

Pojačavači sa bipolarnim tranzistorima

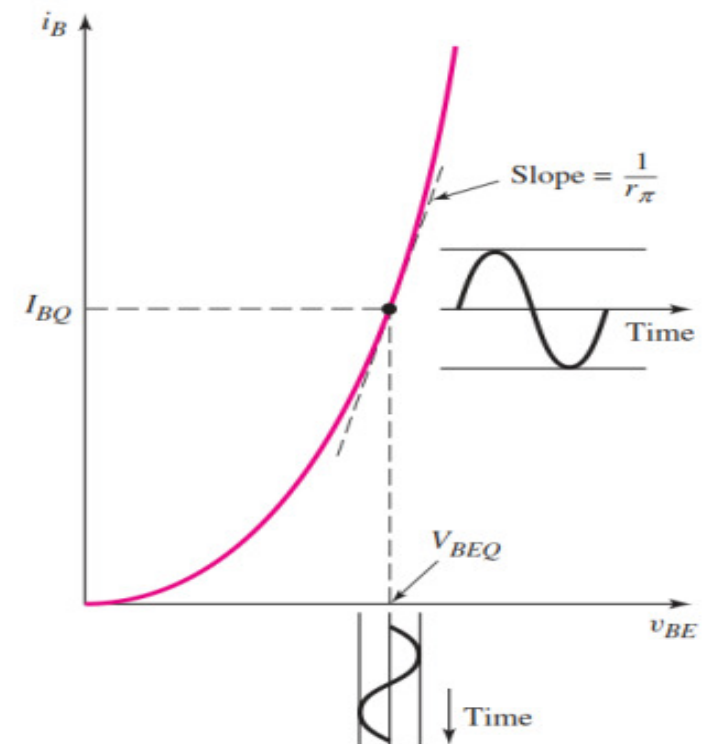
Linearni model tranzistora

Da bi se realizovalo pojačanje bez izobličenja neophodno je da pojačavač bude **linearno kolo**, odnosno da sadrži linearne komponente. Pod linearnim komponentama podrazumevamo komponente koje su okarakterisane linearnim strujno naponskim karakteristikama.

Kada je tranzistor polarisan i nema signala u kolu postoje samo **jednosmerne struje i naponi**. Izlazni jednosmerni napon i izlazna jednosmerna struja tranzistora definišu mirnu radnu tačku. Ukoliko se dovede signal javiće se pored jednosmerne i promenjiva ili **naizmenična komponenta struja i napona** u kolu.

Karakteristike tranzistora su nelinearne ali se mogu aproksimirati linearnim funkcijama ukoliko su promene struja i napona u okolini radne tačke dovoljno male.

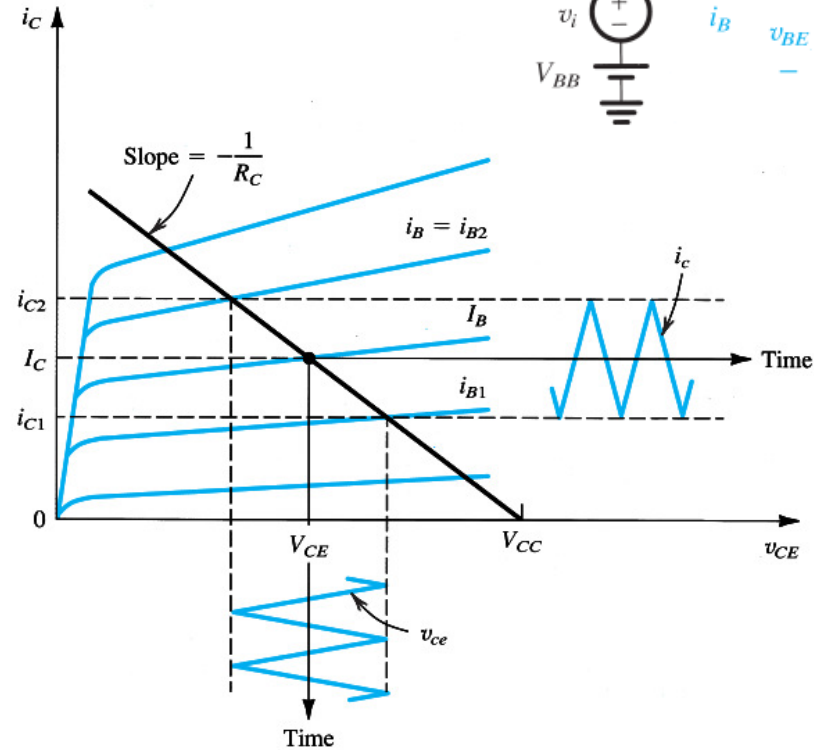
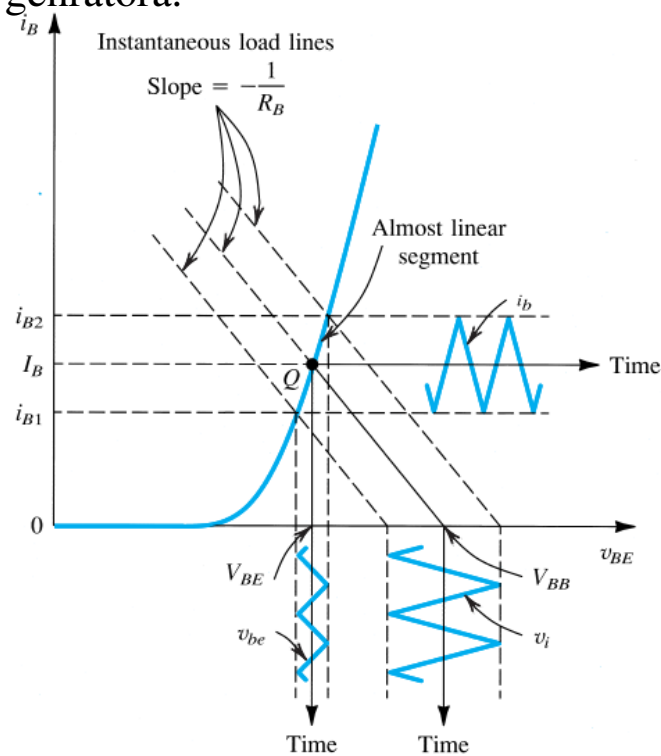
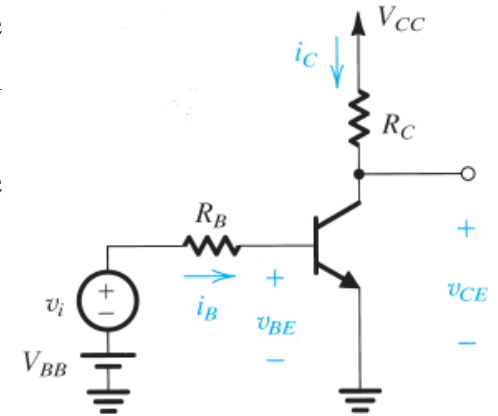
U linearnim kolima se može primeniti superpozicija što omogućava da se odvojeno analizira kolo u kojem deluju jednosmerni generatori, koji obavljaju polarizaciju komponente, a odvojeno naizmenični generatori koji predstavljaju ulazni signal.



