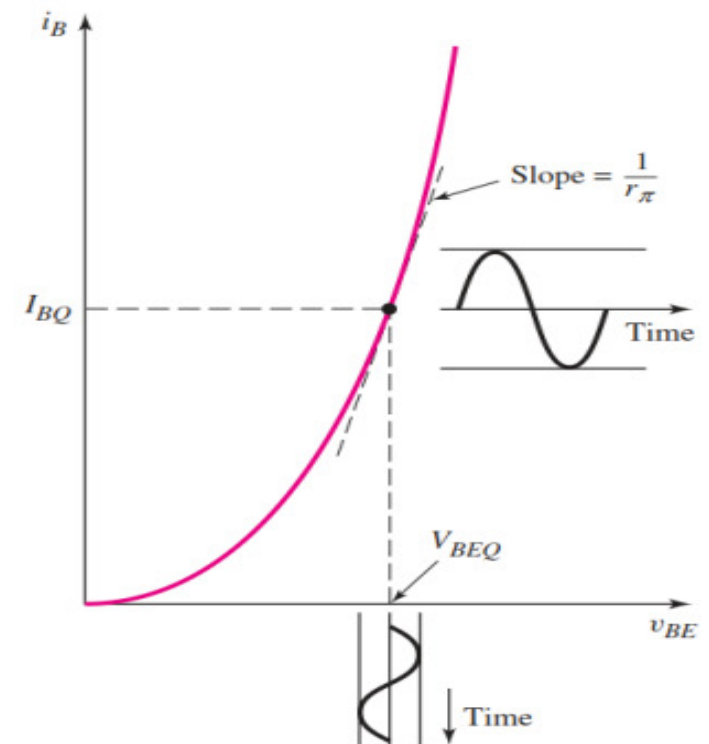


Pojačavači sa bipolarnim tranzistorima

## Linearni model tranzistora

Ukoliko pojačavač tretiramo kao linearno kolo sve komponente koje on sadrži treba da budu linearne, odnosno okarakterisane linearnim strujno naponskim karakteristikama. S obzirom da su karakteristike tranzistora nelinearne funkcije sledi da je za analizu pojačavača kao linearnog kola neophodno da se ove **karakteristike linearizuju u okolini radne** tačke. Ovo praktično znači da se nelinearne karakteristike tranzistora za male promene napona i struja u okolini radne tačke aproksimiraju linearnim funkcijama (pravim linijama).

U linearnim kolima se može primeniti **superpozicija** što omogućava da se odvojeno analizira kolo u kojem deluju jednosmerni generatori (DC analiza) a odvojeno kolo u kome deluju naizmenični generatori (AC analiza).



## Označavanje jednosmernih i naizmeničnih kompenenata

Naizmenične komponente struja i napona označavaju se malim slovima i indeksom sa malim slovima.

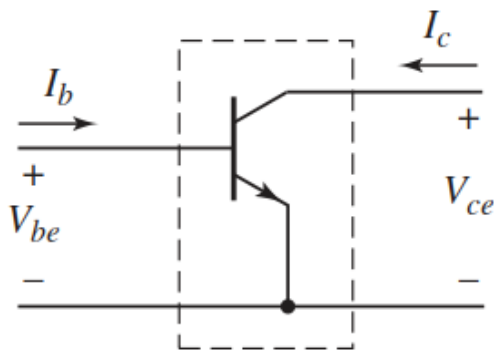
Jednosmerne veličine označavaju se velikim slovom i indeksom sa velikim slvom.

Ukupna struja ili napon, koja obuhvata i jednosmernu i naizmeničnu komponentu, označava se malim slovom i indeksom sa velikim slovom.

Promenjive	Značenje
$i_B, v_{BE}$	Ukupna trenutna vrednost
$I_B, V_{BE}$	Jednosmerna vrednost
$i_b, v_{be}$	Trenutna naizmenična vrednost

## Model tranzistora sa h parametrima

Tranzistor se može modelirati kao četvoropol, odnosno komponenta sa dva pristupa, ulaznim (B-E) i izlaznim (C-E). Kada se četvoropol poveže u električno kolo na njemu se mogu izmeriti četiri veličine: ulazni naponon  $v_{BE}$ , ulazna struja  $i_b$ , izlazni napon  $v_{ce}$ , izlazna struja  $i_c$ . Ukoliko se zadaju dve od ove četiri veličine preostale dve zavise samo od karakteristika komponente. U praksi se najviše koriste h-parametri, za koje su nezavisno promenjive ulazna struja  $i_b$  i izlazni napon  $v_{ce}$ .



Napon baza-emitor se može predstaviti kao nelinearna funkcija od struje baze i napona kolektor-emitor. Struja kolektora se može izraziti kao nelinearna funkcija od struje baze i napona kolektor-emitor.

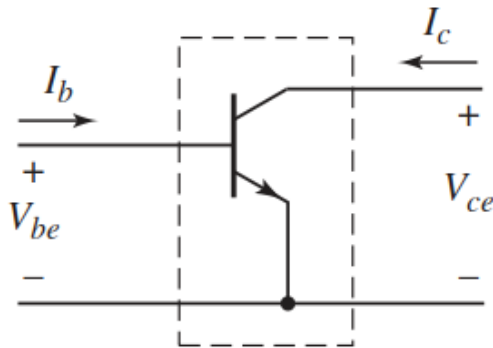
$$\begin{aligned}v_{be} &= f_1(i_B, v_{CE}) \\ i_C &= f_2(i_B, v_{CE})\end{aligned}$$

Ukoliko razmatramo priraštaj zavisno promenjivih veličina ( $v_{be}$ ,  $i_C$ ) pri malim priraštajima nezavisno promenjivih veličina ( $i_B$ ,  $v_{ce}$ ) dobijamo sledeće izraze:

$$\Delta v_{BE} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \cdot \Delta i_B + \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \cdot \Delta v_{CE}$$

$$\Delta i_C = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \cdot \Delta i_B + \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \cdot \Delta v_{CE}$$

## Model tranzistora sa h parametrima



$$\Delta v_{BE} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \cdot \Delta i_B + \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \cdot \Delta v_{CE}$$

$$\Delta i_C = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \cdot \Delta i_B + \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \cdot \Delta v_{CE}$$

Priraštaji struje baze i priraštaj napona kolektor emitor predstavljaju naizmeničke komponente ovih veličina:

$$i_b = \Delta i_B \quad v_{ce} = \Delta v_{CE}$$

- Ulazni parametar  $h_{ie}$  (i-input) povezuje ulaznu struju i ulazni napon,  $v_{be}$  i  $i_b$ , kada je izlazni napon konstantan (naizmenična komponenta  $v_{ce}$  jednaka nuli).
- Povratni parametar  $h_{re}$  (r-reverse transfer) daje zavisnost ulaznog napona  $v_{be}$  od izlaznog napona  $v_{ce}$ , napona kada je ulazna struja konstantna.
- Prenosni parametar  $h_{fe}$  (f-forward transfer) daje zavisnost izlazne struje od ulazne struje  $i_b$ , kada je izlazni napon konstantan.
- Izlazni parametar  $h_{oe}$  (o-out) daje zavisnost izlazne struje  $i_c$  od izlaznog napona  $v_{ce}$ , kada je ulazna struja konstantna.

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} \quad h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

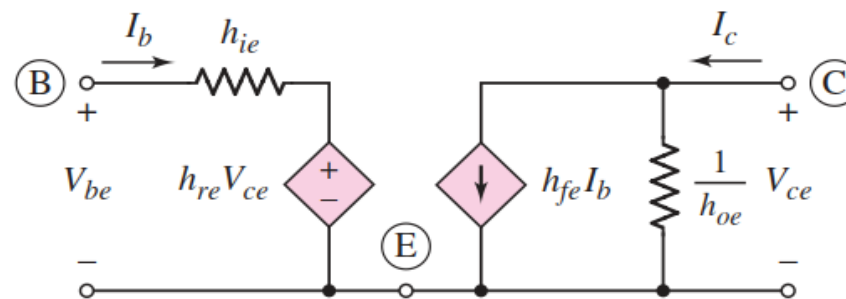
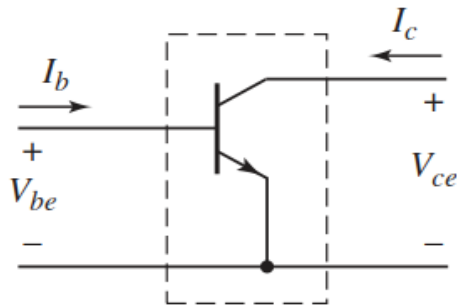
$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} \quad h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

## Model tranzistora sa h parametrima

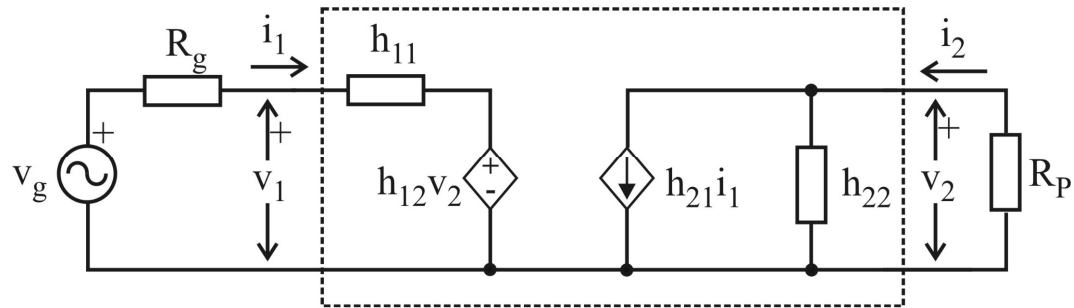
Naponi i struje u izrazima za  $h$  parametre su naizmenične komponente struja i napona. Oznaka  $e$  u indeksu označava da se radi o sprezi sa zajedničkim emitorom. Mogu se definisati  $h$  parametri i za druge sprege tranzistora.

$$v_{be} = h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe} \cdot i_b + h_{oe} \cdot v_{ce}$$



## Model tranzistora sa h parametrima



$$A_s = \frac{i_2}{i_1} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22}R_p}$$

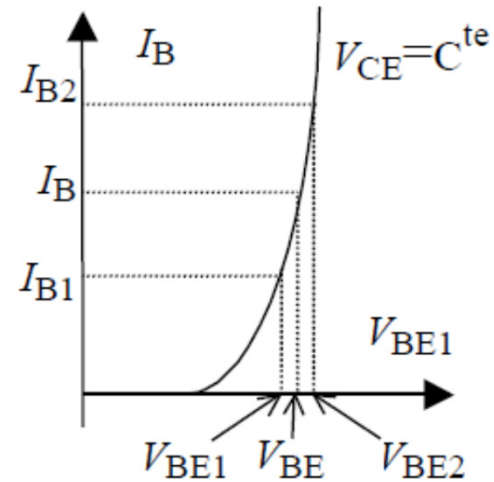
$$A_n = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_p i_2}{R_{ul} i_1} = -\frac{R_p}{R_{ul}} A_s$$

## Dodatak Model bipolarnog tranzistora

### Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

$$h_{iE} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE} = Const}$$

$$h_{iE} = \left. \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{I_{B2} - I_{B1}} \right|_{V_{CE} = Const} \approx x \text{ k}\Omega$$

