

Osnovi analogne elektronike

prof. Dr Nenad Jovičić

nenad@etf.rs

Bipolarni tranzistori

- Tranzistor: tri elektrode, pojačavačka svojstva
- Jedna elektroda referentna (zajednička) za ulaz i izlaz
- Male promene signala između ulazne i ref elektrode dovode do velike promene signala između izlazne i referentne.
- trans(fer res)istor – prenosni otpornik

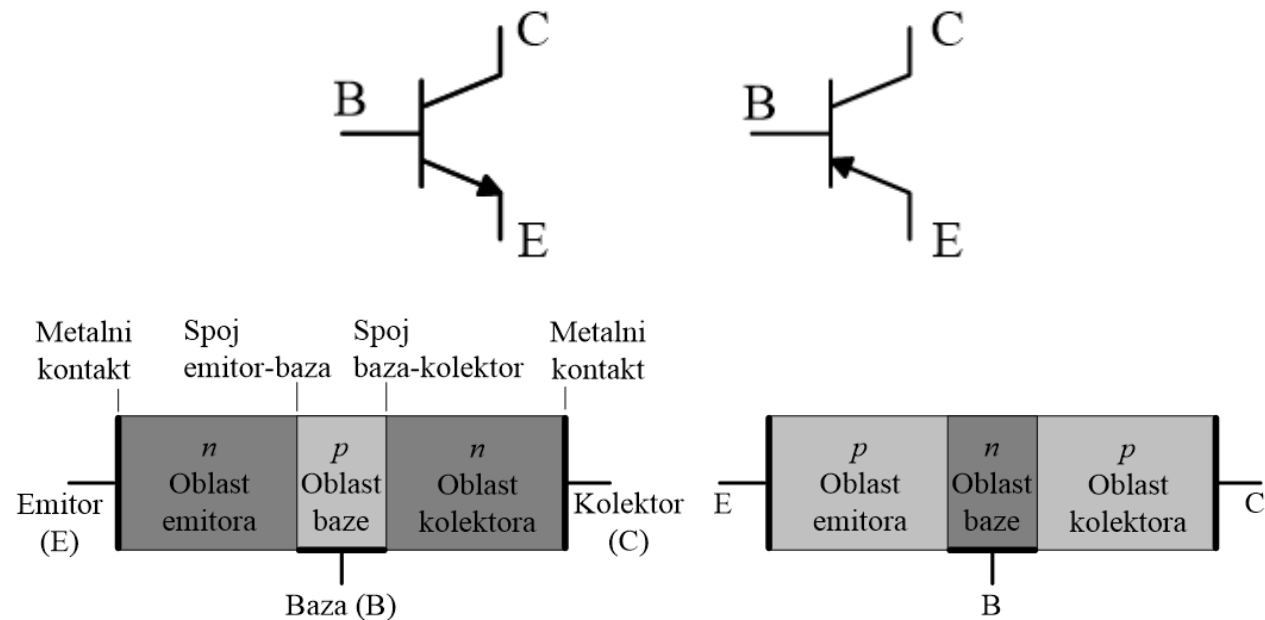
Bipolarni tranzistori

- Sastoji se od dva PN spoja
 - Dva komada pp istog tipa spojena uskim komadom pp suprotnog tipa
 - NPN i PNP

– EMITOR

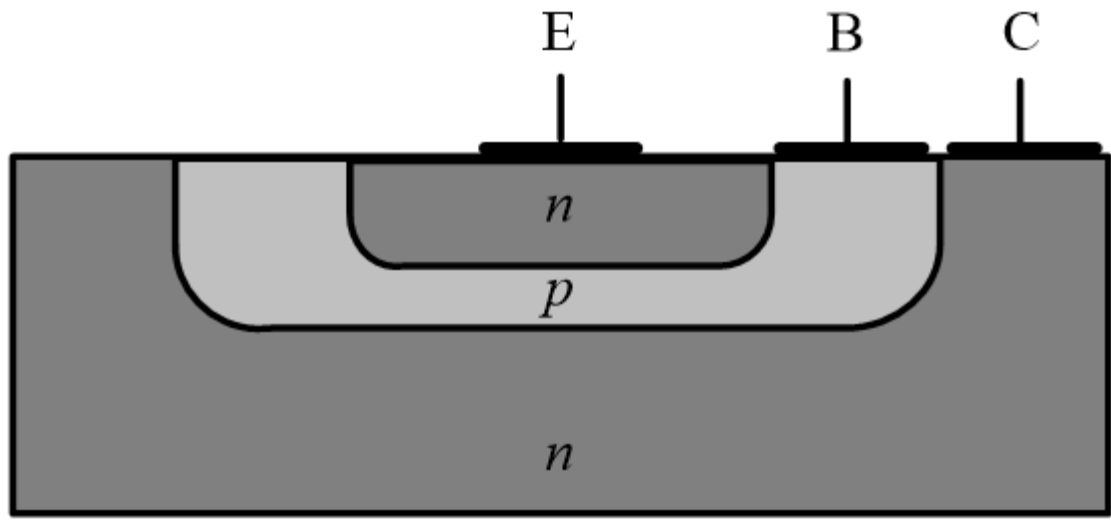
– BAZA

– KOLEKTOR



Bipolarni tranzistori

- Praktična izvedba



– Bipolarni jer struju čine elektroni i šupljine

Bipolarni tranzistori

- **Struje u tranzistoru**

- Tranzistor radi kao pojačavač ako je u (direktnom) **aktivnom režimu**
 - Direktna polarizacija emitorskog i inverzna kolektorskog spoja
 - Suprotno **inverzan aktivan režim**
- Emitor najjače dopiran, baza najmanje, baza male dužine

