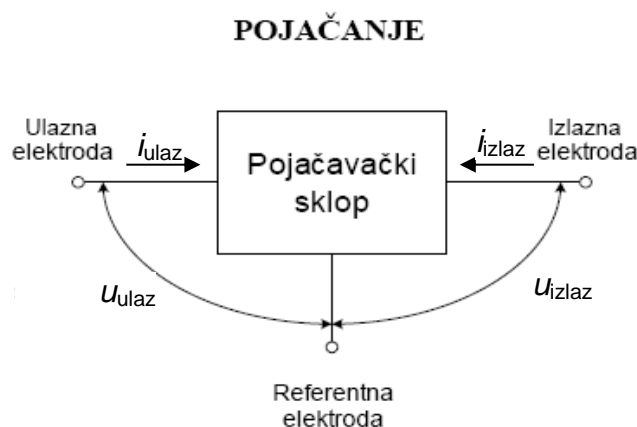


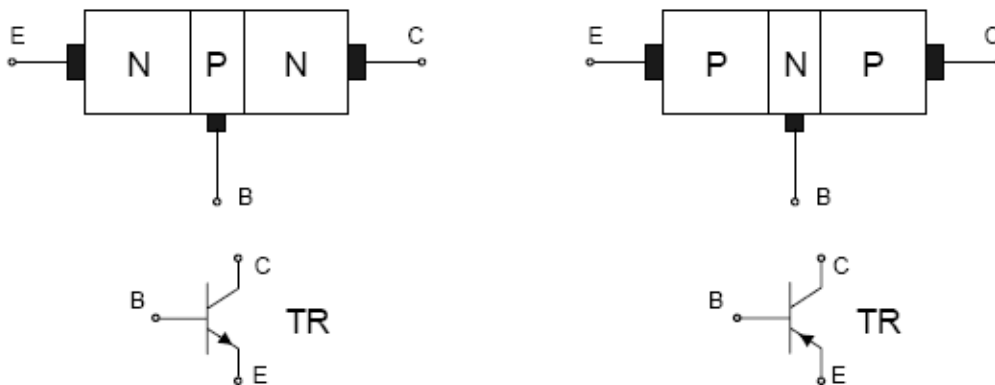
6. Bipolarni tranzistor

- Bipolarni tranzistor je poluprovodnička komponenta sa tri priključka (tri elektrode) koja poseduje pojačavačko svojstvo - sposobnost pojačavanja malih signala. Male promene ulaznog napona merenog između ulazne i referentne elektrode preslikavaju se u velike promene izlaznog napona merenog između izlazne i referentne elektrode.



- Elektrode bipolarnih tranzistora su E-emitor, B-baza i C-kolektor. U procesu provođenja učestvuju dve vrste nosilaca naelektrisanja: slobodni elektroni i šupljine (otuda naziv bipolarni tranzistor).

Bipolarni tranzistor ima sendvič strukturu - 2 PN spoja su formirana na istoj kristalnoj rešetki — podlozi. Postoje 2 vrste bipolarnih tranzistora: NPN i PNP tipa.

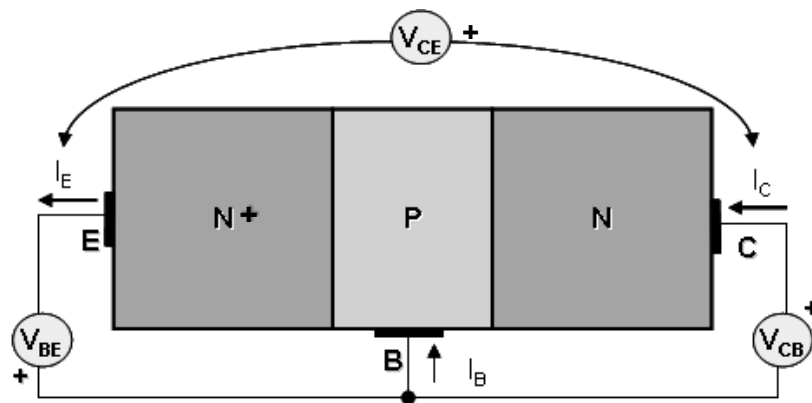


Povezivanje tranzistora sa ostalim komponentama u kolu vrši se preko omskih kontakata metal-poluprovodnik za svaku elektrodu.

Osnovna primena u elektronskim kolima:

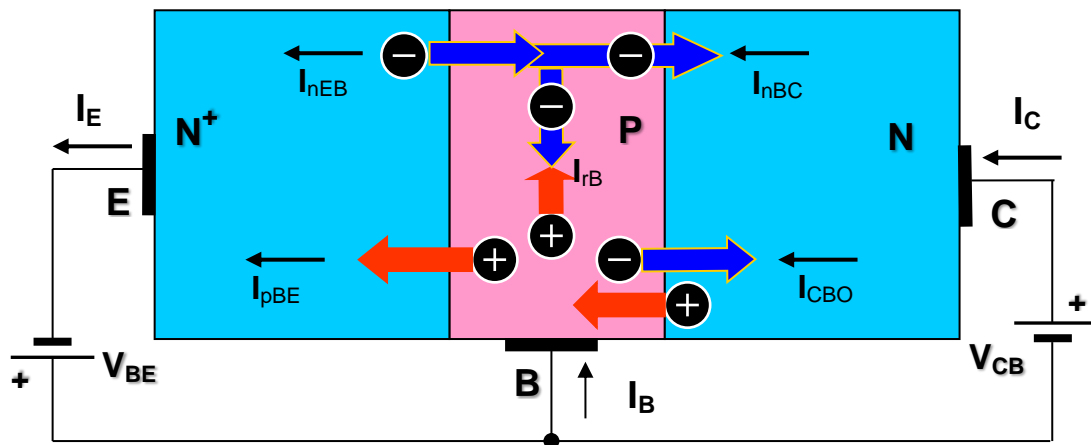
- pojačavački element (analogna ili linearna elektronika).
- prekidački element (digitalna elektronika).

Tranzistor opisuju tri struje i tri napona:



$$I_E = I_C + I_B \quad V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

- Direktni aktivni režim rada tranzistora (pojačavački režim) postiže se direktnom polarizacijom BE spoja i inverznom polarizacijom BC spoja.



