

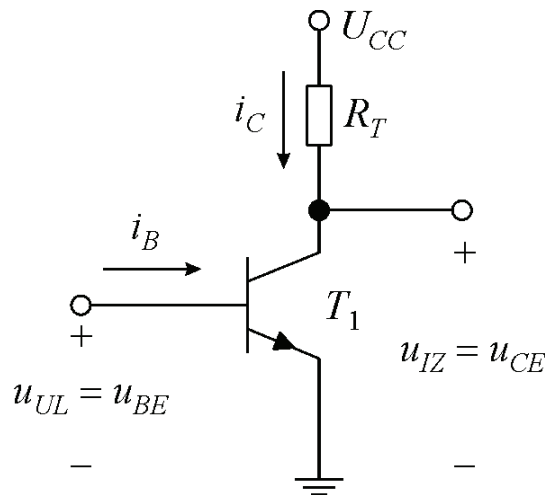
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,  
računalne i inteligentne sustave

# **Elektronika 1**

Ž. Butković, J. Divković Pukšec, A. Barić

## **8. Sklopovi s bipolarnim tranzistorima**

# Osnovni sklop bipolarnog tranzistora



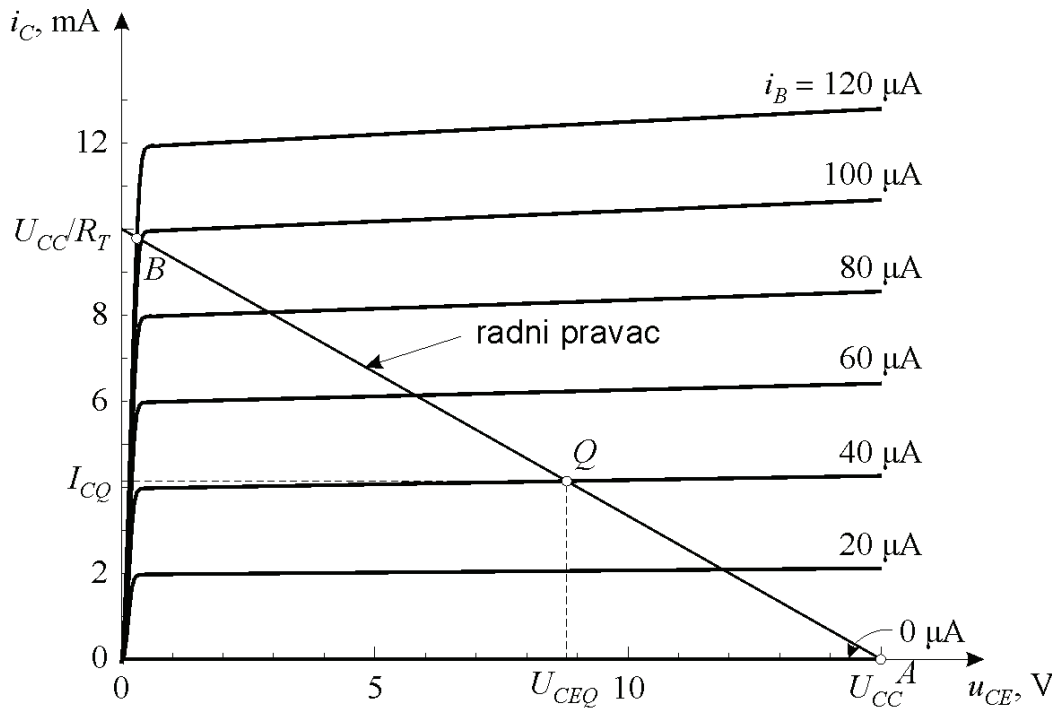
ulazni krug

$$u_{UL} = u_{BE}$$

izlazni krug

$$u_{IZ} = u_{CE} = U_{CC} - R_T i_C$$

# Polje izlaznih karakteristika



$Q$  – statička radna točka

primjer:

$$U_{CC} = 15 \text{ V}, R_T = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$\text{za } u_{BE} = u_{UL} \rightarrow I_{BQ} = 40 \mu\text{A},$$

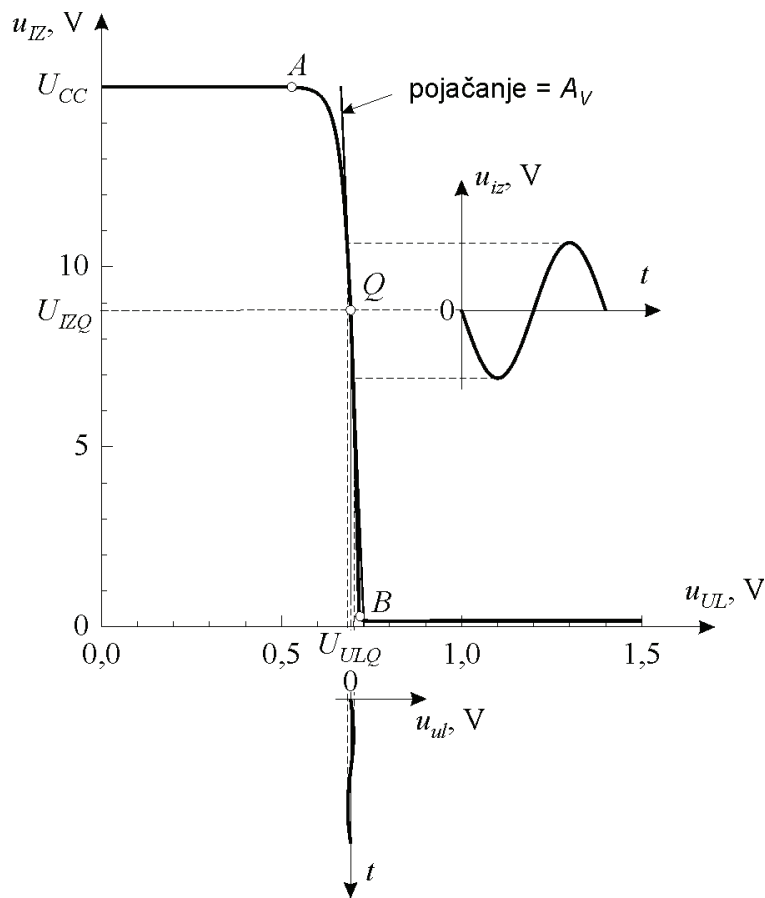
$$I_{CQ} = 4,1 \text{ mA}, U_{CEQ} = 8,8 \text{ V}$$

između  $A$  i  $B$  – normalno  
aktivno područje

točka  $A$  – granica s područjem  
zapiranja

točka  $B$  – granica s područjem  
zasićenja

# Naponska prijenosna karakteristika



naponska prijenosna karakteristika -

$$u_{IZ} = f(u_{UL})$$

za  $u_{UL} = u_{BE} < 0,5 \text{ V} \rightarrow$  struje tranzistora vrlo male;  $i_C \approx 0$ ,  $u_{IZ} = u_{CE} = U_{CC}$

□ između  $A$  i  $B$  – normalno aktivno područje  $\rightarrow$  pojačalo

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{u_{BE}}{U_T}\right) = I_S \exp\left(\frac{u_{UL}}{U_T}\right)$$

$$u_{IZ} = U_{CC} - R_T I_S \exp\left(\frac{u_{UL}}{U_T}\right)$$

□ lijevo od  $A$  i desno od  $B \rightarrow$  sklopka  
primjer:  $U_{ULQ} = 0,69 \text{ V}$ ,  $U_{IZQ} = 8,8 \text{ V}$

# Pojačanja

grafičko očitavanje:

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{-U_{izm} \sin \omega t}{U_{ulm} \sin \omega t} = -\frac{U_{izm}}{U_{ulm}} = -\frac{1,88}{8 \cdot 10^{-3}} = -235$$

analitički izvod:

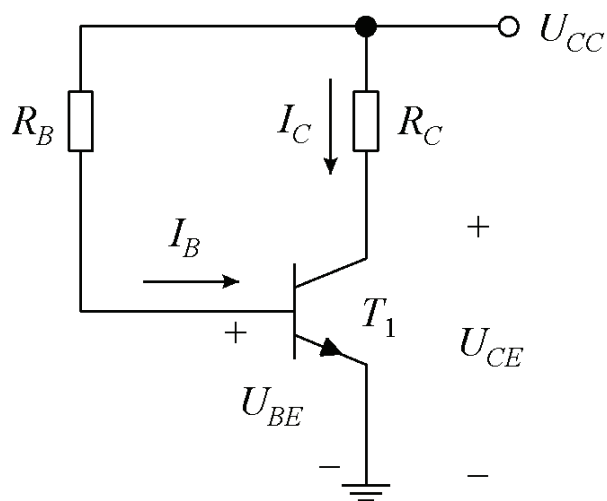
$$A_V \equiv \left. \frac{du_{IZ}}{du_{UL}} \right|_Q = -\frac{R_T}{U_T} I_S \exp\left(\frac{u_{UL}}{U_T}\right) \Big|_Q = -\frac{R_T I_{CQ}}{U_T} = -g_m R_T$$

primjer:  $U_T = 25 \text{ mV}$ ,  $I_{CQ} = 4,1 \text{ mA} \rightarrow g_m = 164 \text{ mA/V}$ ,  $R_T = 1,5 \text{ k}\Omega \rightarrow A_V = -246$

$$A_I \equiv \left. \frac{di_{IZ}}{di_{UL}} \right|_Q = \left. \frac{di_{IZ}}{di_{UL}} \right|_Q = -\left. \frac{di_C}{di_B} \right|_Q = -h_{fe}$$

primjer:  $h_{fe} \approx 100 \rightarrow A_I = -100$

# Podešavanje radne točke stalnom baznom strujom



ulazni strujni krug

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B}$$

$$U_{BEQ} \approx U_\gamma$$

izlazni strujni krug

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_C I_{CQ}$$

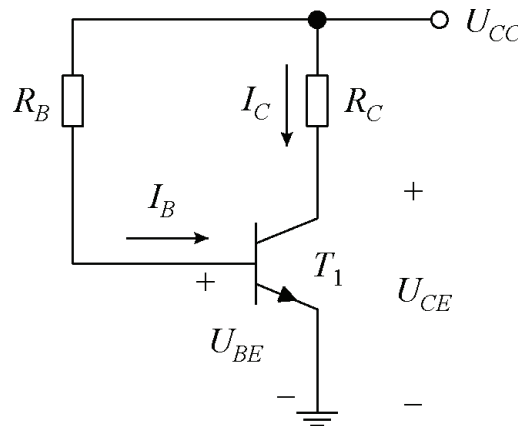
uvjet za normalno aktivno područje

$$U_{CEQ} > U_{BEQ}$$

## Primjer 8.1

U sklopu prema slici napon napajanja je  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ , a otpor  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ .

Parametri tranzistora su  $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$  i  $\beta = 100$ . Odrediti otpor otpornika  $R_B$  uz koji će u statičkoj radnoj točki izlazni napon  $U_{CEQ}$  biti jednak polovici napona napajanja,  $U_{CEQ} = U_{CC}/2$ .



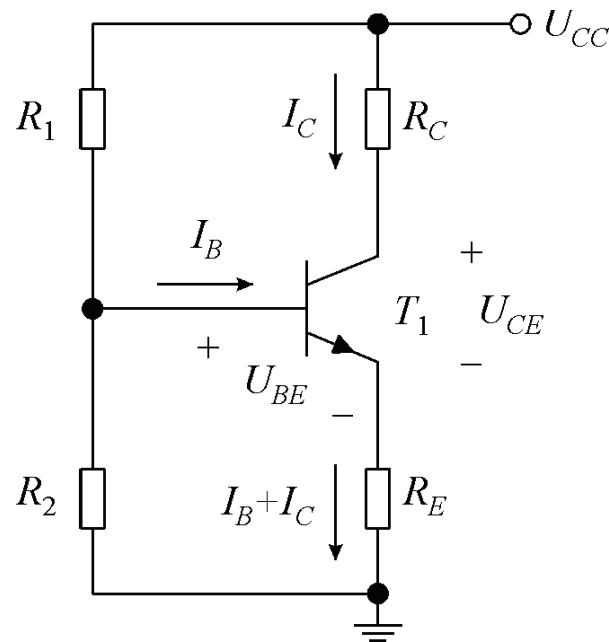
## Primjer 8.2

---

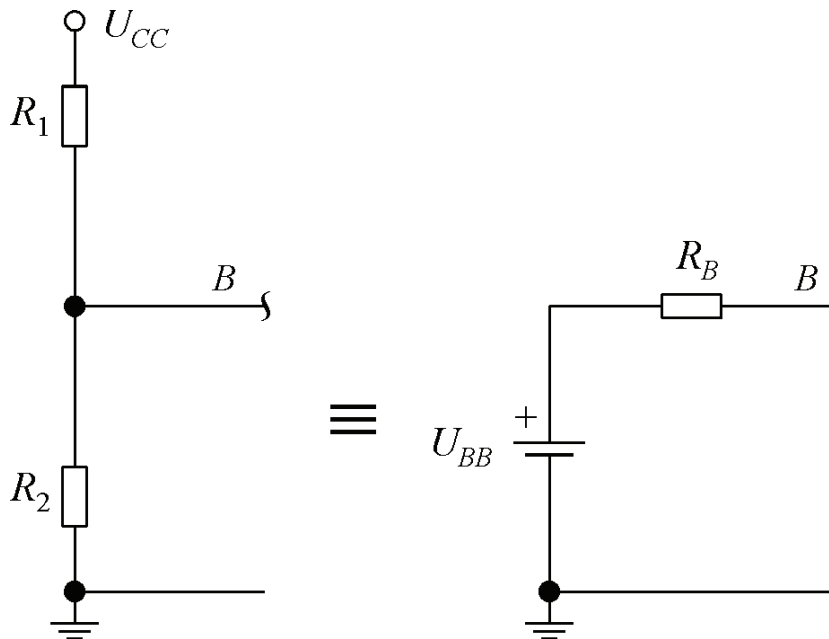
Kada u primjeru 8.1 temperatura naraste s  $25^{\circ}\text{C}$  na  $75^{\circ}\text{C}$  faktor strujnog pojačanja poveća se s  $\beta_1 = 100$  na  $\beta_2 = 150$ . Izračunati nove vrijednosti struja i napona tranzistora u statičkoj radnoj točki na temperaturi od  $75^{\circ}\text{C}$ . Zanemariti struju zasićenja  $I_{CE0}$ , te promjenu napona propusne polarizacije  $U_{BE}$  s temperaturom.



# Stabilizacija radne točke emitterskim otpornikom



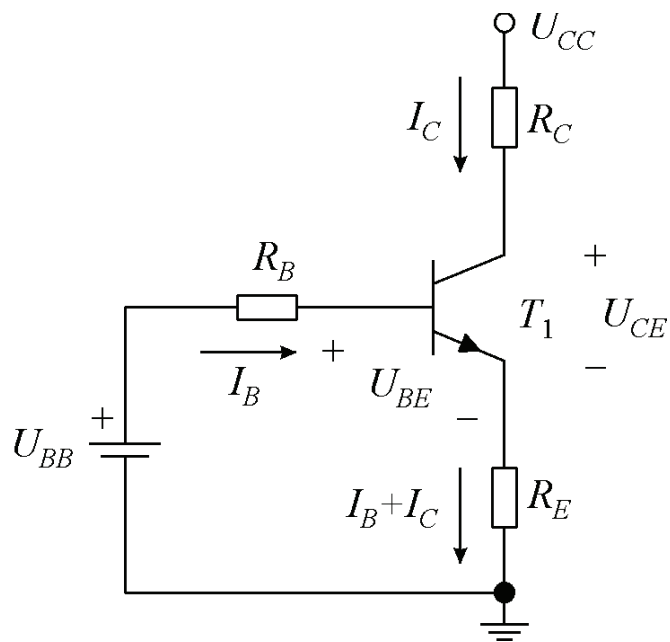
# Nadomještavanje otpornog djelila po Theveninu



$$U_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

# Shema sklopa za statičku analizu



$$U_{BB} = R_B I_B + U_{BE} + R_E (I_B + I_C)$$

u statičkoj radnoj točki

$$U_{BB} = R_B I_{BQ} + U_{BEQ} + (1 + \beta) R_E I_{BQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E} = \frac{U_{BB} - U_\gamma}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

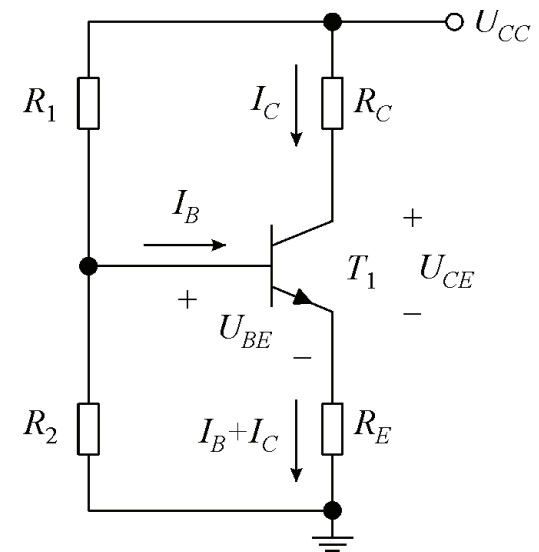
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_C I_{CQ} - R_E (I_{BQ} + I_{CQ}) \approx U_{CC} - (R_C + R_E) I_{CQ}$$

## Primjer 8.3

U sklopu prema slici napon napajanja je  $U_{CC} = 15\text{ V}$ ,  
a otpori su  $R_1 = 11\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 2\text{ k}\Omega$  i  
 $R_E = 500\text{ }\Omega$ .