- **Emitorska struja:**

- Spoj E-B direktno polarisan i propušta glavne nosioce
 - Elektroni iz E čine struju I_{NE}
 - Šupljine iz B čine struju I_{PE}

- $i_E = I_{NE} + I_{PE}$

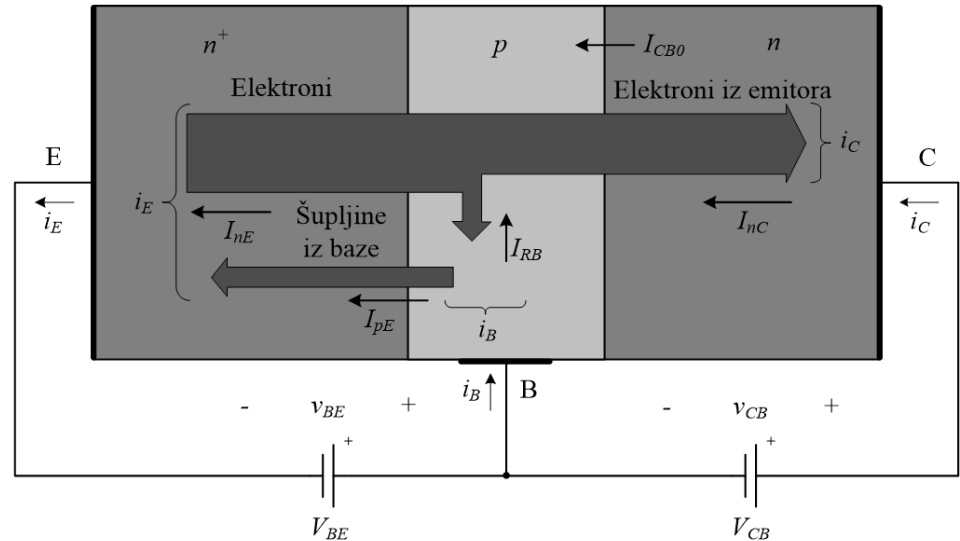
- **Kolektorska struja:**

- Spoj C-B inverzno polarisan i propušta manjinske nosioce
 - Elektroni iz E koji su uspeli da preskoče B (nisu se rekombinovali), čine struju I_{NC}
 - Elektroni iz B i šupljine iz C koji čine inv. struju zasićenja kolektorskog spoja I_{CBO} , jako malu

- $i_C = I_{NC} + I_{CBO}$

- **Bazna struja razlika emitorske i kolektorske (I Kirhofov zakon, $i_E = i_B + i_C$)**

- $i_B = I_{PE} + I_{RB} - I_{CBO}$ (I_{RB} struja elektrona iz E rekombinovanih u B)



Bipolarni tranzistori

- **Pojačanje tranzistora**

- Kolektorsku struju praktično čine elektroni koji uspeju da prođu B i stignu u C

- Ako je $i_C \approx i_E$, i_B je malo, pa je $\frac{i_C}{i_B}$ VELIKO

- Potrebno

- $\frac{I_{PE}}{I_{NE}} \ll I_{NE}$, što se izražava preko efikasnosti emitora $\gamma =$

$$\frac{I_{NE+I_{PE}}}{I_{NE+I_{PE}}}$$

- Ako $I_{PE} \ll I_{NE}$, $\gamma \rightarrow 1$

- Postiže se jačim dopiranjem E u odnosu na B

- $\frac{I_{RB}}{I_{NC}} < 1$ što manje da bi bilo $I_{NC} \approx I_{NE}$, transportni faktor $\alpha_T =$

$$\frac{I_{RB}}{I_{NE}}$$

- Baza što uža, smanjivanje verovatnoće rekombinacije jer je vreme zadržavanja nosilaca kratko

Bipolarni tranzistori

- **Pojačanje tranzistora**

- Proračun:

$$i_C = I_{NC} + I_{CBO}$$

$$i_C = \alpha_T I_{NE} + I_{CBO}$$

$$i_C = \alpha_T \gamma (I_{NE} + I_{PE}) + I_{CBO}$$

- Smena $\alpha_T \gamma = \alpha$

$$i_C = \alpha i_E + I_{CBO}$$

$$i_C \approx \alpha i_E$$

- $\alpha = \frac{i_C}{i_E}$ faktor strujnog pojačanja od E do C, $\alpha < \approx$