Raspodela struja u NPN tranzistoru

Pretpostavke:

Emitorska oblast (N^+) je najviše dopirana, zatim sledi kolektorska oblast (N), a baza (P) je najslabije dopirana.

Širina bazne oblasti je dovoljno mala.

- Glavne komponente struja kroz tranzistor.

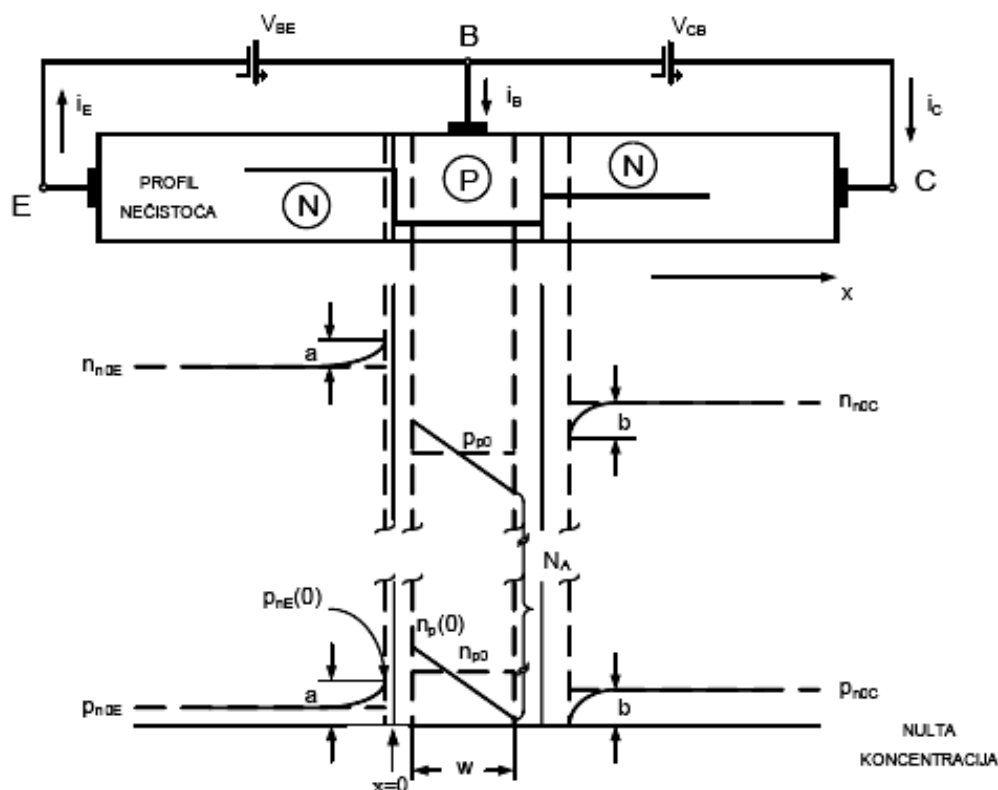
➤ Struja emitera $I_E = I_{nEB} + I_{pBE} \approx I_{nEB}$

N^+P spoj baza–emiter BE je direktno polarisan, pa kroz njega lako prolaze većinski nosioci: elektroni iz emitera prema bazi – struja I_{nEB} i šupljine iz baze prema emiteru – struja I_{pBE} . Podsetimo se da je smer struje suprotan smeru kretanja elektrona. Kako je koncentracija šupljina u bazi mnogo manja od koncentracije elektrona u emiteru, to je struja šupljina I_{pBE} zanemarljiva u odnosu na struju elektrona I_{nEB} .

➤ Struja kolektora $I_C = I_{nBC} + I_{pCB} \approx I_{nBC}$

PN spoj baza-kolektor je inverzno polarisan i kroz njega prolaze dve struje:

- inverzna struja zasićenja spoja kolektor-baza I_{CBO} , koju čini protok manjinskih nosilaca naelektrisanja: elektrona iz baze prema kolektoru i šupljina iz kolektora prema bazi. Ova struja je praktično zanemarljivo mala.
 - I_{nBC} je struja elektrona iz emitera koji „prežive“ rekombinaciju tokom puta kroz bazu i bivaju prebačeni jakim ugrađenim poljem na spoju BC u kolektor kao manjinski nosioci. S obzirom da je baza kratka i slabo dopirana, rekombinacija prispelih elektrona iz emitera je vrlo mala, pa je ova elektronska komponenta struje dominantna u kolektorskoj struji.
- Struja baze $I_B = I_{pBE} + I_{rB} - I_{CBO}$ sadrži tri komponente:
- Struju šupljina I_{pBE} koje iz baze prelaze u emitor.
 - Struju I_{rB} kojom se nadoknađuju rekombinovane šupljine u području baze.
 - Inverznu struju zasićenja bazno-kolektorskog spoja I_{CBO} .



Raspodela koncentracije nosilaca u tranzistoru koji radi u direktnom aktivnom (pojačavačkom) režimu (puna linija) i u slučaju bez polarizacije elektroda (isprekidana linija).

Takođe, prema I Kirhofom zakonu uvek važi:

$$I_E = I_B + I_C$$

- Efikasnost emitera γ je odnos elektronske i šupljinske komponente struje emitora:

$$\gamma = \frac{I_{nEB}}{I_E} = \frac{I_{nEB}}{I_{nEB} + I_{pBE}}, \text{ treba da bude što bliži 1.}$$

Efikasnost emitera je veća ukoliko je emiter više dopiran u odnosu na bazu, jer je tada struja šupljina iz baze mnogo manja od struje elektrona iz emitera.

- Transportni faktor baze β^* pokazuje odnos elektronske struje na kolektorskom i emitterskom spoju:

$$\beta^* = \frac{I_{nBC}}{I_{nEB}}, \text{ treba da bude što bliži 1.}$$

Transportni faktor baze je veći ako je rekombinacija elektrona u bazi manja, tj. ako je baza uža, slabije dopirana i vreme preleta elektrona kroz bazu što kraće.