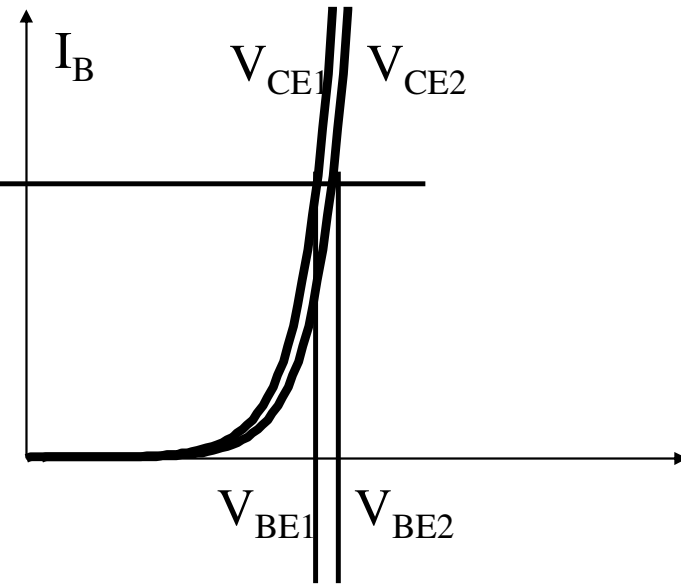




## Dodatak Model bipolarnog tranzistora

### Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

$$h_{rE} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right|_{I_B = \text{Const.}}$$

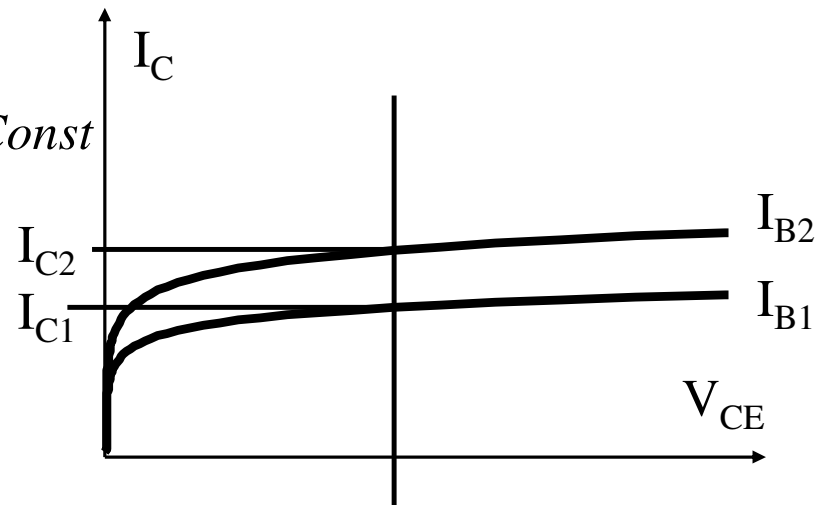


$$h_{rE} = \left. \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{V_{CE2} - V_{CE1}} \right|_{I_B = \text{Const.}} \approx 0$$

## Dodatak Model bipolarnog tranzistora

### Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

$$h_{fE} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE} = \text{Const}}$$

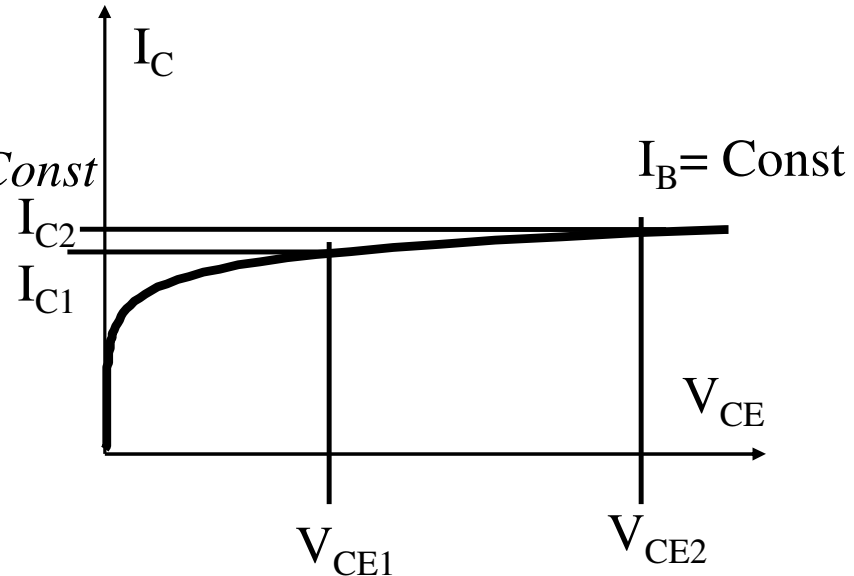


$$h_{fE} = \left. \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}} \right|_{V_{CE} = \text{Const}} \approx 100$$

## Dodatak Model bipolarnog tranzistora

### Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

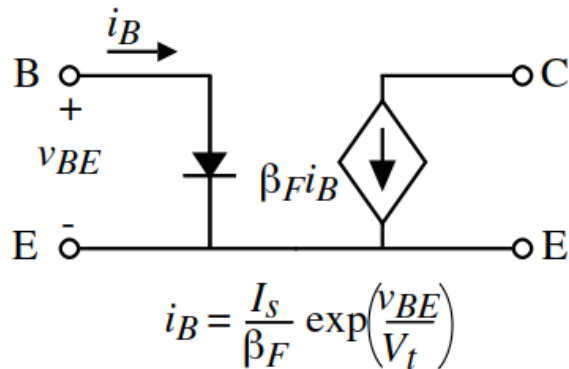
$$h_{oE} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right|_{I_B = \text{Const}}$$



$$h_{oE} = \left. \frac{I_{C2} - I_{C1}}{V_{CE2} - V_{CE1}} \right|_{I_B = \text{Const.}} \approx 0$$

## Pi model

Ukoliko smatramo da je pojačavač unilateralan, (da nema prenošenja signala od izlaza ka ulazu) ulazna struja će zavisiti samo od ulaznog napona i obrnuto. Dinamički parametar koji povezuje naizmeničnu komponentu ulaznog napona,  $v_{be}$ , i naizmeničnu komponentu ulazne struje,  $i_b$ , struje je difuziona otpornost  $r_\pi$ . Ovaj dinamički parametar se može odrediti iz jednačine modela za velike signale.



Q označava da se izvodi traže u mirnoj radnoj tački  
 $I_{BQ}$  je jednosmerna struja baze

$$i_B = \frac{I_S}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q$$

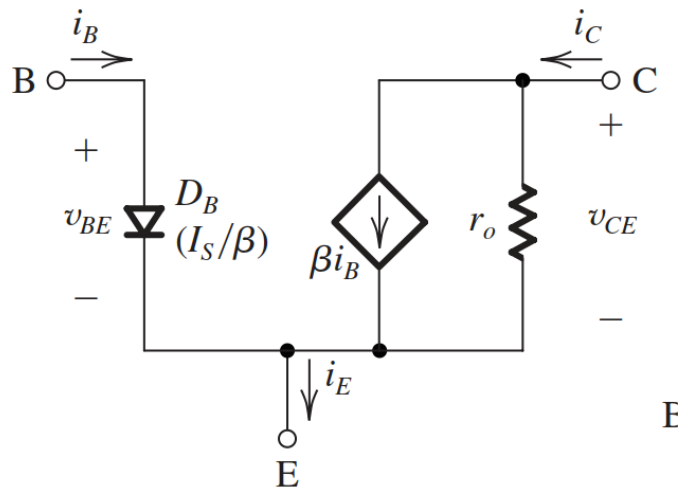
$$\frac{1}{r_\pi} = \left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \frac{\partial}{\partial v_{BE}} \left[ \frac{I_S}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right] \Bigg|_Q$$

$$\frac{1}{r_\pi} = \frac{1}{V_T} \left[ \frac{I_S}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right] \Bigg|_Q = \frac{I_{BQ}}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{v_{BE}}{i_B} = \frac{V_T}{I_{BQ}}$$

## Pi model

Naizmenični izlazni napon zavisi pre svega od ulaznog naizmeničnog napona ali i od izlaznog napona. Dinamički parametar koji povezuje izlaznu struju sa izlaznim naponom naziva se transkonduktansa,  $g_m$ . Ovaj dinamički parametar se određuje iz jednačine modela za velike signale.



$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

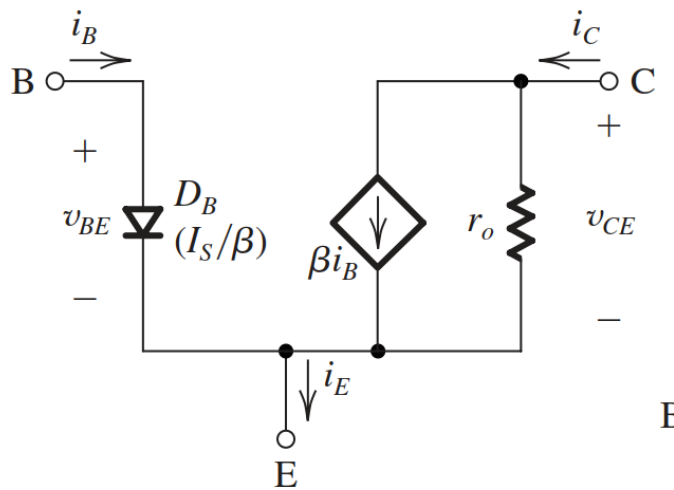
$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{BE}} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q$$

$$\left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \frac{1}{V_T} \cdot I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \Big|_Q = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

## Pi model

Naizmenični izlazni napon  $i_c$  zavisi i od izlaznog napona,  $v_{ce}$ . Dinamički parametar koji povezuje izlaznu struju sa izlaznim naponom je izlazna otpornost,  $r_o$ . Ovaj dinamički parametar se određuje iz jednačine modela za velike signale. Vrednost  $r_o$  određena je jednosmernom strujom kolektora i Erlijevim naponom,  $V_A$ .



$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$r_o = \frac{v_{ce}}{i_c} = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta i_C} = \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_Q$$

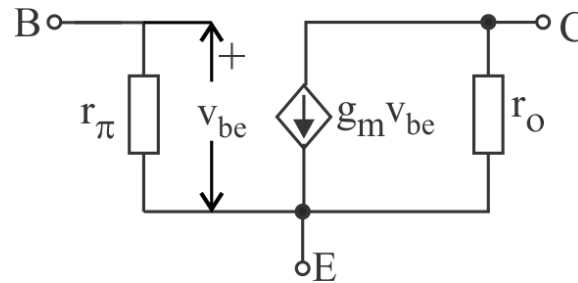
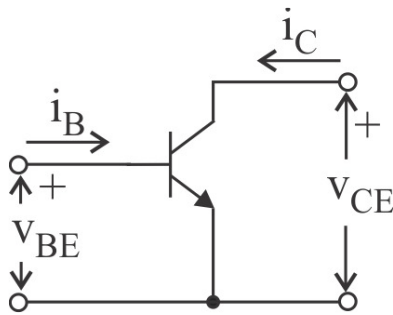
$$\frac{1}{r_o} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_Q = \frac{\partial}{\partial v_{CE}} \left[ I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) \right] \Bigg|_Q$$

$$\frac{1}{r_o} = \frac{1}{V_A} \cdot I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right] \Bigg|_Q \approx \frac{I_{CQ}}{V_A}$$

$$r_o = \frac{v_{ce}}{i_c} = \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

## Pi model bipolarnog tranzistora

Prikazani model za male signale (za naizmeničnu struju) je identičan za npn i pnp tip tranzistora. Parametri modela značajno zavise od radne tačke. Vrednosti dinamičkih parametara važe samo ukoliko se struje i naponi menjaju u okolini mirne radne tačke. Ovde je dat unilateralni model a tačniji model bi obuhvatao i uticaj izlaza na ulaz.