Linearni model tranzistora

Jednosmernom analizom (DC–direct current) se određuju jednosmerne komponente napona i struja. Pri ovoj analizi uzimaju se u obzir samo jednosmerni generatori.

Naizmeničnom analizom (AC–alternating current) se određuju promenjive komponente napona i struja u kolu. Ova analiza razmatra samo uticaj naizmeničnih genratora.



Označavanje jednosmernih i naizmeničnih kompenenata

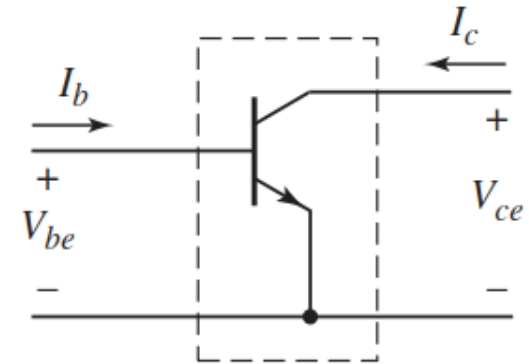
Naizmenične komponente struja i napona označavaju se malim slovima i indeksom sa malim slovima. Jednosmerne veličine označavaju se velikim slovom i indeksom sa velikim slovom. Ukupna struja ili napon, koja obuhvata i jednosmernu i naizmeničnu komponentu, označava se malim slovom i indeksom sa velikim slovom.

Promenjive	Značenje
i_b, v_{be}	Trenuntna naizmenična vrednost
I_B, V_{BE}	Jednosmerna vrednost
\dot{i}_B, \dot{v}_{BE}	Ukupna trenuntna 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 napon v_{BE} ,
- ulazna struja i_B ,
- izlazni napon v_{CE} ,
- izlazna struja i_C .



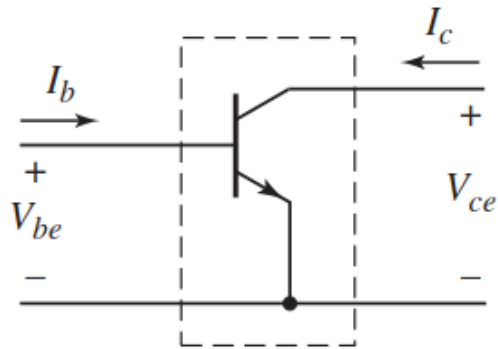
Ukoliko se zadaju dve od ove četiri veličine preostale dve zavise samo od karakteristika komponente. U praksi se za modeliranje bipolarnog tranzistora najviše koriste h-parametri, za koje su nezavisno promenjive ulazna struja i_B i izlazni napon v_{CE} .

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.

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

Model tranzistora sa h parametrima

$$v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE})$$
$$i_C = f_2(i_B, v_{CE})$$

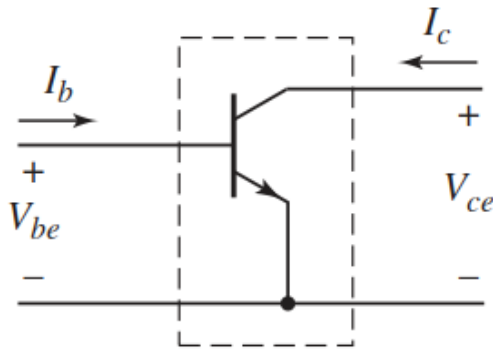


Ukoliko razmatramo priraštaj zavisno promenljivih veličina (v_{BE} , i_C) pri malim priraštajima nezavisno promenljivih veličina (i_B , v_{CE}) dobijamo sledeće izraze:

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

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

Model tranzistora sa h parametrima



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

$$\Delta v_{BE} = v_{be} \quad \Delta i_B = i_b \quad \Delta v_{CE} = v_{ce} \quad \Delta i_C = i_c$$

$$v_{be} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \cdot i_b + \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \cdot v_{ce}$$

$$i_c = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \cdot i_b + \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \cdot v_{ce}$$

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

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

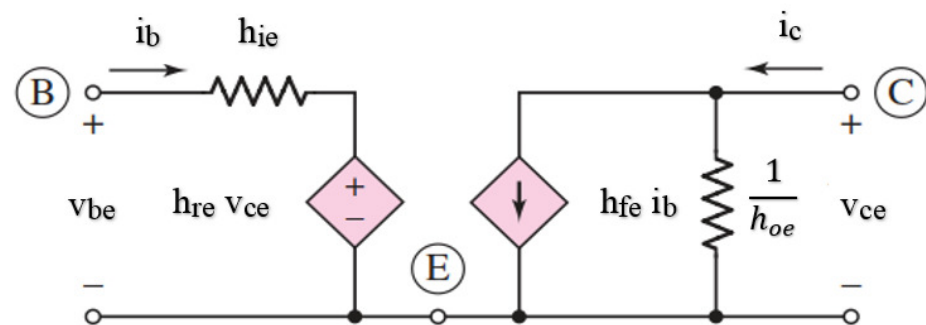
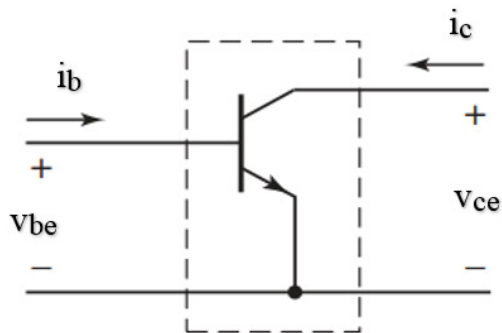
$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} \quad h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

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 i *h* parametri za druge sprege tranzistora.

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

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

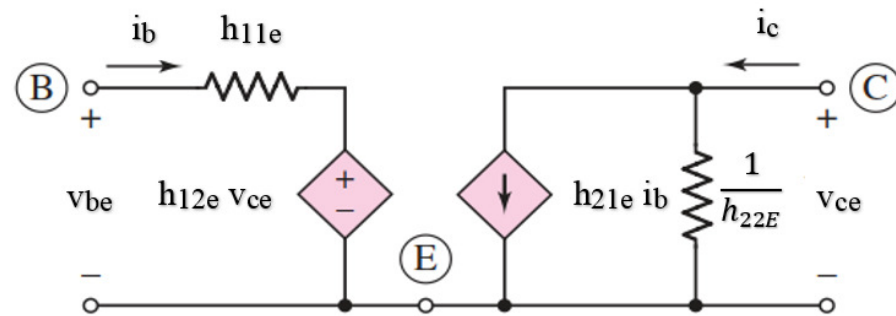
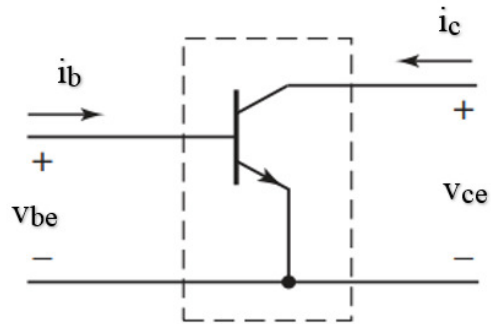