- Faktor strujnog pojačanja α od emitora do kolektora pokazuje odnos struja kolektora i emitera

$$I_{nBC} = \beta^* I_{nEB} = \beta^* \cdot \gamma \cdot I_E = \alpha \cdot I_E$$

$$\alpha = \beta^* \cdot \gamma$$

$\alpha = \frac{I_{nBC}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E}$, jer je inverzna struja zasićenja I_{CBO} mnogo manja od struje kolektora. Uobičajena vrednost je $\alpha \approx 0.95 - 0.99$.

- Faktor pojačanja struje od baze do kolektora – β pokazuje odnos struja kolektora i baze kada se zanemari inverzna struja zasićenja I_{CBO} :

$$I_C = I_{nBC} + I_{CBO} = \alpha I_E + I_{CBO} = \alpha(I_C + I_B) + I_{CBO}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CBO} = \beta I_B + (\beta+1) I_{CBO}, \quad I_C = \beta I_B + \beta I_{CBO} + I_{CBO}, \quad I_C - I_{CBO} = \beta(I_B + I_{CBO})$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad \beta = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

Strujno pojačanje β je najznačajnija karakteristika tranzistora kao pojačavača. Tipične vrednosti su $\beta=100-500$.

- **Pojačanje tranzistora: mala varijacija napona v_{BE} na direktno polarisanom spoju BE izaziva znatno veću varijaciju struje spoja i_{BE} (videti 4. Poluprovodničke diode). Struja baze i_B direktno prati promenu struje i_{BE} i pomnožena β faktorom preslikava se u promenu kolektorske struje $i_C = \beta i_B$.**

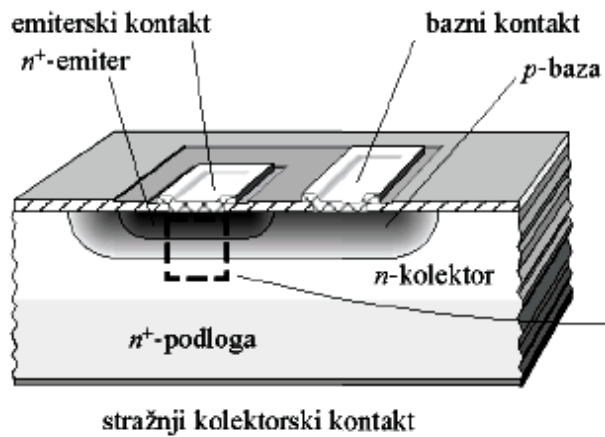
Da bi strujno pojačanje, izraženo β faktorom, bilo što veće potrebno je obezbediti:

- direktnu polarizaciju emitorskog i inverznu polarizaciju kolektorskog spoja.
- dopirati emitor znatno više od baze (veća efikasnost emitera – γ).
- napraviti usku (kratku) bazu (veći transportni faktor- β^*).
- dovoljno dopirati bazu i kolektor radi smanjenja inverzne struje zasićenja spoja I_{CBO} .

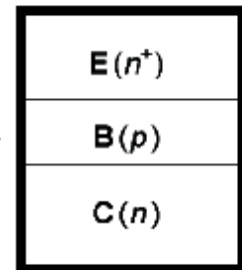
Sve navedene relacije i konstatacije važe i za PNP tranzistor.

