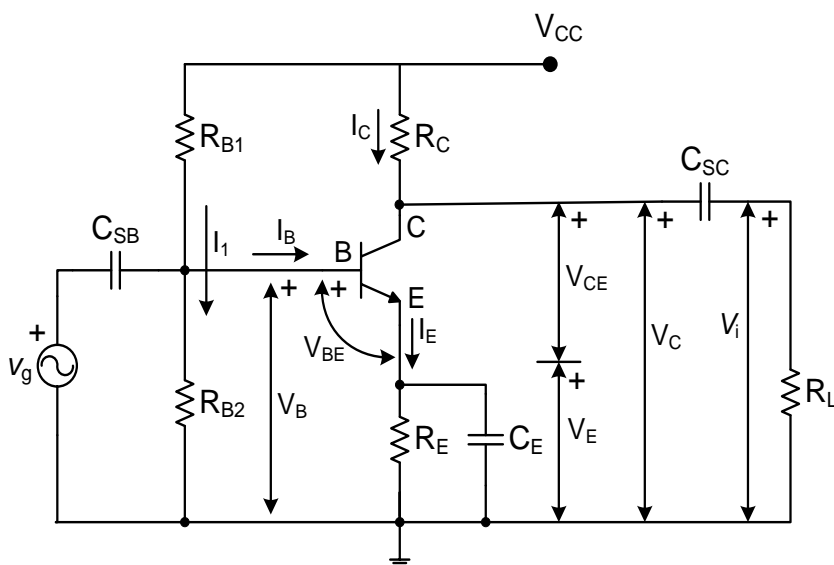


## 7. Pojačavači sa bipolarnim tranzistorima

- Pojačavač u sprezi sa ZE – detaljna analiza

Kondenzator ne provodi jednosmernu struju !

Karakteristika kondenzatora je  $i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$ . Za jednosmerni (vremenski konstantni napon)  $u_c(t) = U_C = \text{const.}$ , pa je  $i_c(t) = C \frac{dU_C}{dt} = 0$ , za svako  $U_C = \text{const.}$



- Stabilizacija mirne radne tačke otpornikom  $R_E$  – negativna povratna sprega

Polarizacija pojačavača je izvedena korišćenjem jedne jednosmerne baterije  $V_{CC}$ . Napon na bazi tranzistora je određen naponskim razdelnikom koga čine baterija  $V_{CC}$  i otpornici  $R_{B1}$  i  $R_{B2}$ . Jednosmerni napon baze prema „masi“ iznosi:  $V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$ . Napon između baze i emitera u direktnom aktivnom režimu je praktično konstantan i iznosi  $V_{BE} = 0.7[\text{V}]$ . Jednosmerni napon emitera je onda:  $V_E = V_B - V_{BE}$ . Kako su napon baze  $V_B$  i napon direktno polarisanog spoja BE  $V_{BE}$  praktično konstantni, to je i emitorski napon  $V_E$  konstantan. Onda je i emitorska struja  $I_E = \frac{V_E}{R_E}$  konstantna. Struja kolektora je praktično jednaka struji emitera, jer je  $I_E \approx I_C + I_B$ , a bazna struja  $I_B = I_C / \beta$  je mnogo manja od kolektorske struje. Sledi da je i kolektorska struja konstantna.

Ako iz nekog razloga (povećanje temperature ili promene  $\beta$  faktora zbog zamene tranzistora) kolektorska struja  $I_C$  poraste, doći će do porasta emitorske struje  $I_E$ . Porast struje emitera uzrokuje porast napona na emiteru  $V_E = I_E R_E$ , pa zbog konstantnog napona na bazi  $V_B$  dolazi do pada napona na direktno polarisanom BE spoju,  $V_{BE} = V_B - V_E$ . Smanjivanje

napona direktne polarizacije BE spoja  $V_{BE}$  dovodi do smanjivanja struje baze a zatim i struje emitera,  $i_E = I_{ES}[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1]$ , što znači i direktnog smanjivanja struje kolektora.

U suprotnom, smanjivanje struje kolektora dovodi do smanjivanja struje emitera, pa emitterski napon pada. Pad napona na emiteru uslovljava porast napona spoja BE  $V_{BE}$ , što prema prethodnom povećava struju baze i struju emitera, a samim tim i kolektora.

Dakle, otpornikom  $R_E$  se primenom mehanizma negativne povratne sprege reguliše struja kolektora i položaj mirne radne tačke tranzistora.

- Uloga kondenzatora  $C_E$  u emitorskom kolu

Kako struja kolektora treba da prati promenu malog, naizmeničnog, pobudnog napona  $v_g$  koji se dovodi na bazu tranzistora, to opisano kolo za stabilizaciju mirne radne tačke ne treba da sprečava promenu naizmenične komponente kolektorske struje. Zato se paralelno otporniku  $R_E$  vezuje kondenzator velikog kapaciteta  $C_E$  (reda 100[μF]), koji za brze promene napona na emiteru predstavlja praktično kratak spoj.

Reaktansa (reaktivna otpornost) kondenzatora je  $X_C = 1/(\omega C)$ , gde je  $\omega = 2\pi f$  kružna učestanost napona i struje kondenzatora. Za dovoljno brze promene napona i struje kondenzatora,  $\omega$  je veliko ( $\omega \rightarrow \infty$ ), jer brze promene karakteriše visoka frekvencija, pa reaktansa kondenzatora  $X_C$  teži nuli.

Na taj način je za naizmeničnu komponentu napona i struje emitera, otpornik  $R_E$  praktično kratko prespojen na „masu“ i ne utiče na pojačavanje naizmeničnog pobudnog signala.