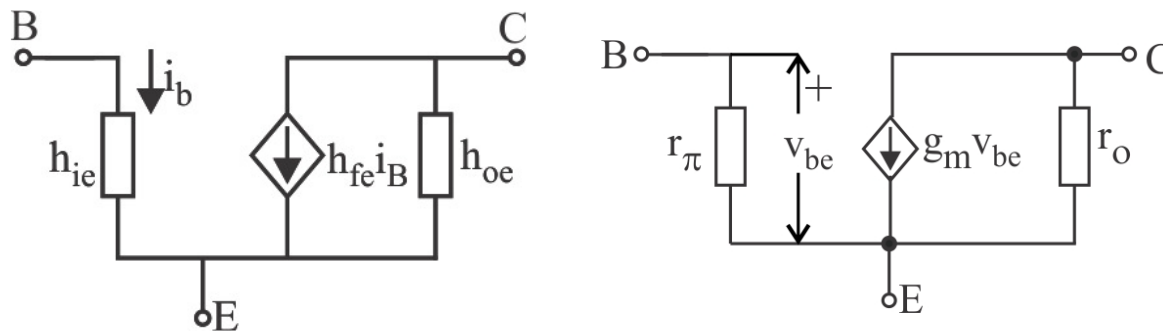
$$r_{\pi} = \frac{v_{BE}}{i_B} = \frac{V_T}{I_{BQ}}$$

$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

$$r_o = \frac{v_{ce}}{i_c} = \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

## Pi model bipolarnog tranzistora

Dinamički parametri u  $\pi$  modelu i dinamički parametri u  $h$  modelu su međusobno povezani. Pored oznaka jedina razlika se ogleda u tome što se u  $\pi$  modelu primenjuje strujni generator kontrolisan naponom dok se u  $h$  modelu koristi strujni generator kontrolisan strujom.



$$r_{\pi} = h_{ie}$$

$$g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$r_o = \frac{1}{h_{oe}}$$

Odnos naizmenične komponente struje kolektora i struje baze zavisi od radne tačke ali je približno jednak koeficijentu za spregu sa zajedničkim emitorom  $\beta$ . Iz tog razloga ponekad se koristi ista oznaka za odnos naizmeničnih komponentata kao za odnos jednosmernih komponentata.

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \qquad h_{fe} = g_m \cdot \frac{1}{r_{\pi}} = \beta$$



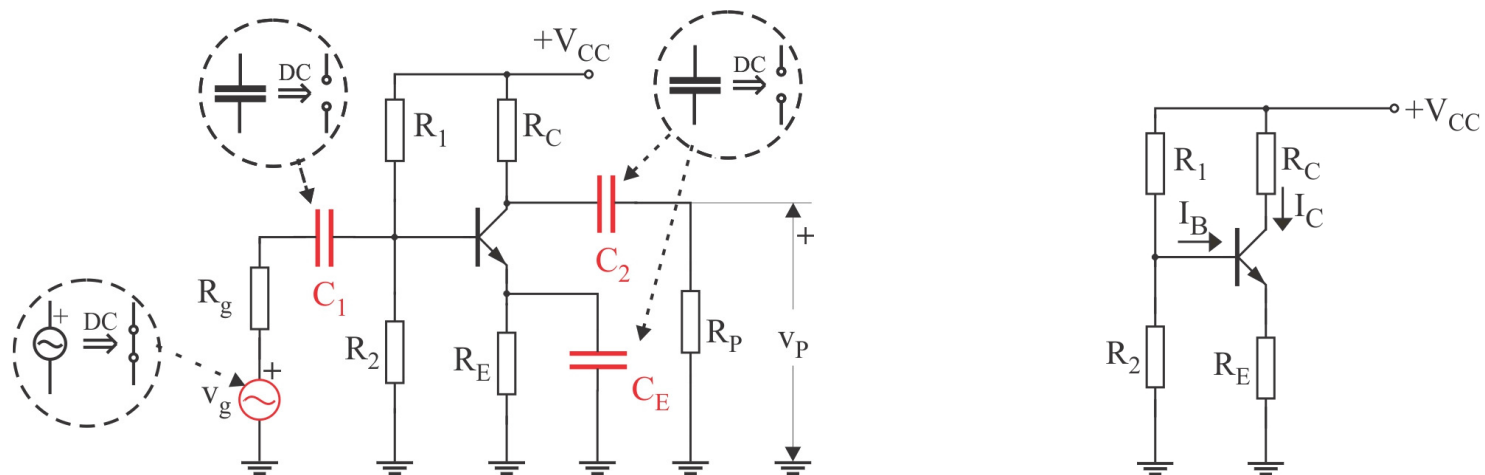
## Analiza pojačavača

Postupak sinteze ili analize pojačavača sastoji se od sledećih koraka:

- **Jednosmernom analizom kola** određuje se mirna radna tačka tranzistora. Elemente kolo za polarizaciju treba odabrati na takav način da se mirna radna tačka nalazi na sredini radne prave i u linearnijem delu karakteristika tranzistora.
- Nakon što je utvrđena mirna radna tačka mogu se na osnovu jednosmernih struja tranzistora odrediti **dinamički parametri tranzistora** (  $h$  parametri ili parametri  $\pi$  modela).
- Formira se **ekvivalentno kolo pojačavača za male signale** na taj način što se ukinu svi elementi na kojima nema promenjive (naizmenične) komponente napona ili struja. Jednosmerni naponski generatori i veće kapacitivnosti se kratkospajaju, jednosmerni strujni su prekid. Tranzistori se zamenjuju modelom za male signale.
- **Naizmeničnom analizom kola** ili analizom ekvilvaletnog kola pojačavača za male signale određuju se karakteristike pojačavača: naponsko pojačanje, strujno pojačanje, ulazna i izlazna otpornost.

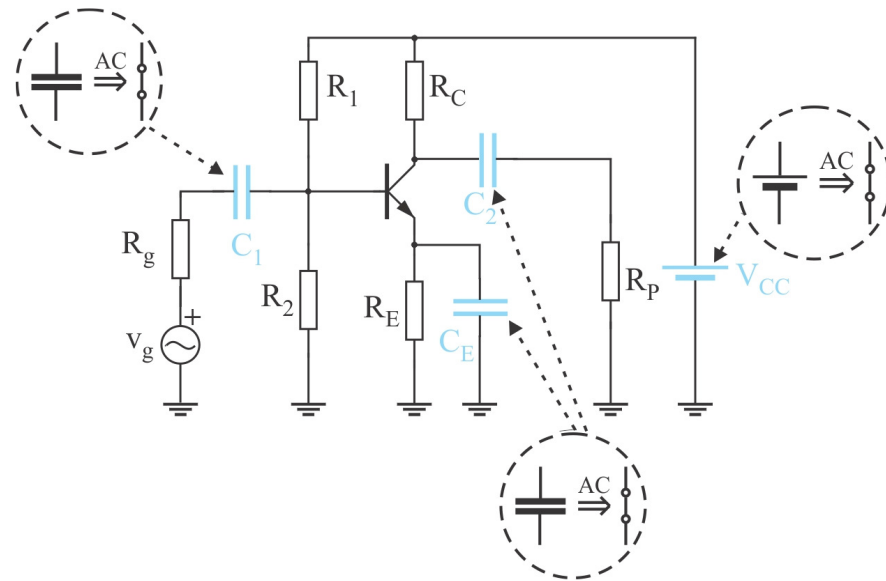
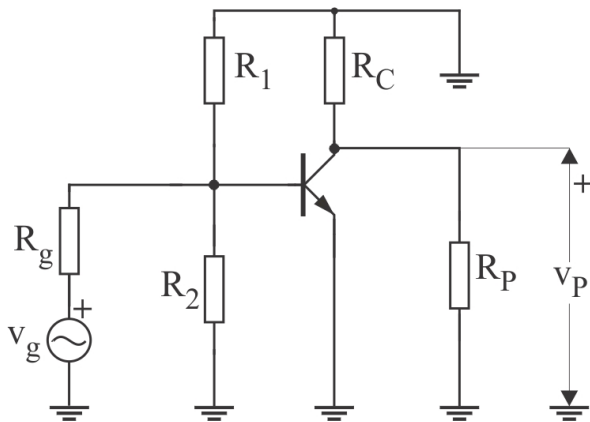
# Analiza pojačavača

## Jednosmerna analiza pojačavača (Direct current DC)

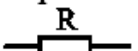
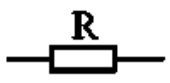
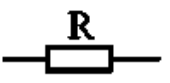
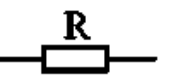

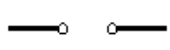
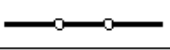
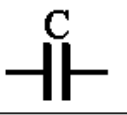
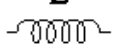
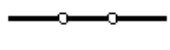
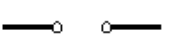
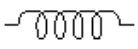
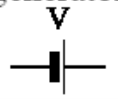
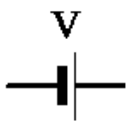
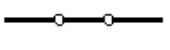
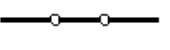
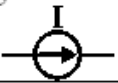

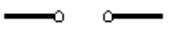
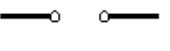

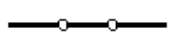
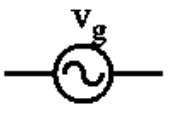
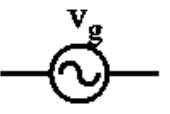


# Analiza pojačavača

## Naizmenička analiza pojačavača (Alternating current AC)

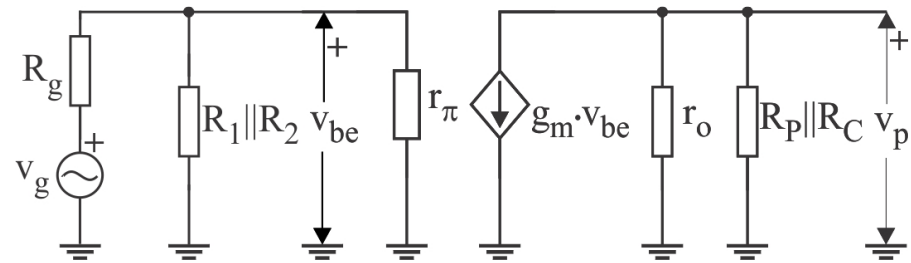
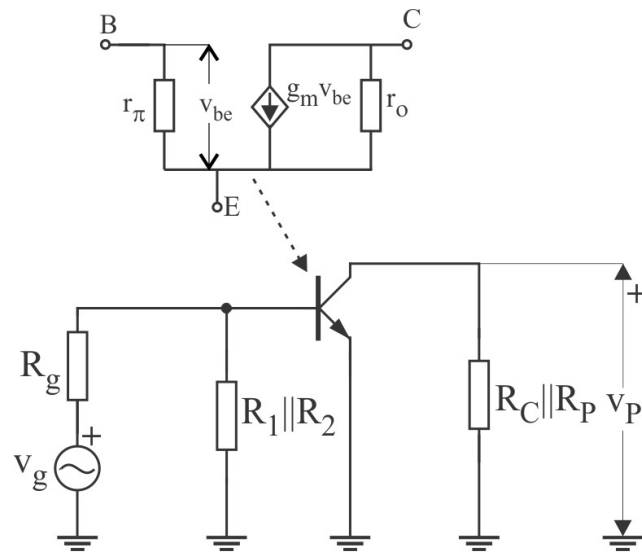