- Struktura savremenih diskretnih (pojedninačnih) i integrisanih tranzistora

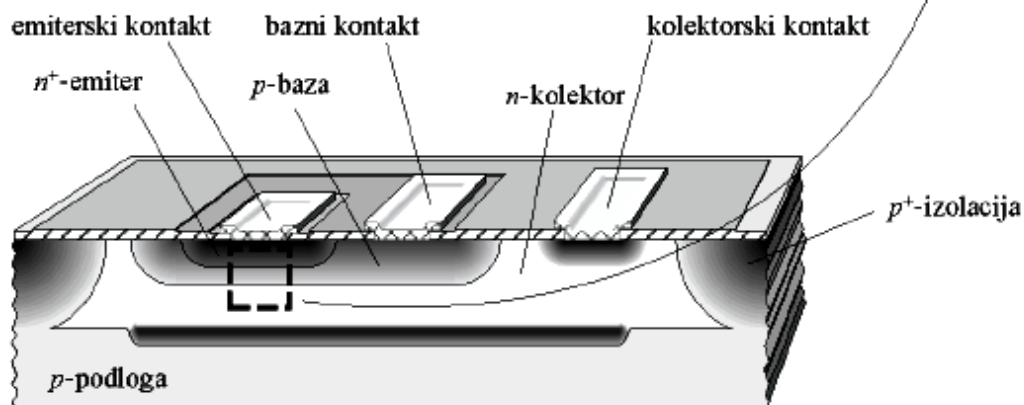
diskretni tranzistor



aktivni (sopstveni) tranzistor



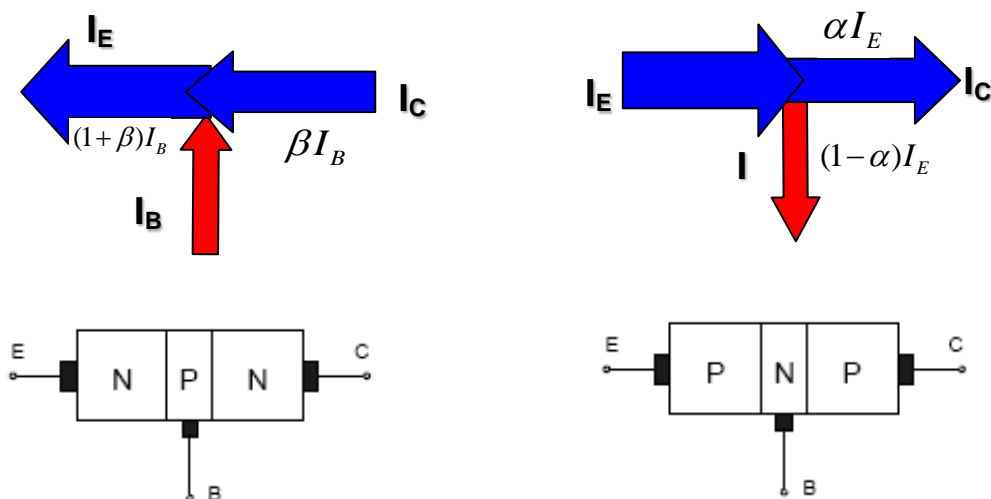
integrisani tranzistor



prvi tranzistori 1947-48 (Bratin, Bardin, Šokli) Belove laboratorije

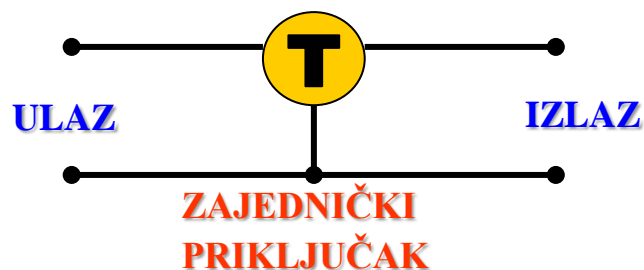


diskretni tranzistor u kućištu

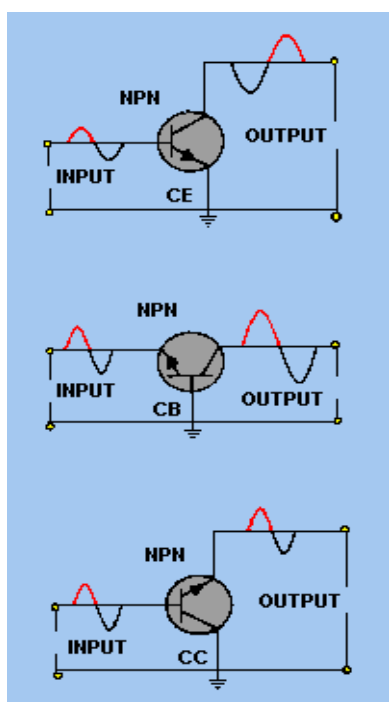


Dijagram struja kroz NPN i PNP tranzistor.

- Povezivanje tranzistora u kolo uvek se realizuje tako da je jedna elektroda zajednička za ulazno i izlazno kolo.



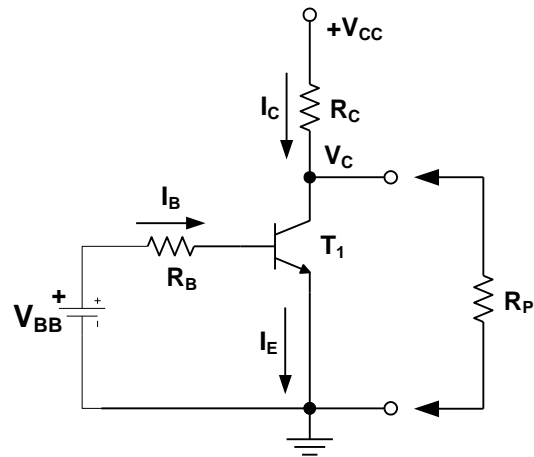
- U zavisnosti od toga koja je elektroda zajednička razlikujemo 3 sprege



- Sprega sa zajedničkim emiterom ZE (common emitter CE)
- Sprega sa zajedničkom bazom ZB (common base CB)
- Sprega sa zajedničkim kolektorom ZC (common collector CC)

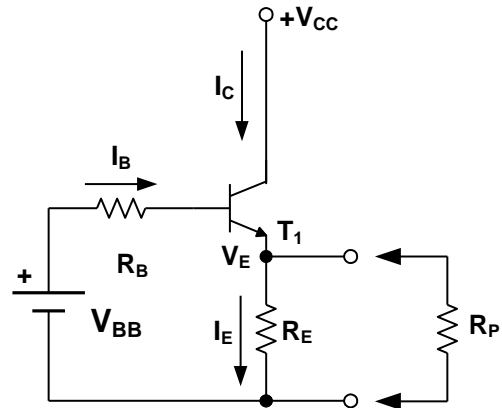
- Polarizacija tranzistora u sprezi sa zajedničkim emiterom ZE

- Najčešće korišćena sprega u pojačavačkim kolima.
- Ulaz između baze i emitera, izlaz između kolektora i emitera.
- Sprega poseduje značajno i strujno i naponsko pojačanje, kao i pojačanje snage.
- Obrće – invertuje fazu ulaznog signala.



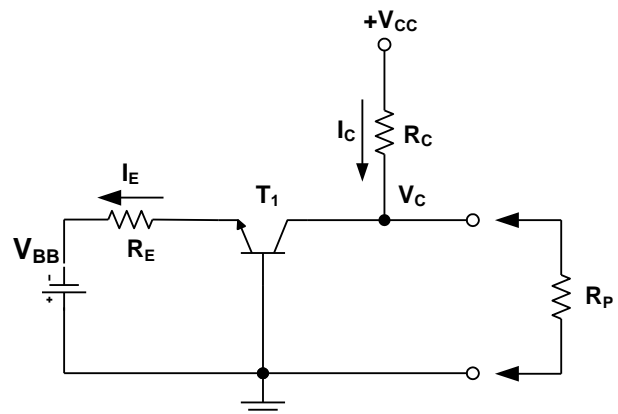
- Polarizacija tranzistora u sprezi sa zajedničkim kolektorom ZC

- Ulaz između baze i kolektora, izlaz između emitera i kolektora
- Izlazni napon prati ulazni (emitter follower), naponsko pojačanje je vrlo blisko 1 (nešto manje)
- Poseduje značajno strujno pojačanje
- Ima veliku ulaznu i malu izlaznu otpornost