- Uloga sprežnih kondenzatora na ulazu  $C_{SB}$  i izlazu  $C_{SC}$  pojačavača

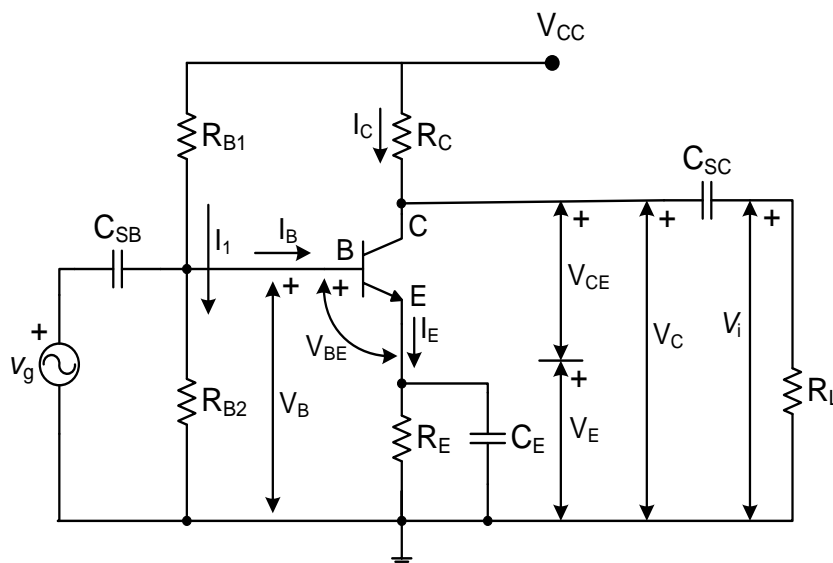
Preko sprežnog kondenzatora na ulazu  $C_{SB}$  priključen je pobudni, naizmenični napon  $v_g$  na bazu tranzistora. Ovim kondenzatorom su pobudni generator  $v_g$  i ulaz pojačavača - napon  $v_{BE}$  kratko spojeni za naizmenični signal, ali su istovremeno razdvojeni za jednosmerni signal. Na taj način, baza tranzistora nije na „masi“ za jednosmerni signal (preko male unutrašnje otpornosti pobudnog generatora).

Sprežni kondenzator na izlazu  $C_{SC}$  blokira jednosmernu komponentu napona kolektora, pa tako izlazni napon iz pojačavača  $v_i$  sadrži samo pojačanu naizmeničnu komponentu izlaznog napona, što i jeste bio cilj.

- Proračun komponenti pojačavača

Neka je  $R_L$  otpornost potrošača priključenog na izlaz pojačavača. Usvojimo da je napon baterije za napajanje  $V_{CC} = 10[V]$  i da je otpornost u kolu kolektora  $R_C = 2[k\Omega]$ . Jednosmerni napon na emiteru treba da bude u opsegu 10–30% napona napajanja. Tako se obezbeđuje dobra stabilizacija radne tačke i sprečava veći gubitak napona napajanja na otporniku  $R_E$ . Usvojimo  $V_E = 2[V]$ . Sada je zbir padova napona na otporniku  $R_C$  i tranzistoru  $V_{CE}$  ukupno

8[V], jer je  $V_{CC} = V_E + V_{CE} + R_C I_C$ . Neka su, dalje, padovi napona na otporniku  $R_C$  i tranzistoru  $V_{CE}$  jednaki i iznose po 4[V]. Tako napon na kolektoru  $V_C$  može da se povećava ili snižava za 4[V], pa se na izlazu dobija relativno veliki naizmenični napon.



Struja kolektora je onda  $I_C = 4[V]/R_C = 4[V]/2[k\Omega] = 2[mA]$ . To je istovremeno i struja emitera  $I_E \approx I_C$ , pa se za vrednost otpornika u emiteru dobija  $R_E = V_E / I_E = 2[V]/2[mA] = 1[k\Omega]$ .

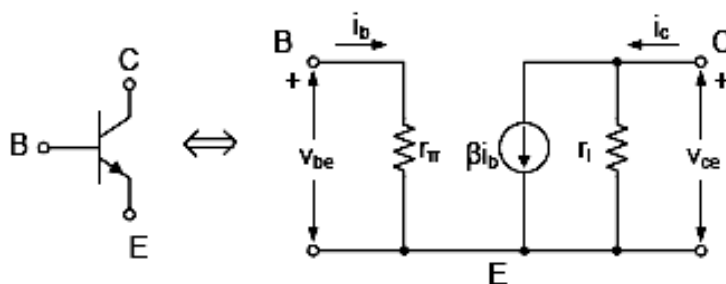
Jednosmerna struja baze je onda  $I_B = I_C / \beta = 2[mA]/100 = 20[\mu A]$ , gde je usvojeno da je koeficijent strujnog pojačanja upotrebljenog tranzistora  $\beta = 100$ . Struja naponskog razdelnika u kolu baze  $I_1$ , treba da bude barem 5 puta veća od bazne struje tranzistora  $I_B$ , tako da eventualna promena bazne struje  $I_B$  ne utiče u znatnoj meri na napon baze  $V_B$ . Usvojimo  $I_1 = 5I_B = 5 \cdot 20[\mu A] = 100[\mu A]$ . Napon na bazi u mirnoj radnoj tački će onda biti  $V_B = V_E + V_{BE} = 2[V] + 0.7[V] = 2.7[V]$ . Sada je  $R_{B2} = V_B / I_1 = 2.7[V]/100[\mu A] = 27[k\Omega]$ . Otpornost  $R_{B1}$  se određuje iz uslova  $V_B + I_1 R_{B1} = V_{CC}$  i iznosi  $R_{B1} = (V_{CC} - V_B) / I_1 = (10[V] - 2.7[V]) / 100[\mu A] = 73[k\Omega]$ . Kako ovo nije standardna otpornost, usvojimo  $R_{B1} = 75[k\Omega]$ .