- Odrediti struje i napone tranzistora u statičkoj radnoj točki za temperaturu od  $25^\circ\text{C}$  na kojoj su parametri tranzistora  $U_\gamma = 0,7\text{ V}$  i  $\beta_1 = 100$ .
- Ponoviti proračun statičke radne točke za temperaturu od  $75^\circ\text{C}$  na kojoj faktor strujnog pojačanja naraste na  $\beta_2 = 150$ . Zanemariti pri tome temperaturnu promjenu napona koljena propusno polariziranog spoja  $U_\gamma = 0,7\text{ V}$ .



# Uvjet za dobru stabilizaciju statičke radne točke

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = \frac{\beta(U_{BB} - U_{BEQ})}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

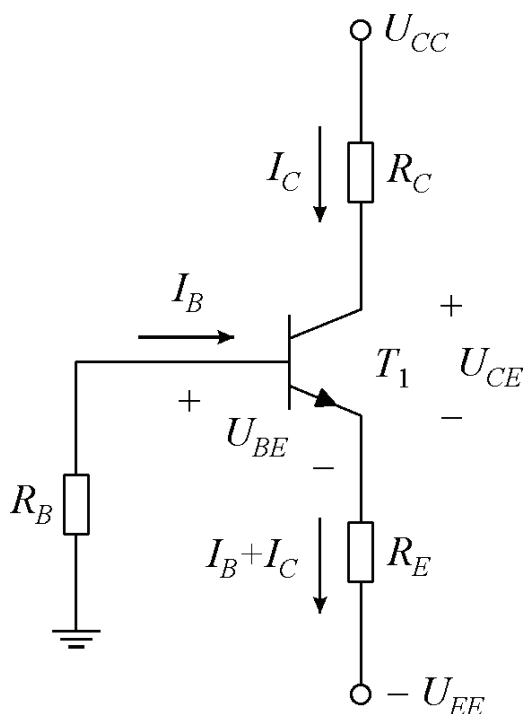
Struja  $I_{CQ}$  neovisna je o  $\beta$  uz  $R_B \ll (1 + \beta) R_E$

$$I_{CQ} \approx \frac{\beta(U_{BB} - U_{BEQ})}{(1 + \beta)R_E} \approx \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_E}$$

Uz  $R_B \ll (1 + \beta) R_E$  baza je na fiksnom potencijalu  $U_{BB}$

$$U_{BB} \approx U_{BE} + R_E I_C$$

# Podešavanje radne točke s dva napona napajanja



jednadžba ulaznog strujnog kruga

$$U_{EE} = R_B I_B + U_{BE} + R_E (I_B + I_C)$$

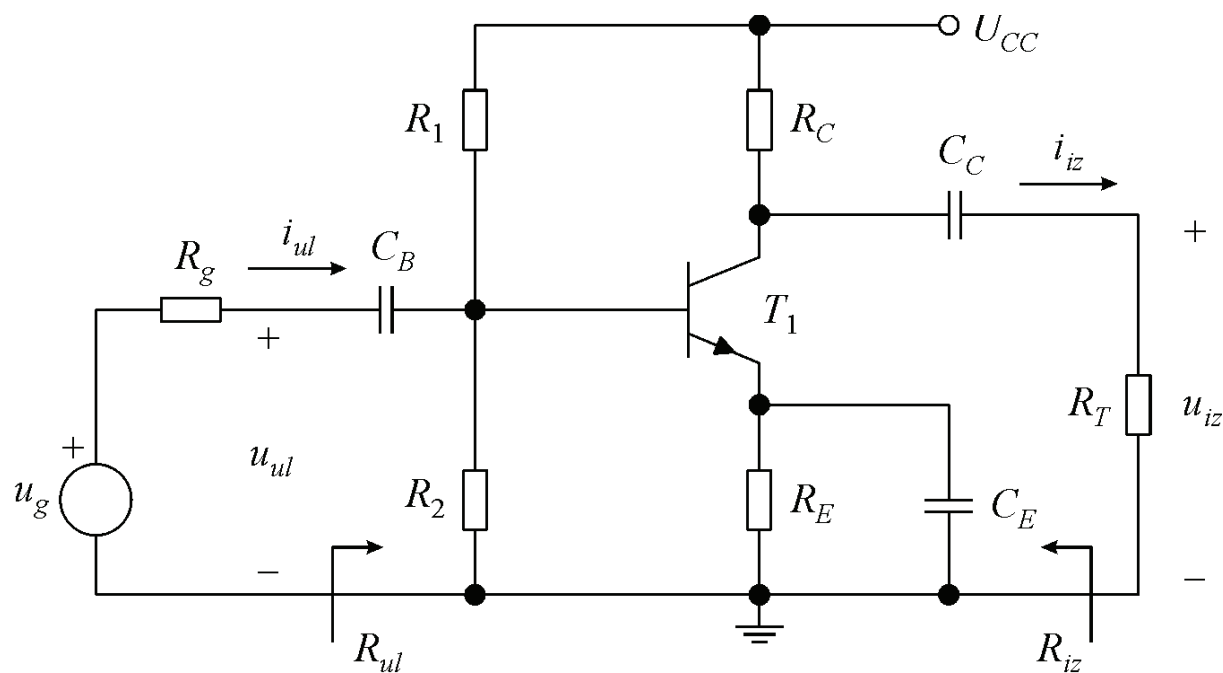
uz  $I_C = \beta I_B$

$$I_B = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

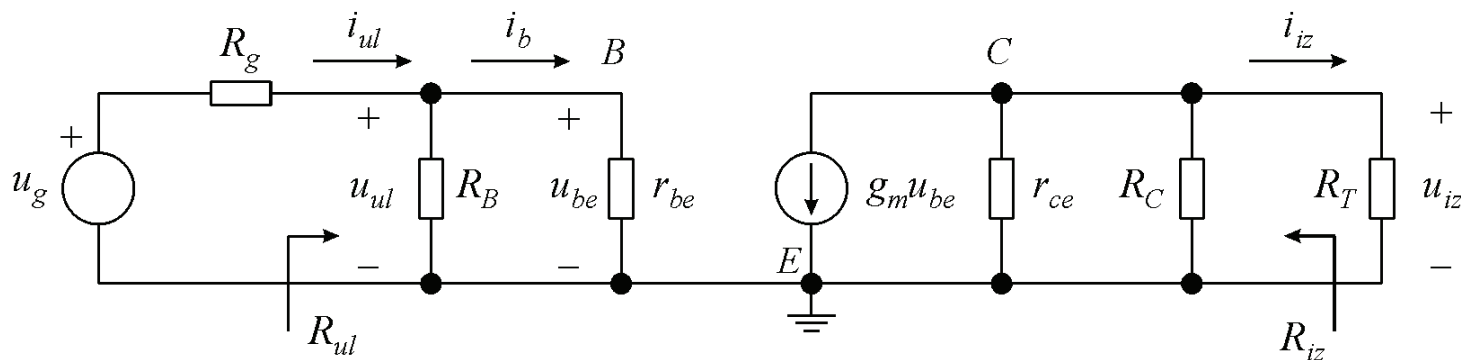
jednadžba izlaznog strujnog kruga

$$U_{CE} = U_{CC} + U_{EE} - (R_C + R_E) I_C$$

# Pojačalo u spoju zajedničkog emitera



# Pojačalo u spoju zajedničkog emitera – naponsko pojačanje



$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

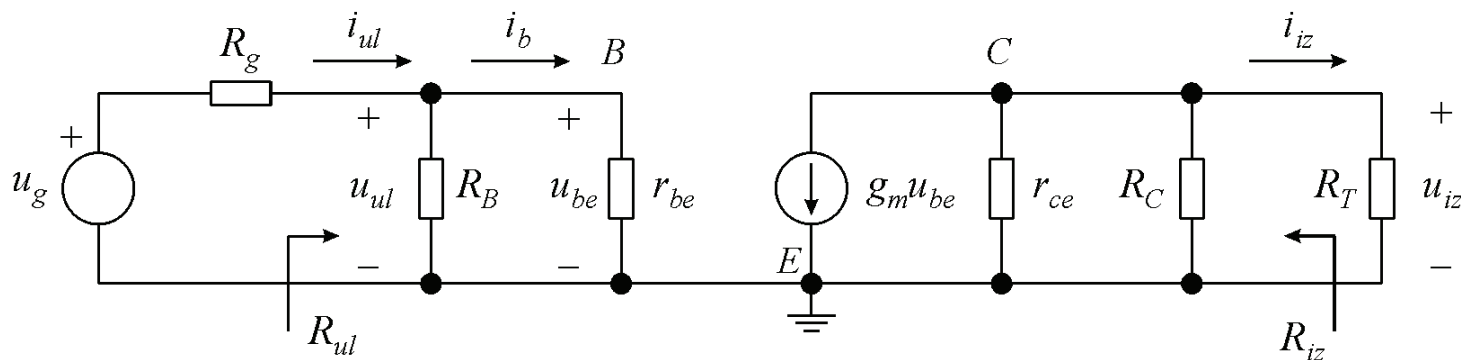
$$u_{iz} = -g_m u_{be} (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_T) \quad u_{ul} = u_{be}$$

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -g_m (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_T) \quad A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \approx -g_m (R_C \parallel R_T)$$

$$\text{uz ovisni izvor } h_{fe} i_b \text{ i uz } g_m = h_{fe} / r_{be} \rightarrow A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \approx -\frac{h_{fe} (R_C \parallel R_T)}{r_{be}}$$



# Pojačalo u spoju zajedničkog emitera – strujno pojačanje



$$i_{iz} = -g_m u_{be} \frac{r_{ce} \parallel R_C}{r_{ce} \parallel R_C + R_T}$$

$$u_{be} = (R_B \parallel r_{be}) i_{ul}$$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = -g_m \frac{r_{ce} \parallel R_C}{r_{ce} \parallel R_C + R_T} (R_B \parallel r_{be})$$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \approx -g_m \frac{R_C}{R_C + R_T} (R_B \parallel r_{be})$$

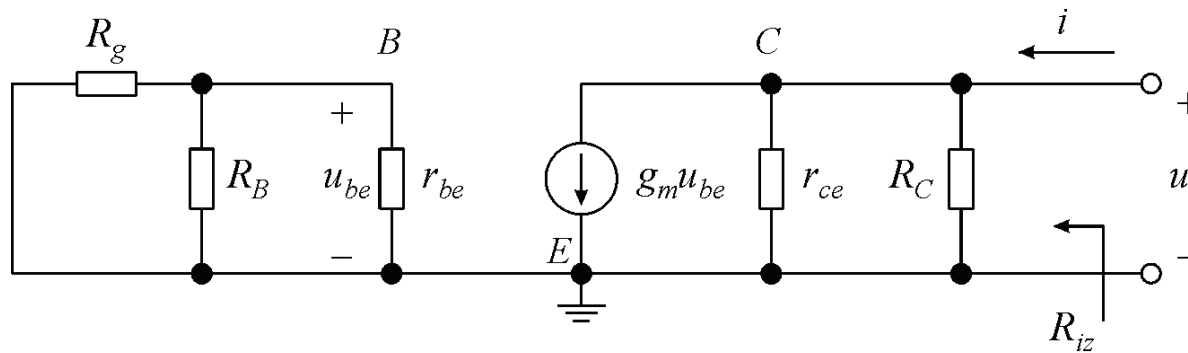
uz ovisni izvor  $h_{fe} i_b$  i uz  $g_m = h_{fe}/r_{be} \rightarrow$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \approx -h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be}}$$

# Pojačalo u spoju zajedničkog emitera – ulazni i izlazni otpor

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_B \parallel r_{be} \quad \text{strujno pojačanje} \rightarrow \quad A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{u_{iz} / R_T}{u_{ul} / R_{ul}} = A_V \frac{R_{ul}}{R_T}$$

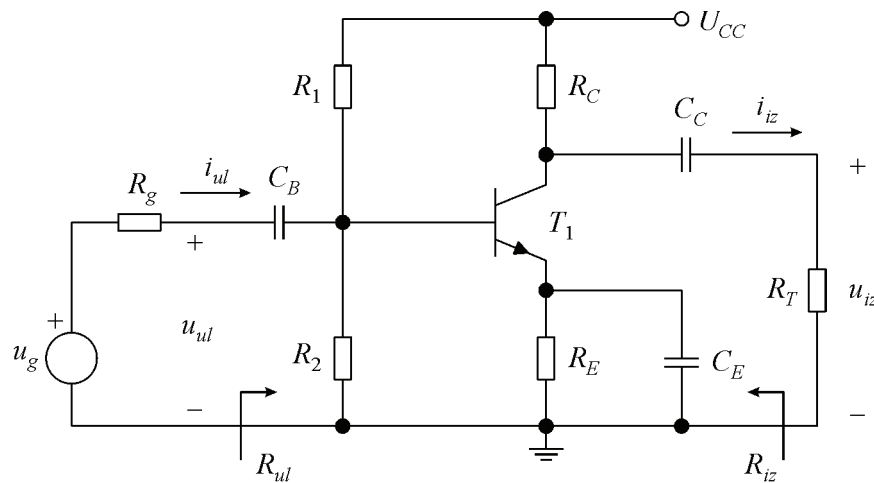
Shema za određivanje izlaznog otpora:



$$R_{iz} = \frac{u}{i} = r_{ce} \parallel R_C$$

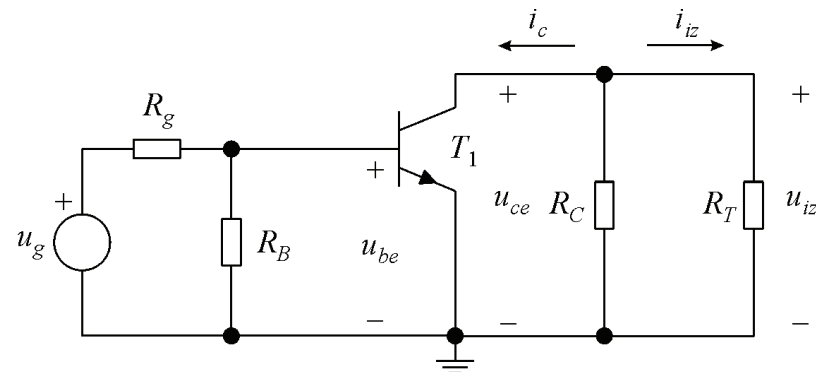
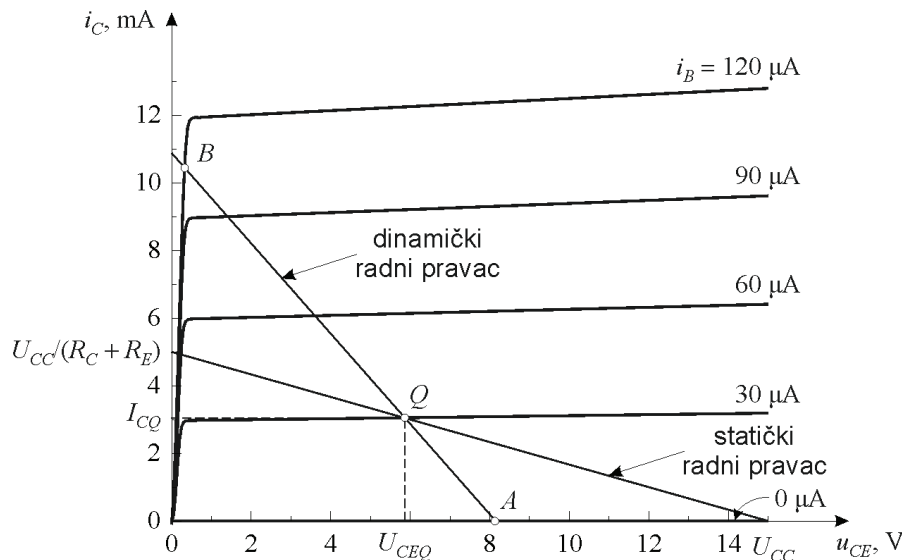
## Primjer 8.4

U pojačalu sa slike zadano je:  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $R_g = 500 \Omega$ ,  $R_1 = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 11 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_T = 1,2 \text{ k}\Omega$  i  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ . Parametri *npn* bipolarnog tranzistora su  $\beta \approx h_{fe} = 100$ ,  $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$  i  $U_A = 200 \text{ V}$ . Naponski ekvivalent temperature  $U_T = 25 \text{ mV}$ . Odrediti pojačanja  $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ ,  $A_I = i_{iz}/i_{ul}$  i  $A_{Vg} = u_{iz}/u_g$ , te ulazni i izlazni otpor pojačala.