## Pojačavač sa zajedničkim emitorom

Element	Jednosmerni model (DC)	Naizmenični model (AC)	
		Srednje frekvencije	Opšti slučaj
Otpornik R 			
Kondenzator C 		$\omega C \rightarrow \infty$ 	
Kalem L 		$\omega L \rightarrow \infty$ 	
Jednosmerni naponski generator V 			
Jednosmerni strujni generator I 			
Naizmenični naponski generator $v_g$ 			

# Analiza pojačavača

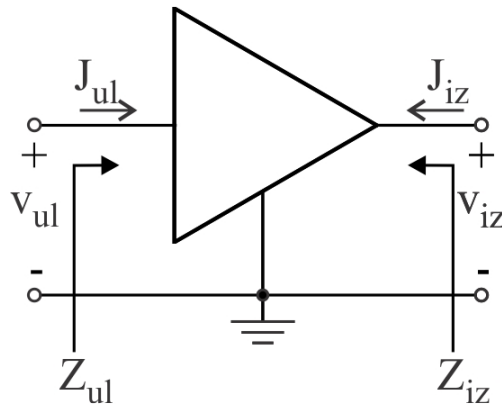
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{V_T}{I_B} \quad V_T = \frac{K \cdot T}{q} = 26 \text{ mV}$$



## Analiza pojačavača

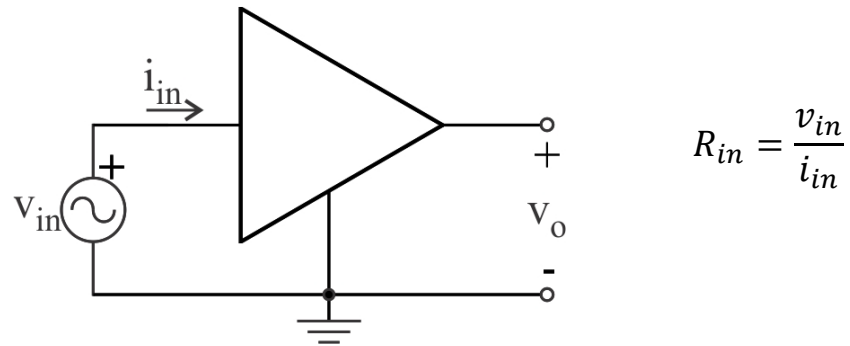
Ulazna otpornost se meri na ulaznom pristupu a izlazna na izlaznom pristupu. Obe otpornosti se određuju iz kola za naizmeničnu struju. Prilikom merenja ulazne otpornosti između ulaznih priključaka veže se idealni naponski generator koji predstavlja test generator. Odnos napona i struje test generatora predstavlja ulaznu otpornost,  $R_{ul}$ .

Izlazna otpornost se određuje vezivanjem idealnog naponskog generatora na izlaznom pristupu, pri čemu je vrednost pobudnog generatora jednaka nuli (naponski pobudni generator se kratkospaja, strujni pobudni predstavlja prekid). Odnos napona i struje test generatora vezanog između izlaznih priključaka predstavlja izlaznu otpornost,  $R_{iz}$ .

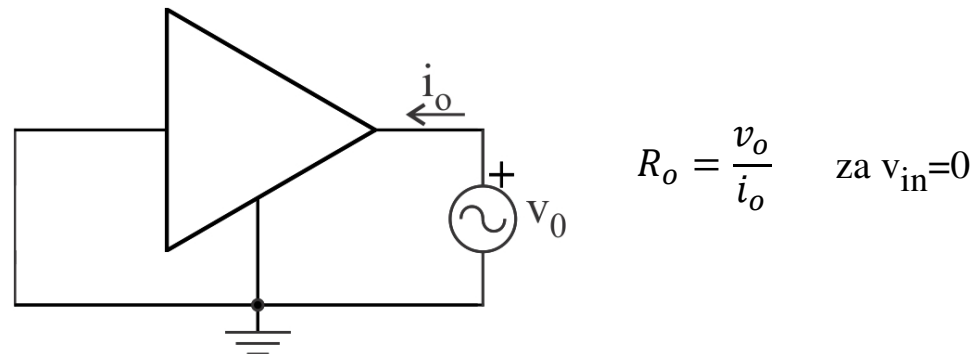


## Analiza pojačavača

### Merenje ulazne otpornosti



### Merenje izlazne otpornosti

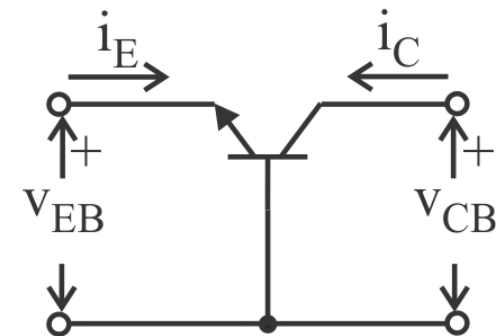
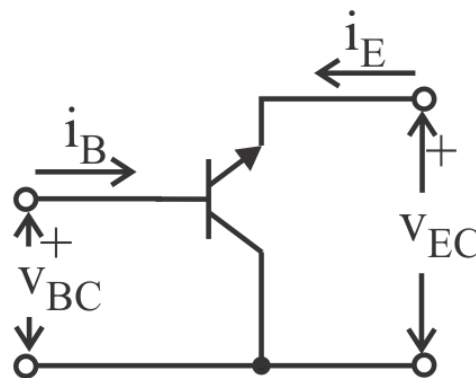
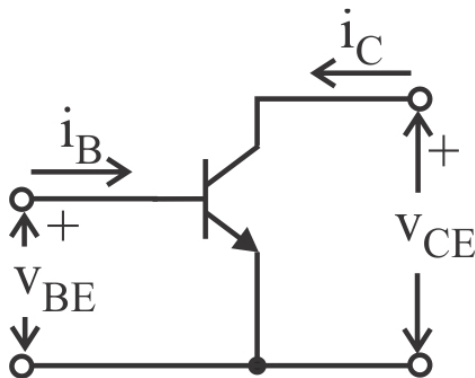


## Sprege tranzistora u pojačavačkim kolima

Tranzistor se može na više različitih načina povezati kao četvoropol (kolo ili komponenta sa dva pristupa). Pri tome, jedna od elektroda je povezana za ulazni pristup, druga za izlazni pristup, a treća referentna je povezana istovremeno i za ulazni i za izlazni pristup.

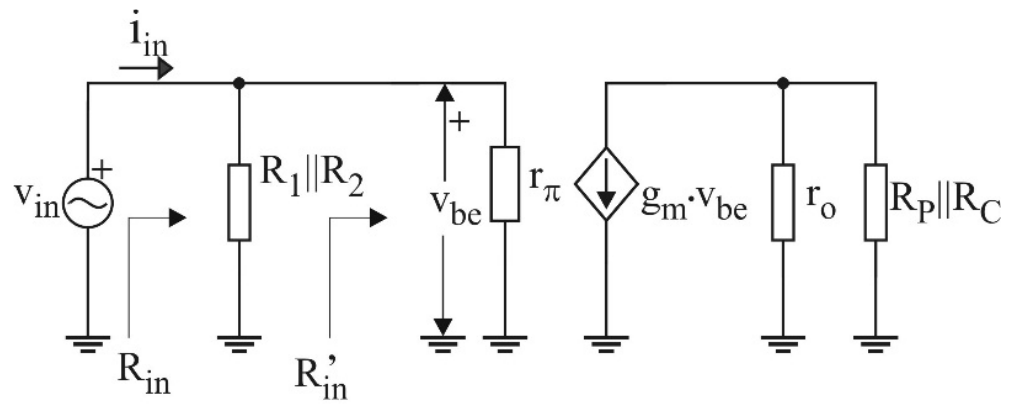
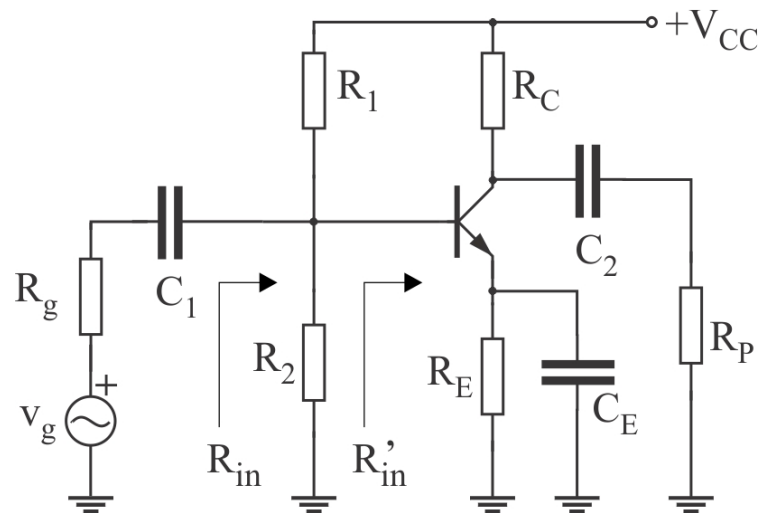
Postoje tri sprege tranzistora u pojačavačkim kolima:

- sprega sa zajedničkim emitorom (ulazna elektroda baza, izlazna kolektor, referentna emitor)
- sprega sa zajedničkim kolektorom (ulazna elektroda baza, izlazna emitor, referentna kolektor)
- sprega sa zajedničkom bazom (ulazna elektroda emitor, izlazna kolektor, referentna baza)





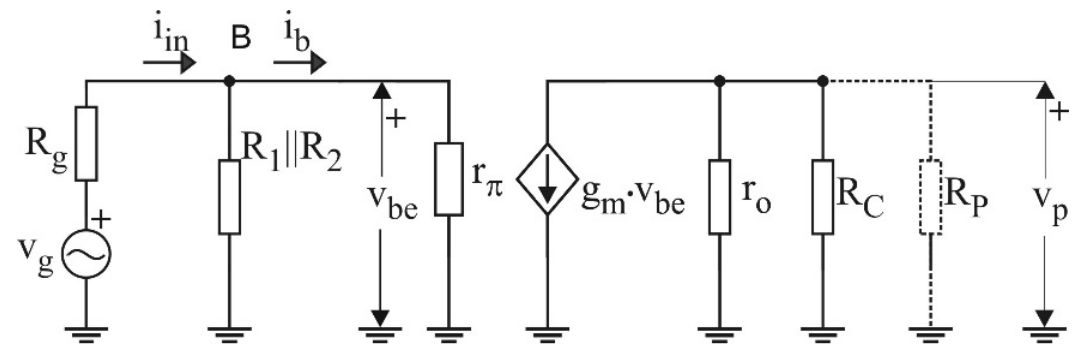
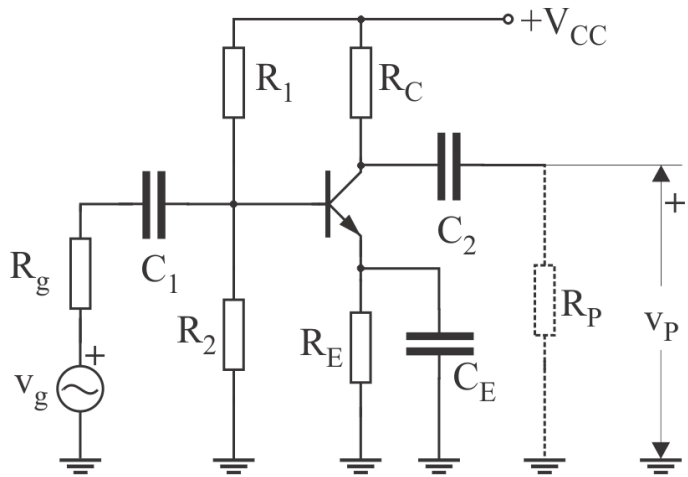
## Pojačavač sa zajedničkim emitorom



$$R_B = R_1 || R_2$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = r_{\pi} || R_B$$