1

Bipolarni tranzistori

- Pojačanje β

$$i_C = \alpha i_E = \alpha (i_C + i_B)$$

$$i_C (1 - \alpha) = \alpha i_B$$

$$i_C = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} i_B = \beta i_B$$

Bipolarni tranzistori

- **Strujno naponska karakteristika** tranzistora se dobija ako se krene od koncentracije slobodnih nosilaca koji se preko direktno polarisanog spoja E-B kreću kroz bazu

$$n_p(0) = n_{p0} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

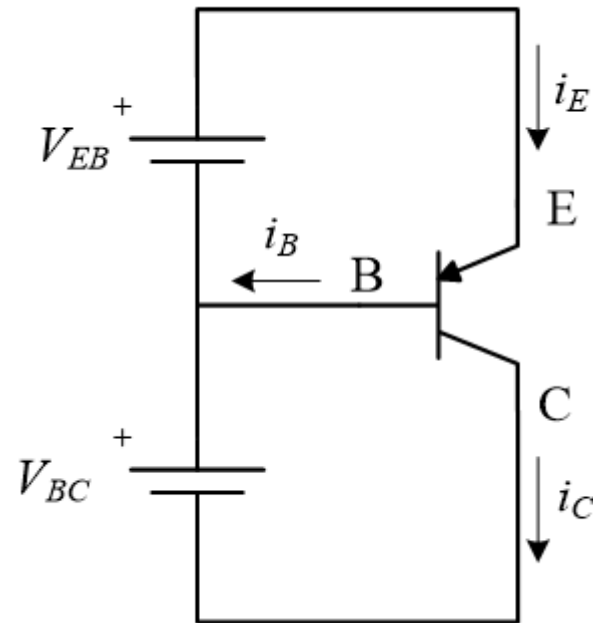
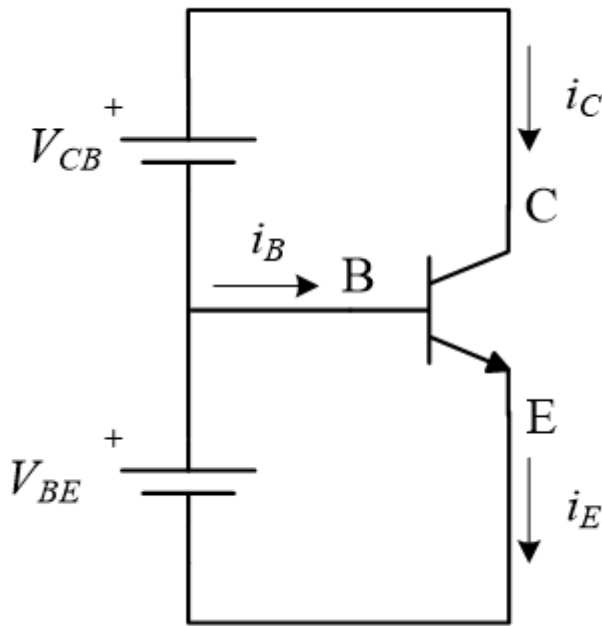
- n_{p0} koncentracija termički generisanih elektrona u bazi
-

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}, I_{CB0} = 0$$

- I_S struja saturacije, zavisi od konstrukcije tranzistora (površina poprečnog preseka i širina baze)