- Polarizacija tranzistora u sprezi sa zajedničkom bazom ZB

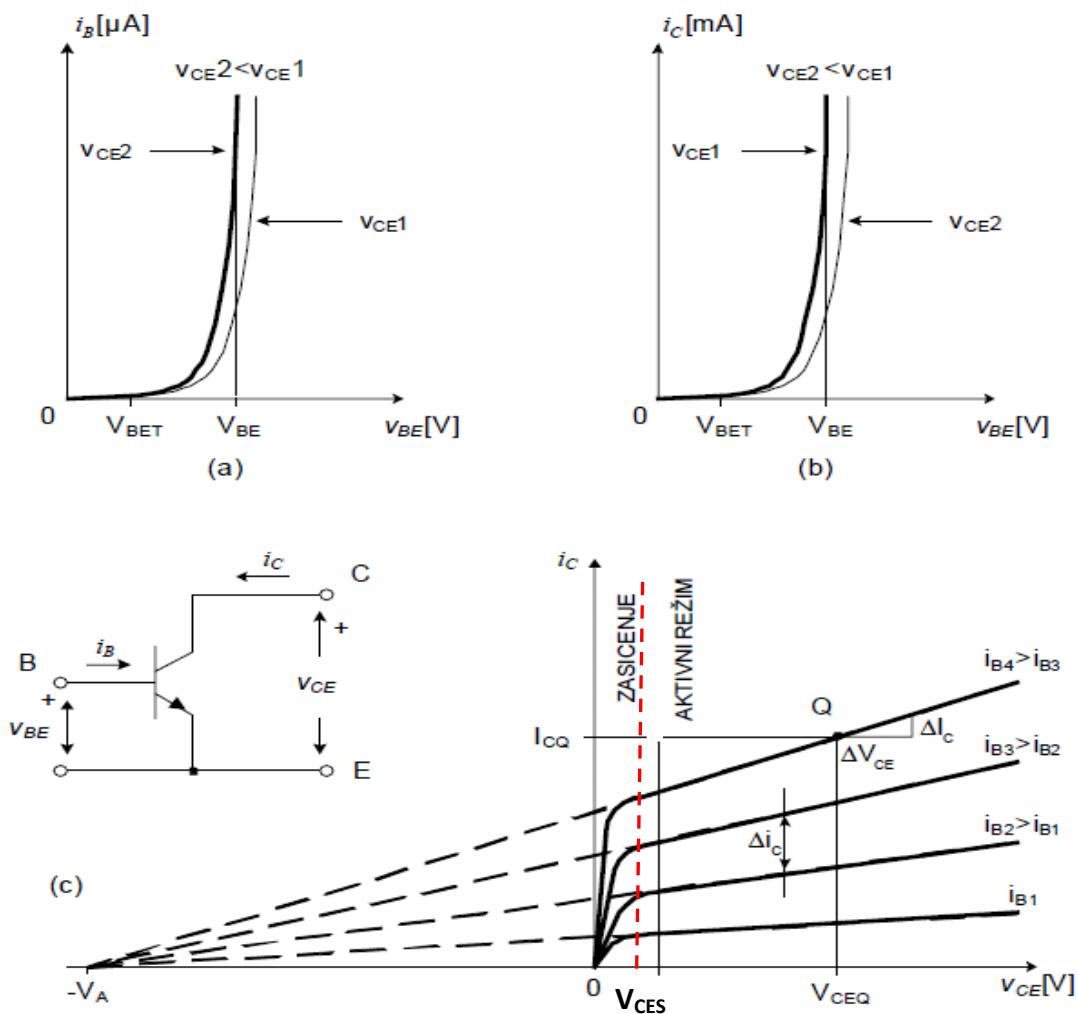
- Ulaz između emitora i baze, izlaz između kolektora i baze.
- Ne obrće fazu ulaznog signala.
- Naponsko pojačanje je veliko, a strujno blisko 1 (nešto manje).
- Ima malu ulaznu i veliku izlaznu otpornost.



- Pregled karakteristika tranzistorskih sprega

TIP POJAČAVAČA	ZB	ZE	ZC
RAZLIKA U FAZI NA ULAZU I IZLAZU	0°	180°	0°
NAPONSKO POJAČANJE	VELIKO	VELIKO	MALO, ≈ 1
STRUJNO POJAČANJE	MALO, ≈ 1	VELIKO	VELIKO
POJAČANJE SNAGE	SREDNJE	VELIKO	SREDNJE
ULAZNA OTPORNOST	MALA	SREDNJA	VELIKA
IZLAZNA OTPORNOST	VELIKA	SREDNJA	MALA

- Statičke karakteristike tranzistora u sprezi zajednički emiter (ZE)



Statičke karakteristike tranzistora u sprezi zajednički emitor:

a) ulazna, b) prenosna, c) izlazna

Na direktno polarisanom BE spoju važi Šoklijeva jednačina za struju diode:

$$i_E = I_{ES} [e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1]. \text{ Dalje je:}$$

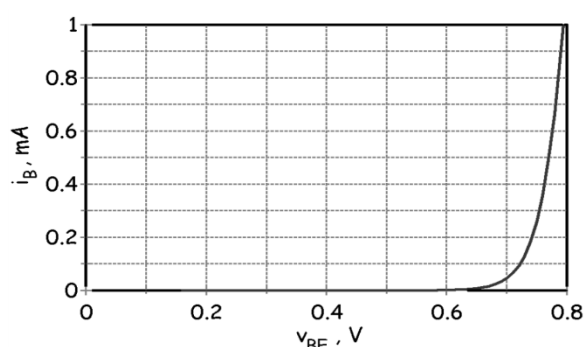
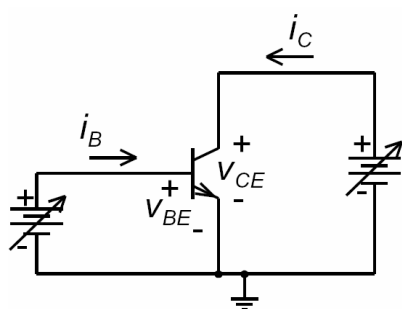
$$i_C = \alpha i_E = \alpha \cdot I_{ES} [e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1] \approx \alpha \cdot I_{ES} [e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}] \approx I_S [e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}], I_S = \alpha \cdot I_{ES}, \alpha \approx 1.$$

$$i_E = i_C + i_B \Rightarrow i_E = \alpha i_E + i_B \Rightarrow i_B = (1 - \alpha) i_E.$$