## Pojačavač sa zajedničkim emitorom



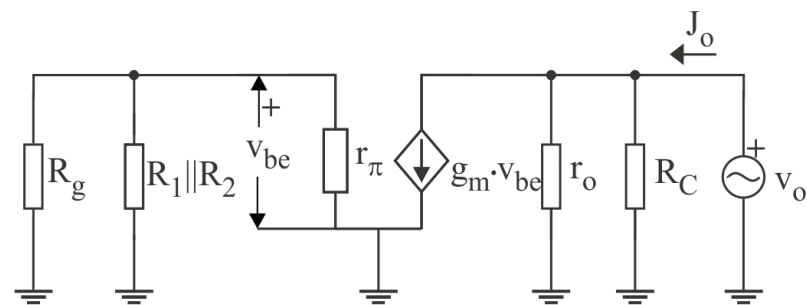
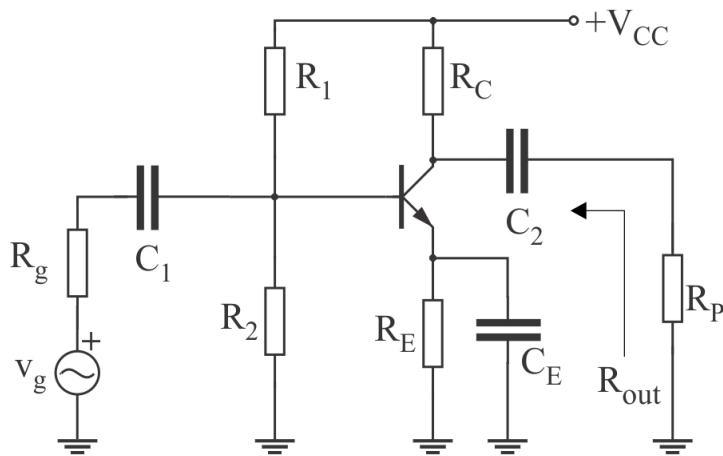
$$v_o = -(r_o || R_C) \cdot g_m \cdot v_{be}$$

$A_0$  označava pojačanje neopterećenog pojačavača (kada ne postoji  $R_P$ ).

$$A_o = \frac{v_o}{v_b} = - (r_o || R_C) \cdot g_m \approx -R_C \cdot g_m$$

$$A = \frac{v_o}{v_b} = -(R_C || R_p) \cdot g_m$$

## Pojačavač sa zajedničkim emitorom



Uticaj izlazne dinamičke otpornosti tranzistora  $r_o$  ne može da se zanemari ukoliko otpornost otpornika za polarizaciju u kolu kolektora  $R_C$  iznosi nekoliko desetina kilooma. Ta situacija se javlja jedino kada opterećenje ne predstavlja otpornik nego izvor konstantne struje (potkolo koje obezbeđuje približno konstantnu vrednost struje). Izvori konstantne struje se primenjuju u direktno spregnutim pojačavačima (na slici je dat pojačavač sa kapacitivnom spregom).

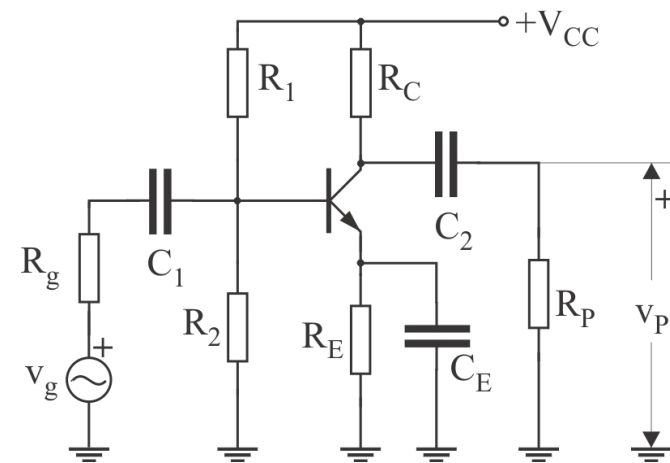
$$v_{be} = 0$$

$$R_{out} = r_o || R_C \approx R_C$$

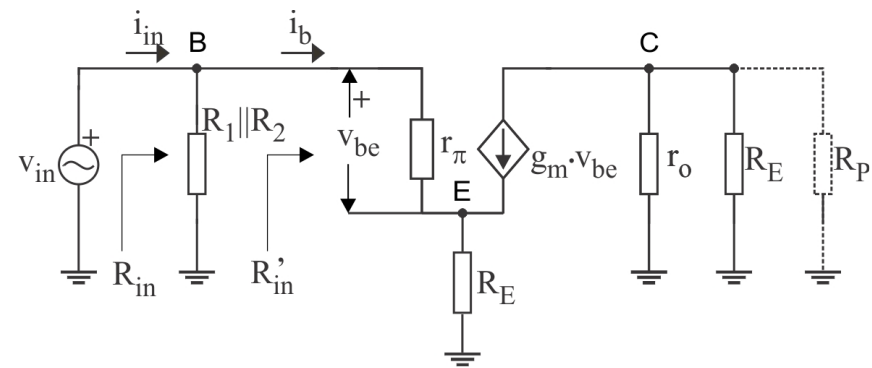
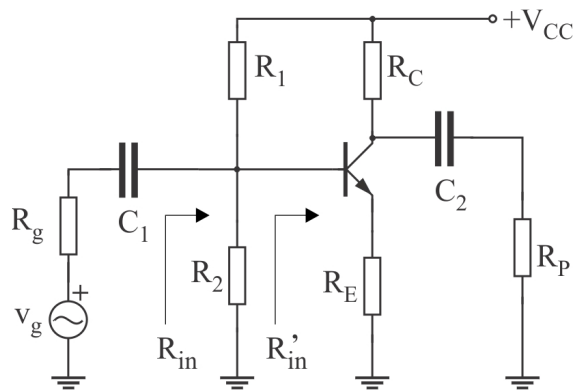
$$R_{out} = R_C$$

## Pojačavač sa zajedničkim emitorom

- Pojačavač sa zajedničkim emitorom pojačava i napon i struju. Ovom spregom postiže se najveće pojačanje snage.
- Ova sprega daje negativno pojačanje (obrće fazu).
- Ulazna otpornost je mala. Izlazna otpornost je približno jednaka otporniku za polarizaciju kolu kolektora  $R_C$  ukoliko se kolo ne polariše izvorom konstantne struje. Ukoliko se kolo polariše izvorom konstantne treba uzeti u obzir i  $r_0$ .
- Najveće pojačanje se dobija kada je pobudni generator vrlo male unutrašnje otpornosti (naponski generator), a otpornost potrošača vrlo velika. Da bi se realizovala velika otpornost potrošača neophodno je koristiti izvor konstantne struje.



## Pojačavač sa zajedničkim emitorom



$$v_b = i_b \cdot r_\pi + v_e$$

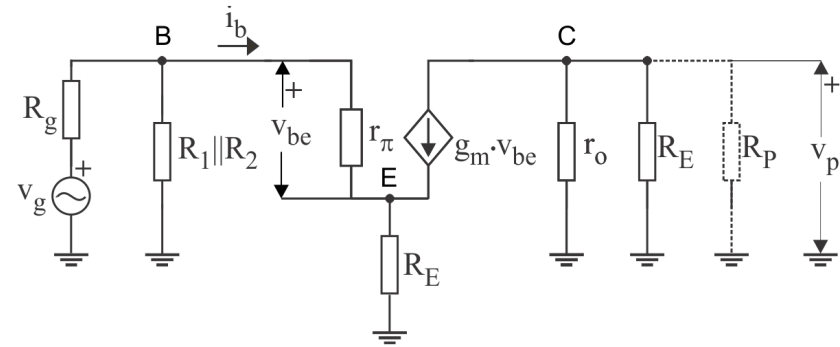
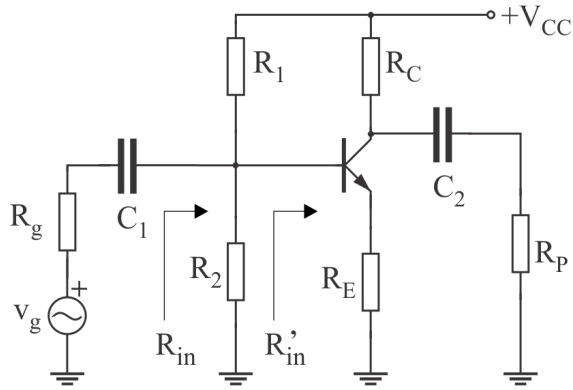
$$v_e = i_e \cdot R_E = i_b(1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E$$

$$v_b = i_b \cdot r_\pi + i_b(1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E$$

$$R'_{in} = \frac{v_b}{i_b} = r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_E$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R'_{in} || R_B$$