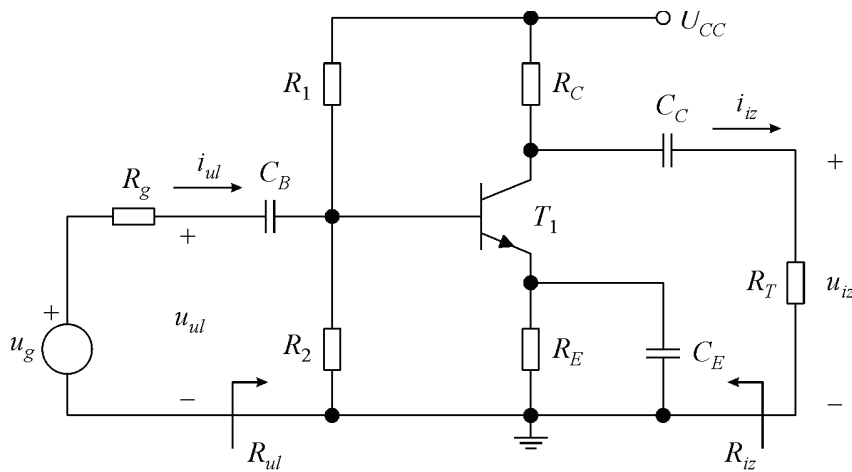


## Primjer 8.5

Za pojačalo iz primjera 8.4 u polje izlaznih karakteristika bipolarnog tranzistora ucrtati statički i dinamički radni pravac. Koliki je maksimalni hod izmjeničnih izlaznih napona i struje, a da pri tome radna točka ne izađe iz normalnog aktivnog područja?

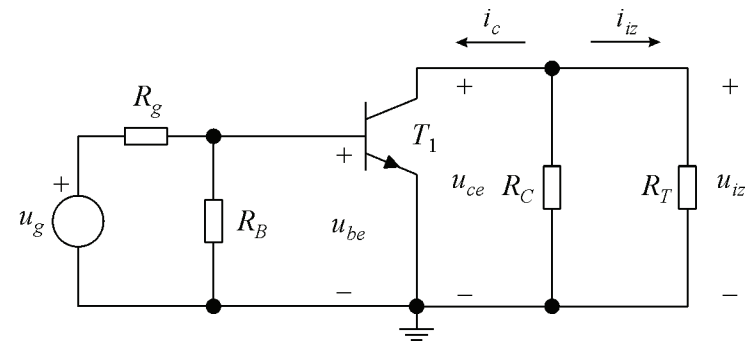


# Podešavanje statičke radne točke za maksimalni hod signala (1)



Jednadžba statičkog  
radnog pravca:

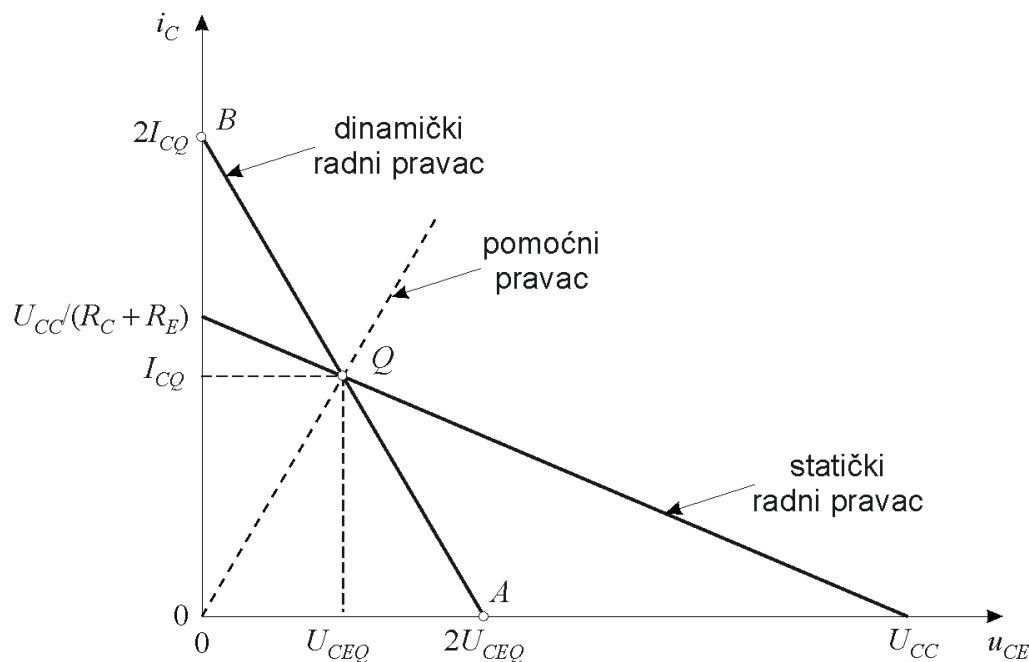
$$U_{CEQ} = U_{CC} - (R_C + R_E)I_{CQ}$$



Jednadžba dinamičkog  
radnog pravca:

$$u_{ce} = -(R_C \parallel R_T)i_c$$

# Podešavanje statičke radne točke za maksimalni hod signala (2)



$$u_{ce} = -(R_C \parallel R_T) i_c$$

$$u_{CE} - U_{CEQ} = -(R_C \parallel R_T)(i_C - I_{CQ})$$

$$\text{U točki } B \rightarrow \text{za } u_{CE} = 0, i_C = 2 I_{CQ}$$

$$0 - U_{CEQ} = -(R_C \parallel R_T)(2 I_{CQ} - I_{CQ})$$

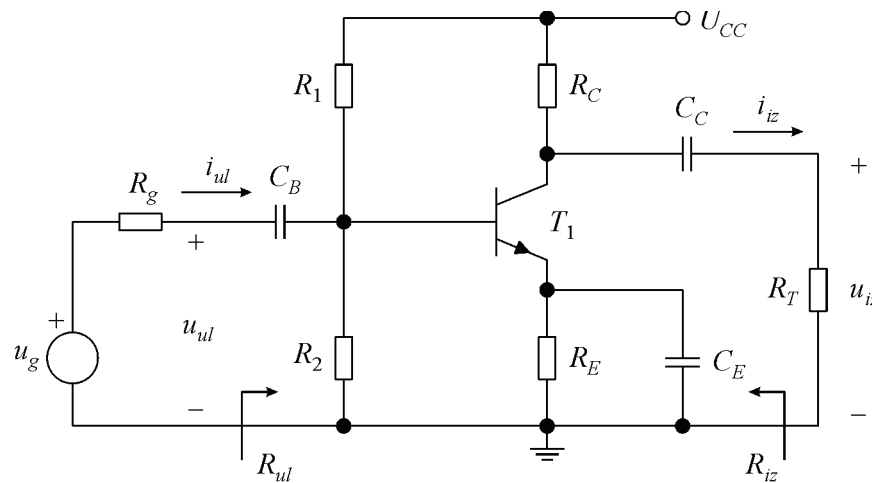
$$U_{CEQ} = (R_C \parallel R_T) I_{CQ}$$

$$I_{CQ} = \frac{U_{CC}}{R_C + R_E + R_C \parallel R_T}$$

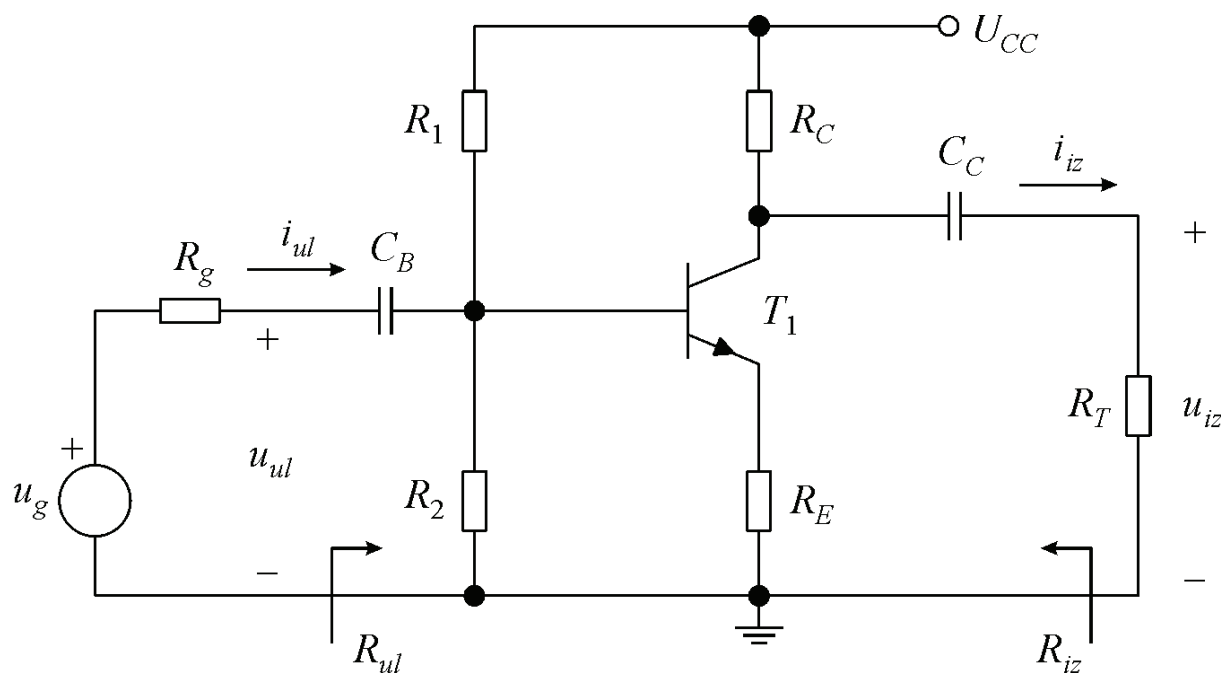
$$U_{CEQ} = \frac{R_C \parallel R_T}{R_C + R_E + R_C \parallel R_T} U_{CC}$$

## Primjer 8.6

Za pojačalo sa slike odrediti statičku radnu točku za maksimalni hod signala. Koliki su pri tome maksimalni hodovi izlaznog napona  $u_{iz}$  i izlazne struje  $i_{iz}$ ? Odrediti otpore otpornog djelila  $R_1$  i  $R_2$  kojima se postiže ta statička radna točka. Zadano je:  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_T = 1,2 \text{ k}\Omega$  i  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ . Parametri *npn* bipolarnog tranzistora su  $\beta = 100$  i  $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$ .

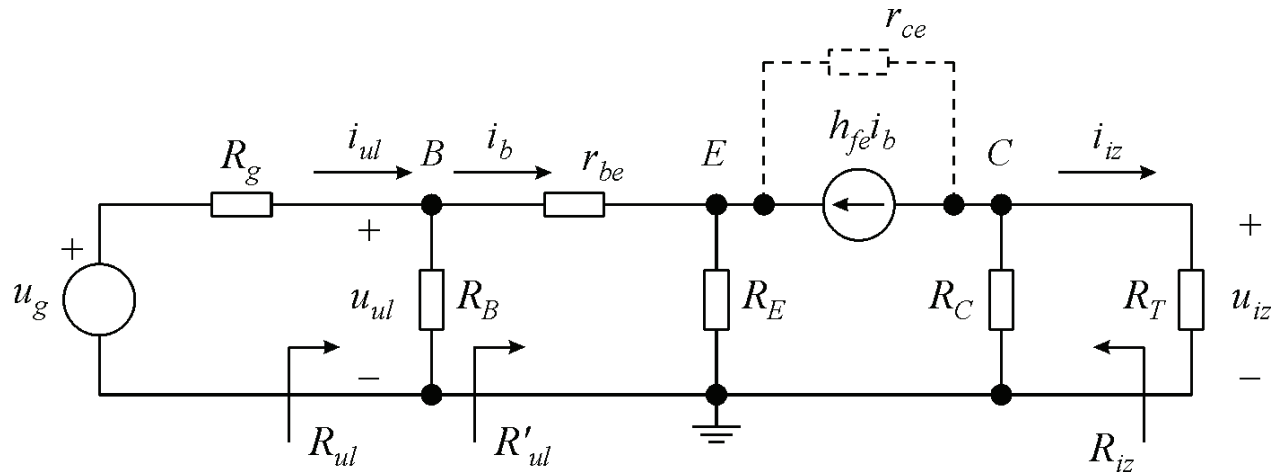


# Pojačalo u spoju zajedničkog emitera s emitterskom degeneracijom





# Pojačalo s emitterskom degeneracijom – naponsko pojačanje

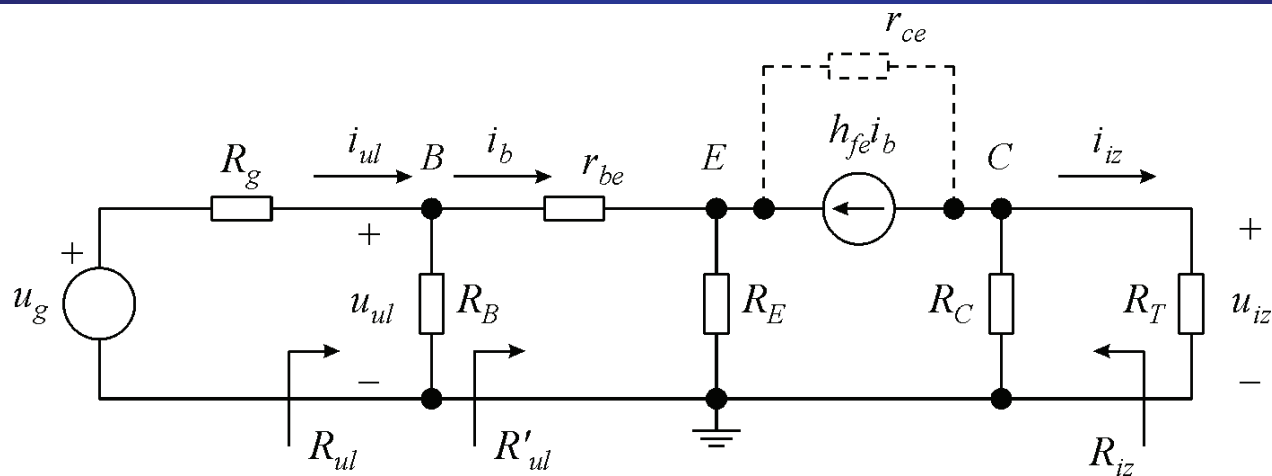


$$u_{ul} = i_b r_{be} + (1 + h_{fe}) i_b R_E \quad u_{iz} = -h_{fe} i_b (R_C \parallel R_T)$$

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -h_{fe} \frac{R_C \parallel R_T}{r_{be} + (1 + h_{fe}) R_E} \quad A_V \approx \frac{-g_m (R_C \parallel R_T)}{1 + g_m R_E}$$

$$\text{Uz: } g_m R_E \gg 1 \rightarrow A_V \approx -\frac{R_C \parallel R_T}{R_E}$$

# Pojačalo s emitterskom degeneracijom – strujno pojačanje



$$R'_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_b} = r_{be} + (1 + h_{fe})R_E$$

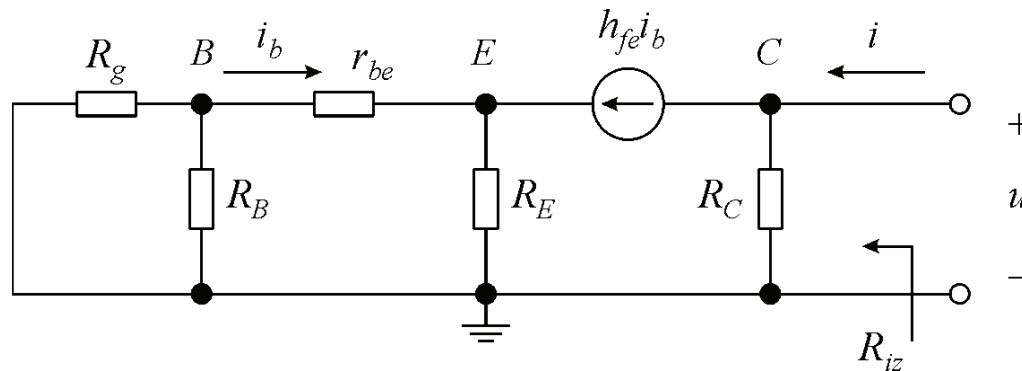
$$i_{iz} = -h_{fe} i_b \frac{R_C}{R_C + R_T} \quad i_b = i_{ul} \frac{R_B}{R_B + R'_{ul}} = i_{ul} \frac{R_B}{R_B + r_{be} + (1 + h_{fe})R_E}$$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = -h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be} + (1 + h_{fe})R_E}$$