Model tranzistora sa h parametrima

U našoj literaturi često se koriste i sledeće oznake za ha parametre:

$$h_{11e} = h_{ie}; h_{12e} = h_{re}; h_{21e} = h_{fe}; h_{22e} = h_{oe}.$$

$$v_{be} = h_{11e} \cdot i_b + h_{12e} \cdot v_{ce}$$
$$i_c = h_{21e} \cdot i_b + h_{22e} \cdot v_{ce}$$

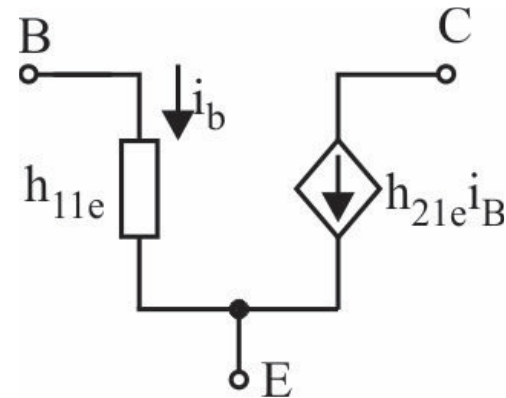
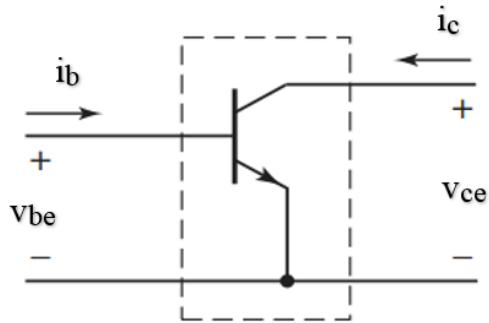


Model tranzistora sa h parametrima

Ukoliko se uzmu u obzir samo h parametri koji imaju dominantan uticaj na naizmenične struje i napone dobija se pojednostavljeni model ($h_{12e} \nearrow 0$; $h_{22e} \nearrow 0$).

$$v_{be} \approx h_{11e} \cdot i_b$$

$$i_c \approx h_{21e} \cdot i_b$$



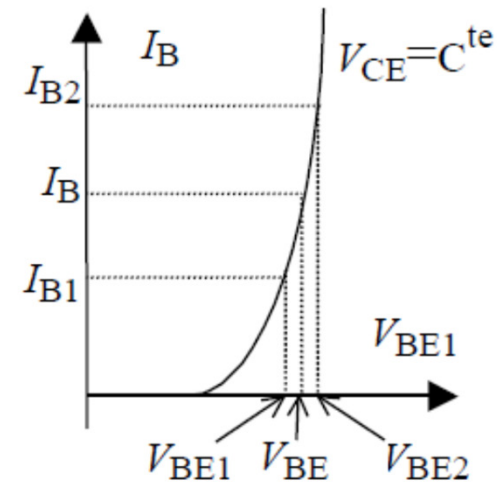
Dodatak Model bipolarnog tranzistora

Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

Ulazni h parameter se određuje iz ulazne karakteristike pri čemu se vrednost izlaznog napona V_{CE} održava konstantnom.

$$h_{11e} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE} = Const}$$

$$h_{11e} = \left. \frac{v_{BE2} - v_{BE1}}{i_{B2} - i_{B1}} \right|_{v_{CE} = Const} \approx x \text{ k}\Omega$$



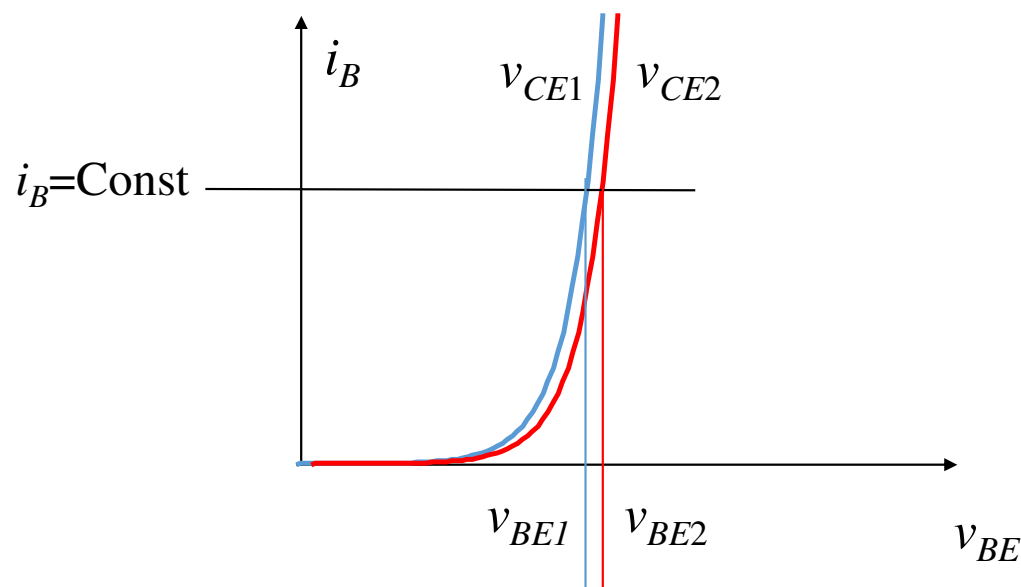
Dodatak Model bipolarnog tranzistora

Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

Povratni h parameter se određuje iz ulazne karakteristike pri čemu se vrednost ulazne struje i_b održava konstantnom.

$$h_{12e} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta v_{CE}} \right|_{i_B = \text{Const.}}$$

$$h_{12e} = \left. \frac{v_{BE2} - v_{BE1}}{v_{CE2} - v_{CE1}} \right|_{i_B = \text{Const.}} \approx 0$$