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

$$\alpha = 0.99 \Rightarrow \beta = 100, \quad i_C = \beta \cdot i_B$$

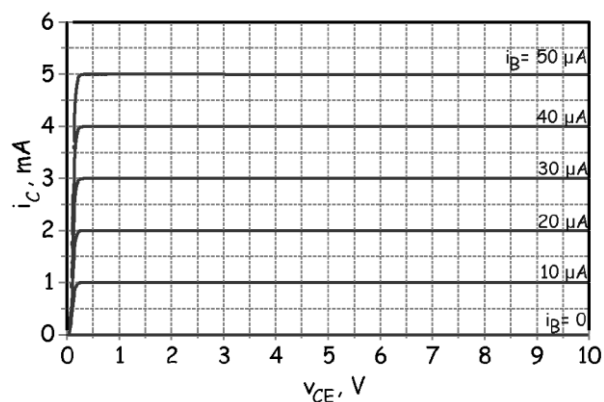
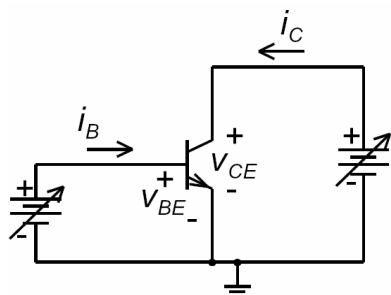
➤ Ulazna karakteristika u spoju ZE: $i_B = f(v_{BE}), v_{CE} = \text{const.}$



kolo za snimanje karakteristike

Ovo je zapravo karakteristika diode BE u oblasti direktne polarizacije.

➤ Izlazna karakteristika u spoju ZE: $i_C = f(v_{CE}), i_B = \text{const.}$



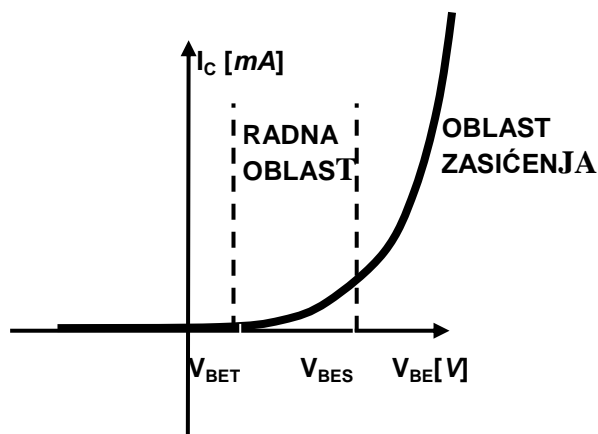
kolo za snimanje karakteristike

Familija krivih za različite vrednosti bazne struje i_B kao parametra.

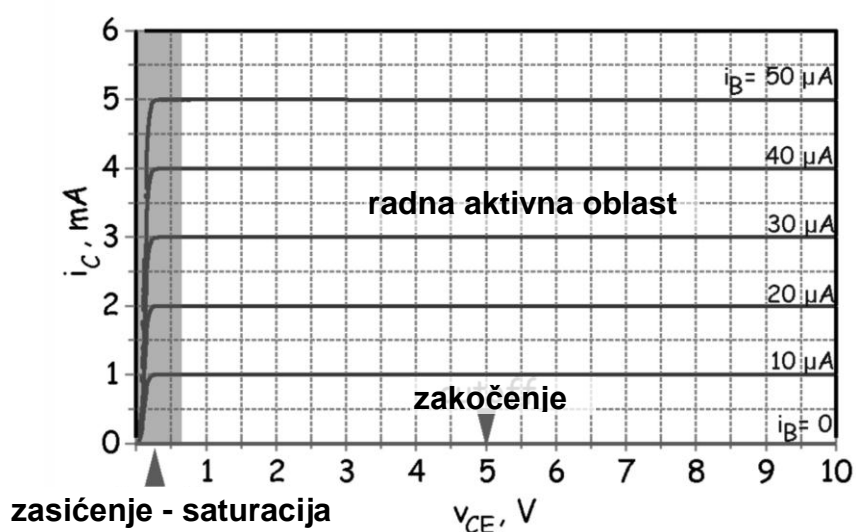
➤ Prenosna karakteristika u spoju ZE: $i_C = f(v_{BE}), v_{CE} = \text{const.}$

Napon direktne polarizacije spoja BE - v_{BET} ispod koga su struje i_C i i_B zanemarljivo male je oko 0.6[V] za Si tranzistore.

Napon saturacije $v_{BES} \approx 0.8[V]$ za Si tranzistore.



- Oblasti rada NPN tranzistora u spoju ZE



➤ **Radna aktivna oblast**

- Spoj BE je direktno, a spoj BC inverzno polarisan.
- Pošto je pad napona na direktno polarisanom spoju BE $v_{BE} \approx 0.7[V]$ to je spoj BC inverzno polarisan sve dok je napon $v_{CE} > 0.7[V]$.
- Struja kolektora je β puta veća od struje baze, $i_C = \beta \cdot i_B$.

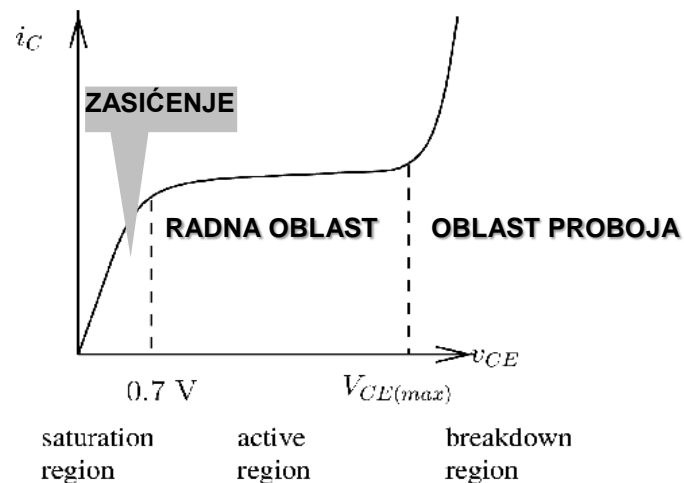
➤ **Oblast zakočenja**

- Spojevi BE i BC su inverzno polarisani.
- Tranzistor je zakočen (ne provodi struju), $i_B = 0$ (grafik apscisna osa).