## Pojačavač sa zajedničkim emitorom



$$R_C \ll r_o \Rightarrow R_C \parallel r_o \approx R_C$$

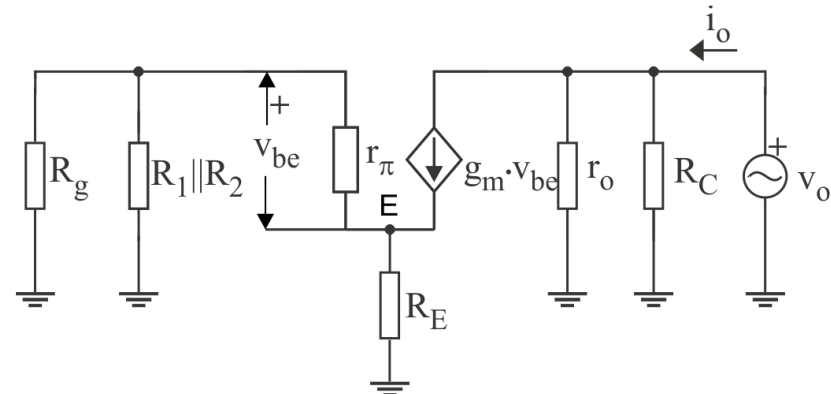
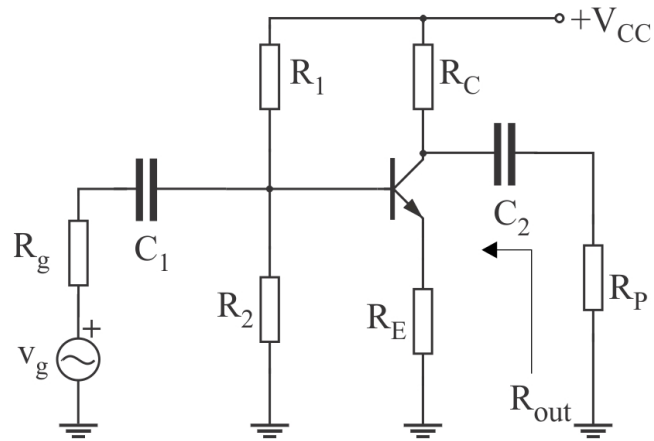
$$v_{be} = i_b \cdot r_{\pi} = \frac{v_b}{R'_{in}} \cdot r_{\pi}$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{be} \cdot R_C = -g_m \cdot R_C \cdot r_{\pi} \cdot \frac{v_b}{R'_{in}}$$

$$A_o = \frac{v_o}{v_b} = -\frac{g_m \cdot r_{\pi}}{R'_{in}} \cdot R_C$$

$$A = -\frac{g_m \cdot r_{\pi}}{R'_{in}} \cdot (R_C \parallel R_p)$$

## Pojačavač sa zajedničkim emitorom



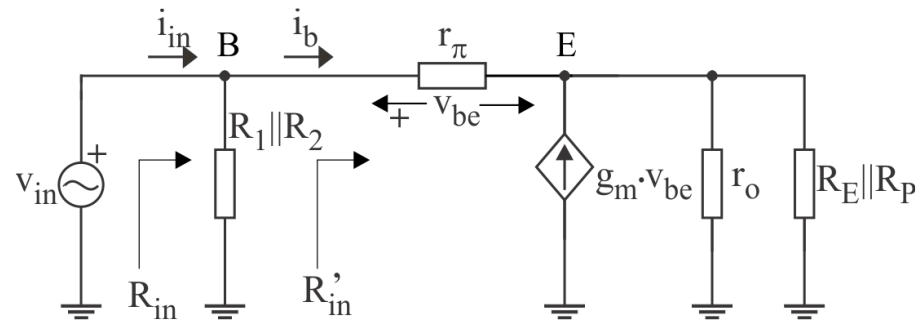
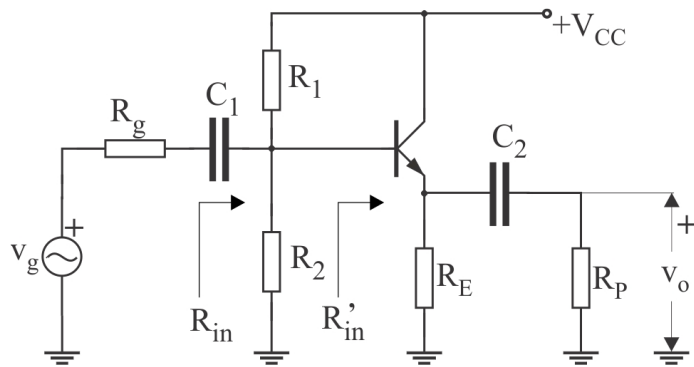
$$R_C \ll r_o \Rightarrow R_C \parallel r_o \approx R_C$$

$$v_{be} = 0$$

$$R_{out} = \frac{v_o}{i_o} = r_o \parallel R_C$$

$$R_{out} \approx R_C$$

## Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



$$R_E \parallel R_p \ll r_o \Rightarrow R_E \parallel R_p \parallel r_o \approx R_E \parallel R_p$$

$$v_b = i_b \cdot r_\pi + v_e$$

$$v_e = (i_b + g_m \cdot v_{be}) \cdot R_E \parallel R_p = i_b (1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E \parallel R_p$$

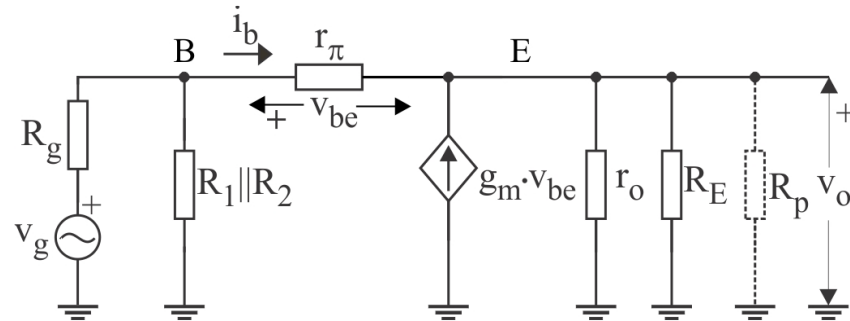
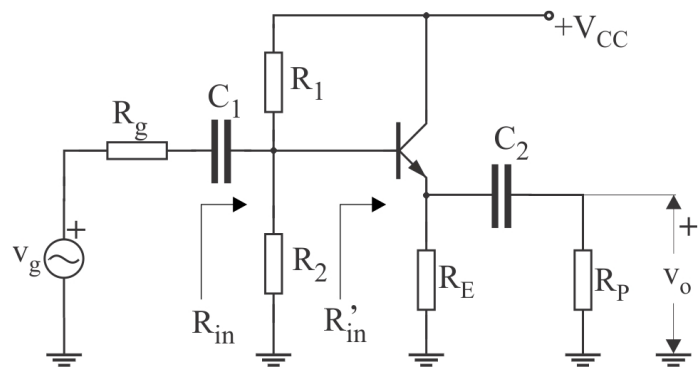
$$v_b = i_b \cdot r_\pi + i_b (1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E \parallel R_p$$

$$R'_{in} = \frac{v_b}{i_b} = r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_E \parallel R_p$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R'_{in} \parallel R_B$$



## Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



$$R_E \ll r_o \Rightarrow R_E \parallel r_o \approx R_E$$

$$v_b = i_b \cdot r_\pi + v_e$$

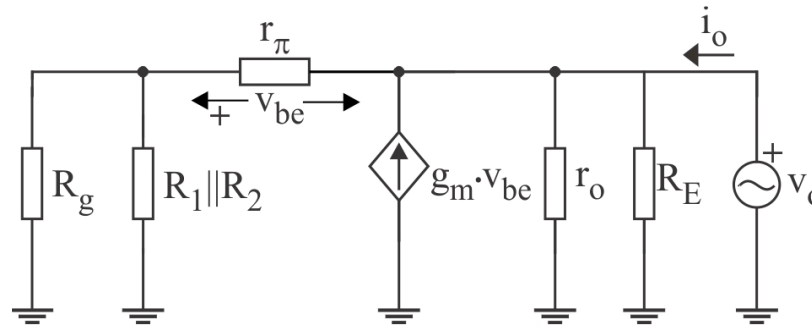
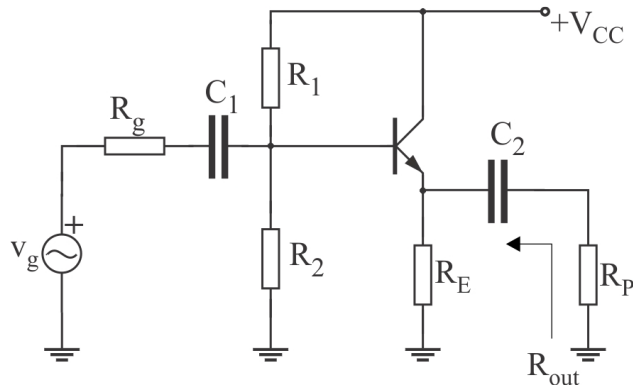
$$v_e = (i_b + g_m \cdot v_{be}) \cdot R_E = i_b(1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E$$

$$v_b = i_b \cdot r_\pi + i_b(1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E \parallel R_p$$

$$A_o = \frac{v_o}{v_b} = \frac{(1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E}{r_\pi + (1 + g_m \cdot r_\pi) \cdot R_E}$$

$$A = \frac{v_o}{v_b} = \frac{(1 + \beta) \cdot R_E \parallel R_p}{r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_E \parallel R_p} \approx 1$$

## Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



$$R_E \ll r_o \Rightarrow R_E || r_o \approx R_E$$

$$R_B = R_1 || R_2$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_E} - (1 + \beta) \cdot i_b$$

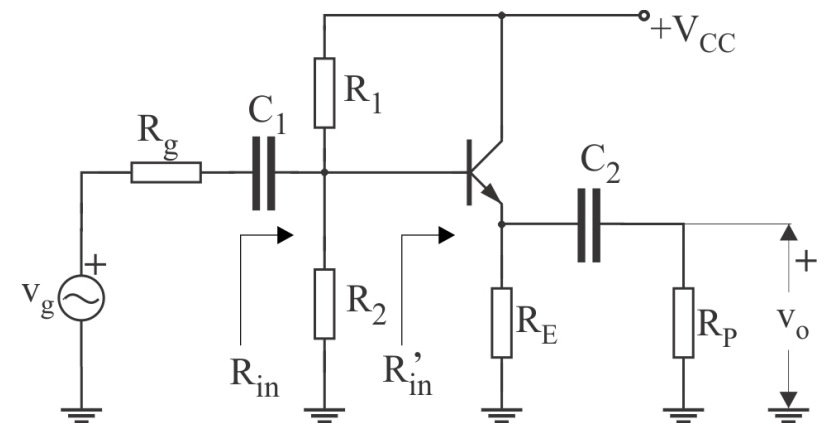
$$i_o = \frac{v_o}{R_E} + \frac{v_o(1 + \beta)}{r_\pi + R_g || R_B}$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = R_E || \frac{r_\pi + R_g || R_B}{(1 + \beta)} \approx \frac{r_\pi + R_g || R_B}{(1 + \beta)}$$

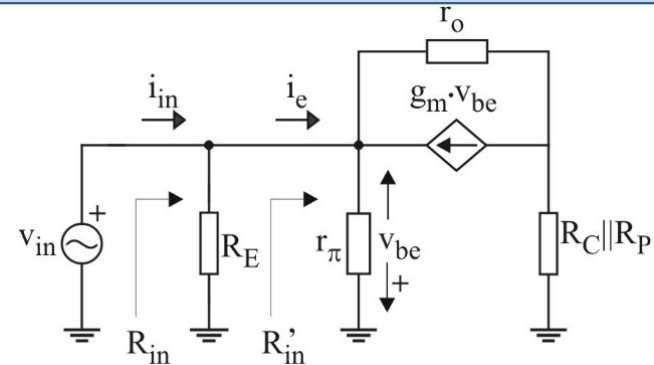
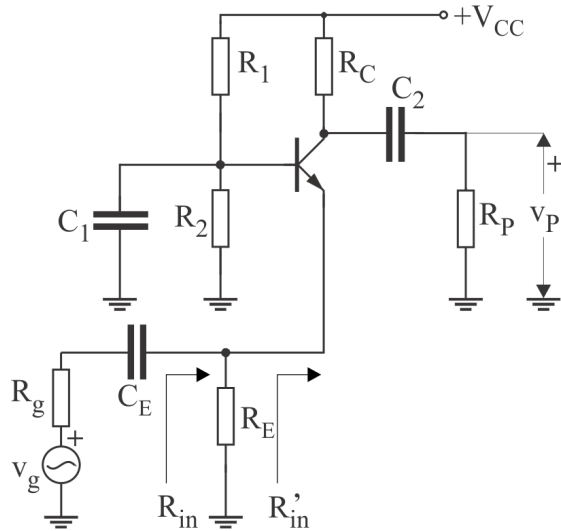
$$R_o = \frac{r_\pi + R_g || R_B}{(1 + \beta)}$$

## Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

- Pojačavač sa zajedničkim kolektorom ne pojačava napon. Naponsko pojačanje je manje od 1 i veoma blizu jediničnog. Strujno pojačanje je približno  $\beta$ .
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Ulazna otpornost je vrlo velika, izlazna otpornost je vrlo mala.
- Najčešće se primenjuje kao poslednji pojačavački stepeni za prilagođenje po impedansi i to u slučaju kada je otpornost potrošača veoma mala. Prilagođenje po impedansi znači približno izjednačavanje izlazne otpornosti pojačavača sa otpornošću potrošača, jer se najveće pojačanje snage se dobija kada su ove dve otpornosti jednake.