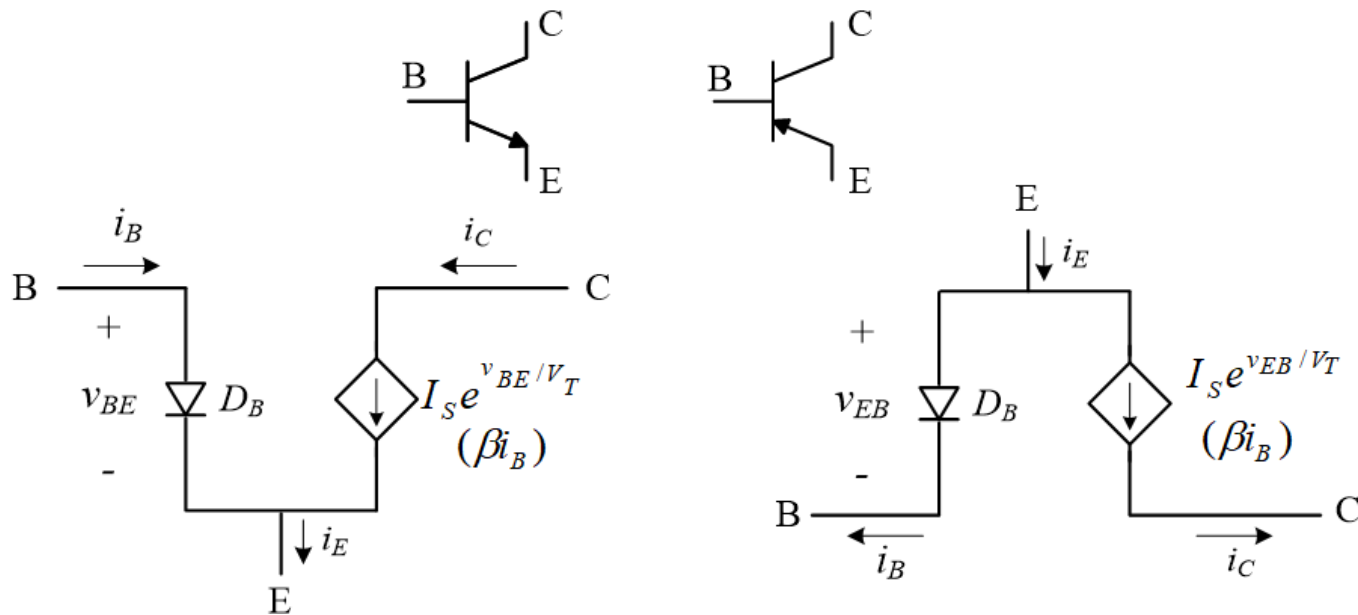
Bipolarni tranzistori

- Polarizacija tranzistora za rad u aktivnom režimu, sa dve baterije



Bipolarni tranzistori

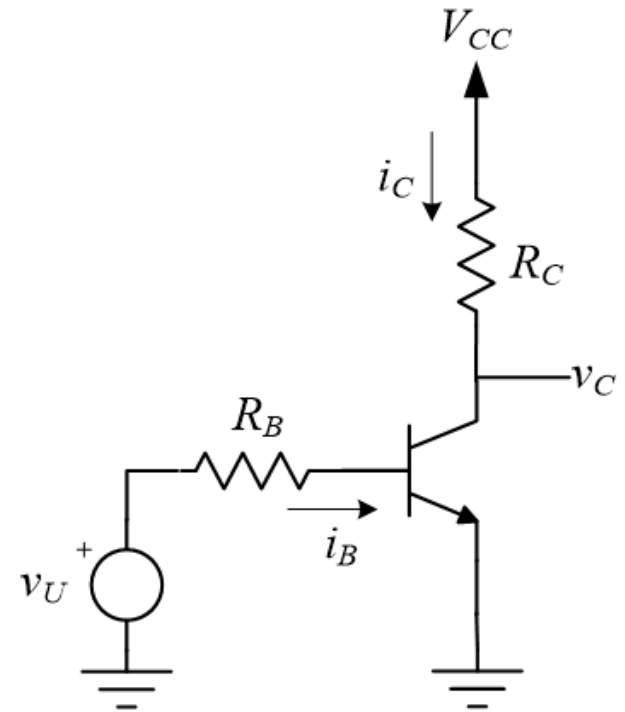
- Model tranzistora za velike signale



- Između B i C inverzno polarisan PN spoj, nema ničega (zanemaruje se I_{CB0})
- Smerovi i_B i i_C usklađeni kod oba tipa

Bipolarni tranzistori

- **Režimi rada tranzistora**
 - U (direktnoj) oblasti tranzistor radi kada se koristi kao pojačavač. Pored toga može biti u zasićenju ili u neprovodnom stanju (ili u inverznom aktivnom režimu, koji nam nije od interesa)