➤ **Oblast zasićenja**

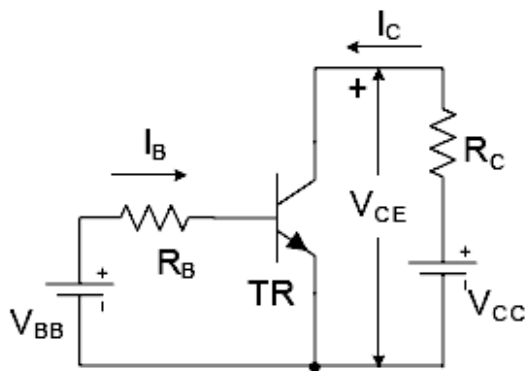
- Spojevi BE i BC su direktno polarisani.
- Struja kolektora je srazmerna struji baze, $i_C \ll \beta \cdot i_B$.
- Naponi zasićenja su $v_{BES} \approx 0.8[V]$ i $v_{CES} \approx 0.2[V]$ kod Si tranzistora.

➤ Ograničenja u radu tranzistora



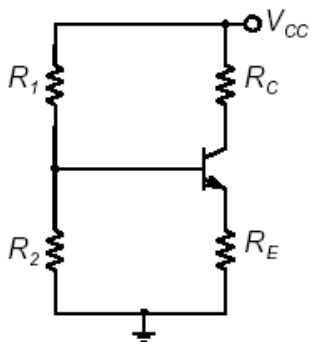
• Polarizacija pojačavača

Cilj polarizacije tranzistora je postavljanje mirne radne tačke u željenu radnu oblast - direktni aktivni režim.

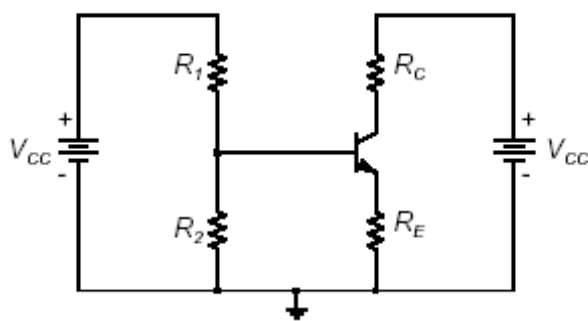


Polarizacija NPN tranzistora u spoju ZE sa dve baterije za polarizaciju.

Najčešća realizacija je korišćenjem samo jednog jednosmernog izvora napajanja – baterije i naponskog razdelnika u kolu baze u cilju regulacije bazne struje.

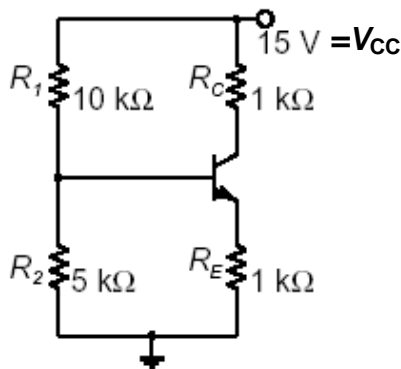


uobičajena šematska oznaka

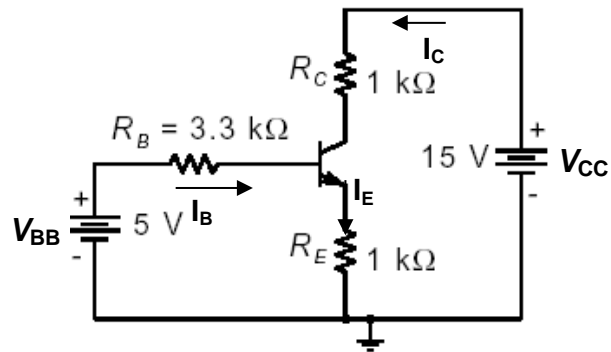


detaljna električna šema

➤ Primer polarizacije pojačavača u sprezi ZE



električna šema



ekvivalentno kolo

Primenom Tevenenove teoreme na kolo za polarizaciju baze tranzistora, koje čine baterija V_{CC} i otpornici R_1 i R_2 , dobijamo ekvivalentno kolo sa dve baterije za polarizaciju V_{CC} i V_{BB} .

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{5[\text{K}\Omega]}{10[\text{K}\Omega] + 5[\text{K}\Omega]} 15[\text{V}] = \frac{5}{15} \cdot 15[\text{V}] = 5[\text{V}],$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10\text{K} \cdot 5\text{K}}{10\text{K} + 5\text{K}} = \frac{50\text{K}}{15} = \frac{10}{3} \text{K} = 3.3[\text{K}\Omega].$$

Usvajajući da je $\beta = 100$ i $V_{BE} = 0.7[\text{V}]$ dobijamo:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = 41.2[\mu\text{A}] \Rightarrow I_C = \beta \cdot I_B = 4.12[\text{mA}]$$

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \beta)I_B = 4.16[\text{mA}] \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 6.72[\text{V}].$$

➤ Stabilnost polarizacije

Položaj mirne radne tačke treba učiniti što manje zavisnim od promene koeficijenta strujnog pojačanja β sa promenom tranzistora (zamena jednog tranzistora drugim) ili sa promenom radne temperature.

Ubacivanjem otpornika R_E u kolo emitera za kolektorsku struju se dobija:

$$I_C = \beta \cdot I_B = \beta \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta)R_E}.$$