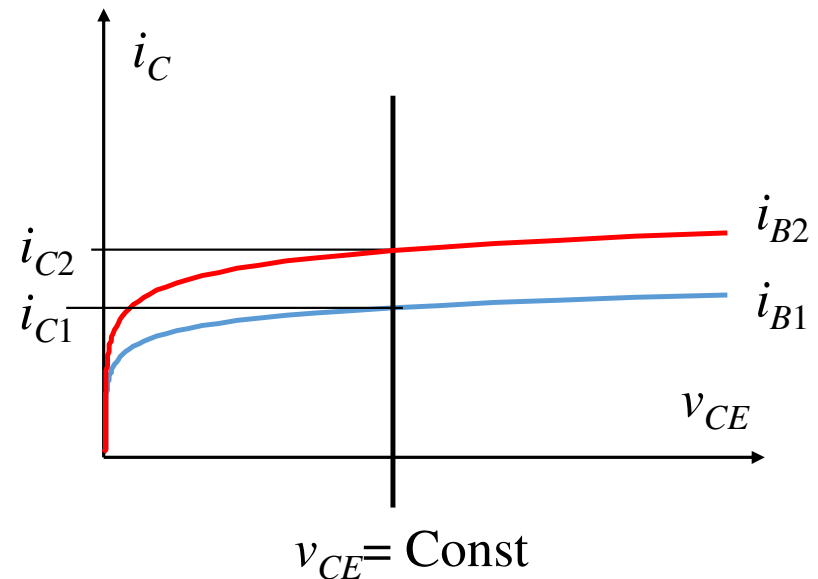
Dodatak Model bipolarnog tranzistora

Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

Prenosni h parameter se određuje iz izlaznih karakteristika pri čemu se vrednost izlaznog napona v_{CE} održava konstantnom.

$$h_{21e} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE} = Const}$$

$$h_{21e} = \left. \frac{i_{C2} - i_{C1}}{i_{B2} - i_{B1}} \right|_{v_{CE} = Const} \approx 100$$



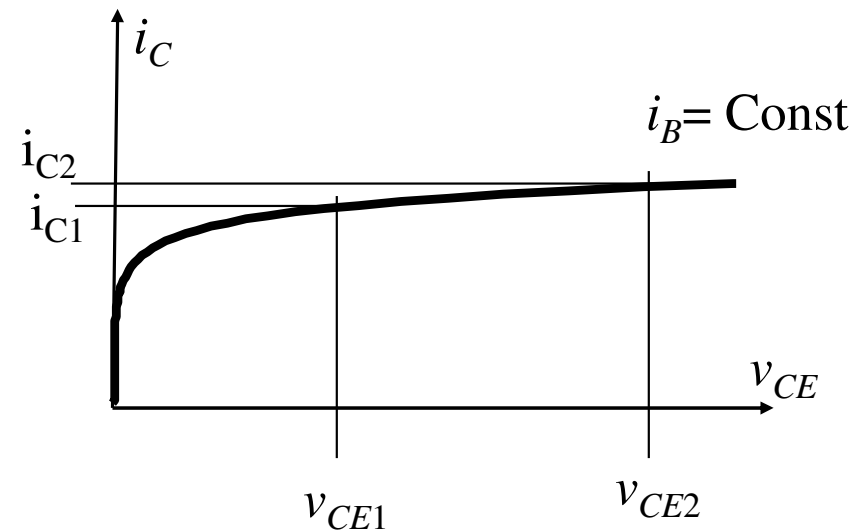
Dodatak Model bipolarnog tranzistora

Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika

Prenosni h parameter se određuje iz izlaznih karakteristika pri čemu se vrednost ulaznog napona i_B održava konstantnom.

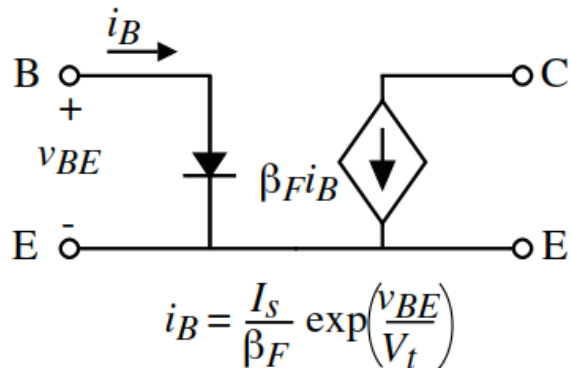
$$h_{oE} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}} \right|_{i_B = \text{Const}}$$

$$h_{oE} = \left. \frac{i_{C2} - i_{C1}}{v_{CE2} - v_{CE1}} \right|_{i_B = \text{Const.}} \approx 0$$



Difuziona otpornost

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



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

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

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

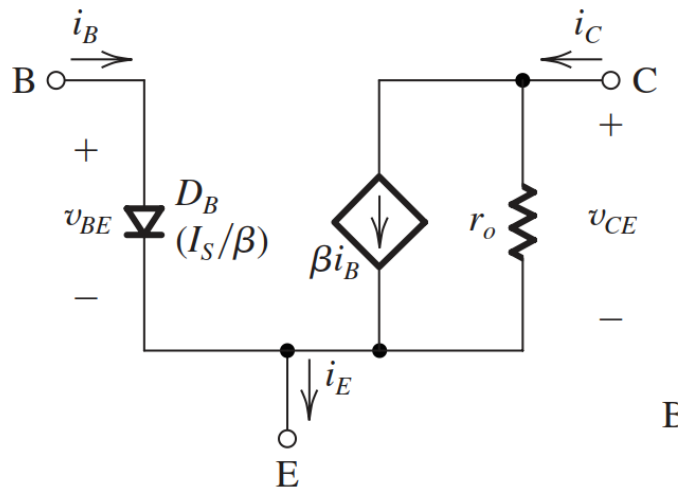
$$\frac{1}{r_\pi} = \frac{1}{V_T} \left[\frac{I_S}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right] \Bigg|_Q = \frac{I_{BQ}}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T}{I_{BQ}}$$

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

Transkonduktansa

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



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

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

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

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

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

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

Q označava da se izvodi traže u mirnoj radnoj tački

I_{CQ} je jednosmerna struja baze

V_T je temperautski potencijal

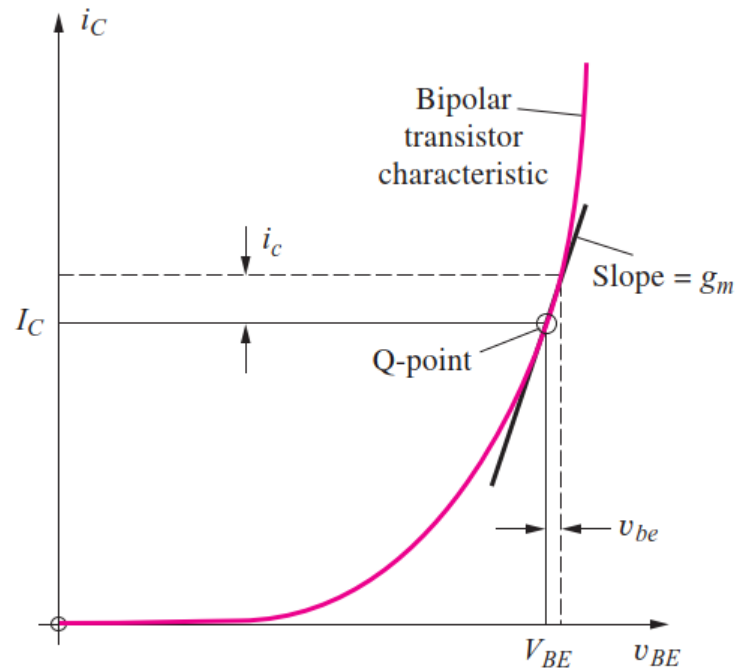
Transkonduktansa

Transkonduktansa, g_m . se može odrediti iz prenosne strujno-naponske karakteristike, koja povezuje struju kolektora i napon baza-emitor. Ova zavisnost je prema modelu za velike signale eksponencijalna.

