prethodna dva slučaja koja ćemo sada raspisati malo detaljnije.

1. Za struje baze I_B koje su manje od $\frac{I'_C}{h_{FE}}$ vrijedit će $I_C = I_B \cdot h_{FE}$. U tom slučaju pad napona na otporniku R_C bit će jednak upravo $U_{RC} = I_C \cdot R_C = (I_B \cdot h_{FE}) \cdot R_C$ što će biti manje od napona napajanja; razlika do napona napajanja trošit će se na napon U_{CE} koji će i dalje biti veći od napona U_{CES} . Ovo područje rada tranzistora poznato je kao *normalno aktivno područje* (NAP); u tom području postoji linearna ovisnost struje kolektora o struji baze.

2. Za struje baze I_B koje su veće ili jednake od $\frac{I'_C}{h_{FE}}$ vrijedit će

$$I_C = I'_C = \frac{U_{RC,max}}{R_C} = \frac{U_{CC} - 0.25V}{R_C} \quad (\text{drugim riječima, struja } I_C \text{ više neće ovisiti o struji } I_B - \text{ovo}$$

područje rada tranzistora poznato je kao područje *zasićenja*; u tom području nema više ovisnosti struje kolektora o struji baze – struja kolektora je maksimalna moguća a napon U_{CE} minimalni mogući i jednak je U_{CES}).

Bipolarni NPN tranzistor kao sklopka

U digitalnoj elektronici bipolarne NPN tranzistore moguće je koristiti za ostvarivanje sklopke odnosno sklopa koji zovemo *inverter*. Pogledajte ponovno prethodnu sliku i uočite na slici gdje smo označili izlazni napon U_{izl} . Taj napon direktno je jednak naponu U_{CE} .

Pogledajmo sada dva slučaja.

1. Napon U_B je vrlo mali napon (manji od 0.7V). U tom slučaju nema struje baze I_B i tranzistor je zatvoren. Kako ne teče struja baze, struja kolektora I_C je također jednaka 0A. Stoga je pad napona na otporniku R_C jednak 0V, pa vrijedi:

$$U_{CC} = U_{RC} + U_{CE} = 0V + U_{CE} \Rightarrow U_{CE} = U_{CC} \Rightarrow U_{izl} = U_{CE} = U_{CC}$$

Znači, uz mali ulazni napon, izlazni napon je veliki.

2. Kada je napon $U_B > 0.7V$ dovoljno velik da razlika $U_B - 0.7V$ generira dovoljno veliku struju baze uz koju će kroz kolektor poteći maksimalna moguća kolektorska struja (drugim riječima, kada je U_B dovoljno velik da generira struju baze koja će tranzistor gurnuti u zasićenje), napon U_{CE} će pasti na minimalni mogući – postat će jednak U_{CES} (cca 0.25V) pa će vrijediti:

$$U_{izl} = U_{CE} = U_{CES} = 0.25V \quad ;$$

u tom slučaju imamo dakle uz veliki ulazni napon upravo mali izlazni napon (iznosa cca 0.25V).

Sklop koji smo dakle dobili ponaša se kao inverter. Označimo li napon U_B kao ulazni napon U_{ul} , te označimo li nizak ulazni (i izlazni napon) s N, a visok ulazni (i izlazni napon) napon s V, ponašanje sklopa opisano je sljedećom tablicom naponskih kombinacija:

U_{ul}	U_{iz}
N	V
V	N

Ako sada ulaznom naponu pridijelimo značenje ulazne varijable A , a izlaznom naponu funkciju $f(A)$ te ako tablicu naponskih kombinacija tumačimo u skladu s pozitivnom logikom, dobit ćemo tablicu istinitosti:

A	$f(A)$
0	1
1	0

pa zaključujemo:

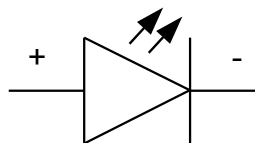
$$f(A) = \bar{A} \quad .$$

Svjetleća dioda

Svjetleće diode (engleski termin je *Light Emitting Diode*, kraće LED) su elektronički elementi koje susrećemo svakodnevno – svaki puta kada na nekom elektroničkom elementu vidimo malu crvenu (ili zelenu) "lampicu" koja indicira da je uređaj upaljen ili da smo aktivirali neku funkciju, najčešće gledamo upravo u LED. Najčešće izvedbe u tri različite boje prikazane su u nastavku.