# Pojačalo s emitterskom degeneracijom

## – ulazni i izlazni otpor

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_B \parallel R'_{ul} = R_B \parallel [r_{be} + (1 + h_{fe})R_E]$$



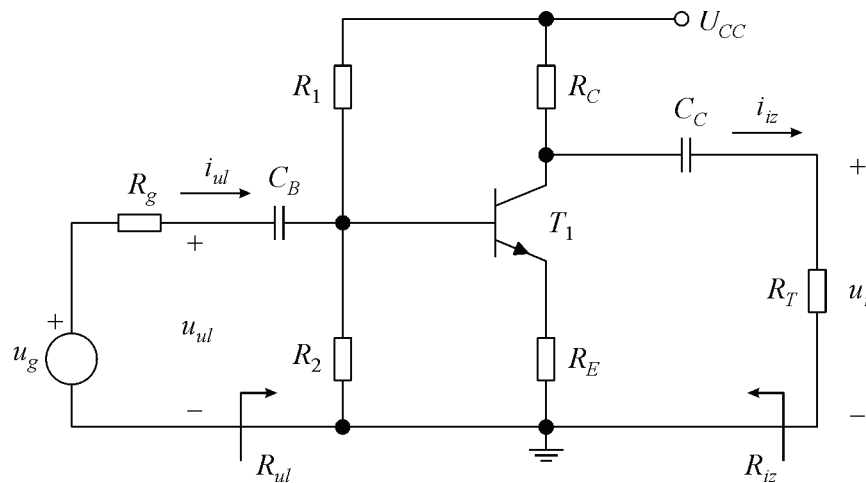
$$i = \frac{u}{R_C} + h_{fe} i_b$$

$$u_e = (1 + h_{fe}) i_b R_E = -i_b (R_g \parallel R_B + r_{be}) \rightarrow i_b = 0$$

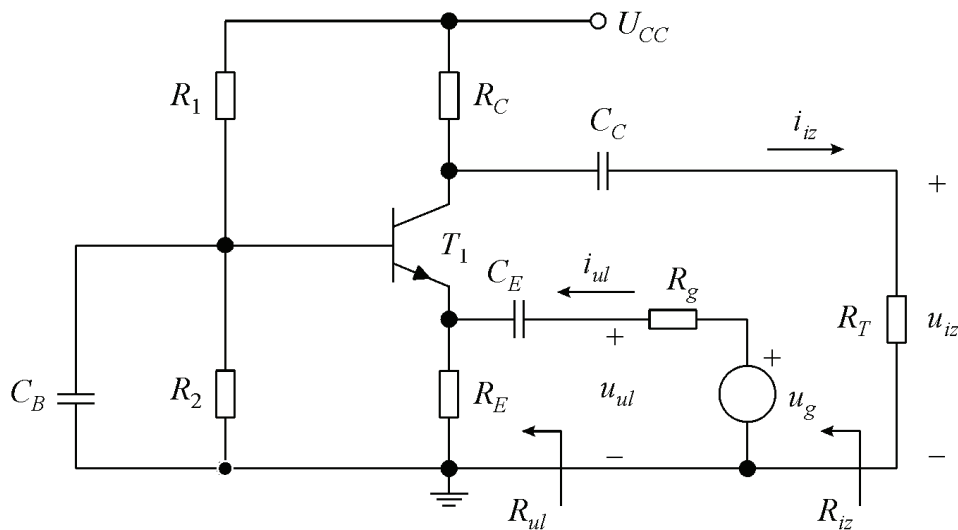
$$R_{iz} = \frac{u}{i} = R_C$$

## Primjer 8.7

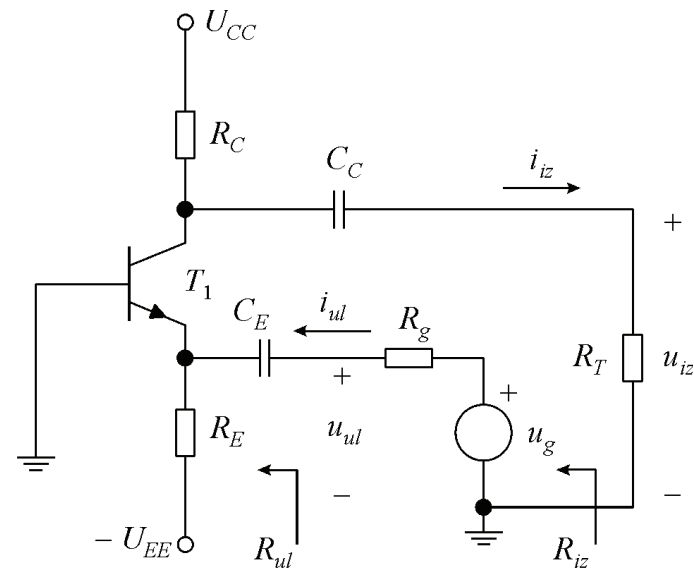
U pojačalu sa slike zadano je:  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $R_g = 500 \Omega$ ,  $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_T = 2 \text{ k}\Omega$  i  $R_E = 200 \Omega$ . Parametri *npn* bipolarnog tranzistora su  $\beta \approx h_{fe} = 100$  i  $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$ . Zanimariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature  $U_T = 25 \text{ mV}$ . Odrediti pojačanja  $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ ,  $A_I = i_{iz}/i_{ul}$  i  $A_{Vg} = u_{iz}/u_g$ , te ulazni i izlazni otpor pojačala.



# Pojačalo u spoju zajedničke baze

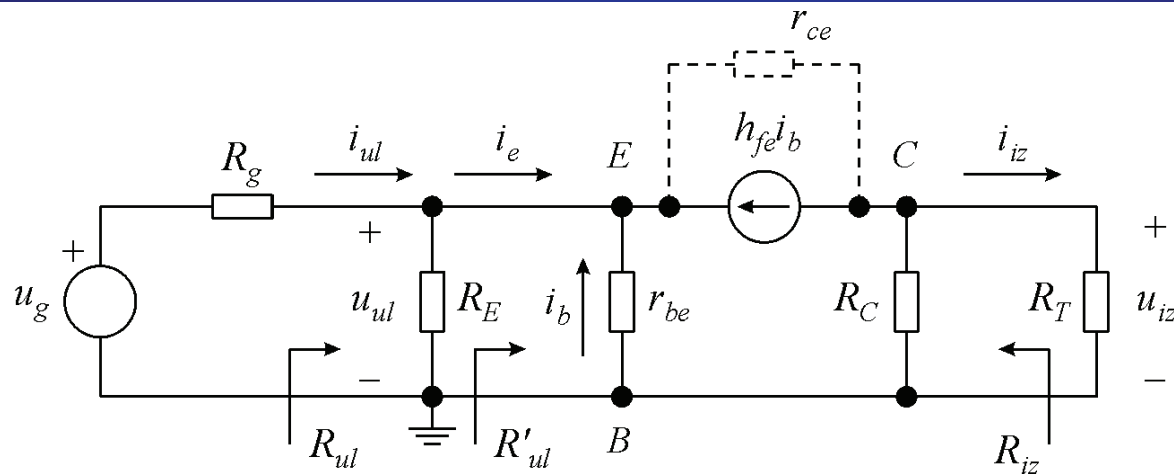


s jednim izvorom napajanja



s dva izvora napajanja

# Pojačalo u spoju zajedničke baze – naponsko pojačanje

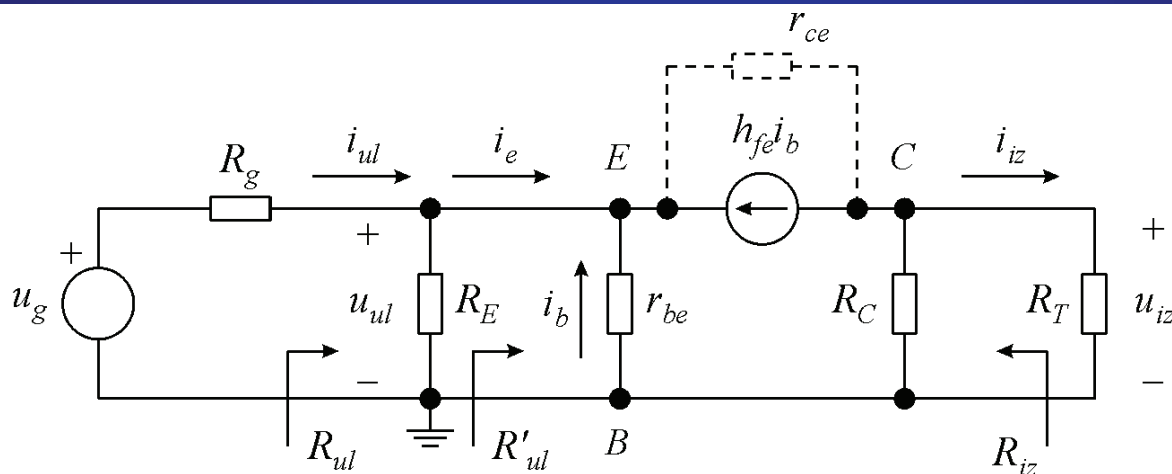


$$u_{ul} = -i_b r_{be}$$

$$u_{iz} = -h_{fe} i_b (R_C \parallel R_T)$$

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = h_{fe} \frac{R_C \parallel R_T}{r_{be}} = g_m (R_C \parallel R_T)$$

# Pojačalo u spoju zajedničke baze – strujno pojačanje



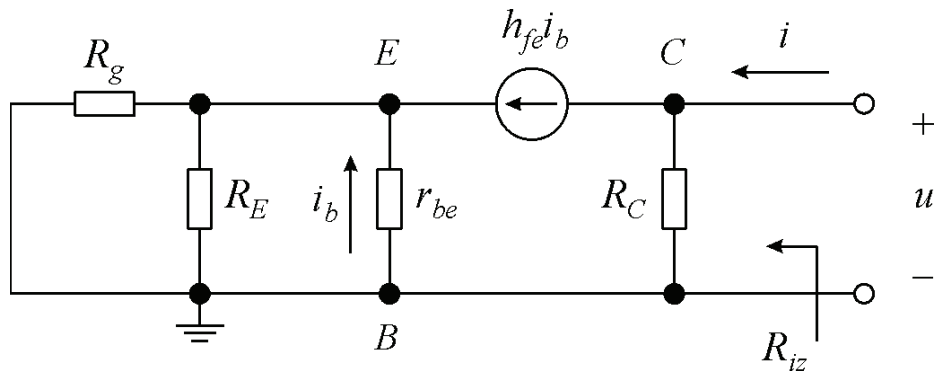
$$R'_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_e} = \frac{-i_b r_{be}}{-(1 + h_{fe})i_b} = \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}} \approx \frac{r_{be}}{h_{fe}} = \frac{1}{g_m}$$

$$i_{iz} = -h_{fe} i_b \frac{R_C}{R_C + R_T} \quad i_e = -(1 + h_{fe})i_b = i_{ul} \frac{R_E}{R_E + R'_{ul}}$$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_E}{R_E + R'_{ul}}$$

# Pojačalo u spoju zajedničke baze – ulazni i izlazni otpor

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_E \parallel R'_{ul} = R_E \parallel \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}} \approx R_E \parallel \frac{1}{g_m}$$



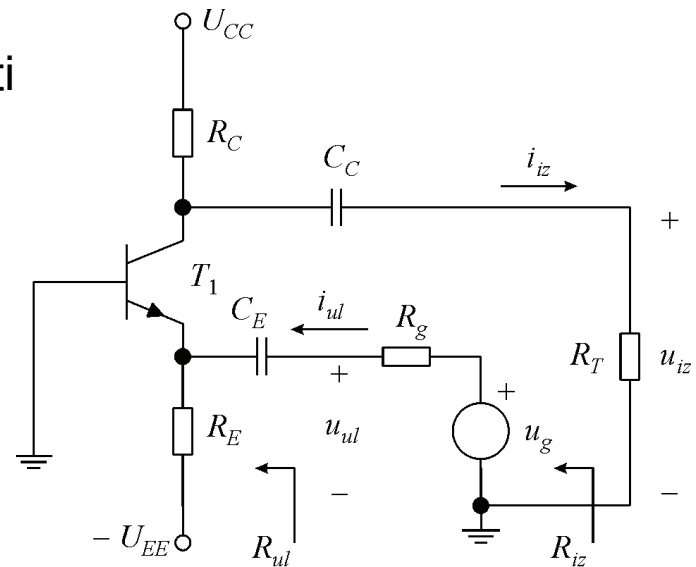
$$u_e = -i_b r_{be} = (1 + h_{fe})i_b (R_g \parallel R_E)$$

$$R_{iz} = \frac{u}{i} = R_C$$

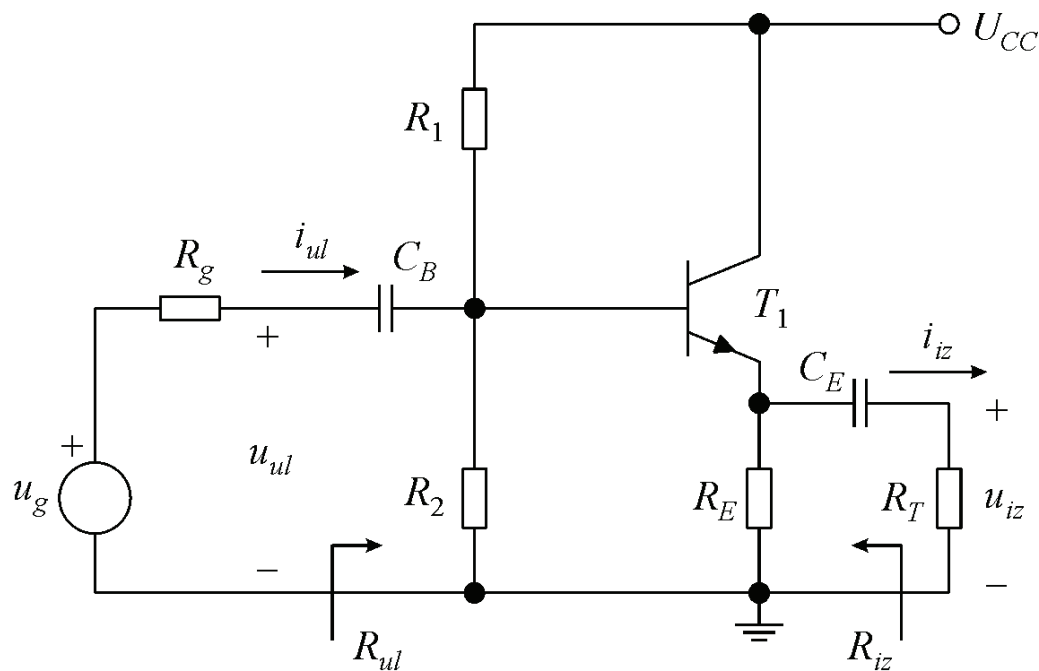


## Primjer 8.8

U pojačalu sa slike zadano je:  $U_{CC} = U_{EE} = 15\text{ V}$ ,  $R_g = 500\ \Omega$ ,  $R_C = 2\text{ k}\Omega$  i  $R_T = 1,2\text{ k}\Omega$ . Parametri *npn* bipolarnog tranzistora su  $\beta \approx h_{fe} = 100$  i  $U_\gamma = 0,7\text{ V}$ . Zanemariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature  $U_T = 25\text{ mV}$ . Odrediti otpor otpornika  $R_E$  koji će osigurati statičku struju kolektora  $I_{CQ} = 3\text{ mA}$ . Izračunati pojačanja  $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ ,  $A_I = i_{iz}/i_{ul}$  i  $A_{Vg} = u_{iz}/u_g$ , te ulazni i izlazni otpor pojačala.