Ovom promenom neznatno se menja položaj mirne radne tačke, kao i jednosmerne vrednosti svih napona i struja (DC – režim pojačavača). Međutim, nama zapravo i nije potreban tačan proračun, jer sve upotrebljene komponente imaju toleranciju vrednosti od 5 – 10% , koja mnogo više utiče na realni položaj radne tačke.

- Proračun pojačanja napona, struje i snage

Mali, naizmenični, pobudni napon  $v_g$  pojačava se tako što izaziva promenu napona direktno polarisanog spoja  $v_{BE}$ . Promena napona  $v_{BE}$  izaziva znatno veću promenu ulazne, bazne struje tranzistora  $i_B$ . Promena bazne struje višestruko se multiplicira velikim  $\beta$  faktorom u promenu kolektorske struje  $i_C$ , koja na otporniku  $R_C$  pravi znatno veću promenu izlaznog napona  $v_i$ , nego što je bila promena ulaznog napona  $v_g$ .

U okolini mirne radne tačke, tranzistor se može predstaviti ekvivalentnim kolom za male signale.



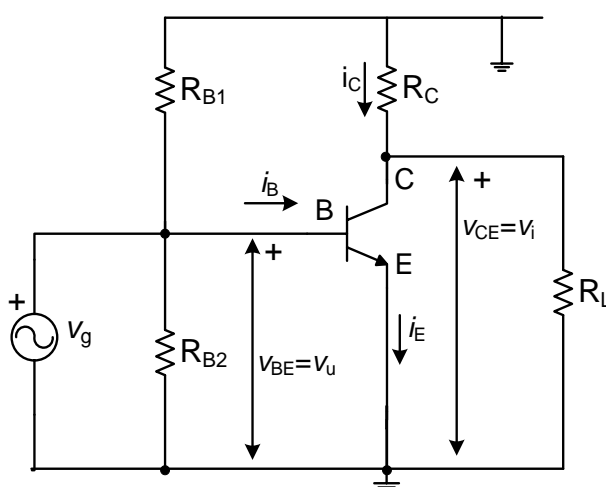
Parametri ovog kola određuju se na osnovu jednosmerne DC analize pojačavača (videti 6 Bipolarni tranzistori – model tranzistora za male signale).

- Ulazna (dinamička) otpornost  $r_\pi = \frac{dv_{BE}}{di_B} \Big|_Q = \left[ \frac{di_B}{dv_{BE}} \Big|_Q \right]^{-1} = \frac{V_T}{I_{BQ}}$ , gde je  $V_T = kT / e = 26[\text{mV}]$ ,  $I_{BQ}$  je jednosmerna struja baze u mirnoj radnoj tački (tipično reda  $\mu\text{A}$ ). Tipična vrednost parametra  $r_\pi$  je reda  $100[\Omega]$  do nekoliko  $[\text{k}\Omega]$ .
- Koeficijent strujnog pojačanja u opsegu  $\beta = 100 - 500$ .
- Izlazna otpornost  $r_i = \frac{V_A + U_{CEQ}}{I_{CQ}} \approx \frac{V_A}{I_{CQ}}$ , gde je  $V_A$  Early-ev napon, a  $I_{CQ}$  jednosmerna struja kolektora u radnoj tački. Tipično  $r_i \approx 100[\text{k}\Omega]$ .

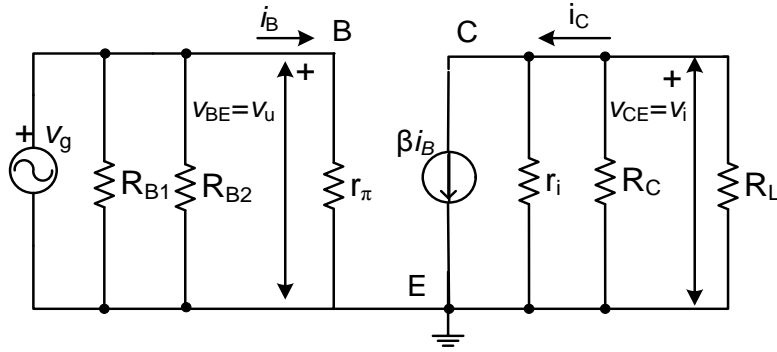
### **Pretpostavke:**

1. Idealni jednosmerni izvor napajanja  $V_{CC}$  predstavlja kratak spoj za naizmeničnu struju. Nakon poništavanja elektromotorne sile izvor se kratko prespaja na masu.
2. Svi kondenzatori u kolu, na srednjim i visokim učestanostima, mogu se zameniti kratkim spojem jer im je impedansa zanemarljivo mala.

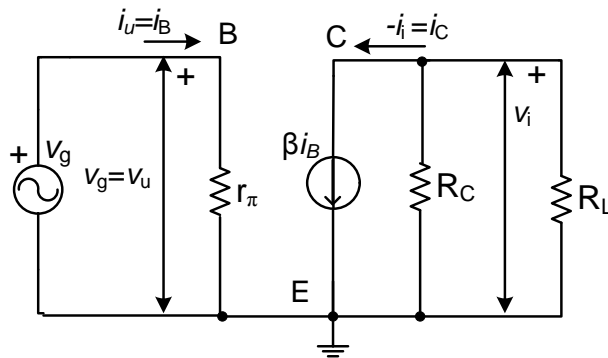
Pod navednim uslovima pojačavač sa ZE se može predstaviti sledećim ekvivalentnim kolom za male, naizmenične signale:



Nakon zamene tranzistora hibridnim  $\pi$  modelom za male signale dobijamo:



Otpornici  $R_{B1}$  i  $R_{B2}$  i ulazna otpornost tranzistora  $r_\pi$  su vezane paralelno. Kako su  $R_{B1}, R_{B2} \gg r_\pi$ , to je njihova ekvivalentna otpornost samo  $r_\pi$ . Otpornik  $R_C$  i izlazna otpornost tranzistora  $r_i$  su takođe vezani paralelno. Kako je  $r_i \gg R_C$ , to je ekvivalentna otpornost u izlaznom kolu samo  $R_C$ .