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

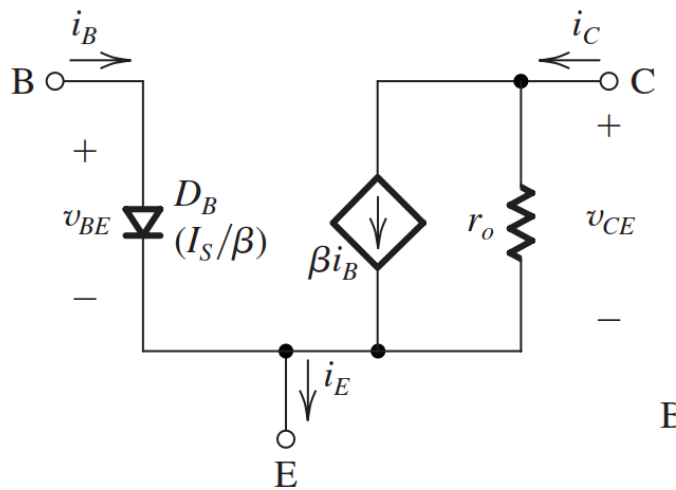
$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{BE}} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q$$

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



Izlazna otpornost

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 .



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

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

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

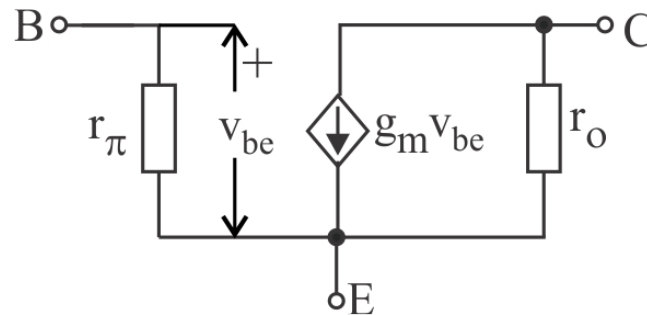
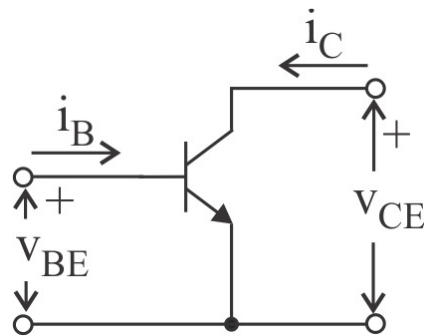
$$\frac{1}{r_o} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_Q = \frac{\partial}{\partial v_{CE}} \left[I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) \right] \Bigg|_Q$$

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

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

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. Ukoliko dodje do promene radne tačke vrednosti promeniće se i vrednosti dinamičkih parametara. Ovde je dat unilateralni model a tačniji model bi obuhvatao i uticaj izlaza na ulaz.



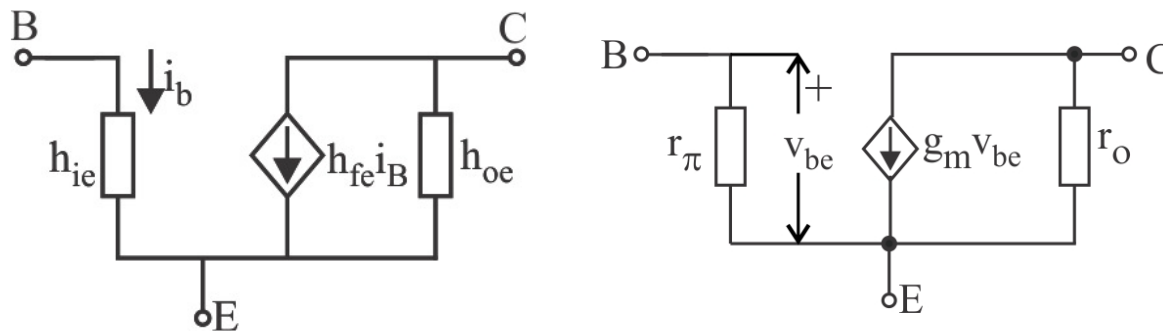
$$r_{\pi} = \frac{v_{BE}}{i_B} = \frac{V_T}{I_{BQ}}$$

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

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

Pi model bipolarnog tranzistora

Dinamički parametri u π modelu i dinamički parametri u h modelu su međusobno povezani. Pored oznaka jedina razlika se ogleda u tome što se u π 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 β . Iz tog razloga ponekad se koristi ista oznaka za odnos naizmeničnih komponentata kao za odnos jednosmernih komponentata.

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

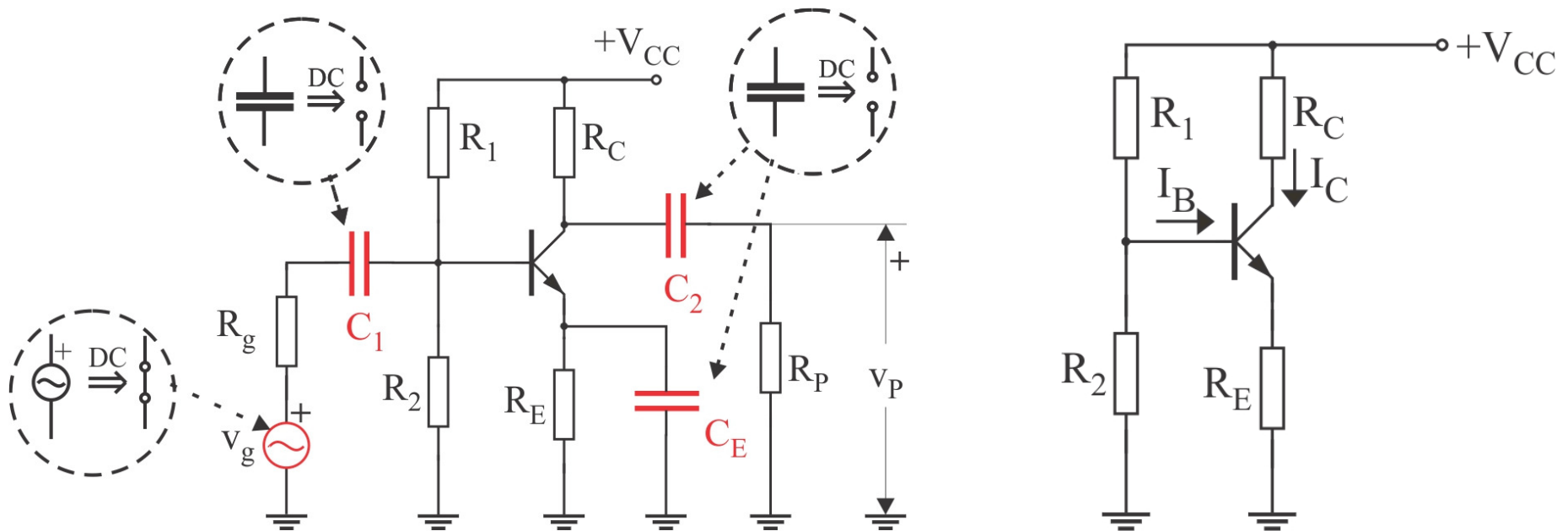
Analiza pojačavača

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 generatori su prekid. Tranzistori se zamenjuju modelom za male signale.
- **Naizmeničnom analizom kola** ili analizom ekvivalentnog kola pojačavača za male signale određuju se karakteristike pojačavača: naponsko pojačanje, strujno pojačanje, ulazna i izlazna otpornost.