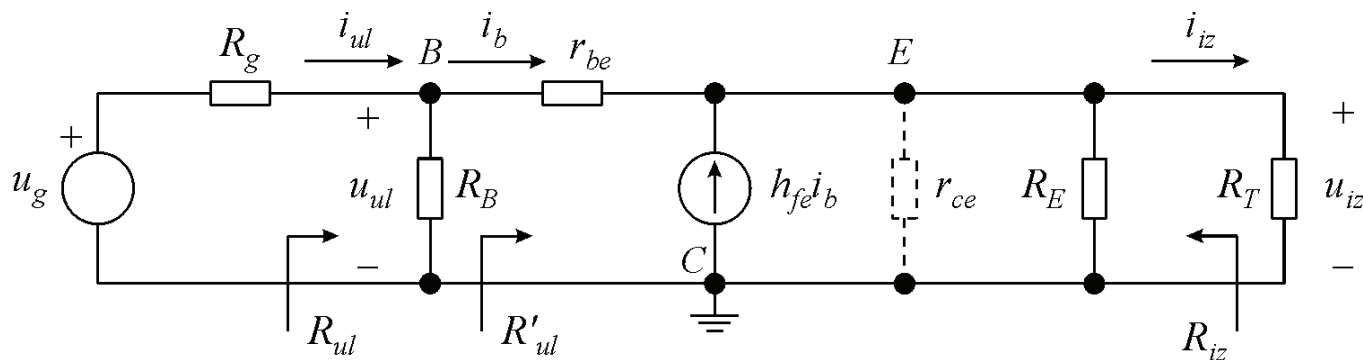


# Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – emittersko sljedilo



U statici:  $U_{CE} \approx U_{CC} - R_E I_C$

# Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – naponsko pojačanje

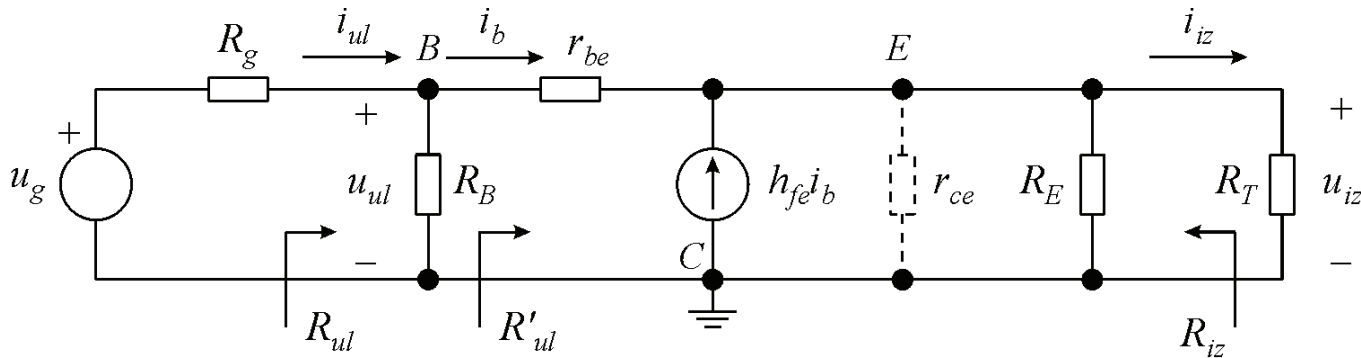


$$u_{iz} = (1 + h_{fe}) i_b (R_E \parallel R_T) \qquad u_{ul} = i_b r_{be} + (1 + h_{fe}) i_b (R_E \parallel R_T)$$

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{(1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)}{r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)}$$

$$A_V \approx \frac{h_{fe}(R_E \parallel R_T)}{r_{be} + h_{fe}(R_E \parallel R_T)} = \frac{g_m(R_E \parallel R_T)}{1 + g_m(R_E \parallel R_T)}$$

# Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – strujno pojačanje



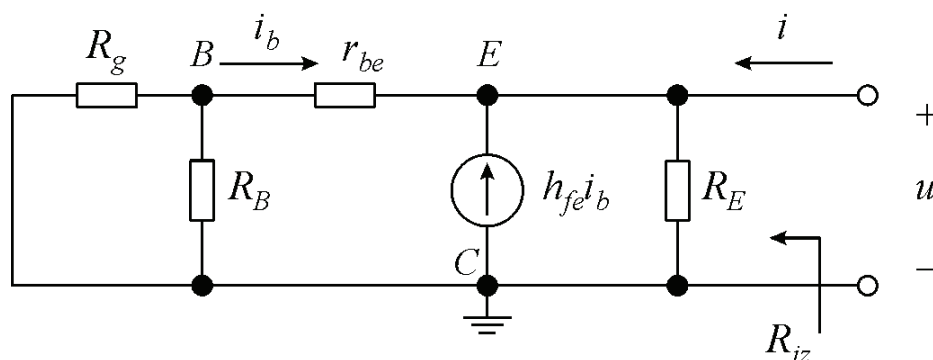
$$R'_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_b} = r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)$$

$$i_{iz} = (1 + h_{fe}) i_b \frac{R_E}{R_E + R_T} \qquad i_b = i_{ul} \frac{R_B}{R_B + R'_{ul}}$$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = (1 + h_{fe}) \frac{R_E}{R_E + R_T} \frac{R_B}{R_B + R'_{ul}}$$

# Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – ulazni i izlazni otpor

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_B \parallel R'_{ul} = R_B \parallel [r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)]$$

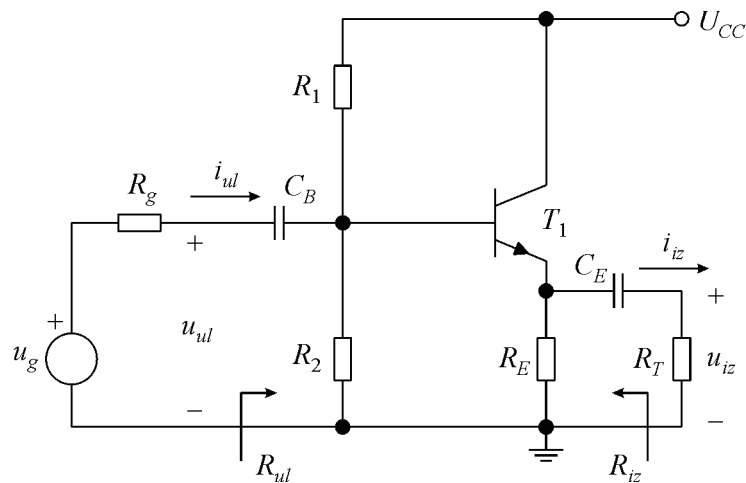


$$u = -i_b (R_g \parallel R_B + r_{be}) \quad \frac{i}{u} = \frac{1}{R_E} - \frac{(1 + h_{fe})i_b}{u} = \frac{1}{R_E} + \frac{1 + h_{fe}}{R_g \parallel R_B + r_{be}}$$

$$R_{iz} = \frac{u}{i} = R_E \parallel \frac{R_g \parallel R_B + r_{be}}{1 + h_{fe}}$$

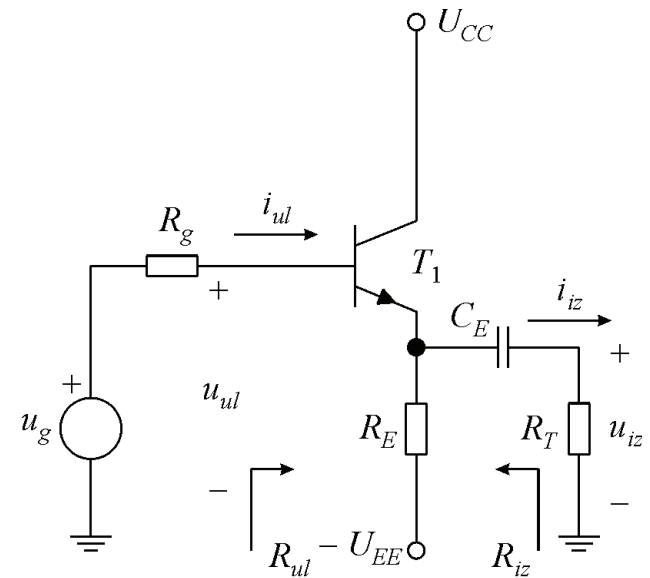
## Primjer 8.9

U pojačalu sa slike zadano je:  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $R_g = 500 \Omega$ ,  $R_1 = 70 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 4 \text{ k}\Omega$  i  $R_T = 1 \text{ k}\Omega$ . Parametri *npn* bipolarnog tranzistora su  $\beta \approx h_{fe} = 100$  i  $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$ . Zanimariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature  $U_T = 25 \text{ mV}$ . Odrediti pojačanja  $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ ,  $A_I = i_{iz}/i_{ul}$  i  $A_{Vg} = u_{iz}/u_g$ , te ulazni i izlazni otpor pojačala.



## Primjer 8.10

U pojačalu sa slike zadano je:  $U_{CC} = U_{EE} = 15\text{ V}$ ,  $R_g = 500\ \Omega$ ,  $R_E = 4\text{ k}\Omega$  i  $R_T = 1\text{ k}\Omega$ . Parametri *npn* bipolarnog tranzistora su  $\beta \approx h_{fe} = 100$  i  $U_\gamma = 0,7\text{ V}$ . Zanemariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature  $U_T = 25\text{ mV}$ . Odrediti pojačanja  $A_V = u_{iz}/u_{ul}$  i  $A_I = i_{iz}/i_{ul}$ , te ulazni i izlazni otpor pojačala.



# Usporedba osnovnih spojeva pojačala s bipolarnim tranzistorima

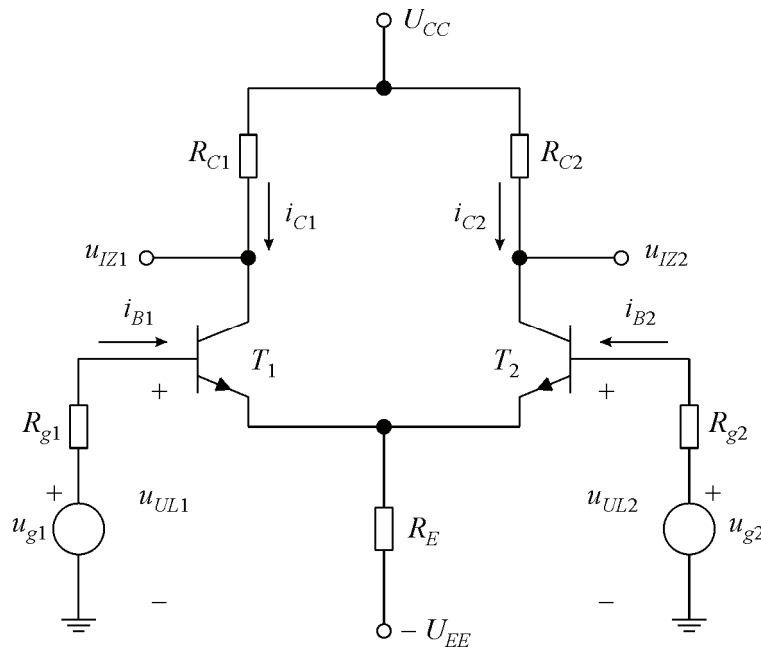
Spoj pojačala	zajednički emiter	zajednička baza	zajednički kolektor
$A_V$	$-g_m(R_C \parallel R_T)$	$g_m(R_C \parallel R_T)$	$\frac{g_m(R_E \parallel R_T)}{1 + g_m(R_E \parallel R_T)}$
$A_I$	$-h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be}}$	$\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_E}{R_E + \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}}}$	$(1 + h_{fe}) \frac{R_E}{R_E + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)}$
$R_{ul}$	$R_B \parallel r_{be}$	$R_E \parallel \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}}$	$R_B \parallel [r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)]$
$R_{iz}$	$R_C$	$R_C$	$R_E \parallel \frac{R_g \parallel R_B + r_{be}}{1 + h_{fe}}$



# Diferencijsko pojačalo

## Diferencijsko pojačalo

- ❑ jedno od najznačajnijih tranzistorskih pojačala
- ❑ ulazni stupanj u operacijskim pojačalima, komparatorima, stabilizatorima
- ❑ primjena u mjernoj tehnici



2 ulaza  $\rightarrow u_{ul1}$  i  $u_{ul2}$

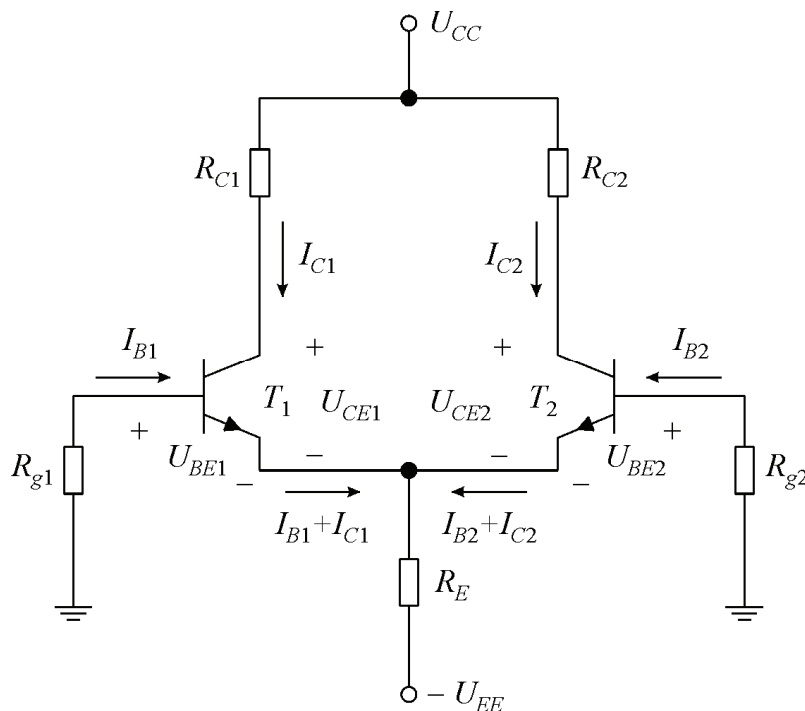
2 izlaza  $\rightarrow u_{iz1}$  i  $u_{iz2}$

koristi se:

- ❑ samo  $u_{iz1}$  ili  $u_{iz2} \rightarrow$  **asimetrični izlaz**
- ❑ razlika  $u_{iz} = u_{iz2} - u_{iz1} \rightarrow$  **diferencijski ili simetrični izlaz**

istosmjerno pojačalo

# Statička analiza



u statiki  $\rightarrow u_{g1} = u_{g2} = 0$

simetrične grane :

$$T_1 = T_2, R_{g1} = R_{g2}, R_{C1} = R_{C2} \rightarrow$$

$$I_{B1} = I_{B2}, I_{C1} = I_{C2}$$

za ulazni krug tranzistora  $T_1$ :

$$U_{EE} = I_{BQ1} R_{g1} + U_{BEQ1} + 2(1 + \beta) I_{BQ1} R_E$$

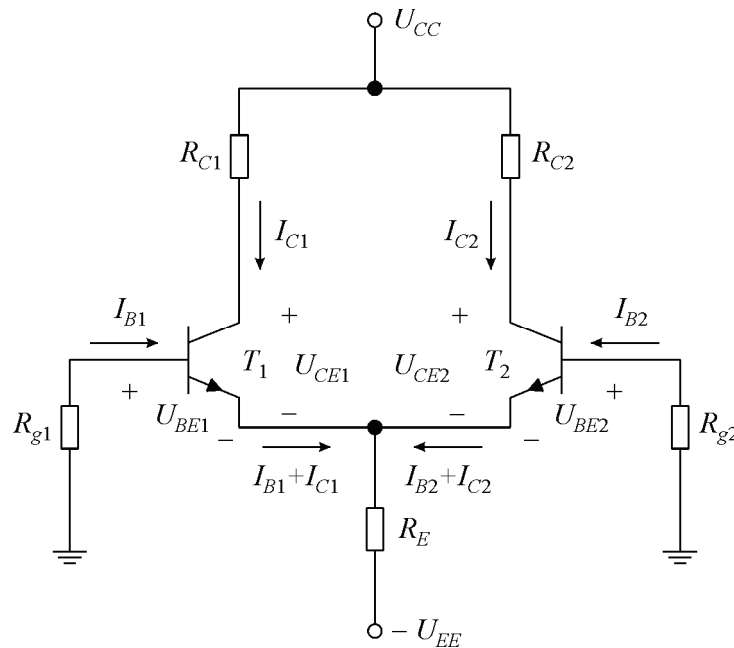
$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ1}}{R_{g1} + 2(1 + \beta) R_E}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \beta I_{BQ1}$$

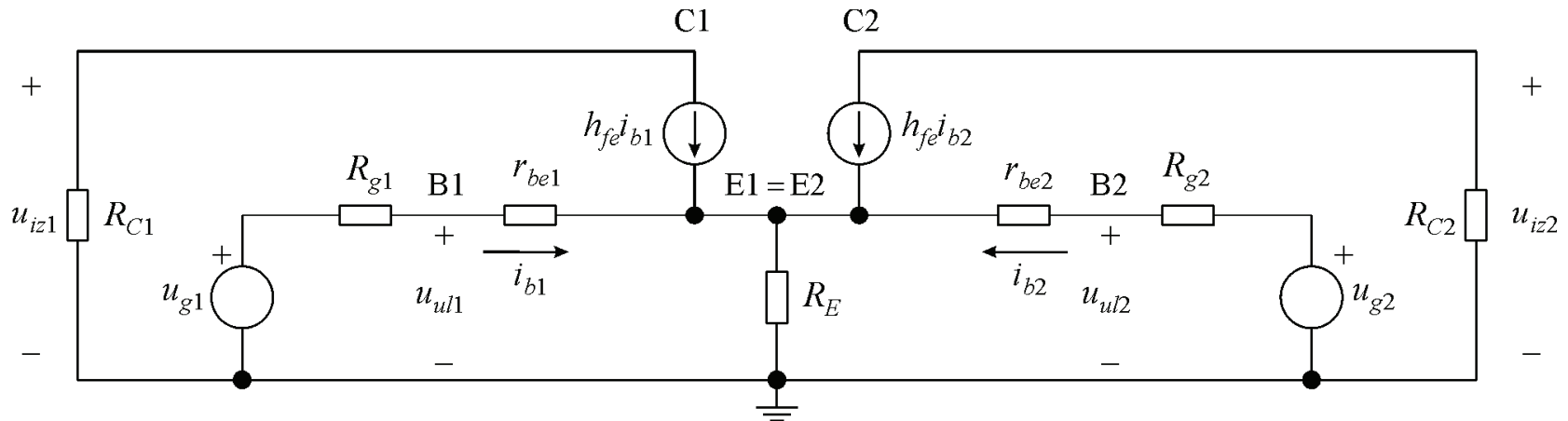
$$\begin{aligned} U_{CEQ1} = U_{CEQ2} &= U_{CC} + U_{EE} - [\beta R_{C1} + 2(1 + \beta) R_E] I_{BQ1} \approx \\ &\approx U_{CC} + U_{EE} - (R_{C1} + 2 R_E) I_{CQ1}. \end{aligned}$$

## Primjer 8.11

U diferencijskom pojačalu sa slike zadano je:  $U_{CC} = U_{EE} = 15\text{ V}$ ,  $R_{g1} = R_{g2} = 500\ \Omega$ ,  $R_{C1} = R_{C2} = 1,5\text{ k}\Omega$  i  $R_E = 4,5\text{ k}\Omega$ . Parametri oba bipolarna tranzistora su  $\beta = 100$  i  $U_\gamma = 0,7\text{ V}$ . Odrediti struje i napone tranzistora u statičkoj radnoj točki.