Napon na potrošaču je  $v_i = -i_c \cdot (R_C \parallel R_L)$ . Kako je  $i_c = \beta \cdot i_B$  i  $i_B = v_g / r_\pi$  to je naponsko pojačanje pojačavača:

$$A_V = \frac{v_i}{v_u} = \frac{-i_c \cdot (R_C \parallel R_L)}{v_u} = -\frac{\beta i_B (R_C \parallel R_L)}{v_u} = -\frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{r_\pi} \cdot \frac{v_u}{r_\pi}, \text{ odnosno}$$

$$A_V = \frac{v_i}{v_u} = -\frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{r_\pi}.$$

Naponsko pojačanje u praznom hodu pojačavača (za  $R_L \rightarrow \infty$ ) je onda

$$A_V = \frac{v_i}{v_u} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi}.$$

Za  $r_\pi = 4.5[\text{k}\Omega]$  i  $\beta = 330$  uz  $R_C = 2[\text{k}\Omega]$  dobija se naponsko pojačanje u praznom hodu:

$$A_V = \frac{v_i}{v_u} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} = -\frac{330 \cdot 2[\text{k}\Omega]}{4.5[\text{k}\Omega]} = -147.$$

Naponsko pojačanje je negativno što znači da pojačavač obrće fazu pobudnog signala. Takođe, pojačanje u prisustvu potrošača je uvek manje od pojačanja u praznom hodu i zavisi od otpornosti potrošača.

Strujno pojačanje, definisano kao količnik izlazne struje kroz paralelnu vezu  $R_C$  i  $R_L$  (to je zapravo struja  $-i_c$ ) i ulazne struje kroz pobudu ( $i_B$ ) je onda:

$$A_I = \frac{i_i}{i_u} = \frac{-i_C}{i_B} = -\beta = -330.$$

Pojačanje snage u praznom hodu kao količnik snage na izlazu i ulazu je onda:

$$A_P = \frac{v_i \cdot i_i}{v_u \cdot i_u} = \frac{v_i (-i_C)}{v_g i_B} = \frac{v_i}{v_g} \frac{-i_C}{i_B} = A_V \cdot A_I \approx 48500.$$

Naravno, u prisustvu potrošača, naponsko, strujno i pojačanje snage su znatno manji i zavise od otpornosti potrošača.

- Ulazna i izlazna otpornost pojačavača

Ulazna otpornost se definiše kao količnik ulaznog napona i ulazne struje:

$$R_U = \frac{v_U}{i_U} = (R_{B1} \parallel R_{B2}) \parallel r_\pi \approx r_\pi, \text{ jer su u praksi otpornosti } R_{B1}, R_{B2} \gg r_\pi.$$

Ulazna otpornost je mala, reda [kΩ] ili manje.

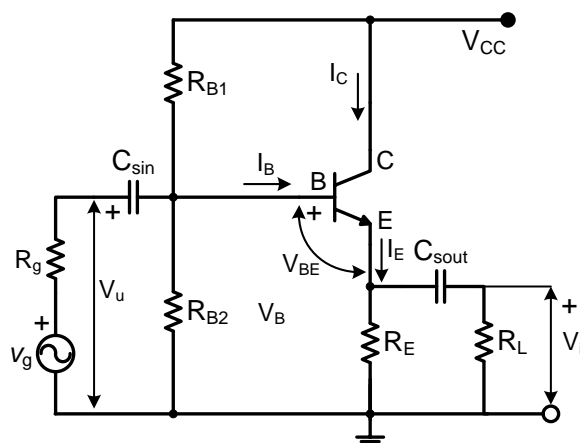
Izlazna otpornost se definiše kao količnik izlaznog napona i izlazne struje

$$R_I = \frac{v_i}{i_i} = R_C \parallel r_i \approx R_C, \text{ jer je } r_i \gg R_C \text{ za većinu praktičnih primena.}$$

Napomena: Pri određivanju otpornosti koja se „vidi“ između dve tačke u kolu potrebno je poništiti sve nezavisne pobude u tom kolu.

- Pojačavač u sprezi sa ZC – emitter follower

Preko baterije za polarizaciju  $V_{CC}$  kolektor je vezan na „masu“ za naizmenični signal, pa je kolektor zajednička elektroda. Ulaz (pobuda) pojačavača je između baze i kolektora, a izlaz između emitera i kolektora.