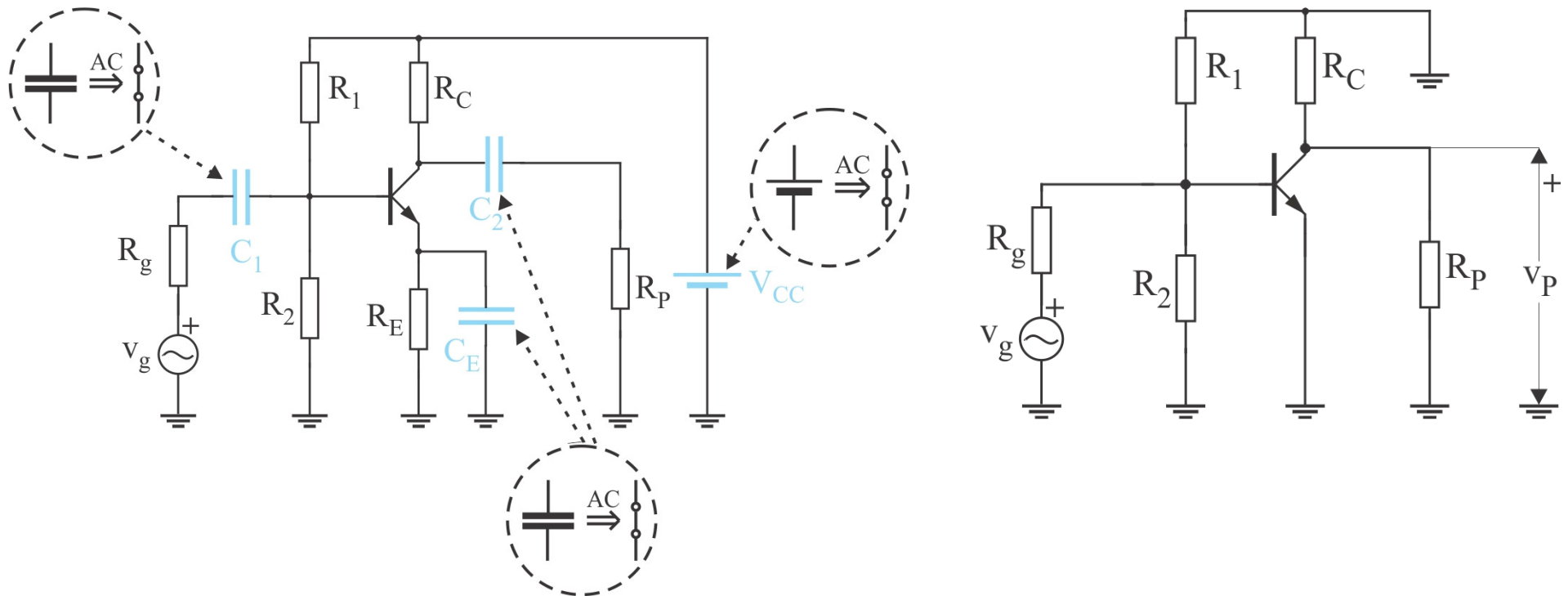
Analiza pojačavača

Jednosmerna analiza pojačavača (Direct current DC)

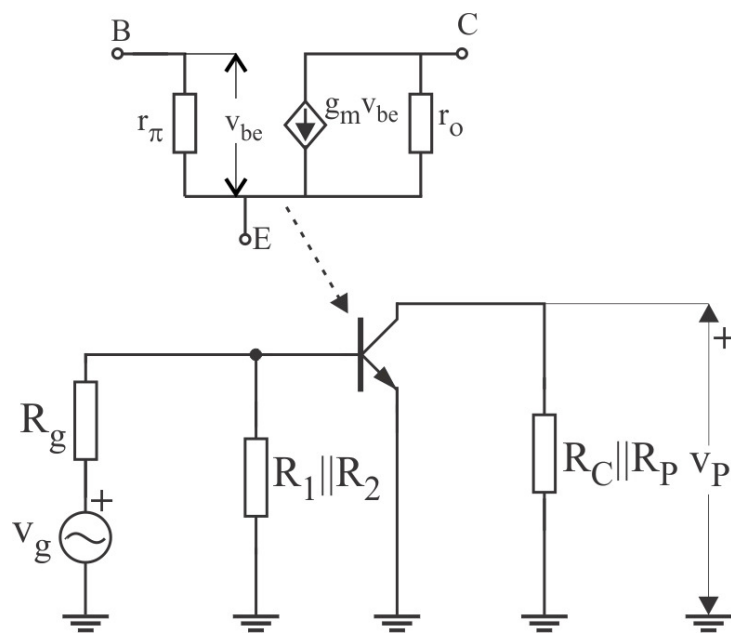


Analiza pojačavača

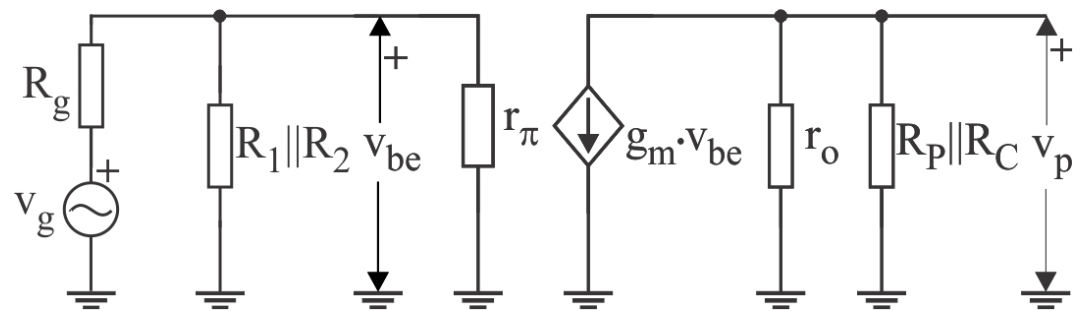
Naizmenička analiza pojačavača (Alternating current AC)



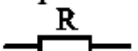
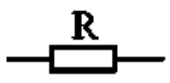
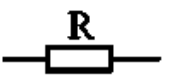
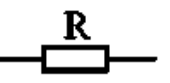