## Pojačavač sa zajedničkom bazom



$$i_e = \frac{v_e}{R_E} - g_m \cdot v_{be} = v_e \cdot \left( \frac{1}{R_E} + g_m \right)$$

$$R'_{in} = \frac{v_e}{i_E} = \frac{r_\pi}{(1 + \beta)} = r_e$$

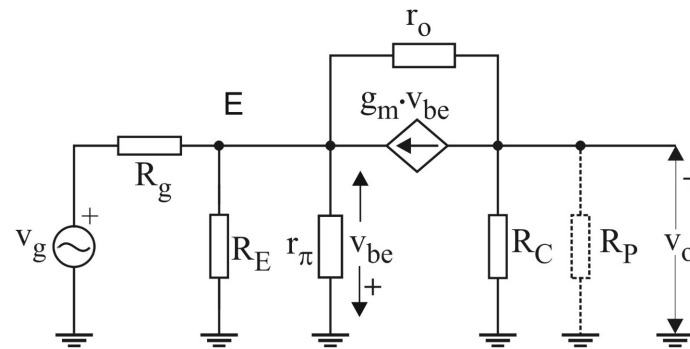
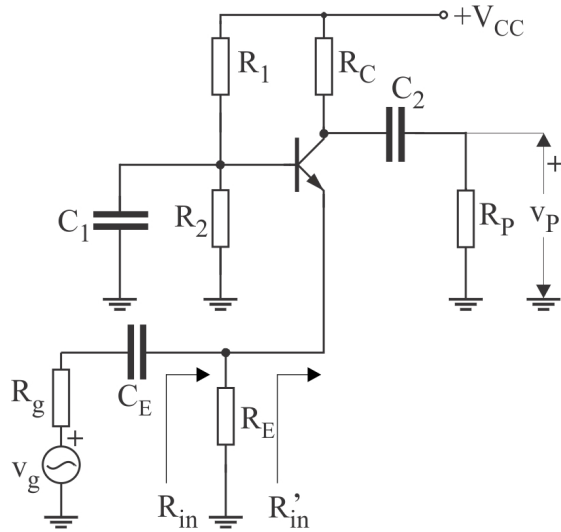
$$R_{in} = R_E || R'_{in} \approx R'_{in}$$

$$R_{in} = \frac{r_\pi}{(1 + \beta)} = r_e$$

Može se pokazati da  $r_o$  u ovoj sprezi nema uticaj ni na ulaznu otpornost ni na naponsko pojačanje.

$r_e$  je dinamička otpornost emitorskog pn spoja.

## Pojačavač sa zajedničkom bazom



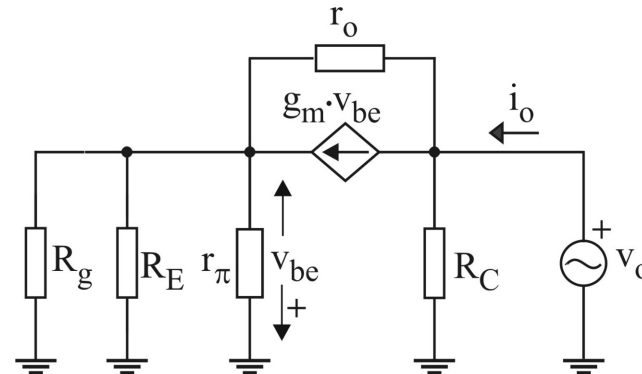
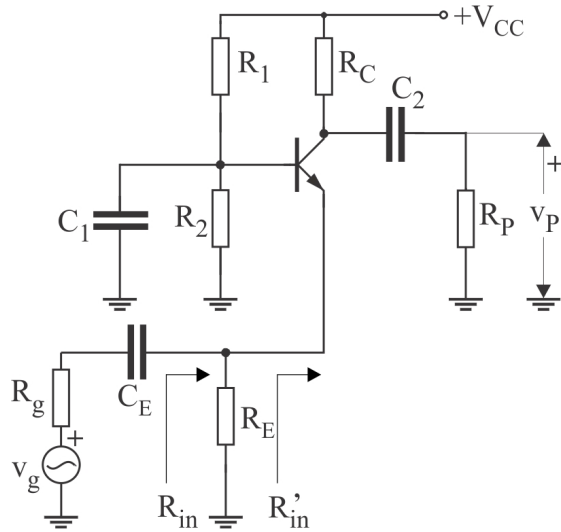
$$v_o = -g_m \cdot v_{be} \cdot R_C$$

$$v_o = g_m \cdot v_e \cdot R_C$$

$$A_o = \frac{v_o}{v_e} = g_m \cdot R_C$$

$$A = \frac{v_o}{v_e} = g_m \cdot (R_C || R_p)$$

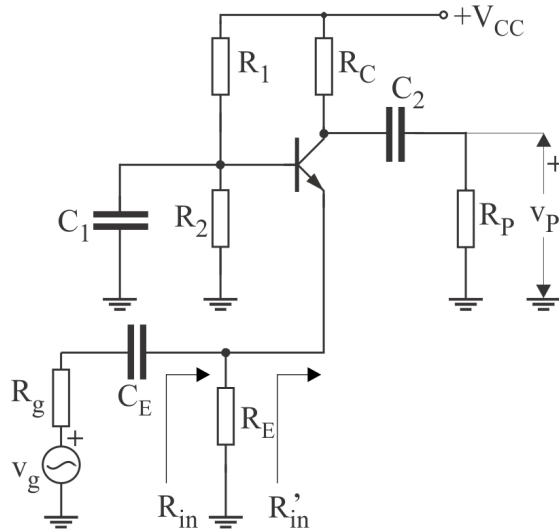
## Pojačavač sa zajedničkom bazom



$$i_o = \frac{v_o}{R_C} - g_m \cdot v_{be}$$

$$R_{out} \approx R_C$$

## Pojačavač sa zajedničkom bazom



- Strujno pojačanje je manje od 1 i veoma blizu jediničnog. Naponsko pojačanje zavisi od otpornosti pobudnog generitora. Što je otpornost pobudnog generitora manja pojačanje je veće.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Ulazna otpornost je vrlo mala, izlazna otpornost vrlo velika.
- Koristi se za prilagođenje po impedansi, ukoliko je otpornost potrošača veoma velika ili ukoliko je unutrašnja otpornost pobudnog generitora veoma mala. Može se koristiti i kao izvor konstantne struje zahvaljujući velikoj izlaznoj otpornosti.

## Poredjenje jednostepenih pojačavača

Vrsta pojačavača	Fazni pomeraj	Naponsko pojačanje	Strujno pojačanje	Ulazna otpornost	Izlazna otpornost
Zajednički emitor	$180^\circ$	$-(R_C    R_p) \cdot g_m$	$\beta$	$R_B    r_\pi$	$R_C$
Zajednički kolektor	$0^\circ$	$\approx 1$	$1 + \beta$	$r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_E    R_p$	$\frac{r_\pi + R_g    R_B}{(1 + \beta)}$
Zajednička baza	$0^\circ$	$g_m \cdot (R_C    R_p)$	$\approx 1$	$\frac{r_\pi}{(1 + \beta)} = r_e$	$R_C$



## Višestepeni pojačavači

Ukoliko se jednostepenim pojačavačem ne može realizovati zadovoljavajuće pojačanje, ulazna ili izlazna impedansa primenjuje se kaskadna sprega više pojačavačkih stepena. Lako se može pokazati da kaskadna sprega više pojačavačkih stepena u sprezi sa zajedničkim kolektorom ili bazom ne daje povećanje pojačanja. Zato se sprega sa zajedničkom bazom i zajedničkim kolektorom koriste ili kako prvi ili kao poslednji pojačavački stepen da bi se realizovalo prilagođenje po impedansi u odnosu na potrošač ili pobudni generator (transdjuser).

Sprega pojačavačkih stepena može da se realizuje:

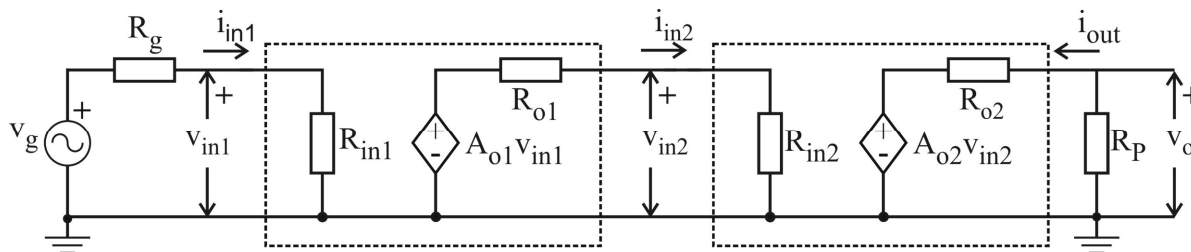
- Direktno spregom (primenom pomerača nivoa)
- Kapacitivnom spregom (primenom kondenzatora)
- Transformatorskom spregom (primenom transformatora)

## Višestepeni pojačavači

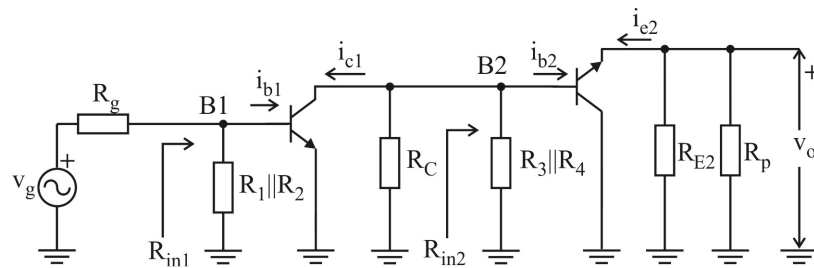
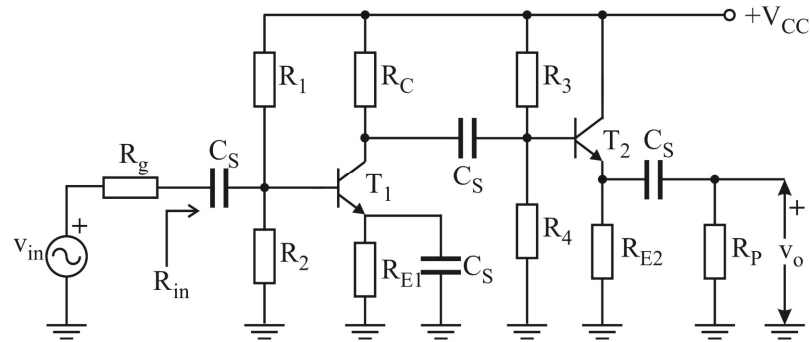
Analiza višestepnih pojačavača se sprovodi primenom Tevenenove teoreme. Pri tome se svaki pojačavački stepen analizira nezavisno nakon što se naredni pojačavaki stepen zameni ulaznom impedansom. Dakle za ovu analizu je potrebno poznavati ulazne impedanse svih pojačavačkih stepena.