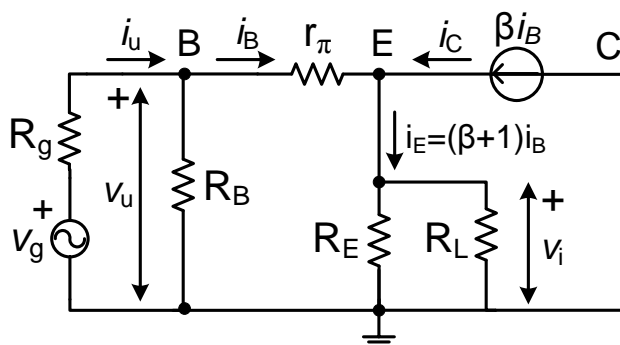


Naponsko pojačanje stepena je nešto manje od 1:

$$A_V = \frac{v_i}{v_u} = \frac{(\beta + 1)i_B \cdot (R_E \parallel R_L)}{i_B \cdot r_\pi + (\beta + 1)i_B \cdot (R_E \parallel R_L)} = \frac{(\beta + 1)(R_E \parallel R_L)}{r_\pi + (\beta + 1)(R_E \parallel R_L)} \approx 1.$$

Strujno pojačanje:  $A_I = \frac{i_i}{i_u} \approx \frac{(1 + \beta)i_B}{i_B} \approx \beta$ , jer je struja  $i_u \approx i_B$ , uz tipično  $R_B \gg r_\pi$ .

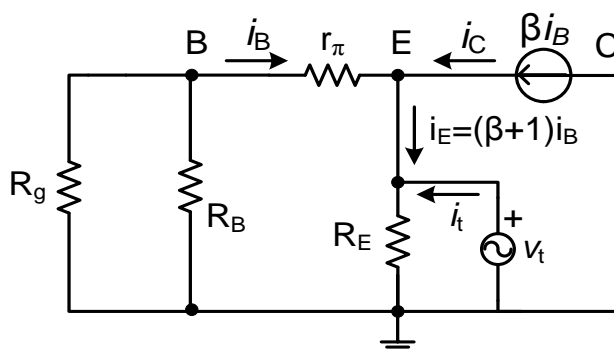
Ekvivalentna šema pojačavača za male signale, uočiti  $R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$ .



Ulazna otpornost stepena sa ZC se izračunava preslikavanjem paralelne veze otpornika  $R_E \parallel R_L$  iz emiterkog u bazno kolo. Pošto je struja emitara,  $i_E = (\beta + 1)i_B$ , preslikana otpornost u bazno kolo iznosi  $(\beta + 1)(R_E \parallel R_L)$ . Sada je ulazna otpornost

$R_U = v_u / i_u = R_B \parallel [r_\pi + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)]$ . Ulazna otpornost je velika ako je  $R_B$  veliko, što važi u većini praktičnih aplikacija.

Izlazna otpornost stepena sa ZC je mala u praktičnim primenama (određena je preslikavanjem otpornosti  $r_\pi + (R_g \parallel R_B)$  iz baznog u emitorsko kolo):



$R_{IZ} = R_E \parallel \left[ \frac{r_\pi + (R_g \parallel R_B)}{(1 + \beta)} \right]$ . Izvođenje relacije primenom testnog generatora:

$$i_t + i_E = \frac{v_t}{R_E}, i_t + (1 + \beta)i_B = \frac{v_t}{R_E}, i_B = \frac{-v_t}{r_\pi + R_g \parallel R_B}, i_t + (1 + \beta) \frac{-v_t}{r_\pi + R_g \parallel R_B} = \frac{v_t}{R_E}$$

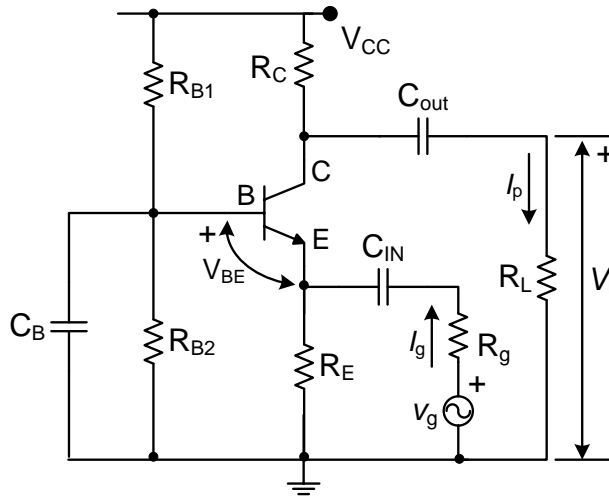
$$i_t = v_t \left[ \frac{1}{(r_\pi + R_g \parallel R_B) / (1 + \beta)} + \frac{1}{R_E} \right], \frac{1}{R_{iz}} = \frac{i_t}{v_t} = \frac{1}{(r_\pi + R_g \parallel R_B) / (1 + \beta)} + \frac{1}{R_E}, \text{ tj.}$$

$$R_{IZ} = R_E \parallel \left[ \frac{r_\pi + (R_g \parallel R_B)}{(1 + \beta)} \right].$$

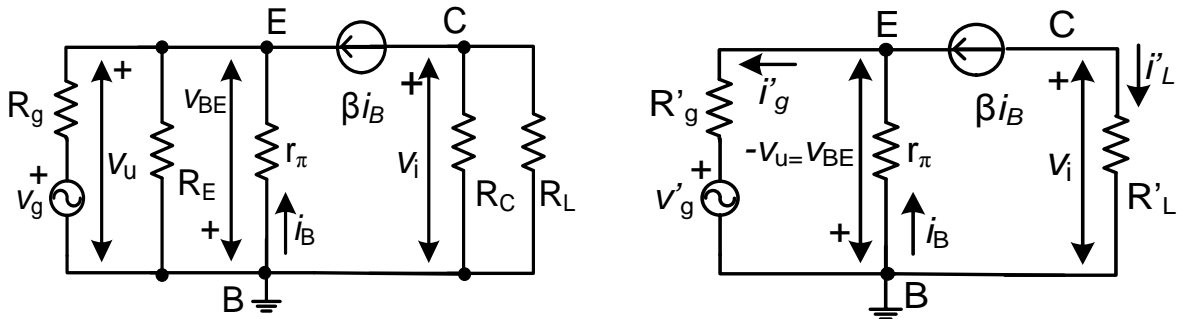
Pojačavač sa ZC ima naponsko pojačanje blisko 1, ne obrće fazu izlaznog napona, ima veliku ulaznu i malu izlaznu otpornost. Koristi se kao razdvojni stepen za prilagođenje impedansi između dva pojačavačka stepena.