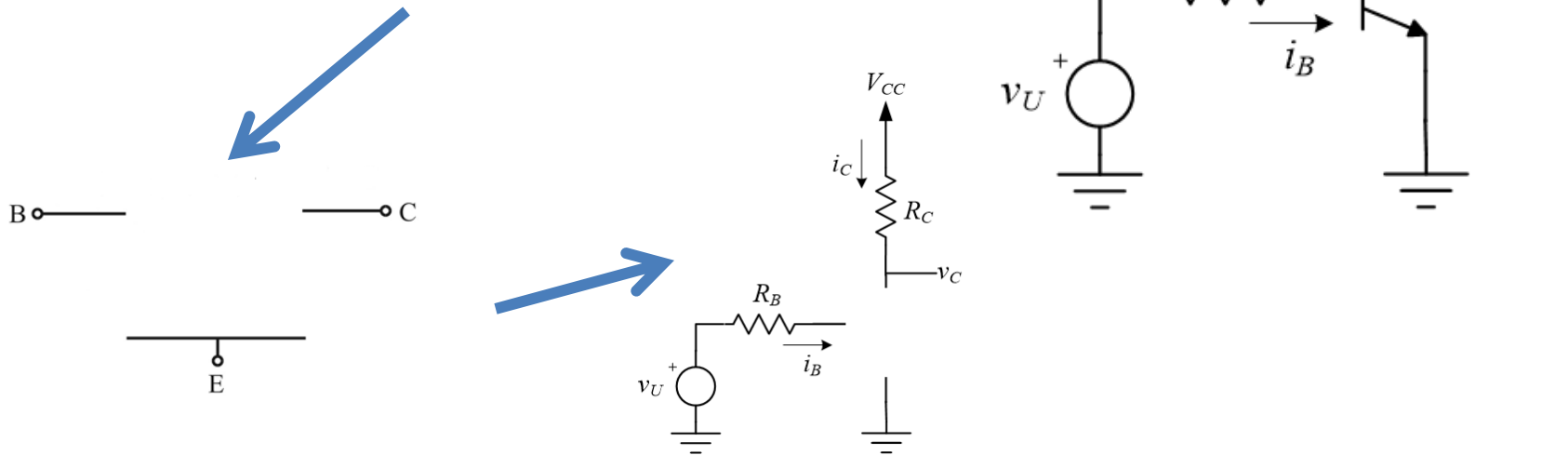


Bipolarni tranzistori

- **Neprovodno stanje**

- Ako je $v_U < V_{BET}$ (~ 0.6 V),
tranzistor je neprovodan (isključen),

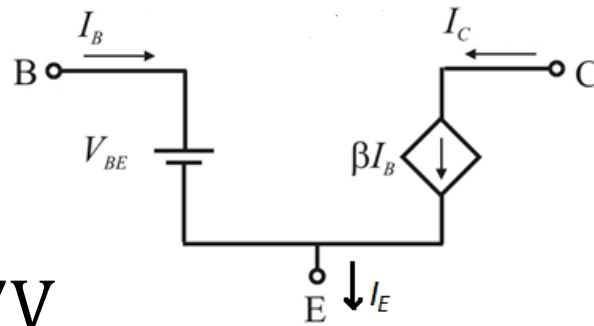
$$i_B = 0, i_C = 0, v_C = V_{CC}$$



Bipolarni tranzistori

- **Aktivni režim**

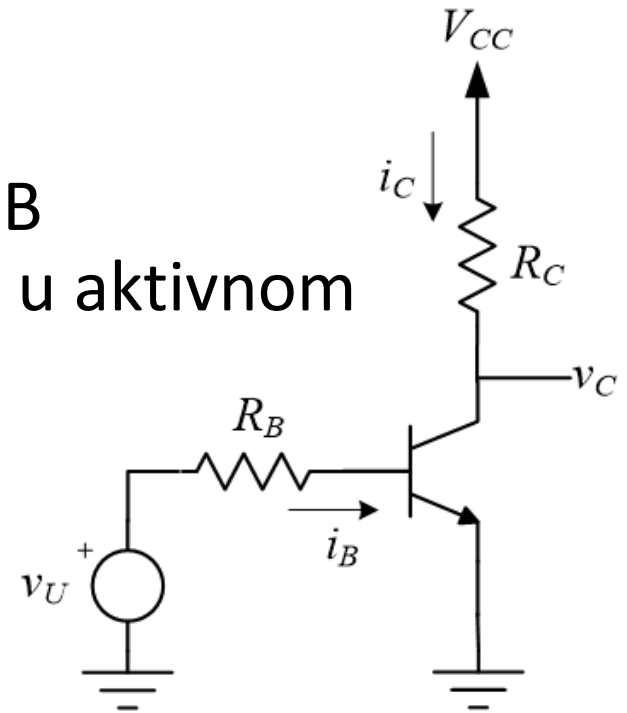
- Ako je $v_U > V_{BET}$, i $v_{CB} > 0$ (C-B inverzno polarisan) tranzistor je u aktivnom režimu



$$V_{BE} \approx 0.7V$$

- $i_B = \frac{v_U - V_{BE}}{R_B}$, $i_C = \beta i_B$, $v_C = V_{CC} - R_C i_C$

- Provera režima: da li je $v_{CB} > 0$, za gornje kolo to je $v_C > V_{BE}$



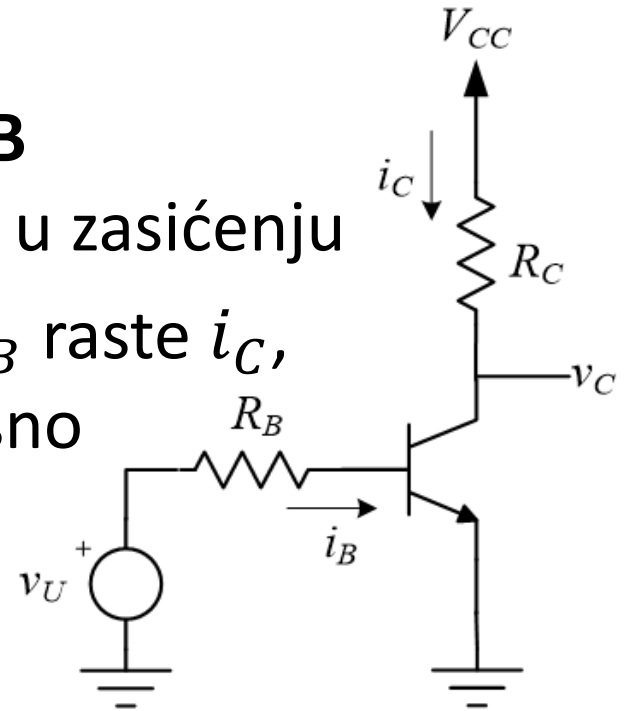
Bipolarni tranzistori

- **Režim zasićenja – strogi uslov**

- Ako je $v_U > V_{BET}$, i $v_{CB} < 0$ (**C-B direktno polarisan**) tranzistor je u zasićenju

- U aktivnom režimu, kako raste i_B raste i_C , pada v_C , granica $v_C = v_B$ odnosno $v_{CE} = V_{BE}$

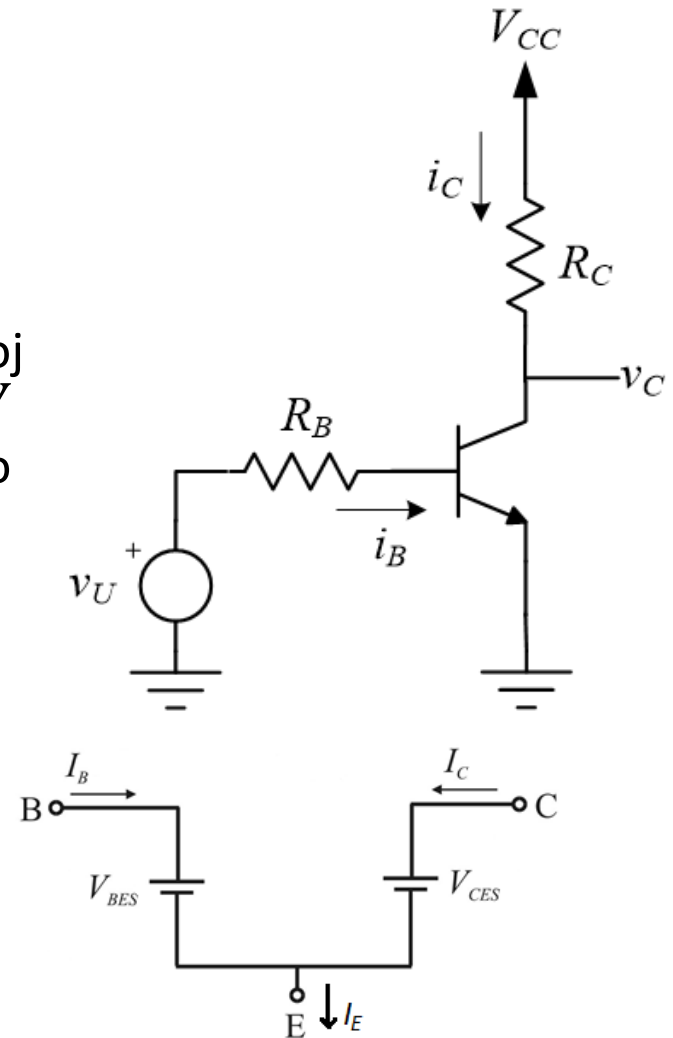
- Na granici $I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C}$, $I_B = \frac{I_C}{\beta}$