Ulazna impedansa određenog pojačavačkog stepena se može odrediti jedino ukoliko je poznato opterećenje odnosno otpornost između izlaznih priključaka. Zato se prilikom određivanja ulaznih impedansi polazi od poslednjeg pojačavačkog stepena i nastavljam redom unazad sve do prvog pojačavačkog stepena. Kada se određuje izlazna otpornost pojačavača redosled je obrnut, polazi se od prvog pojačavačkog stepena i nastavlja redom ka poslednjem.

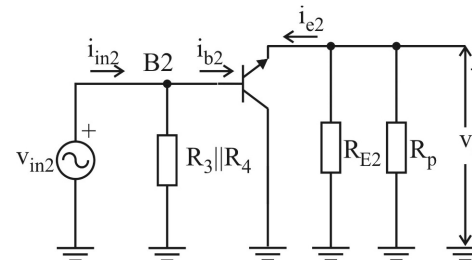
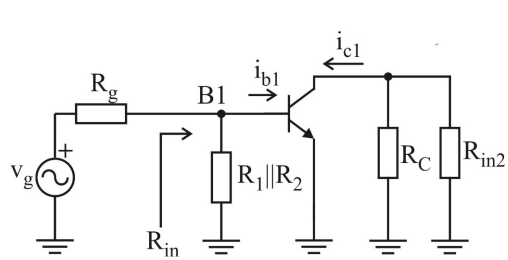
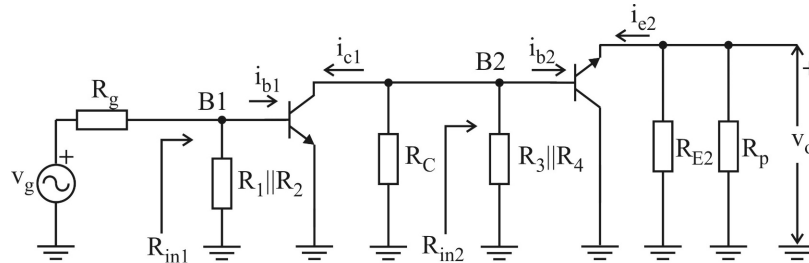
$$\frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{v_{in2}} \cdot \frac{v_{in2}}{v_{in1}} \cdot \frac{v_{in1}}{v_g} \qquad \frac{v_o}{v_g} = A_{o2} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_{o2}} \cdot A_{o1} \cdot \frac{R_{in2}}{R_{in2} + R_{o1}} \cdot \frac{R_{in1}}{R_g + R_{in1}} \cdot$$



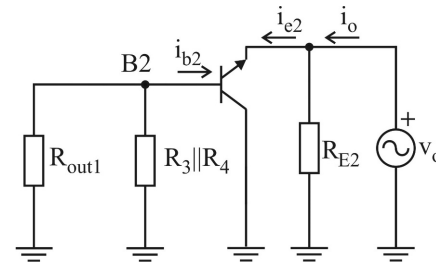
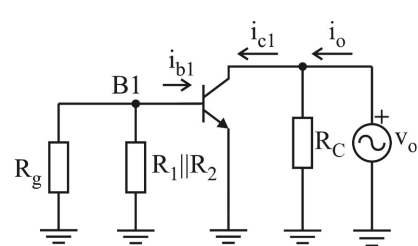
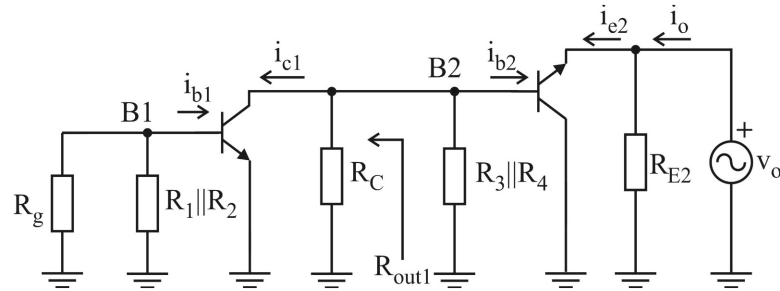
## Višestepeni pojačavači



## Višestepeni pojačavači



## Višestepeni pojačavači



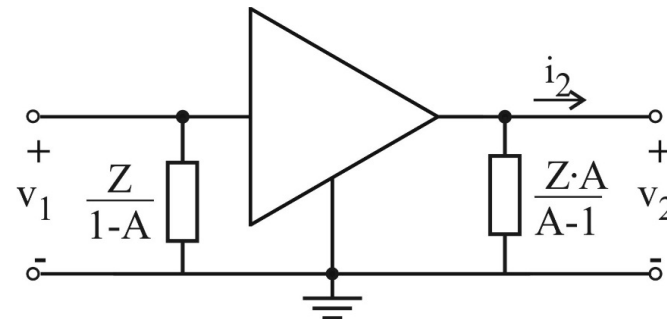
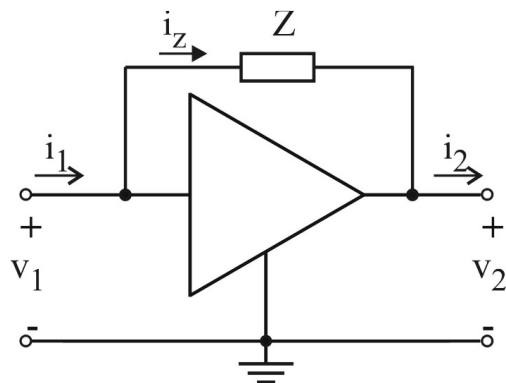
## Milerova teorema

Primenom Milerove teoreme zamenjuje se impedansa koja povezuje izlaz i ulaz nekog pojačavača sa dve impedanse od kojih je jedna između ulaznih priključaka a druga između izlaznih priključaka. Da bi ova dva kola bila identična potrebno je obezbediti da pri istoj vrednosti napona na ulazu  $v_1$  i izlazu  $v_2$  u oba kola teku iste struje na ulazu i izlazu.

$$Z_1 = \frac{v_1}{i_z} = \frac{v_1}{\frac{v_1 - v_2}{Z}} \quad Z_2 = \frac{v_2}{-i_z} = \frac{v_2}{\frac{v_2 - v_1}{Z}} \quad \frac{v_2}{v_1} = A$$

$$Z_1 = \frac{Z}{1 - A}$$

$$Z_2 = \frac{Z \cdot A}{A - 1}$$



# Milerova teorema

## Dualna Milerova teorema

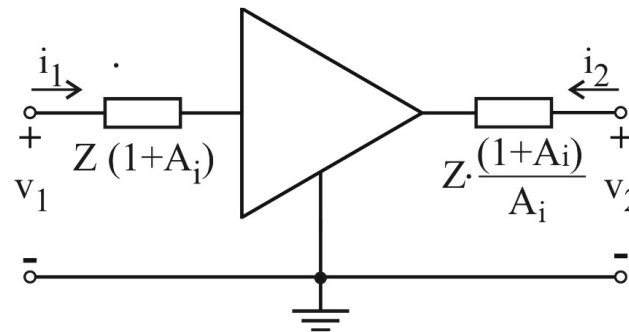
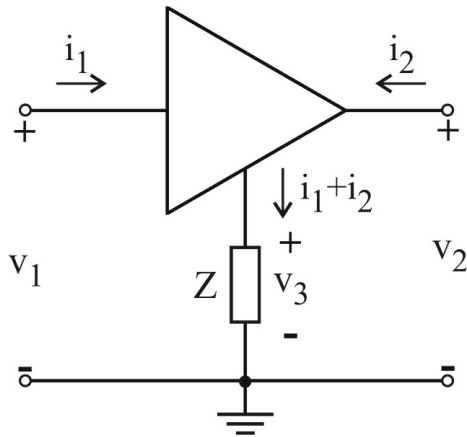
Dualna Milerova teorema se primenjuje u situaciji kada je pojačavač povezan sa referentnim čvorem preko jedne impedanse. U ekvivalentom kolu je ta impedansa zamenjena sa dve impedanse, od kojih je jedna na red sa ulaznim pristupom, a druga na red sa izlaznim pristupom. Potrebno je obezbediti da pri istim vrednostima struja na ulazu i izlazu ( $i_1$  i  $i_2$ ), napon na ulazu i izlazu oba kola bude isti.

$$Z_1 = \frac{v_3}{i_1} = \frac{Z \cdot (i_1 + i_2)}{i_1}$$

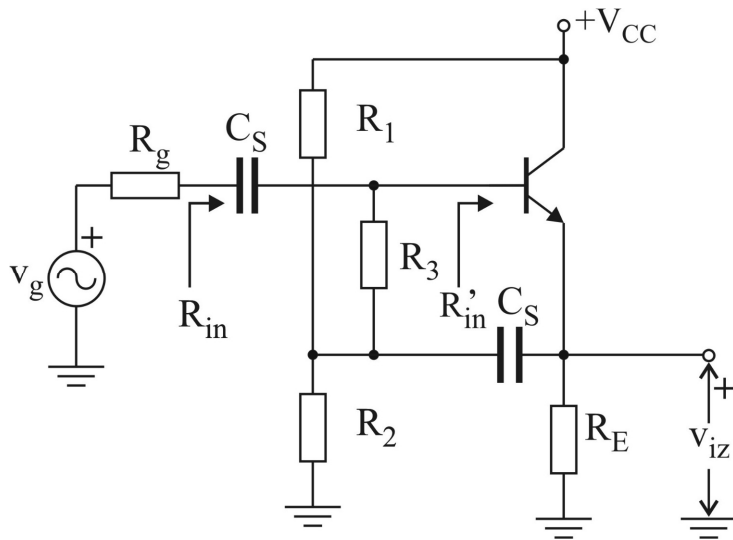
$$Z_2 = \frac{v_3}{i_2} = \frac{Z \cdot (i_1 + i_2)}{i_2} \quad \frac{i_2}{i_1} = A_i$$

$$Z_1 = Z \cdot (1 + A_i)$$

$$Z_2 = Z \cdot \frac{(1 + A_i)}{A_i}$$



## Butstrep pojačavač



Ovim kolom se postiže povećanje ulazne impedanse sprege sa zajedničkim kolektorom.

Prema Milerovoj teoremi ulazna otpornost ovog pojačavača je:

$$R_{in} = \frac{R_3}{1 - A} \parallel R'_{in}$$

S obzirom da je naponsko pojačanje sprege sa zajedničkim kolektorom blisko jedinici sledi da će ulazna otpornost ovog pojačavača biti vrlo velika.



## Elementarna pitanja

1. Postupak analize pojačavača, određivanje ulazne i izlazne otpornosti.
2. Sprege bipolarnih tranzistora u pojačavačkim kolima.
3. Pi model bipolarnog tranzistora (električna šema i izrazi za određivanje  $r_{\pi}$ ,  $r_o$ ,  $g_m$ )

## Ostala ispitna pitanja

4. Model tranzistora sa h parametrima.
5. Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika
6. Pojačavač sa zajedničkim emitorom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
7. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
8. Pojačavač sa zajedničkom bazom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
9. Višestepeni pojačavači.
10. Milerova teorema.