### • Pojačavač u sprezi sa zajedničkom bazom (ZB)

Preko spreznog kondenzatora  $C_B$  baza je vezana na masu za naizmenični signal i predstavlja zajedničku elektrodu za ulazno i izlazno kolo. Ulaz (pobuda) pojačavača je u emiteru, a izlaz između kolektora i mase.



Ekvivalentna šema pojačavača sa ZB za male signale smatrajući da  $r_i \rightarrow \infty$ .



Idealna baterija  $V_{CC}$  nulte unutrašnje otpornosti je nakon poništavanja elektromotorne sile kratko prespojena na masu, a svi sprežni kondenzatori su zamenjeni kratkim vezama. Na šemi desno je  $v'_g = \frac{R_E}{R_E + R_g} v_g$ ,  $R'_g = R_E \parallel R_g$  (dobijeno Tevenenovom teoremom) i

$R'_L = R_L \parallel R_C$ . Izlazni napon  $v_i = i'_L R'_L = -\beta i_B R'_L$ . Napon  $v_{BE} = i_B r_\pi = -v'_g - R'_g i'_g = -v'_g - R'_g (1 + \beta) i_B$ . Iz  $i_B r_\pi = -v'_g - R'_g (1 + \beta) i_B$  dobija se  $i_B [r_\pi + R'_g (1 + \beta)] = -v'_g$ . Zamenom u izraz za izlazni napon dobija se:

$v_i = -\beta i_B R'_L = -\beta R'_L \frac{-v'_g}{r_\pi + R'_g (1 + \beta)} = \frac{\beta R'_L}{r_\pi + R'_g (1 + \beta)} v'_g$ , pa je naponsko pojačanje

$A'_V = \frac{v_i}{v'_g} = \frac{\beta R'_L}{r_\pi + R'_g (1 + \beta)}$ , odnosno  $A_V = \frac{v_i}{v_g} = \frac{\beta R'_L}{r_\pi + R'_g (1 + \beta)} \frac{R_E}{R_E + R_g}$ , tj.

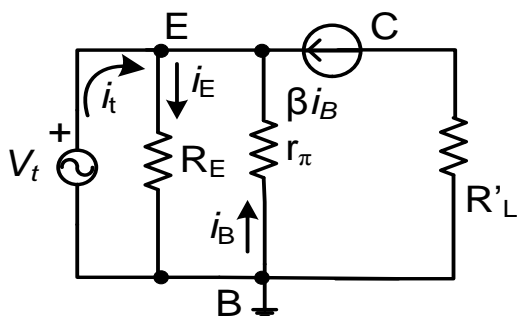
$A_V = \frac{v_i}{v_g} = \frac{\beta R'_L}{r_\pi + R'_g (1 + \beta)} \frac{R_E}{R_E + R_g} = \frac{\beta (R_L \parallel R_C)}{r_\pi + (1 + \beta) \left( \frac{R_E R_g}{R_E + R_g} \right)} \frac{R_E}{R_E + R_g} = \frac{\beta (R_L \parallel R_C)}{r_\pi + (1 + \beta) R_g}.$

Pojačavač ne obrće fazu, a naponsko pojačanje je veliko jer tipično  $R_g \rightarrow 0$  i po modulu je jednako pojačanju stepena sa ZE:  $A_V|_{R_g \rightarrow 0} = \frac{v_i}{v_u} = (\beta / r_\pi) (R_L \parallel R_C)$ .



Strujno pojačanje  $A_I = \frac{i'_L}{i'_s} \approx \frac{-\beta i_B}{(1+\beta)i_B} \approx \frac{-\beta}{1+\beta} \approx -1$ .

Ulazna otpornost je vrlo mala:



$$i_B = -v_t / r_\pi, \quad i_E = v_t / R_E$$

$$i_t = i_E - i_B - \beta i_B = i_E - (1+\beta)i_B$$

$$i_t = v_t / R_E - (1+\beta)(-v_t / r_\pi) = \frac{v_t}{R_E} + (1+\beta) \frac{v_t}{r_\pi}$$

$$\frac{i_t}{v_t} = \frac{1}{R_U} = \frac{1}{R_E} + \frac{1}{r_\pi / (1+\beta)}$$

$$R_U = \frac{v_t}{i_t} = R_E \parallel \frac{r_\pi}{1+\beta}.$$

Izlazna otpornost merena u praznom hodu je  $R_I = R_C$ .

Stepen sa ZB ima veliko naponsko pojačanje samo kada je unutrašnja otpornost pobude mala ( $R_g \rightarrow 0$ ), malu ulaznu i veliku izlaznu otpornost.