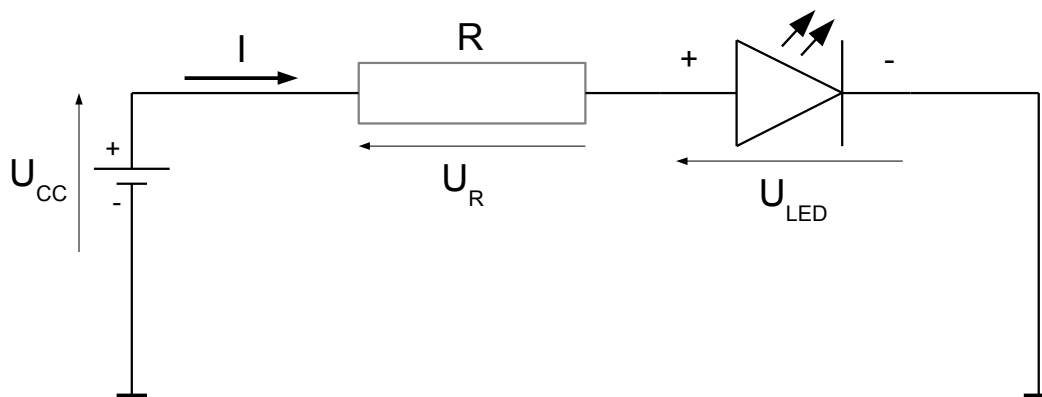
Simbol svjetleće diode sličan je simbolu obične diode, uz dodatak dviju strelica koje označavaju emisiju svjetlosti. Simbol je prikazan je u nastavku.



Klasična dioda, baš kao i tranzistor, nelinearan je element. Ako se spoji na napon napajanja tako da se plus stezaljka izvora spoji na stranu koja je na prethodnoj slici označena s '+' a minus stezaljka na stranu koja je označena s '-', dioda će se (pojednostavljeno gledajući) ponašati kao beskonačan otpor (struja neće teći) sve dok napon izvora ne dosegne napon praga nakon kojeg će dioda provesti i na sebi će održavati poprilično fiksni napon. Za klasične silicijske diode to je poprilično 0.7V. Stoga se klasična dioda nikada ne smije direktno spojiti na izvor napajanja već joj u seriju treba staviti neki drugi element koji će na sebe preuzeti razliku između napona napajanja izvora i pada napona na diodi. Ako na diodu spojimo napon napajanja obrnuto, dioda će se ponašati kao beskonačan otpor i struja kroz nju neće teći (dakako, ako ne pretjeramo s iznosom napona što ćemo ovdje zanemariti).

Svjetleća dioda ponaša se baš kao i klasična dioda, uz dvije razlike: da bi provela, svjetleća dioda zahtjeva na sebi barem cca 2V (za svaku diodu ovaj se napon može pogledati u karakteristikama koje daje proizvođač), te jednom kada provede, dioda ujedno i emitira svjetlost.

Uzevši u obzir sve prethodno opisano, najjednostavniji način spajanja svjetleće diode u strujni krug prikazan je u nastavku.



Ako je napon napajanja U_{CC} , taj je napon jednak sumi padova napona na otporu R i svjetlećoj diodi, a kroz oba elementa teče ista struja I .

$$U_{CC} = U_R + U_{LED} \quad (10)$$

Pretpostavimo sada da smo za korištenu svjetleću diodu u katalogu pronašli da je pad napona na diodi U_{LED} kada dioda vodi struju jednak 2V. Imamo dva slučaja.