# Dinamička analiza – nadomjesni sklop pojačala za mali signal



# Zajednički i diferencijski signal

Naponi  $u_{g1}$  i  $u_{g2}$  rastavljaju se na:

□ zajednički signal  $u_z$  i

□ diferencijski signal  $u_d$

$$u_z = \frac{u_{g1} + u_{g2}}{2}$$

$$u_d = u_{g2} - u_{g1}$$

Pojedinačni ulazni naponi  $u_{g1}$  i  $u_{g2}$  su:

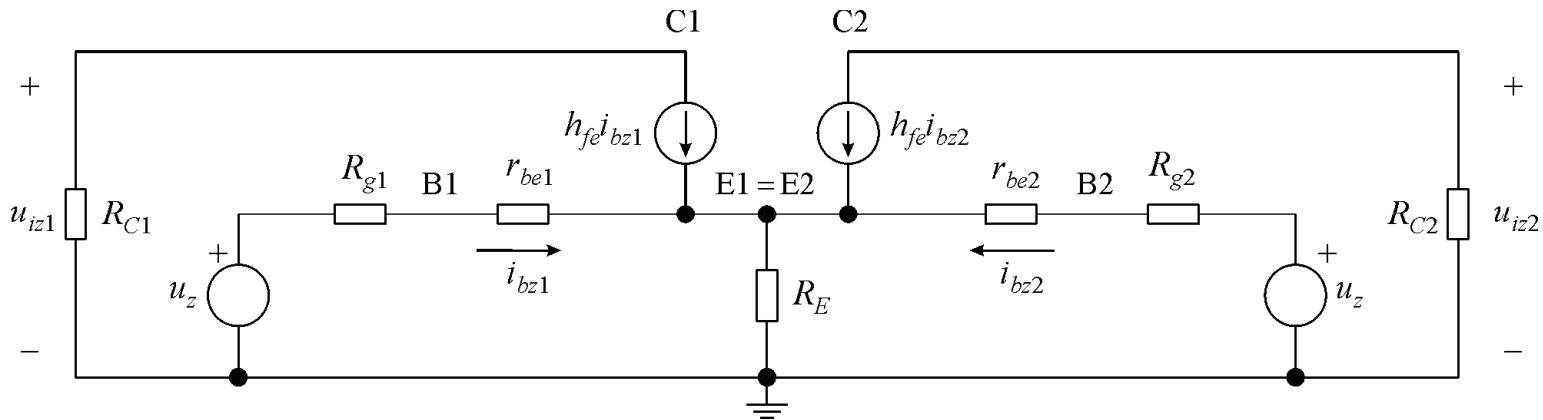
$$u_{g1} = u_z - u_d / 2$$

$$u_{g2} = u_z + u_d / 2$$

Analiza metodom superpozicije – posebno za zajednički, a posebno za diferencijski signal

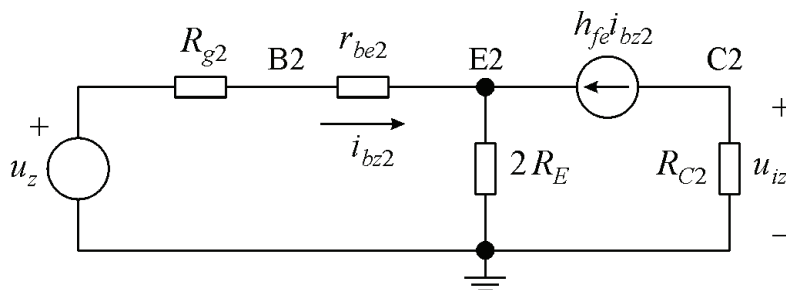
# Pojačanje zajedničkog signala

Na oba je ulaza zajednički signal  $\rightarrow u_{g1} = u_{g2} = u_z$



Uz simetriju  $\rightarrow i_{bz1} = i_{bz2}$ ; za  $u_{iz} = u_{iz2}$

$$u_{iz} = -h_{fe} i_{bz2} R_{C2}$$



$$u_z = i_{bz2} [R_{g2} + r_{be2} + 2R_E (1 + h_{fe})]$$

$$A_{Vz} = \frac{u_{iz}}{u_z} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E (1 + h_{fe})}$$



# Faktor potiskivanja

Izlazni napon  $\rightarrow$  superpozicija napona uz diferencijski i zajednički signal

$$u_{iz} = A_{Vd} u_d + A_{Vz} u_z$$

Faktor potiskivanja:  $\rho \equiv \frac{|A_{Vd}|}{|A_{Vz}|}$

$$\rho = \frac{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E(1 + h_{fe})}{2(R_{g2} + r_{be2})} = \frac{1}{2} + \frac{R_E(1 + h_{fe})}{R_{g2} + r_{be2}}$$

$$\text{Uz } R_{g1} = R_{g2} = 0$$

$$\rho = \frac{1}{2} + \frac{R_E(1 + h_{fe})}{r_{be2}} \approx \frac{1}{2} + g_{m2} R_E = \frac{1}{2} + \frac{I_{CQ2}}{U_T} R_E$$



## Primjer 8.12

---

Za diferencijsko pojačalo iz primjera 8.11 za asimetrični izlaz  $u_{iz} = u_{iz2}$  izračunati naponska pojačanja zajedničkog i diferencijskog signala  $A_{Vz}$  i  $A_{Vd}$ , te faktor potiskivanja  $\rho$ . Dinamički faktor strujnog pojačanja  $h_{fe} = 100$ , a naponski ekvivalent temperature  $U_T = 25 \text{ mV}$ . Zanemariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području.

## Primjer 8.13

Na diferencijsko pojačalo iz primjera 8.12 priključeni su sinusni signali

$u_{g1} = U_{g1m} \sin \omega t$  i  $u_{g2} = U_{g2m} \sin \omega t$ . Izračunati izlazni napon  $u_{iz} = u_{iz2}$  za

a)  $U_{g1m} = -5 \text{ mV}$  i  $U_{g2m} = 5 \text{ mV}$ , te

b)  $U_{g1m} = 20 \text{ mV}$  i  $U_{g2m} = 30 \text{ mV}$ .

# Pojačanja simetričnog ili diferencijskog izlaza

Diferencijski izlaz  $\rightarrow u_{iz} = u_{iz2} - u_{iz1} \rightarrow u_{iz2}$  i  $u_{iz1}$  su pojedinačni izlazni naponi

Za zajednički signal  $u_{g1} = u_{g2} = u_z$

$$A_{Vz1} = \frac{u_{iz1}}{u_z} = \frac{-h_{fe} R_{C1}}{R_{g1} + r_{be1} + 2R_E(1 + h_{fe})} \quad A_{Vz2} = \frac{u_{iz2}}{u_z} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E(1 + h_{fe})}$$

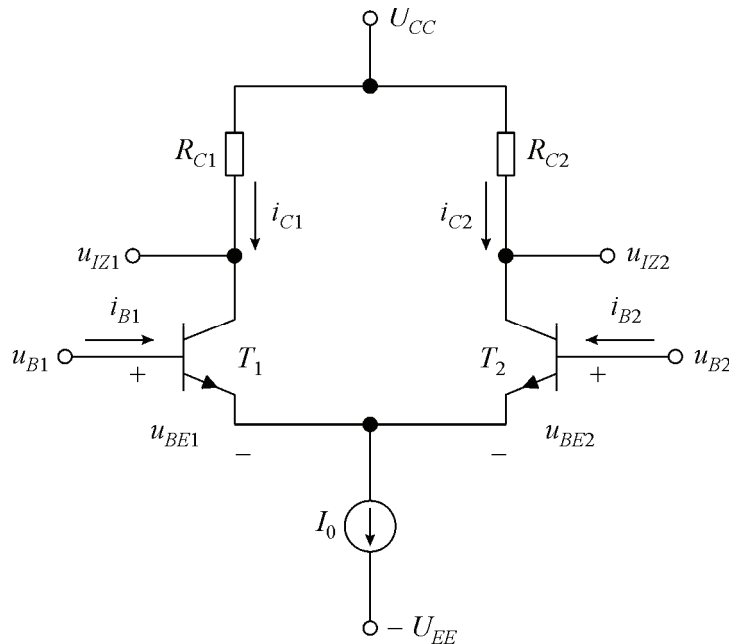
$$A_{Vz} = \frac{u_{iz2} - u_{iz1}}{u_z} = A_{Vz2} - A_{Vz1} = 0$$

Za diferencijski signal  $u_{g2} = -u_{g1} = u_d/2$

$$A_{Vd1} = \frac{u_{iz1}}{u_d} = \frac{+h_{fe} R_{C1}}{2(R_{g1} + r_{be1})} \quad A_{Vd2} = \frac{u_{iz2}}{u_d} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{2(R_{g2} + r_{be2})}$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz2} - u_{iz1}}{u_d} = A_{Vd2} - A_{Vd1} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{R_{g2} + r_{be2}}$$

# Prijenosna karakteristika (1)



$$I_0 = \frac{u_E + U_{EE}}{R_E} \approx \frac{U_{EE}}{R_E}$$

$$I_0 \approx i_{C1} + i_{C2}$$

$$i_{C1} = I_S \exp\left(\frac{u_{BE1}}{U_T}\right)$$

$$i_{C2} = I_S \exp\left(\frac{u_{BE2}}{U_T}\right)$$

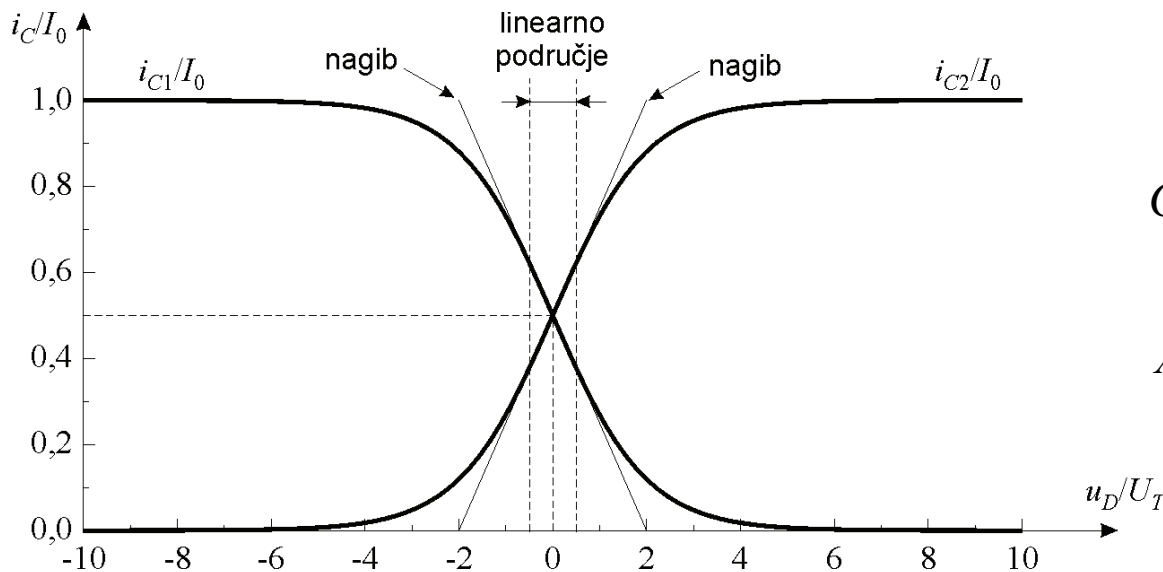
$$i_{C1} = I_S \exp\left(\frac{u_{BE2}}{U_T}\right) \exp\left(-\frac{u_{BE2} - u_{BE1}}{U_T}\right) = i_{C2} \exp\left(-\frac{u_{BE2} - u_{BE1}}{U_T}\right)$$

$$u_D = u_{B2} - u_{B1} = u_{BE2} - u_{BE1}$$

# Prijenosna karakteristika (2)

$$i_{C2} \approx \frac{I_0}{1 + \exp\left(-\frac{u_D}{U_T}\right)}$$

$$i_{C1} \approx \frac{I_0}{1 + \exp\left(\frac{u_D}{U_T}\right)}$$

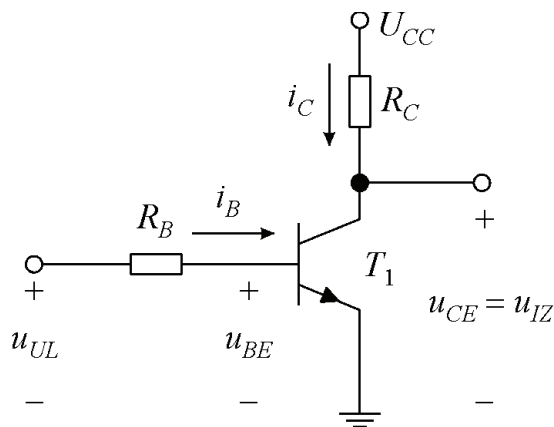


Za  $u_D = 0$

$$G_{m,\max} = \left| \frac{di_{C1}}{du_D} \right| = \left| \frac{di_{C2}}{du_D} \right| = \frac{I_0}{4U_T}$$

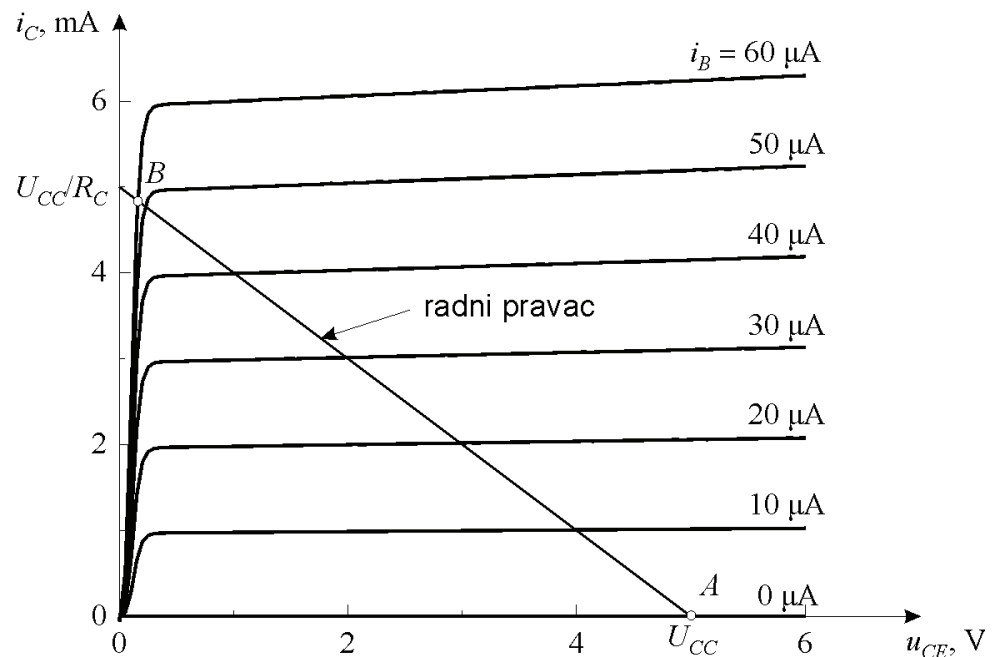
$$\begin{aligned} A_{Vd,\max} &= -G_{m,\max} R_{C2} = \\ &= -\frac{I_0}{4U_T} R_{C2} \end{aligned}$$