- Režimi rada tranzistora u zavisnosti od napona polarizacije PN-spojeva**

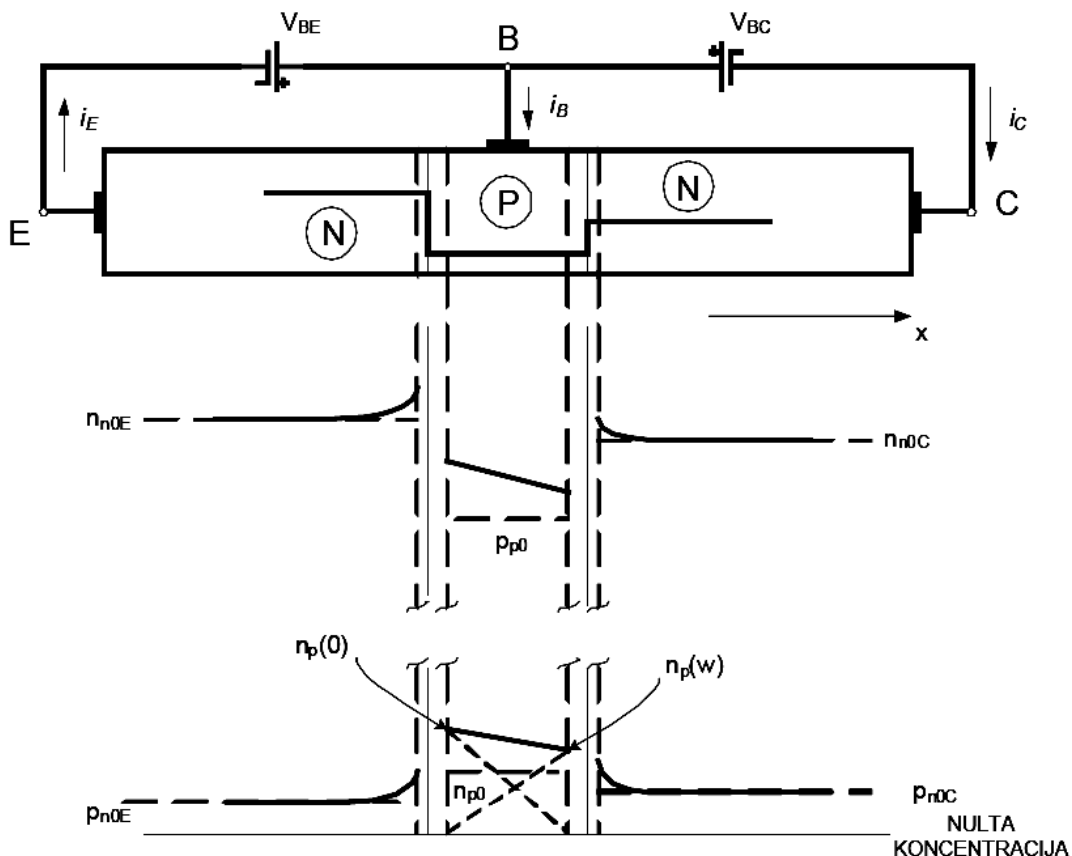
režim rada	spoj E-B	spoj C-B	karakteristike
<b>ZAKOČEN</b>	<b>inverzna</b>	<b>inverzna</b>	<b><math>i_C = i_E = i_B = 0</math></b>
<b>DIREKTNII AKTIVNI</b>	<b>direktna</b>	<b>inverzna</b>	<b>pojačavač</b>
<b>ZASIĆENJE</b>	<b>direktna</b>	<b>direktna</b>	<b><math>v_{CE} \approx 0</math></b>
<b>INVERZNI REŽIM</b>	<b>inverzna</b>	<b>direktna</b>	<b>retka primena</b>

- Režim zasićenja tranzistora**

Bipolarni tranzistor radi u režimu zasićenja kada su oba PN spoja direktno polarisana. U ovom režimu tranzistor nije pojačavačka komponenta.

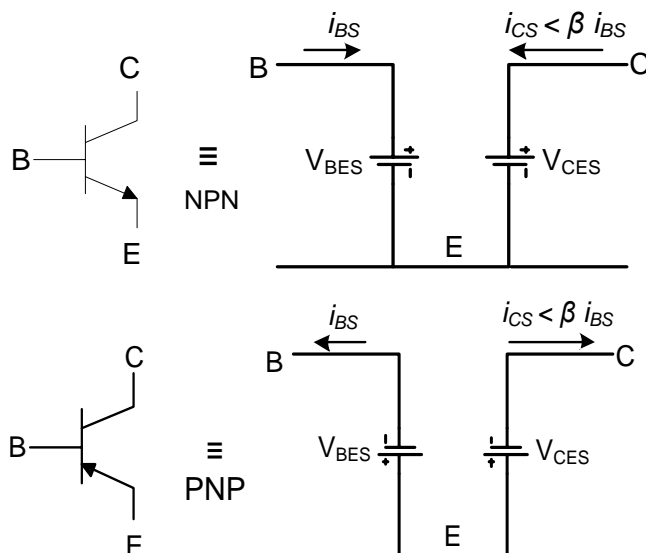
Bazna struja raste jer šupljine neometano prelaze iz baze u emiter, kao i iz baze u kolektor. Takođe, struja kolektora se smanjuje u odnosu na struju u direktnom aktivnom režimu. Zbog toga, sa porastom napona direktne polarizacije spoja baza kolektor, drastično opada strujno pojačanje između struje baze i kolektora.

Režim zasićenja se konstatuje merenjem pozitivnog napona između baze i kolektora  $v_{BC} > V_\gamma$  ili merenjem koeficijenta strujnog pojačanja  $\beta = I_C / I_B$ .



Raspodela koncentracije nosilaca u NPN tranzistoru koji radi u režimu zasićenja (puna linija) i bez polarizacije elektroda (isprekidana linija).