1. Ako je $U_{CC} < 2V$ (tj. od U_{LED}), struja neće teći jer, iako će se sav napon izvora prenijeti na diodu, taj napon i dalje nije dovoljan da dioda provede; stoga će njezin otpor biti "beskonačan", struja kroz nju nula, i dioda neće svijetliti.
2. Ako je $U_{CC} \geq 2V$ (tj. od U_{LED}), svjetleća dioda će provesti struju. Pri tome će dioda na sebi održavati točno napon od 2V, pa će se u skladu s izrazom (10) sav preostali napon izvora trošiti

na otporniku R, odnosno možemo pisati $U_R = U_{CC} - U_{LED}$. Kako je prema Ohmovom zakonu struja kroz otpor R određena omjerom pada napona na tom otporu i samog otpora, slijedi da možemo pisati:

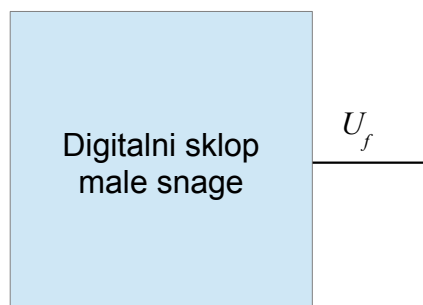
$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{CC} - U_{LED}}{R} \quad (11).$$

Odabirom otpora R možemo dakle podešavati koliku struju želimo propustiti kroz svjetleću diodu. Ovisno o iznosu struje, svjetleća dioda će generirati jaču ili slabiju svjetlost. Ovo je jedan od podataka koji možemo pronaći u katalogu proizvođača; tipični iznosi struja kreću se od 2 mA za relativno slabo svjetljenje do 20 mA za jako svjetljenje. Slijedi da ćemo prilikom projektiranja sklopova sa svjetlećim diodama temeljem odabranog željenog iznosa struje i napona uz koji dioda vodi (koje čitamo iz kataloga proizvođača) te temeljem napona napajanja koji imamo na raspolaganju, uporabom izraza (11) računati iznos otpornika koji trebamo staviti u seriju sa svjetlećom diodom.

Pogledajmo to na primjeru. Neka koristimo napon napajanja od 5V. Iz kataloga proizvođača smo za željenu diodu pročitali da dioda pri vođenju na sebi troši 2V. Također, iz kataloga proizvođača smo pročitali da dioda generira zadovoljavajuću jakost osvjetljenja uz struju od 20 mA. U tom slučaju, računamo na sljedeći način. Pad napona na otporniku koji ćemo spojiti u seriju bit će jednak: $U_R = U_{CC} - U_{LED} = 5V - 2V = 3V$. Ako kroz taj otpornik treba teći struja od 20 mA, tada njegov iznos mora biti: $R = \frac{U_R}{I} = \frac{3V}{20 \text{ mA}} = 150 \Omega$. S obzirom da je otpornik spojen u seriju s diodom, na diodi će se potrošiti preostalih 2V i kroz diodu će teći ista struja iznosa 20 mA kao i kroz otpornik.

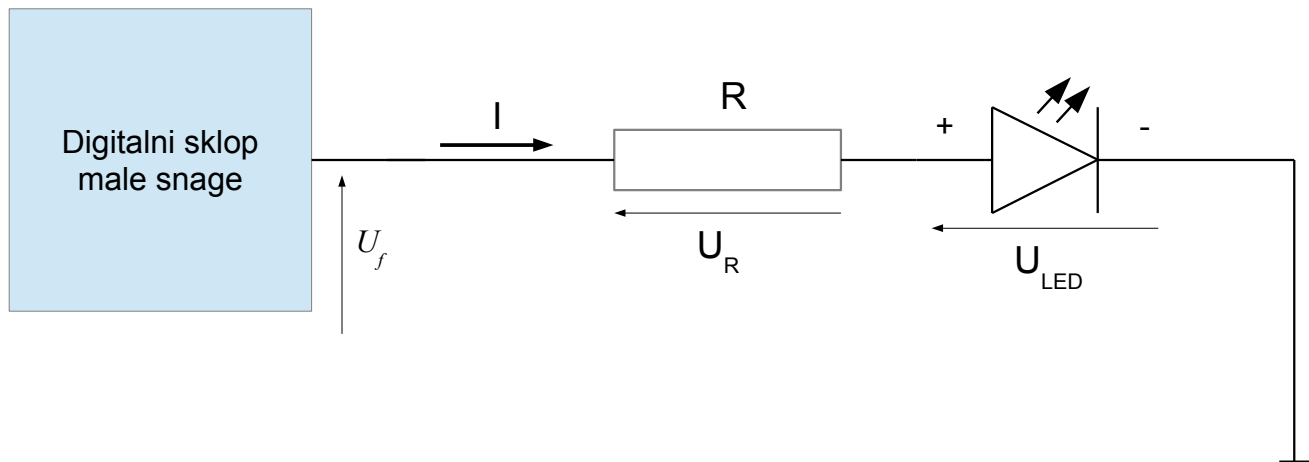
Bipolarni NPN tranzistor koji upravlja svjetlećom diodom

