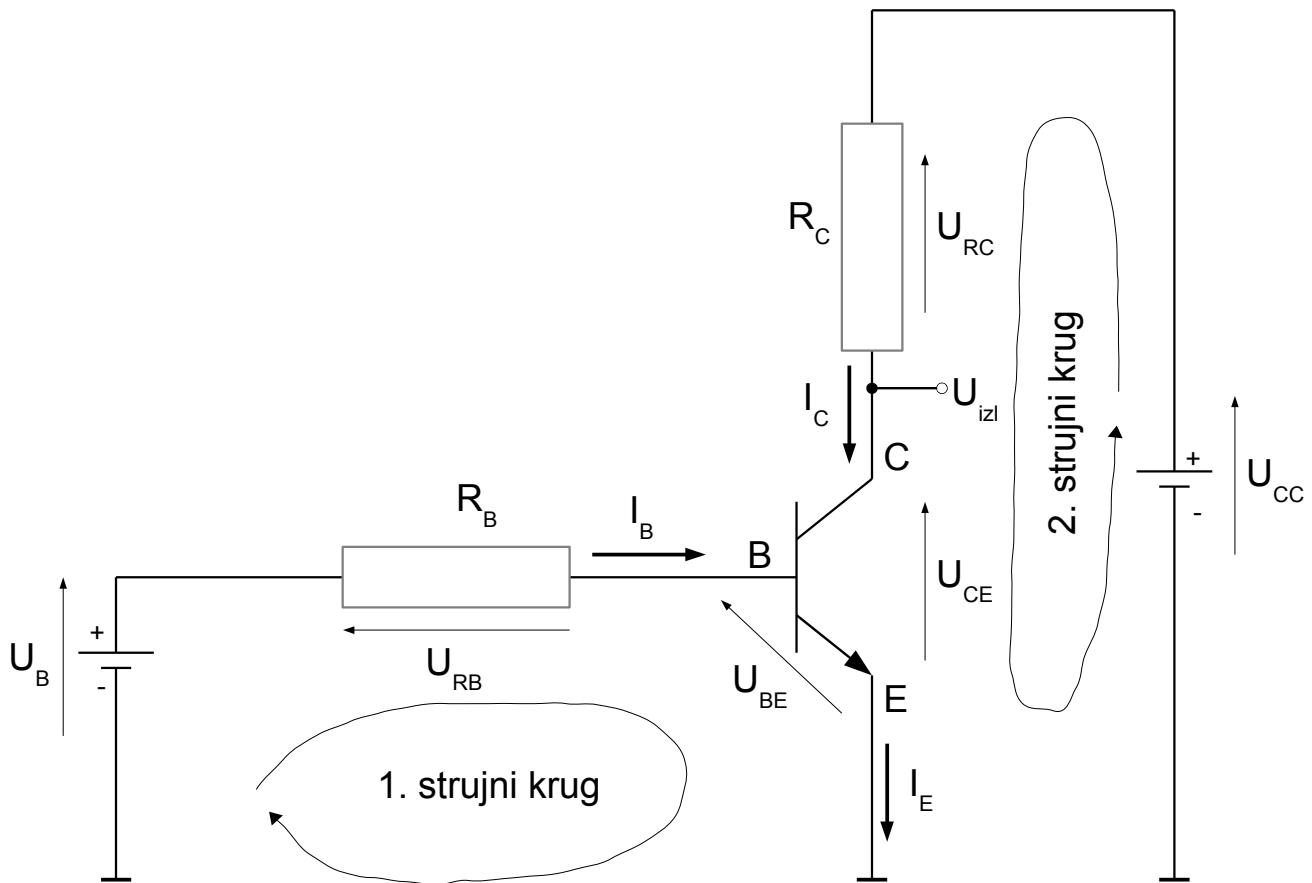


# Tranzistori u digitalnoj logici

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 uvek 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 Kirchoffovim 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 silicijске 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:

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

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

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

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

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

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 označke 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 zadalu 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  $U_{CC}$  fiksan (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 jednak izračunatoj maksimalnoj struci 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 RC biti jednak upravo:

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

i tada će kroz taj otpornik teći struja:

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

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  $I_C = I'_C = \frac{U_{RC,max}}{R_C} = \frac{U_{CC} - 0.25V}{R_C}$  (drugim riječima, struja  $I_C$  više neće ovisiti o struji  $I_B$  – 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 *invertor*. 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:

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

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 invertor. 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:

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