# Bipolarni tranzistor kao sklopka



$$i_B = \frac{u_{UL} - u_{BE}}{R_B}$$

$$u_{IZ} = u_{CE} = U_{CC} - R_C i_C$$



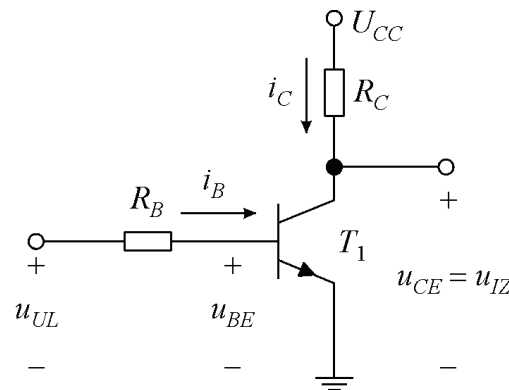
Točka A:  $i_C \approx 0$ ,  $u_{IZ} = u_{CE} = U_{CC} \rightarrow$  **isključena sklopka**

Točka B:  $u_{IZ} = u_{CE} = U_{CEzas}$ ,  $i_C = I_{Czas} = (U_{CC} - U_{CEzas})/R_C \rightarrow$  **uključena sklopka**

**Uvjet za zasićenje:**  $I_{Bzas} \geq I_{Czas}/\beta$

## Primjer 8.14

Bipolarna sklopka sa slike radi s naponom napajanja  $U_{CC} = 5\text{ V}$  i s kolektorskim otporom  $R_C = 1\text{ k}\Omega$ . Odrediti maksimalnu vrijednost otpora  $R_B$  koji će uz ulazni napon  $U_{UL} = U_{CC}$  osigurati rad tranzistora u zasićenju. Faktor strujnog pojačanja tranzistora  $\beta$  može poprimiti vrijednosti iz intervala 50 do 150. Pretpostaviti vrijednosti  $U_{CEzas} = 0,2\text{ V}$  i  $U_{BEzas} = 0,8\text{ V}$ .



# Naponska prijenosna karakteristika

Bipolarna tranzistorska sklopka je **invertor**

naponska prijenosna karakteristika  $\rightarrow u_{IZ} = f(u_{UL})$

□ za  $u_{UL} < U_{ULN} \rightarrow i_C \approx 0, u_{IZ} = U_{CC} = U_{IZV} = U_1$

□ za  $U_{ULN} < u_{UL} < U_{ULV} \rightarrow i_C = \beta i_B$

$$u_{IZ} = u_{CE} = U_{CC} - R_C i_C = U_{CC} - \beta R_C \frac{u_{UL} - u_{BE}}{R_B}$$

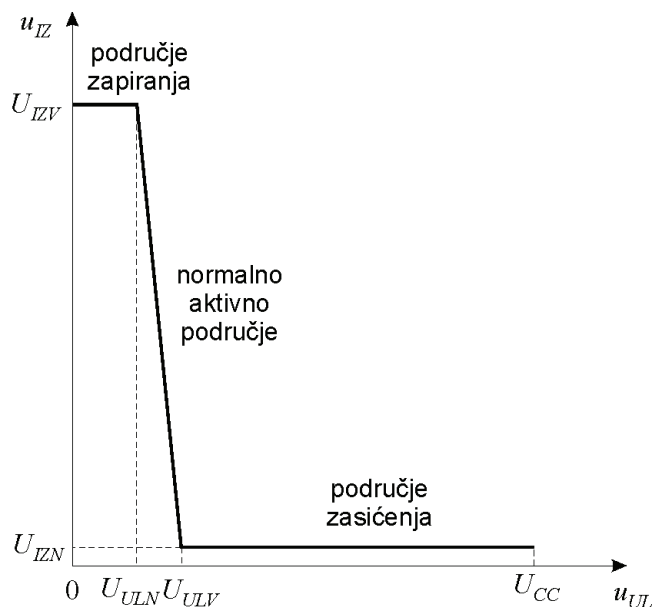
za  $u_{UL} = U_{ULN} \rightarrow i_C \approx 0 \rightarrow U_{ULN} = U_{BE}$

za  $u_{UL} = U_{ULV} \rightarrow U_{IZ} = U_{CEzas}$

$$I_B = \frac{U_{ULV} - U_{BE}}{R_B} = \frac{I_{Czas}}{\beta} = \frac{U_{CC} - U_{CEzas}}{\beta R_C}$$

$$U_{ULV} = \frac{R_B}{\beta R_C} (U_{CC} - U_{CEzas}) + U_{BE}$$

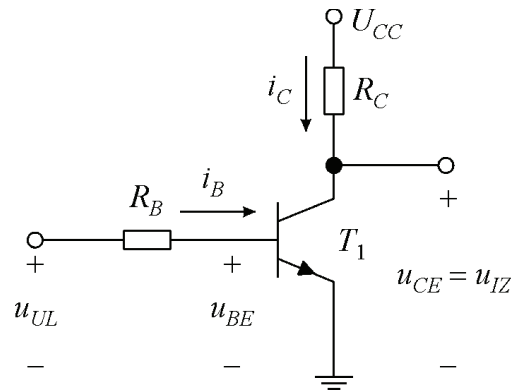
□ za  $u_{UL} > U_{ULV} \rightarrow I_C = I_{Czas} = (U_{CC} - U_{CEzas})/R_C,$   
 $I_{Bzas} \geq I_{Czas}/\beta, u_{IZ} = U_{CEzas} = U_{IZN} = U_0$





## Primjer 8.15

Odrediti karakteristične napone naponske prijenosne karakteristike invertora s bipolarnim tranzistorom sa slike. Napon napajanja  $U_{CC} = 5\text{ V}$ , a otpori otpornika su  $R_B = 10\text{ k}\Omega$  i  $R_C = 1\text{ k}\Omega$ . Faktor strujnog pojačanja tranzistora  $\beta = 100$ , a napon  $U_{CEzas} = 0,2\text{ V}$ . Pretpostaviti da je normalnom aktivnom području rada tranzistora napon  $U_{BE} = 0,7\text{ V}$ . Izračunati granice naponskih smetnji.



# Utjecaj opterećenja na napone logičkih razina

Analiziraju se stacionarna stanja invertora s tranzistorom  $T_1$

- $T_0$  u zapiranju  $\rightarrow T_1$  u zasićenju  $\rightarrow T_2$  u zapiranju

$$I_{B1zas} = \frac{U_{CC} - U_{BEzas}}{R_C + R_B}$$

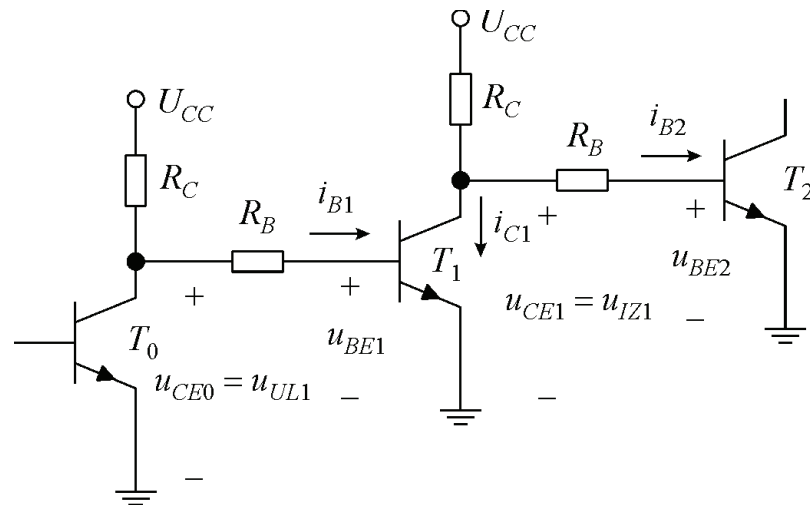
$$I_{B1zas} \geq \frac{I_{C1zas}}{\beta} = \frac{U_{CC} - U_{CEzas}}{\beta R_C}$$

$$u_{IZ1} = u_{CE1} = U_{CEzas} = U_0$$

- $T_0$  u zasićenju  $\rightarrow T_1$  u zapiranju  $\rightarrow T_2$  u zasićenju

$$u_{UL1} = u_{CE0} = U_{CEzas}$$

$$\begin{aligned} u_{IZ1} &= U_{CC} - R_C I_{B2zas} = \\ &= U_{CC} - R_C \frac{U_{CC} - U_{BEzas}}{R_C + R_B} = U_1 \end{aligned}$$

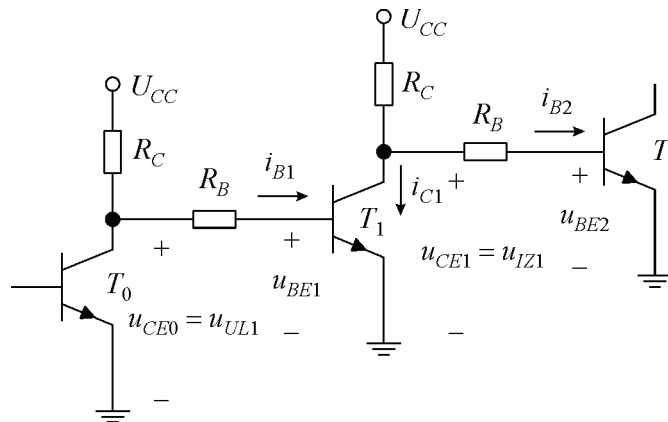


Ako je  $T_1$  opterećen s  $N$  invertora

$$U_1 = U_{CC} - N R_C \frac{U_{CC} - U_{BEzas}}{N R_C + R_B}$$

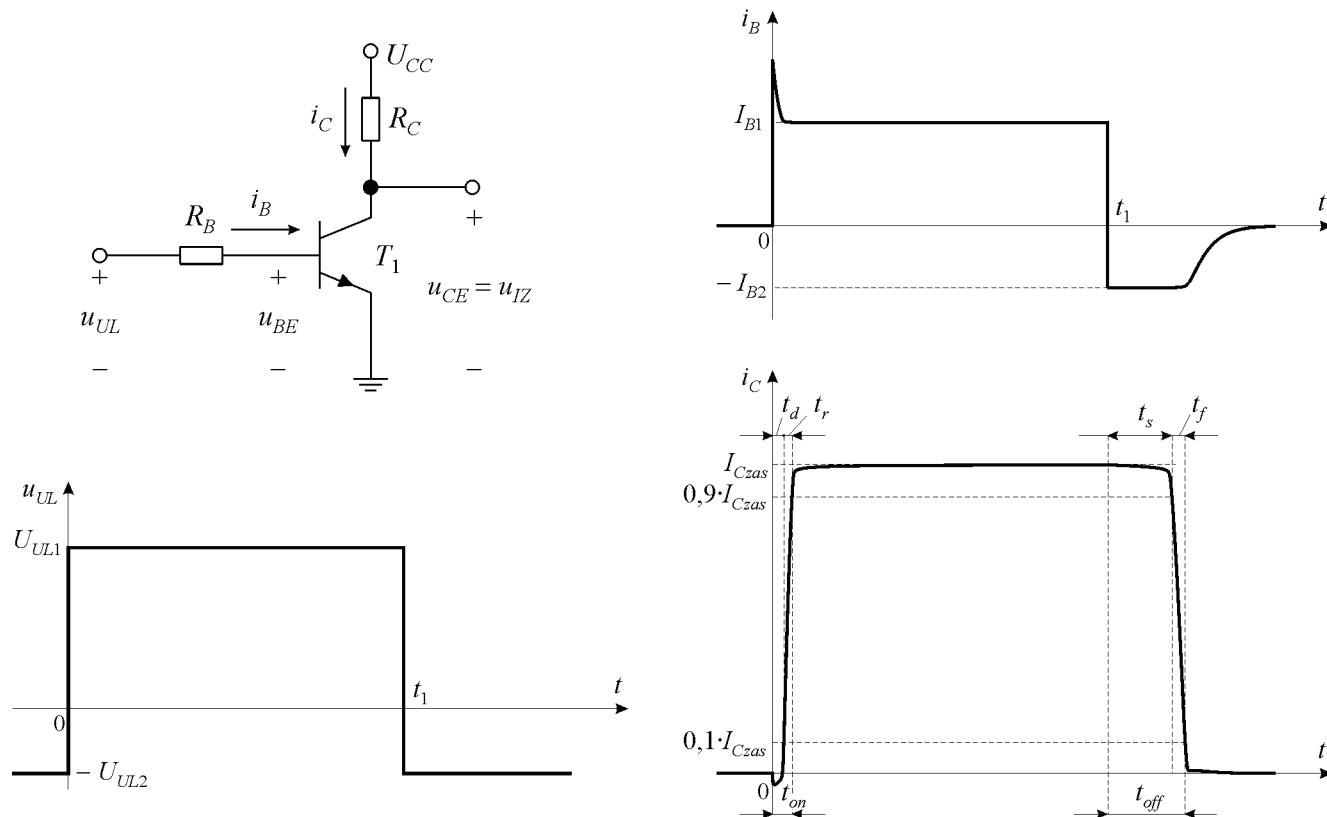
## Primjer 8.16

U lancu invertora sa slike zadani su napon napajanja  $U_{CC} = 5\text{ V}$  i otpori otpornika  $R_B = 20\text{ k}\Omega$  i  $R_C = 1\text{ k}\Omega$ . Parametri svih tranzistora su jednaki i iznose: faktor strujnog pojačanja  $\beta = 100$  i naponi  $U_{CEzas} = 0,2\text{ V}$  i  $U_{BEzas} = 0,8\text{ V}$ . Da li uz navedene podatke invertori ispravno rade? Odrediti napone logičkih 0 i 1 invertora s tranzistorom  $T_1$ .