Bipolarni tranzistor može se koristiti za upravljanje radom svjetleće diode. Evo koju situaciju razmatramo.



Na raspolaganju nam je digitalni sklop prikazan na prethodnoj slici koji ima jedan izlaz (f) na kojem generira izlazni napon U_f . Želimo na izlaz tog sklopa spojiti indikatorski sklop koji se temelji na svjetlećoj diodi koja će svijetliti ako je na izlazu f logička jedinica a neće svijetliti ako je na izlazu f logička nula. Pretpostavimo također da smo pogledali za konkretnu tehnologiju kojom je digitalni sklop ostvaren što to točno znači za izlazne napone, te da smo utvrdili da visoka razina (odnosno logička jedinica) znači napon od poprilično 5V a niska razina (odnosno logička nula) napon od poprilično 0.4V.

Jedna mogućnost jest pokušati direktno na izlaz digitalnog sklopa spojiti otpornik i svjetleću diodu, kako je prikazano na sljedećoj slici.



Kad je f u logičkoj nuli, napon U_f neće biti dovoljan da svjetleća dioda provede (ako joj treba 2V a U_f je manji ili jednak 0.4V), i tada dioda neće svijetliti. Ako je pak f u logičkoj jedinici, napon U_f bit će dovoljan da dioda provede i počne svijetliti. U tom slučaju mogli bismo pretpostaviti se izlaz f ponaša kao idealan naponski izvor te da uz izabranu struju od 20 mA koju želimo da teče kroz svjetleću diodu otpor R možemo odrediti prema izrazu:

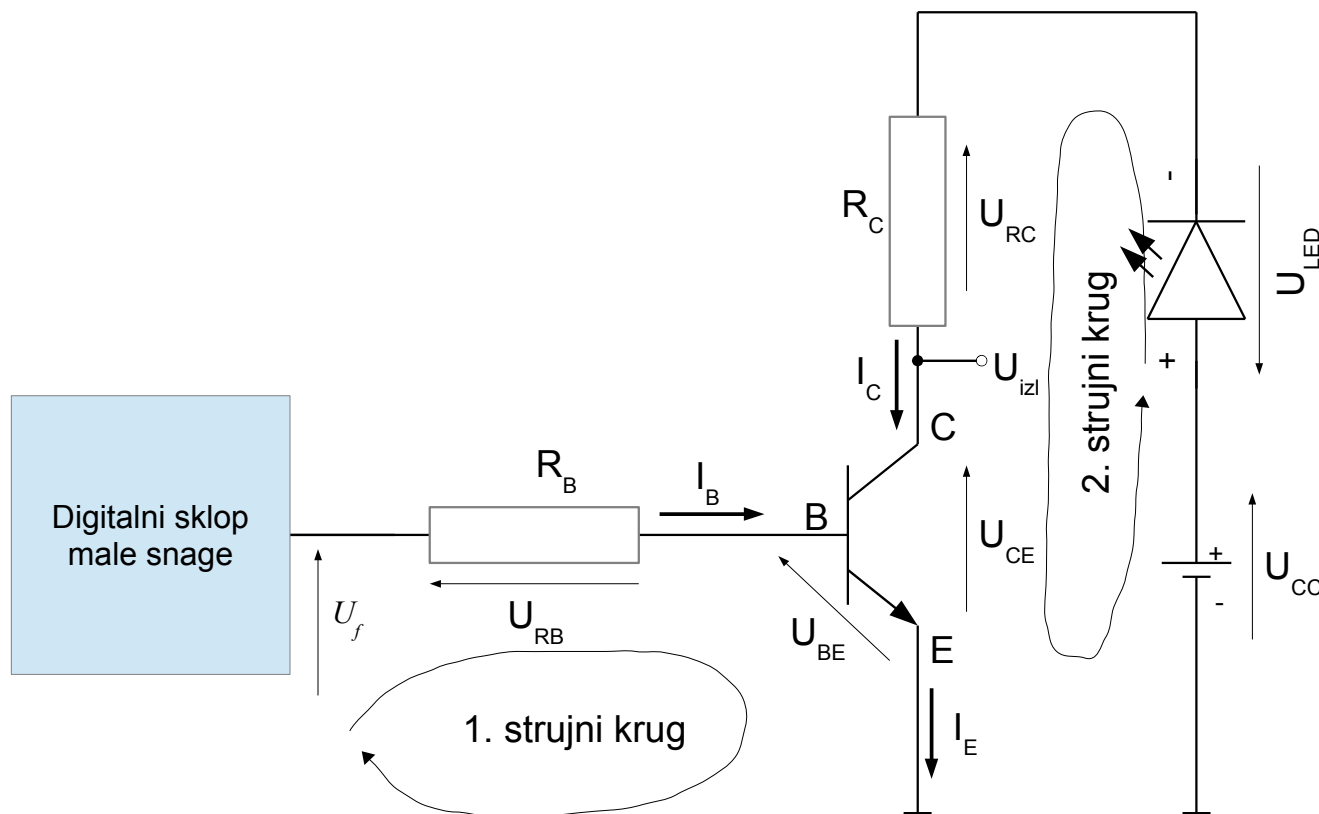
$$R = \frac{U_f - U_{LED}}{I} .$$

Nažalost, s ovom pretpostavkom postoji vrlo ozbiljan problem: izlaz digitalnog sklopa nije idealni naponski izvor. Za svaku konkretnu tehnologiju (sjetite se predavanja o integriranih digitalnim sklopovima) proizvođač za svako logičko stanje izlaza definira raspon napona koji se mogu pojaviti na izlazu digitalnog sklopa te daje ogradu na maksimalnu struju uz koju proizvođač garantira raspon napona na izlazu koji je dao u katalogu. Prvo pitanje je: zašto je to tako, a odgovor je relativno jednostavan: na svakom izlazu digitalnog sklopa nalazi se pridruženi otpor koji ne možemo izbjeći (bilo da se radi o fizički izvedenom otporniku, ili o otporu nekog nelinearnog elementa poput tranzistora). A čim imamo otpor kroz koji teče struja, na tom otporu nastaje i pad napona. U slučaju da je izlaz sklopa u visokoj razini, to znači da će se napon napajanja dijeliti između pada napona na tom izlaznom otporu i napona U_f koji se stvarno pojavljuje na izlazu sklopa. Porastom struje, rast će pad napona na izlaznom otporu i sve će manje preostati za koji će U_f stoga padati.

Stoga treba razmotriti dva slučaja. Ako je struja koju želimo protjerati kroz svjetleću diodu manja od struje koju proizvođač dozvoljava na izlazu sklopa kada je njegov izlaz u logičkoj jedinici, tada možemo primijeniti prethodni izračun (opet uz napomenu da će struja tada biti poprilično ona izračunata jer ne znamo egzaktni iznos napona U_f koji ćemo dobiti na izlazu).

Ako je željena struja veća od toga, svjetleću diodu moramo pogoniti preko tranzistorske sklopke: sjetite se, kod tranzistorske sklopke struja baze kojom ćemo opteretiti izlaz digitalnog sklopa je vrlo mala u odnosu na struju koju želimo protjerati kroz kolektor (za h_{FE} puta manja).