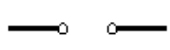
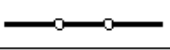
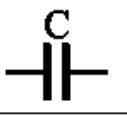
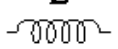
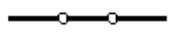
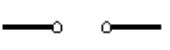
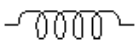
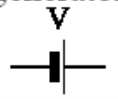
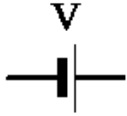
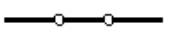
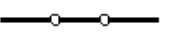
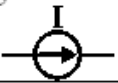
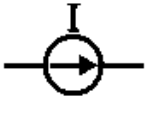
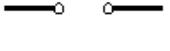
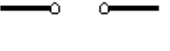

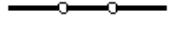
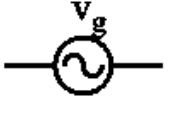
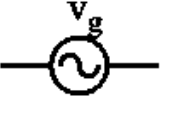
Analiza pojačavača



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

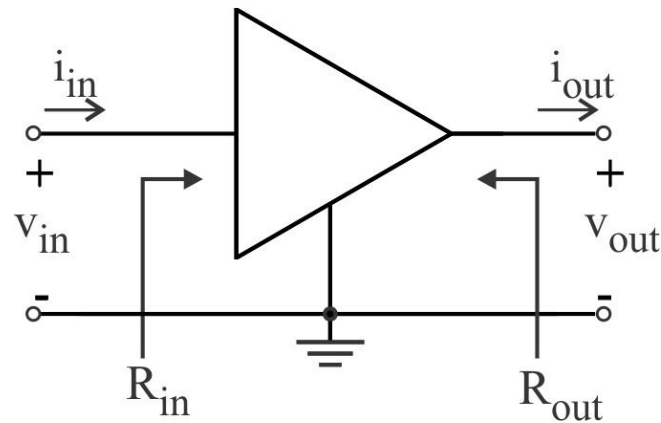


Analiza pojačavača

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

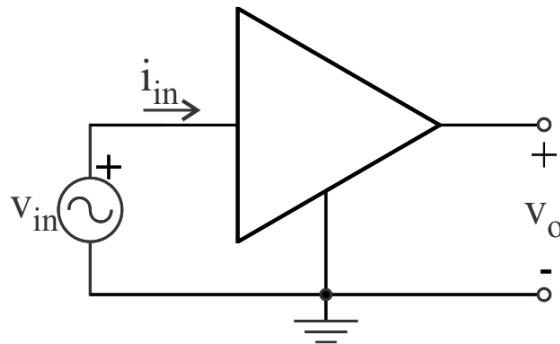
Ulazna otpornost i izlazna otpornost predstavljaju značajne karakteristike svakog pojačavača. Obe ove otpornosti povezuju naizmenične komponente struja i naponan i određuju se iz kola za naizmeničnu struju.



Analiza pojačavača

Prilikom merenja ulazne otpornosti između ulaznih priključaka pojačavača veže se idealni naponski generator koji predstavlja test generator. Odnos napona i struje test generatora predstavlja ulaznu otpornost, R_{in} .

Merenje ulazne otpornosti

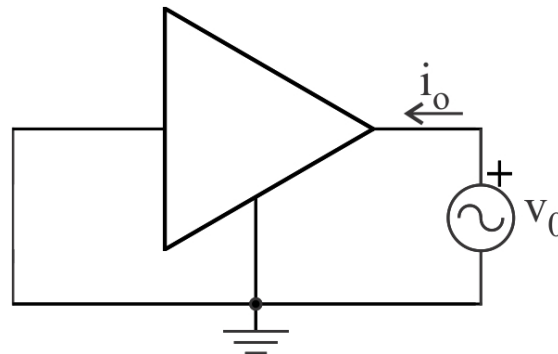


$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}}$$

Analiza pojačavača

Izlazna otpornost predstavlja ekvivalentnu Thevenenovu otpornost koja se vidi sa izlaznog pristupa pojačavača. Izlazna otpornost se određuje vezivanjem idealnog naponskog generatora na izlaznom pristupu pojačavača kada je pobudni generator jednak nuli (pobudni naponski generator se kratkospaja, pobudni strujni predstavlja prekid). Odnos napona generatora vezanog između izlaznih priključaka i struje koja kroz njega protiče predstavlja izlaznu otpornost, R_{ot} .

Merenje izlazne otpornosti



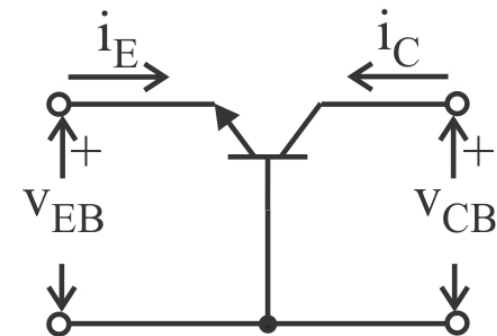
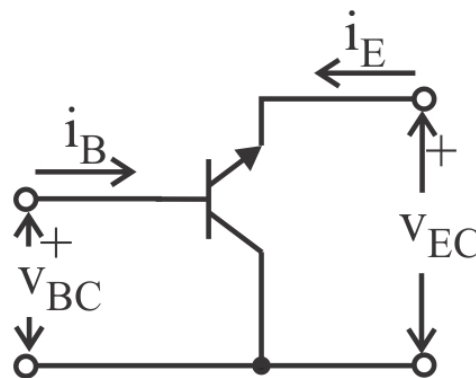
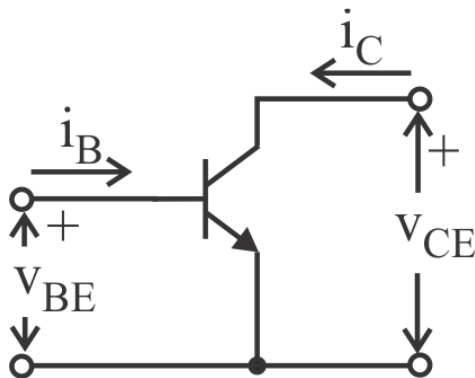
$$R_o = \frac{v_o}{i_o} \quad \text{za } v_{in}=0$$