# Impulсни odziv

## Vremenski odziv na pravokutni impuls



# Uključivanje tranzistora

□ Za  $t < 0 \rightarrow$  napon  $u_{UL} = -U_{UL2}$  zaporno polarizira spoj emiter-baza  $\rightarrow i_B \approx 0$ ,  $u_{BE} = -U_{UL2}$ ; napon  $U_{CC}$  zaporno polarizira spoj kolektor-baza  $\rightarrow i_C \approx 0 \rightarrow$  tranzistor je u **području zaptiranja**

□ U  $t = 0 \rightarrow$  trenutna promjena napona  $u_{UL}$  s  $-U_{UL2}$  na  $U_{UL1}$  izaziva trenutnu promjenu struje  $i_B \rightarrow$  spoj emiter-baza postupno se propusno polarizira  $\rightarrow$  postupno raste struja  $i_C \rightarrow$  tranzistor prolazi kroz **normalno aktivno područje** i uz

$$i_{B1} = \frac{U_{UL1} - U_{BEzas}}{R_B} > \frac{I_{Czas}}{\beta} = \frac{U_{CC} - U_{CEzas}}{\beta R_C}$$

prelazi u **područje zasićenja**

□ Impulsna vremena

- **vrijeme zakašnjenja**  $t_d \rightarrow$  od  $t = 0$  do  $i_C = 0,1 I_{Czas}$
- **vrijeme porasta**  $t_r \rightarrow$  od  $i_C = 0,1 I_{Czas}$  do  $i_C = 0,9 I_{Czas}$
- **vrijeme uključivanja**  $t_{on} = t_d + t_r$

# Isključivanje tranzistora

- U  $t = t_1 \rightarrow$  trenutna promjena napona  $u_{UL}$  s  $U_{UL1}$  na  $-U_{UL2} \rightarrow$  trenutna promjena struje  $i_B$  na

$$-I_{B2} = \frac{-U_{UL2} - U_{BEzas}}{R_B}$$

$\rightarrow$  zbog injektiranog naboja manjinskih nosilaca spoj emiter-baza ostaje u početku propusno polariziran  $\rightarrow$  struja baze  $-I_{B2}$  odstranjuje višak naboja u području zasićenja  $\rightarrow$  struje  $i_B$  i  $i_C$  počinju se smanjivati ulaskom u normalno aktivno područje  $\rightarrow$  prolazom kroz normalno aktivno područje tranzistor prelazi u području zapiranja

- Impulsna vremena

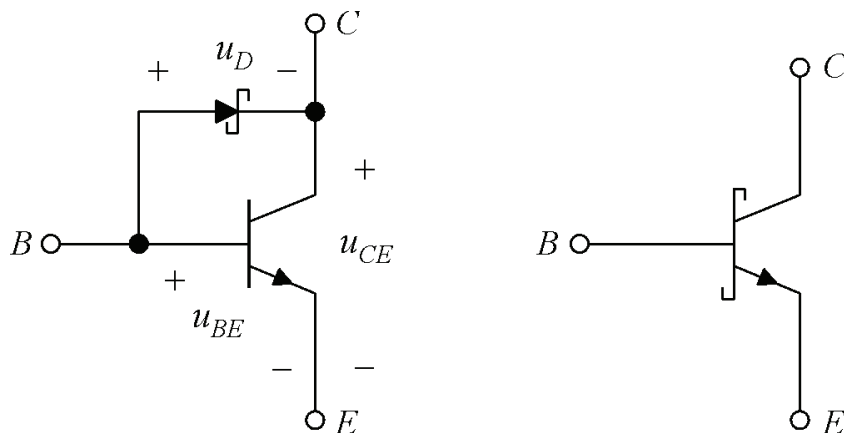
- vrijeme zadržavanja  $t_s \rightarrow$  od  $t = t_1$  do  $i_C = 0,9 I_{Czas}$
- vrijeme pada  $t_f \rightarrow$  od  $i_C = 0,9 I_{Czas}$  do  $i_C = 0,1 I_{Czas}$
- vrijeme isključivanja  $t_{off} = t_s + t_f$

# Brzina odziva

- ❑ Odnos vremena uključivanja i isključivanja podešava se omjerom  $I_{B2} / I_{B1}$  odnosno  $U_{UL2} / U_{UL1}$ 
  - veća struja  $I_{B1} \rightarrow$  brže uključivanje i sporije isključivanje
  - veći iznos struje  $I_{B2} \rightarrow$  brže isključivanje i sporije uključivanje
- ❑ Sklopka se može upravljati samo pozitivnim impulsom  $u_{UL}$  – s visokom razinom  $u_{UL} = U_{UL1}$  i niskom razinom  $u_{UL} = 0 \rightarrow$  manji iznos struje  $I_{B2}$  i sporije isključivanje
- ❑ Najduže vrijeme je vrijeme zadržavanja  $t_s \rightarrow$  zbog odstranjenja viška naboja manjinskih nosilaca u području zasićenja

# Skraćivanje vremena zadržavanja – Schottkyjev tranzistor

Schottkyjeva dioda između kolektora i baze



Kod propusne polarizacije spoja kolektor-baza provede Schottkyjeva dioda i ograniči napon  $u_{BC}$  na napon koljena diode – sprječava ulazak tranzistora dublje u zasićenje

Napon  $u_{CE}$  tranzistora u zasićenju  $u_{CE} = u_{BE} - u_D \approx 0,7 - 0,4 = 0,3 \text{ V}$

Primjena: Schottky TTL

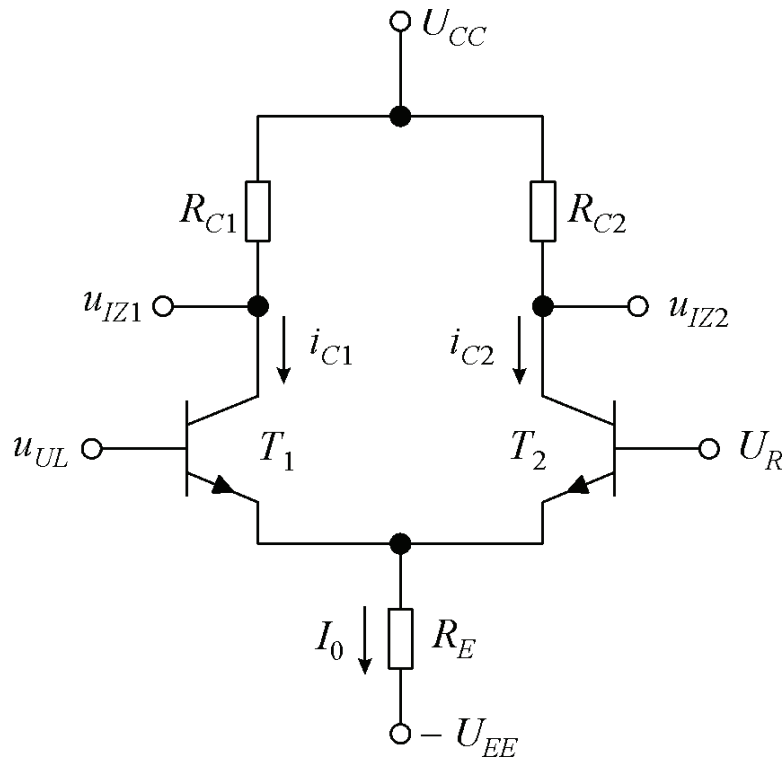


# Digitalni integrirani sklopovi

---

- ❑ Prvi digitalni integrirani sklopovi - bipolarni sklopovi
- ❑ Najznačajnije bipolarne logičke skupine
  - TTL – skupina **tranzistorsko-tranzistorske logike**  
(engl. *transistor-transistor-logic*) – veća brzina rada primjenom Schottkyjevih tranzistora
  - ECL – skupina **emitorski vezane logike**  
(engl. *emitter-coupled-logic*) – najbrža skupina logičkih sklopova → tranzistori rade u normalnom aktivnom području i području zasićenja

# Strujna sklopka



Sklopovska konfiguracija diferencijskog pojačala

ulaz  $\rightarrow u_{UL}$ ,  $U_R \rightarrow$  referentni napon

$$\frac{i_{C1}}{i_{C2}} = \exp\left(\frac{u_{BE1} - u_{BE2}}{U_T}\right) = \exp\left(\frac{u_{UL} - U_R}{U_T}\right)$$

za  $i_{C1} + i_{C2} \approx I_0$

$$\frac{i_{C1}}{I_0} \approx \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{U_R - u_{UL}}{U_T}\right)}$$

$$\frac{i_{C2}}{I_0} \approx \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{u_{UL} - U_R}{U_T}\right)}$$

# Strujna sklopka – naponi logičkih razina

za  $U_R - u_{UL} > 4 U_T \rightarrow$

$$i_{C1} \approx 0 \text{ i } i_{C2} \approx I_0$$

$$u_{IZ1} = U_1 \approx U_{CC}$$

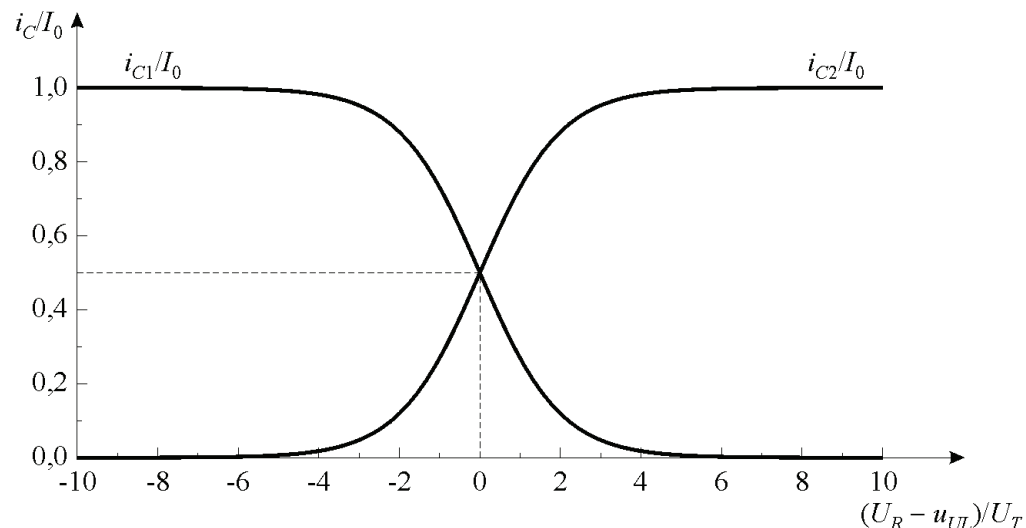
$$u_{IZ2} = U_0 \approx U_{CC} - I_0 R_{C2}$$

za  $u_{UL} - U_R > 4 U_T \rightarrow$

$$i_{C1} \approx I_0 \text{ i } i_{C2} \approx 0$$

$$u_{IZ1} = U_0 \approx U_{CC} - I_0 R_{C1}$$

$$u_{IZ2} = U_1 \approx U_{CC}$$



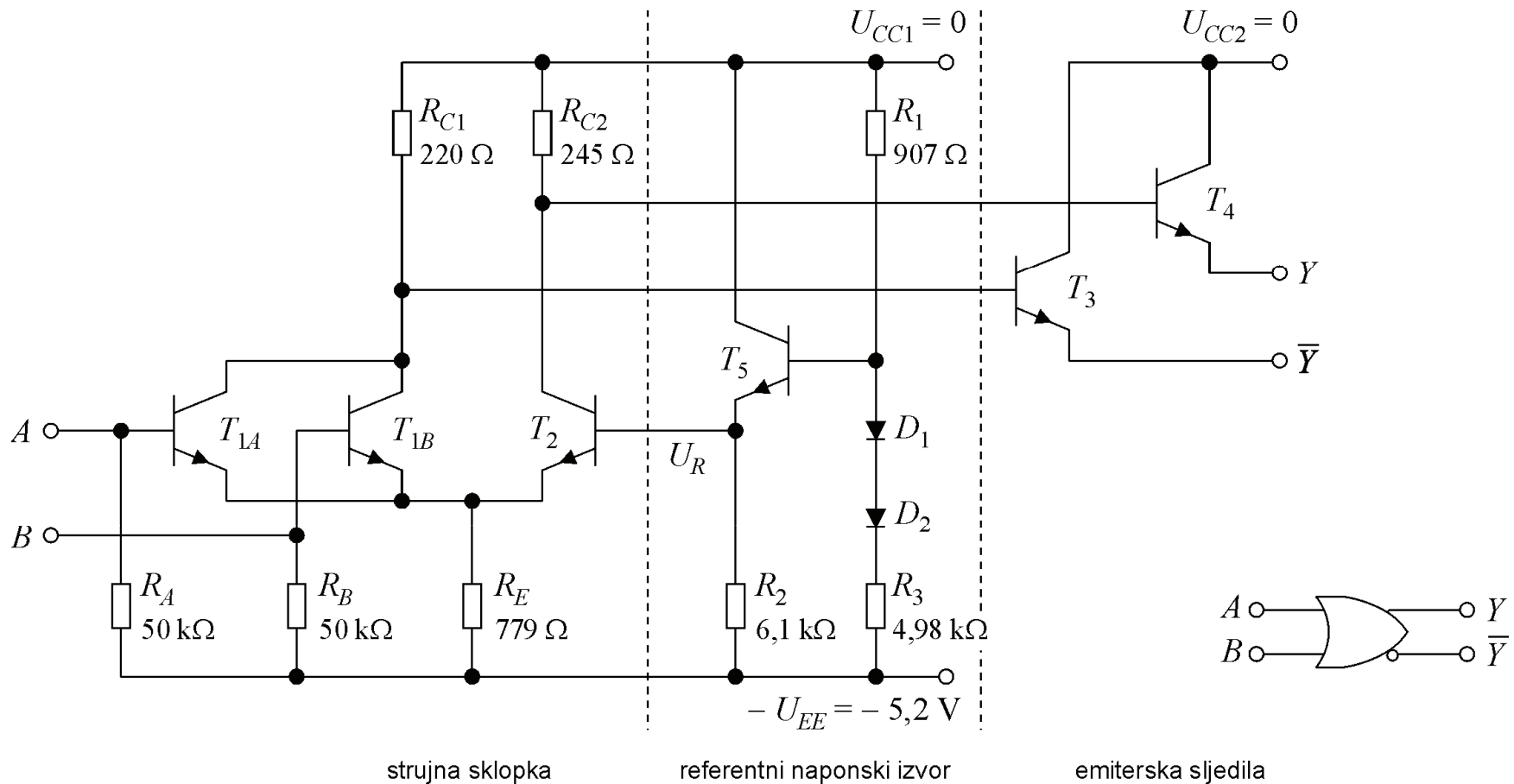
tranzistori rade u normalnom aktivnom području ili području zapiranja

$$I_0 = \frac{U_R - u_{BE2} + U_{EE}}{R_E}$$

$$U_0 \approx U_{CC} - \frac{R_C}{R_E} (U_R - u_{BE2} + U_{EE})$$

$$\Delta U = U_1 - U_0 \approx \frac{R_C}{R_E} (U_R - u_{BE2} + U_{EE})$$

# ECL sklop serije 10K - shema



# ECL sklop serije 10K – opis rada (1)

- ❑ Temelji se na strujnoj sklopki
- ❑ Logička funkcija  $\rightarrow$  tranzistor  $T_1$  zamijenjen paralelno spojenim tranzistorima  $T_{1i}$
- ❑ Izlazi  $\bar{Y}$  i  $Y$  spojeni su na kolektore  $T_{1i}$  i  $T_2$  preko emitorskih sljedila s tranzistorima  $T_3$  i  $T_4$
- ❑ Za ispravan rad  $U_0 > U_R > U_1$
- ❑ Za barem jedan od ulaza u logičkoj 1  $\rightarrow$  struja teče kroz  $R_{C1}$  i ne teče kroz  $R_{C2} \rightarrow U_{\bar{Y}} = U_0 \rightarrow U_Y = U_1$
- ❑ Za sve ulaze u logičkoj 0  $\rightarrow$  struja ne teče kroz  $R_{C1}$  i teče kroz  $R_{C2} \rightarrow U_{\bar{Y}} = U_1 \rightarrow U_Y = U_0$
- ❑ Logičke funkcije ILI i NILI  $Y = A + B, \quad \bar{Y} = \overline{A + B}$

# ECL sklop serije 10K – opis rada (2)

- ❑ Uloga sljedila s  $T_3$  i  $T_4 \rightarrow$ 
  - naponi emitera  $T_3$  i  $T_4$  negativniji su od napona kolektora  $T_{1i}$  i  $T_2 \rightarrow$  pomak naponske razine osigurava iste napone logičkih 0 i 1 na ulazima i izlazima
  - zbog velikog strujnog pojačanja sljedila  $\rightarrow$  veće izlazne struje manje utječu na napone kolektora  $T_{1i}$  i  $T_2 \rightarrow$  moguć veći faktor grananja izlaza
- ❑ Emitterski otpornici tranzistora  $T_3$  i  $T_4$  su otpornici  $R_A$  i  $R_B$  ulaza sljedećeg sklopa  $\rightarrow$  za veće brzine rada otpori se smanjuju spajanjem paralelnih dodatnih otpornika  $\rightarrow$  za prijenosne linije – otpor od  $50 \Omega$  spaja se na drugi napon napajanja od  $-2 \text{ V}$

# ECL sklop serije 10K – opis rada (3)

- ❑ Tranzistori ne ulaze u zasićenje  $\rightarrow$  ako je na bazi jednog od ulaznih tranzistora napon  $U_B = U_1 \rightarrow U_{\bar{Y}} = U_0 \rightarrow U_C = U_0 + U_{BE}$

$$U_{CB} = U_0 + U_{BE} - U_1 = U_{BE} - \Delta U$$

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} = 2U_{BE} - \Delta U = 2U_{\gamma} - \Delta U$$

za normalno aktivno područje  $\rightarrow U_{CE} \geq U_{CEzas}$

primjer: za  $U_{CEmin} = U_{\gamma} / 2 \rightarrow \Delta U_{max} = 1,5 U_{\gamma}$

- ❑ Koriste se negativni naponi napajanja, jer su smetnje manje izražene u tim točkama
- ❑ Odvajaju se naponi napajanja za strujne sklopke i referentne naponske izvore (ne generiraju strujne promjene) od napona napajanja za emitera sljedila (generiraju velike strujne promjene)

# ECL sklop serije 10K – svojstva

## Osnovna svojstva

- ❑ referentni napon  $\rightarrow U_R = -1,32 \text{ V}$
- ❑ naponi logičkih razina  $\rightarrow U_1 = -0,88 \text{ V}$  i  $U_0 = -1,77 \text{ V}$
- ❑ razmak logičkih razina  $\rightarrow \Delta U = U_1 - U_2 = 0,89 \text{ V}$
- ❑ faktor grananja izlaza  $\rightarrow N = 10$
- ❑ vrijeme kašnjenja  $\rightarrow t_d = 2 \text{ ns}$
- ❑ srednja disipacija snage  $\rightarrow P = 25 \text{ mW}$
- ❑ umnožak snage i vremena kašnjenja  $\rightarrow P \cdot t_d = 50 \text{ pJ}$