Sklop koji ćemo tada koristiti prikazan je na slici u nastavku.



Ako je na izlazu digitalnog sklopa f logička nula, napon U_f bit će manji od napona U_{BE} koji je potreban da tranzistor provede i tranzistor će biti zatvoren. Stoga u drugom strujnom krugu neće teći struja i dioda neće svijetliti.

Ako je pak na izlazu f logička jedinica, tranzistor će provesti, kroz svjetleću diodu će proteći struja i dioda će svijetliti. U tom slučaju, sve otpore na slici možemo izračunati na sljedeći način. Neka smo u karakteristikama koje je dao proizvođač za svjetleću diodu otkrili da je napon na diodi kada ona svijetli jednak $U_{LED} = 2V$, i neka smo odabrali željenu struju od 20 mA. Neka smo u karakteristikama koje je dao proizvođač za tranzistor otkrili da je napon U_{BE} uz koji tranzistor vodi jednak 0.7V, da je h_{FE} jednak 100 te da je U_{CES} (napon U_{CE} kada je tranzistor u zasićenju) jednak 0.25V. Konačno, neka radimo s naponom napajanja od $U_{CC} = 5V$, i neka smo u karakteristikama porodice integriranih sklopova koje smo koristili za izgradnju digitalnog sklopa ustanovili da nam se garantira da napon logičke jedinice na izlazu neće biti manji od $U_{OH,min} = 4.7V$ uz dozvoljenu struju od 2 mA.

U drugom strujnom krugu računamo:

$$U_{RC} = U_{CC} - U_{LED} - U_{CES} = 5V - 2V - 0.25V = 2.75V$$

Ako kroz taj strujni krug mora teći odabrana struja $I_C = 20mA$ (pa ona teče i kroz otpor R_C), slijedi da je iznos otpora R_C jednak:

$$R_C = \frac{U_{RC}}{I_C} = \frac{U_{CC} - U_{LED} - U_{CES}}{I_C} = \frac{2.75V}{20mA} = 137.5\Omega$$

Sada moramo podesiti struju baze tako da osigura da je tranzistor doista u zasićenju i da može protjerati 20mA kolektorske struje. Da bi to bio slučaj, struja baze mora biti barem jednaka:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{20\text{mA}}{100} = 0.2\text{mA} \quad .$$

Čitajući 1. strujni krug imamo:

$$U_{RB} = U_f - U_{BE} = U_{OH, \min} - U_{BE} = 4.7\text{V} - 0.7\text{V} = 4\text{V}$$

Slijedi da je bazni otpor na kojem je pad napona od 4V i kroz koji teče struja od 0.2mA jednak:

$$R_B = \frac{U_{RB}}{I_B} = \frac{4\text{V}}{0.2\text{mA}} = 20\text{ k}\Omega$$

Uočimo da je na ovaj način opterećenje izlaza digitalnog sklopa praktički vrlo malo (svega 0.2mA) što će u praksi značiti da će i izlazni napon biti bliži naponu napajanja nego naponu $U_{OH, \min}$. Međutim, ako izračun radimo s najgorim slučajem, imamo garanciju da će i u drugim slučajevima struja baze biti dovoljna za održavanje struje kolektora koju smo podesili.

Treba još istaknuti da u praksi nećemo koristiti otpore od, primjerice, 137.5Ω jer se takvi otpornici naprosto ne proizvode (barem ne jeftino). Danas se otpornici proizvode u odgovarajućim E-serijama; pogledati primjerice:

http://www.logwell.com/tech/components/resistor_values.html

Umjesto tog otpora izabrali bismo najbliži otpor iz E24 serije, a taj bi bio 130Ω ili pak nešto veći otpor od 150Ω uz koji bi struja kroz svjetleću diodu bila nešto manja.

Napomena:

U slučaju bilo kakvih pitanja (ili ako želite nešto od ovoga isprobati uživo), slobodno svratite do mene u D340.