Bipolarni tranzistori

- **Režim zasićenja - realnost**

- Na granici $I_C = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_C}$, $I_B = \frac{I_C}{\beta}$
- Aktivan pojačavački režim važi dok god postoji jasno izražena oblast prostornog tovara između B i C a to je slučaj i pri slaboj direktnoj polarizaciji spoja za $v_{CB} > -0.5V$
- To znači da napon v_{CE} može da opadne do oko 0.2V, i taj karakterističan napon se obeležava sa V_{CES}
- U zasićenju $I_{CS} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_C}$,
- U realnosti se javlja i efekat blagog povećavanja napona direktne polarizacije BE spoja
 $v_{BE} = V_{BES} \approx 0.8V$
- Provera režima: da li je $i_B \geq \frac{I_{CS}}{\beta}$

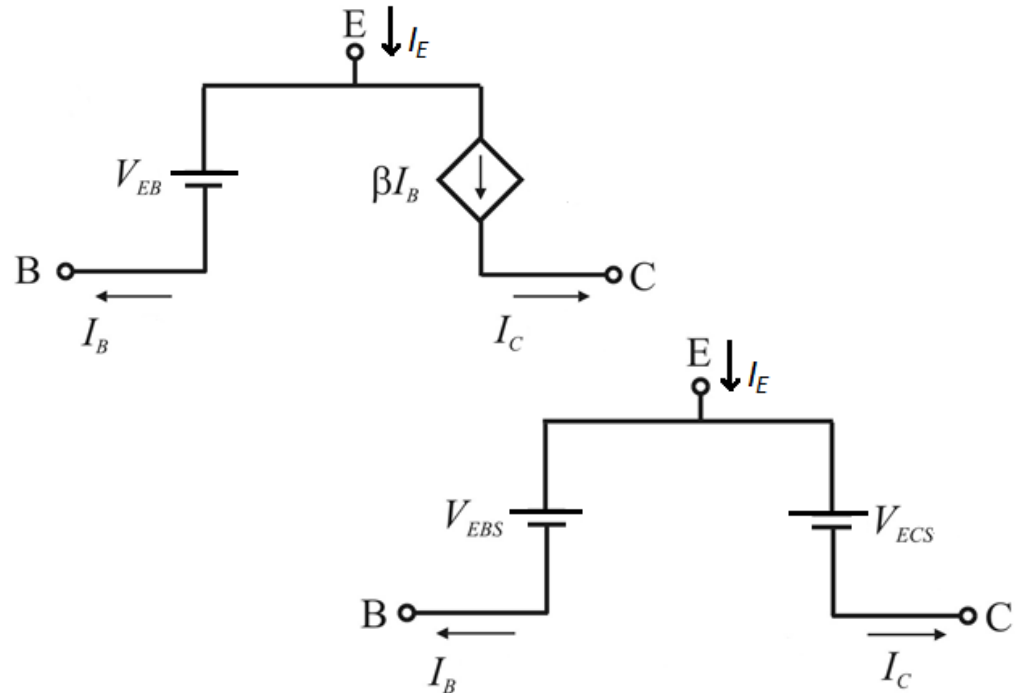


Bipolarni tranzistori

- **Modeli za PNP tranzistor**

- Ekvivalentni modelima NPN tranzistora, sa promenjenim smerovima napona i struja