Bez otpornika R_E kolektorska struja bi bila

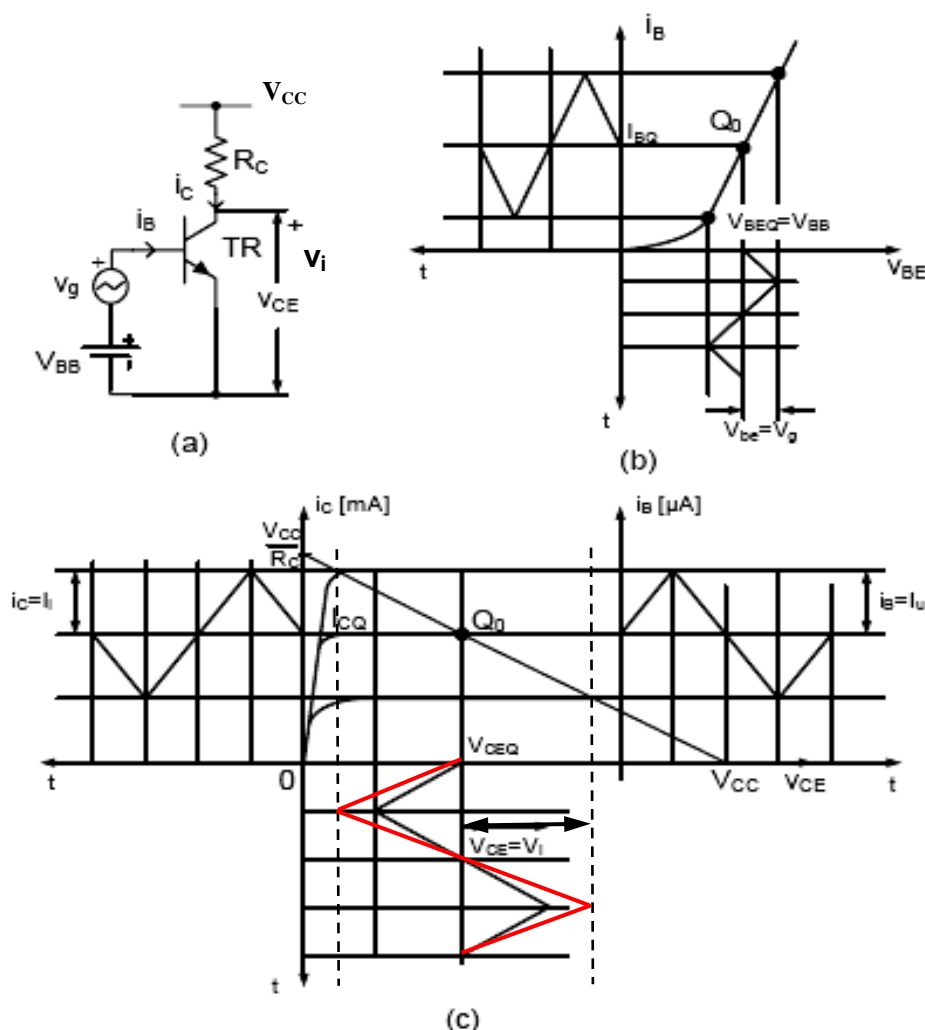
$$I_C = \beta \cdot I_B = \beta \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \text{ i direktno bi zavisila od promene vrednosti } \beta.$$

Da bi promena struje I_C bila što manje zavisna od β potrebno je da važi

$(1 + \beta) \cdot R_E \gg R_B$, što nije teško postići.

• Analiza rada pojačavača u spoju ZE

Grafički metod

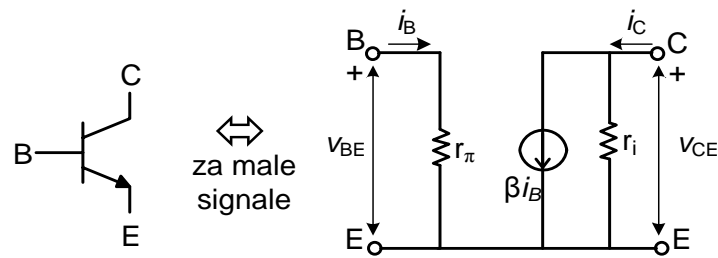


- Polarizacijom se tranzistor dovodi u radni režim koji omogućava odgovarajući odziv na pobudu, u našem slučaju direktni aktivni režim.
- Pobuda je mali, vremenski promenljivi, ulazni signal v_g koji treba pojačati.

Analitički metod:

1. Rešavanjem kola u statičkom režimu (primenom modela za velike signale) određuje se jednosmerni režim rada kola – DC analiza. Za sve nelinearne, poluprovodničke komponente, potrebno je odrediti njihove mirne radne tačke. U našem slučaju, potrebno je odrediti položaj mirne radne tačke Q_0 tranzistora.
2. Svaku nelinearnu komponentu treba zameniti njenim modelom za male signale u okolini mirne radne tačke. U našem slučaju, tranzistor TR treba zameniti modelom za male signale u okolini Q_0 . Zatim rešiti kolo za male signale – AC analiza.
3. Odziv na pobudu se dobija kao zbir jednosmerne-DC i naizmenične-AC komponente izlaznog signala.

- **Model tranzistora za male signale u spoju ZE**



hibridni π model bipolarnog tranzistora za male signale

Parametar r_π je dinamička otpornost direktno polarisanog spoja BE u okolini mirne radne tačke Q_0 . Polazeći od izraza za dinamičku otpornost direktno polarisanog PN spoja Baza Emiter:

$$\frac{di_B}{dv_{BE}} = \frac{d}{dv_{BE}} \left[I_S \left(e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \right] = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \cdot \frac{1}{V_T} = \frac{I_{BQ}}{V_T} = g_\pi = \frac{1}{r_\pi}, \text{ dobijamo}$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_{BQ}} = \frac{V_T}{I_{CQ} / \beta} = \frac{\beta \cdot V_T}{I_{CQ}}.$$

Vrednost otpornosti r_π u ulaznom kolu zavisi od položaja mirne radne tačke Q, tj. od struje baze I_{BQ} (i struje kolektora I_{CQ}) u MRT. Vrednosti ovih struja su određene u analizi kola za velike signale - DC analizi.

Parametar β je koeficijent strujnog pojačanja tranzistora (uzima se vrednost za velike signale).

Parametar r_i modeluje tzv. Early-ev efekat, tj. promenu širine baze sa promenom napona V_{CE} (modulacija baze). Zbog ovog efekta, kolektorska struja i_C se menja pri promeni napona v_{CE} i pri konstantnoj baznoj struji i_B .

Izračunava se kao:

$$r_i = \frac{V_A + U_{CEQ}}{I_{CQ}} \approx \frac{V_A}{I_{CQ}}, \text{ jer je } V_A \gg U_{CEQ}, \text{ gde je } V_A \text{ Early-ev napon, koji je tipično reda stotinu volti.}$$

Kako je $i_b = \frac{v_{BE}}{r_\pi}$ to je $\beta i_b = \beta \frac{v_{BE}}{r_\pi} = \frac{\beta}{r_\pi} v_{BE} = g_m v_{BE}$, gde je

$$g_m = \frac{\beta}{r_\pi} = \frac{\beta}{V_T / I_{BQ}} = \frac{\beta I_{BQ}}{V_T} = \frac{I_{CQ}}{V_T}.$$

Tako dolazimo do sledećeg ekvivalentnog modela za male signale