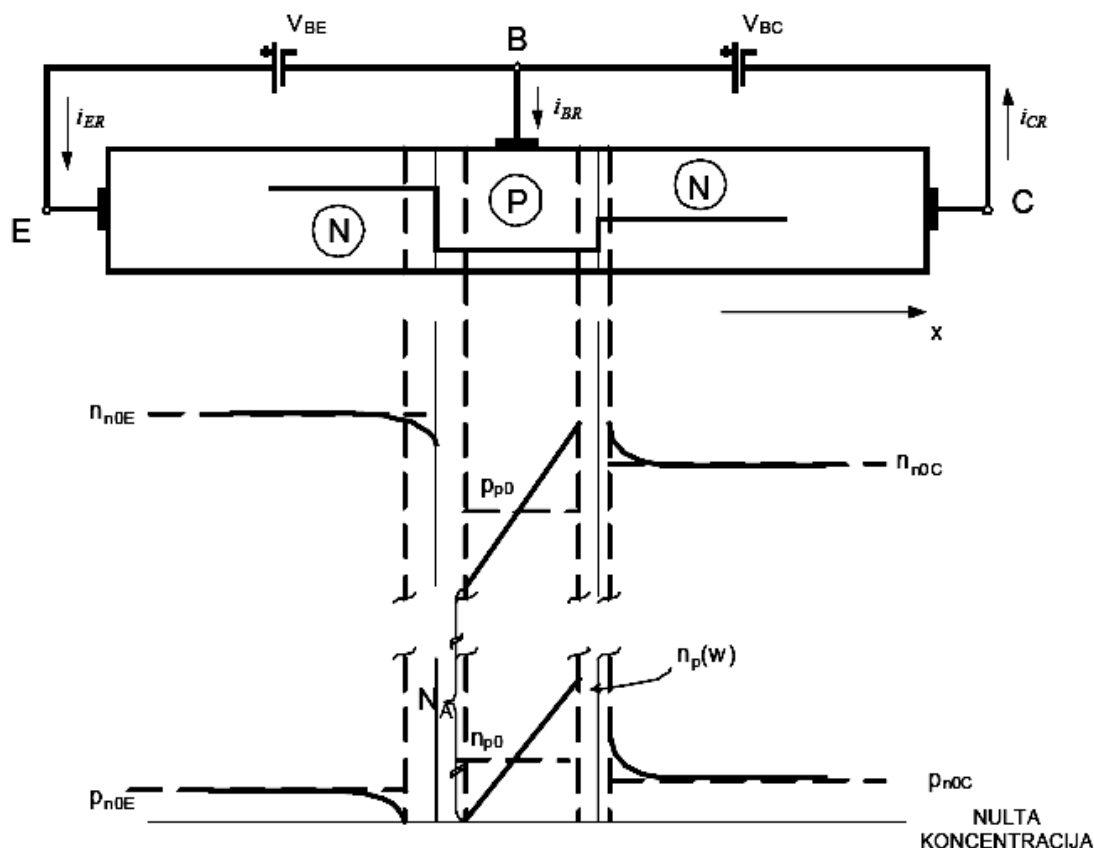
Model tranzistora u režimu zasićenja (saturacije):



Kako je struja direktno polarisanih spojeva BE i BC velika, naponi na njima su približno konstantni i nezavisni od struje u režimu zasićenja. Tipične vrednosti napona saturacije spojeva su  $V_{BES} \approx 0.8[V]$  i  $V_{BCS} \approx 0.6[V]$  zbog razlike u koncentracijama primesa, pa je napon između kolektora i emitera  $V_{CES} \approx 0.2[V]$ . Koristi se u digitalnoj elektronici za definisanje stanja logičke (binarne) nule preko napona  $V_{CES} \approx 0.2[V]$ .

- **Inverzni aktivni režim tranzistora**

Inverzni aktivni režim se ostvaruje inverznom polarizacijom BE spoja i direktnom polarizacijom BC spoja. Praktično, sve je kao u direktnom aktivnom režimu s tim da su kolektor i emitor zamenili uloge. Koeficijent strujnog pojačanja  $\beta$  je vrlo mali ( $\beta_R \approx 0.5$ ), jer je efikasnost spoja kolektor-baza  $\gamma_R$  mnogo manja od efikasnosti emitora  $\gamma$ , zbog slabe dopiranosti BC spoja. Retko se koristi zbog loših pojačavačkih karakteristika.

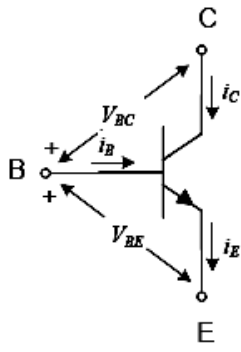


*Raspodela koncentracije nosilaca u NPN tranzistoru koji radi u inverznom aktivnom režimu (puna linija) i bez polarizacije elektroda (isprekidana linija).*

- **Neprovodni režim tranzistora (zakočenje)**

Bipolarni tranzistor je zakočen – neprovodan kada su oba PN spoja inverzno polarisana. U ovom režimu, ako se zanemare izuzetno male struje curenja, između bilo koje dve elektrode tranzistora dobija se otvorena veza. Koristi se u digitalnoj elektronici za definisanje stanja logičke (binarne) jedinice preko napona  $V_{CE} \approx V_{CC}$ .

- **Ebers-Moll-ove jednačine** se koriste za računarsku analizu rada tranzistora za sve režime rada. Indeksi F (forward-napred) i R (reverse-nazad) označavaju smerove struja.



$$i_B = I_{BF} + I_{BR} = I_{SBF} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} + I_{SBR} e^{\frac{v_{BC}}{V_T}} = \frac{I_S}{\beta_F} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} + \frac{I_S}{\beta_R} e^{\frac{v_{BC}}{V_T}}$$

$$i_E = i_{EF} - i_{ER} = \frac{1}{\alpha_F} i_{CF} - \alpha_R i_{CR} = \frac{I_S}{\alpha_F} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - I_S e^{\frac{v_{BC}}{V_T}}$$

$$i_C = i_{CF} - i_{CR} = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - \frac{i_{ER}}{\alpha_R} = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - \frac{I_S}{\alpha_R} e^{\frac{v_{BC}}{V_T}},$$