- Aktivni režim

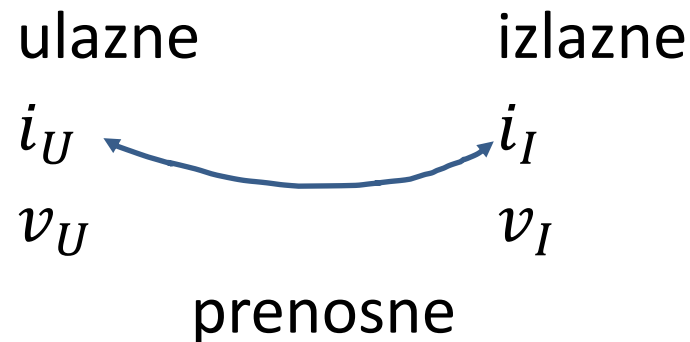


- Zasićenje

Bipolarni tranzistori

- **Statičke strujno-naponske karakteristike**

- Pokazuju zavisnost između ulaznih i izlaznih struja i napona tranzistora



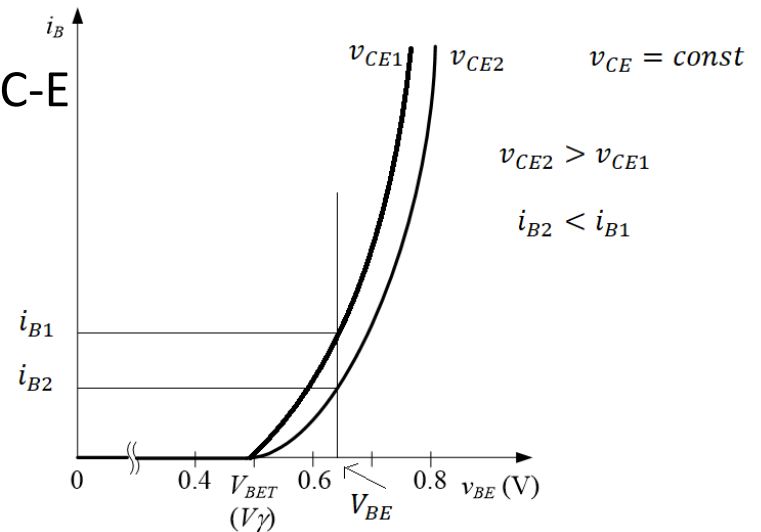
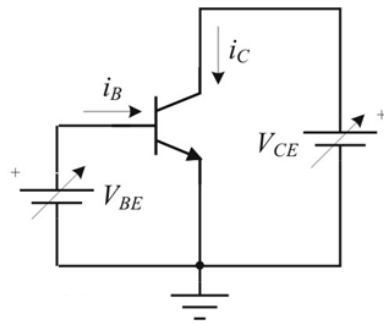
- Posmatraju se ukupni sporopromenljivi signali.
- Značajne karakteristike:
 - Ulazna statička k-ka $i_U - v_U$
 - Izlazna statička k-ka $i_I - v_I$
 - Prenosna statička k-ka $i_I - v_U$

Bipolarni tranzistori

- **Ulazna statička karakteristika**

- Primer NPN tranzistora, ulaz B-E, izlaz C-E

- $i_B(v_{BE})|_{v_{CE}=const}$



- V_{BET} napon praga provođenja tranzistora

- Kada se povećava napon v_{CE} širi se oblast prostornog tovara C-B, baza se sužava, smanjuje se rekombinacija u bazi i smanjuje bazna struja (za konstantno v_{BE}).

- Isti oblik ima i karakteristika $i_C - v_{BE}$

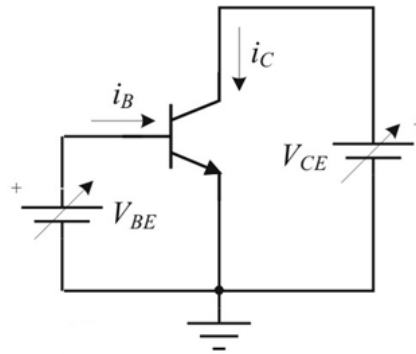
- Ova karakteristika zavisi i od temperature, ako su i_B i i_C konstantne i temperatura raste, v_{BE} opada, $-2 \frac{mV}{^\circ C}$

Bipolarni tranzistori

- **Izlazne statičke karakteristike**

- Primer NPN tranzistora, ulaz B-E, izlaz C-E

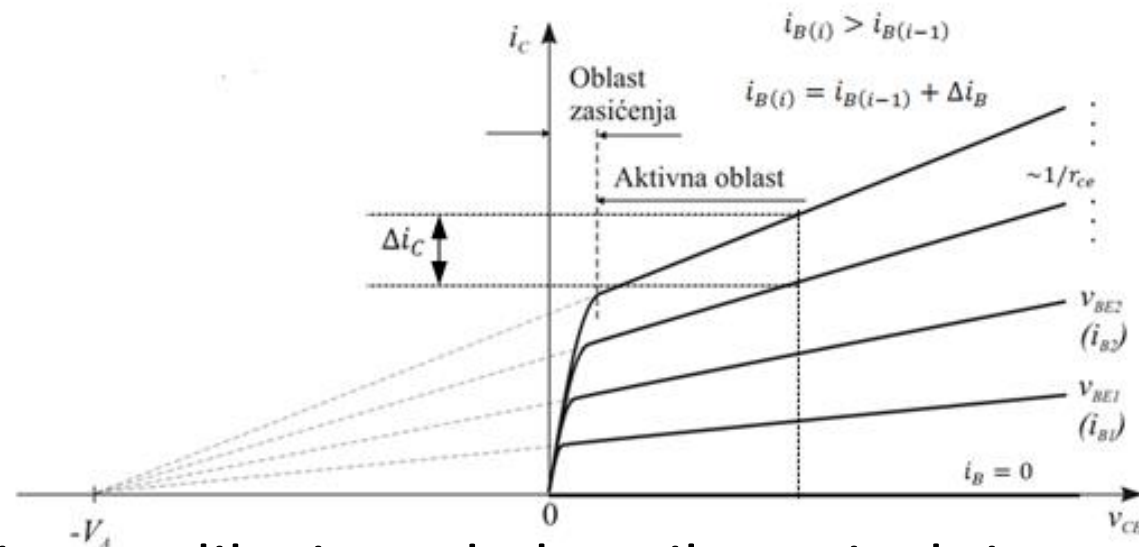
- $i_C(v_{CE})|_{i_B=const}$



- Pomoću V_{BE} se održava konstantna struja baze

Bipolarni tranzistori

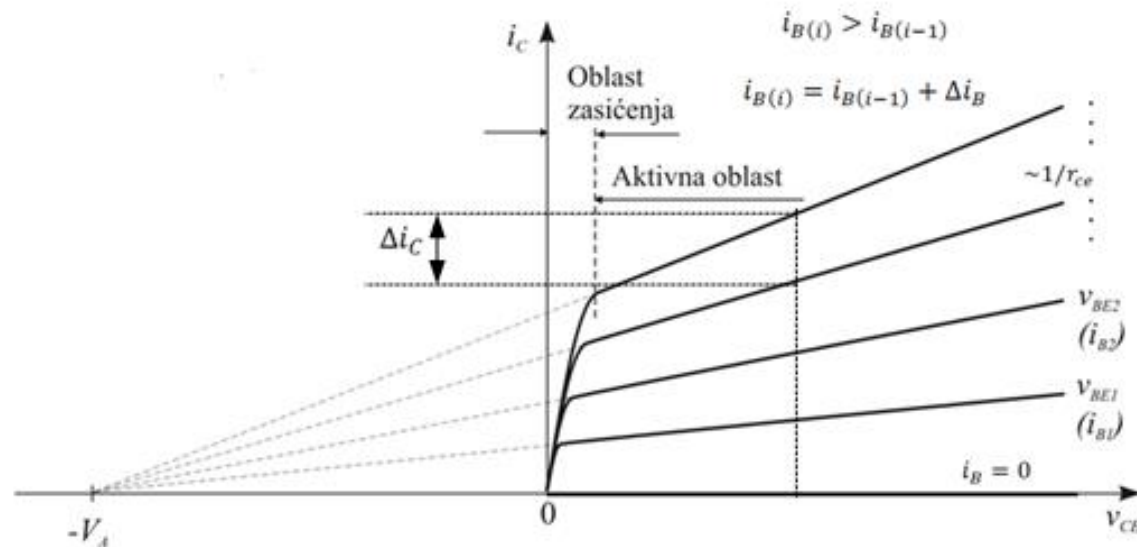
- Izlaze statičke karakteristike



- Za istu razliku između baznih struja, krive su ekvidistantne, zbog $i_C = \beta i_B$
- Sva karakteristike se seku u istoj tački $-V_A$
- Svaka kriva ima linearni deo, sa nagibom $1/r_{ce}$

Bipolarni tranzistori

- Izlazne statičke karakteristike



– Ako je $v_{BE} > V_{BET}$ (provodan tranzistor)

- Ako $v_{CE} > v_{BE}$ aktivna oblast, $i_C = \beta i_B$, $i_B = const$, $i_C \approx const$
- Ako $v_{CE} < v_{BE}$ spoj C-B direktno polarisan i elektroni koji su u bazi manjinski ne mogu da pređu u kolektor, smanjuje se i_C , tranzistor zasićen. Male promene v_{CE} uzrokuju velike promene i_C . „Duboko“ provodan spoj C-B prekida struju i_C

Bipolarni tranzistori

- **Izlazne statičke karakteristike**

- Karakteristike pokazuju da u aktivnoj oblasti i_C nije konstantno kada se menja v_{CE}

- $i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$, V_A Early-jev napon

- Definiše se nagib karakteristike

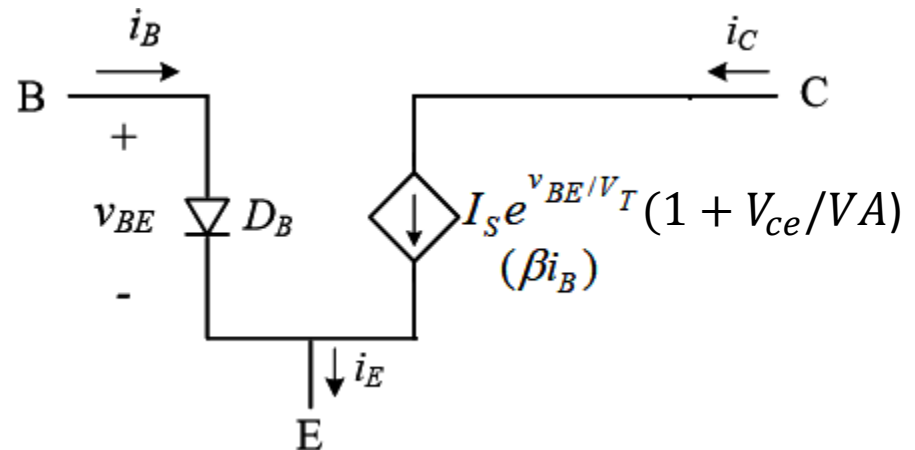
- $\frac{1}{r_{ce}} = \left. \frac{di_C}{dv_{CE}} \right|_{V_{BE}=\text{const}} = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \Big|_{v_{BE}=V_{BE}} \cdot \frac{1}{V_A} = \frac{I_C}{V_A}$

- $r_{ce} = \frac{V_A}{I_C}$, označava se i sa r_i (izlazna otpornost)

Bipolarni tranzistori

- **Izlazne statičke karakteristike**

- Potpuniji model tranzistora za velike signale koji uključuje Erljev efekat



- Ipak, kod DC analize u aktivnom režimu ne uzimamo u obzir V_A