Sprege tranzistora u pojačavačkim kolima

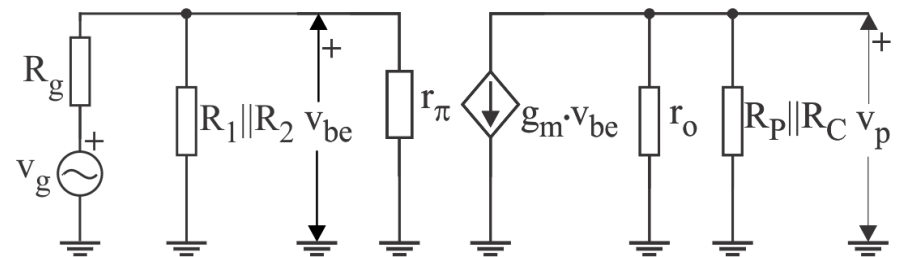
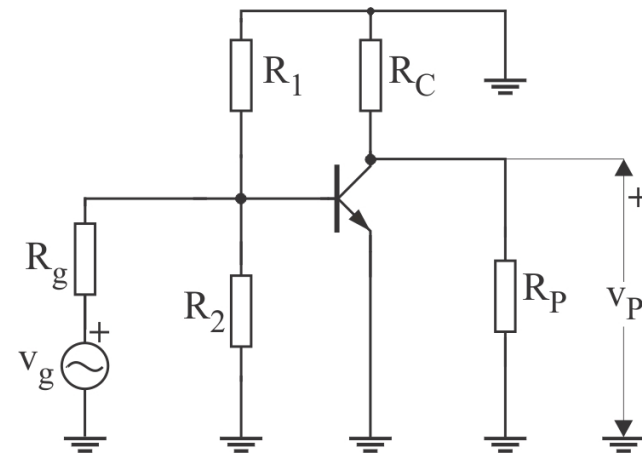
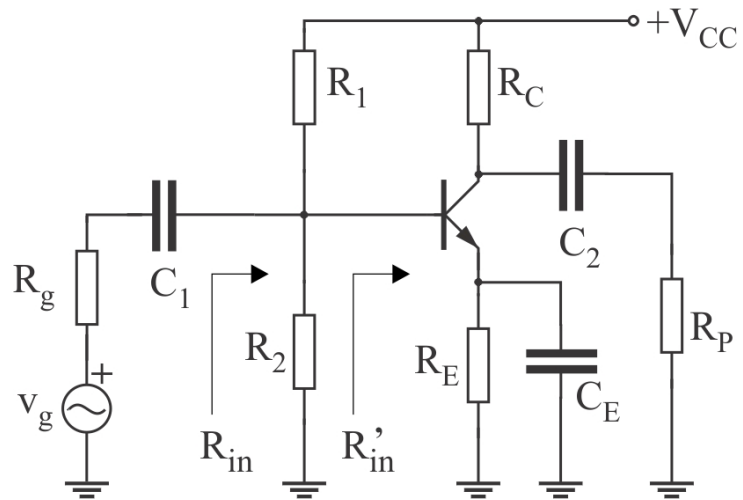
Tranzistor se može na više različitih načina povezati kao četvoropol (kolo ili komponenta sa dva pristupa). S obzirom da tranzistor ima tri electrode, jedna od njih je povezana za ulazni pristup, druga za izlazni pristup, a treća referentna je povezana istovremeno i za ulazni i za izlazni pristup.

Postoje tri sprege tranzistora u pojačavačkim kolima:

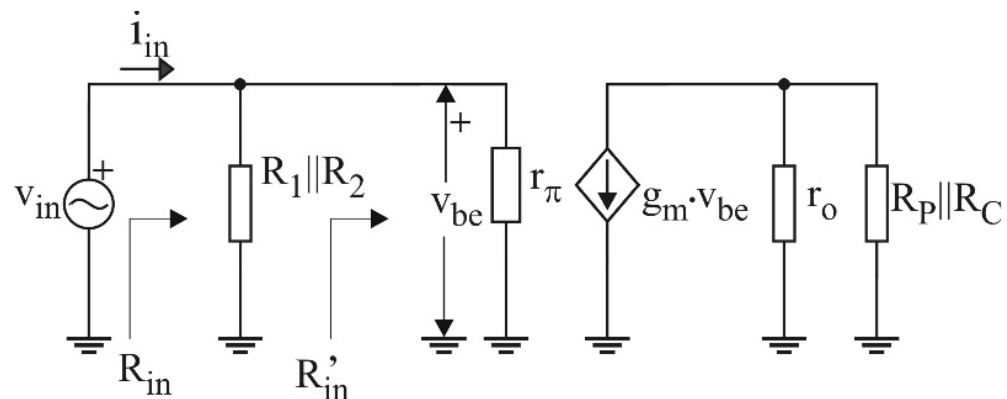
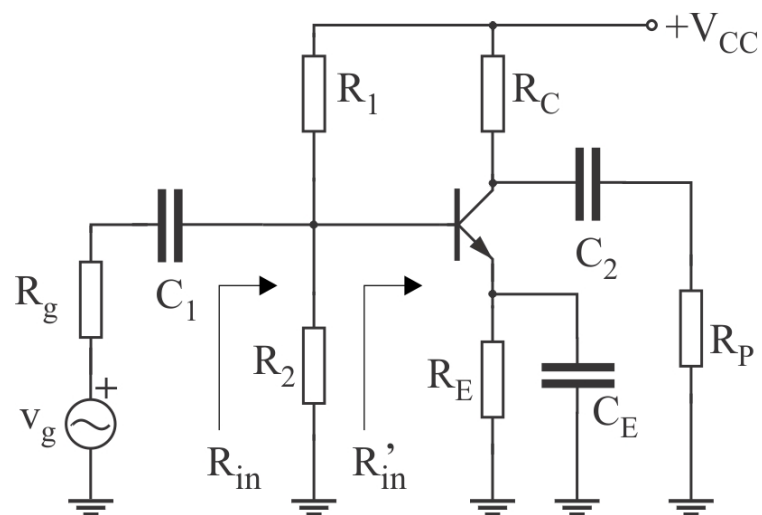
- sprega sa zajedničkim emitorom (ulazna elektroda baza, izlazna kolektor, referentna emitor)
- sprega sa zajedničkim kolektorom (ulazna elektroda baza, izlazna emitor, referentna kolektor)
- sprega sa zajedničkom bazom (ulazna elektroda emitor, izlazna kolektor, referentna baza)



Pojačavač sa zajedničkim emitorom



Pojačavač sa zajedničkim emitorom



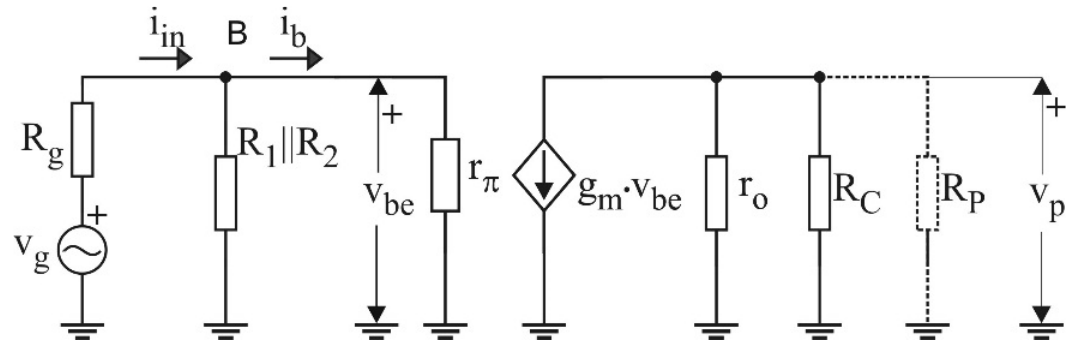
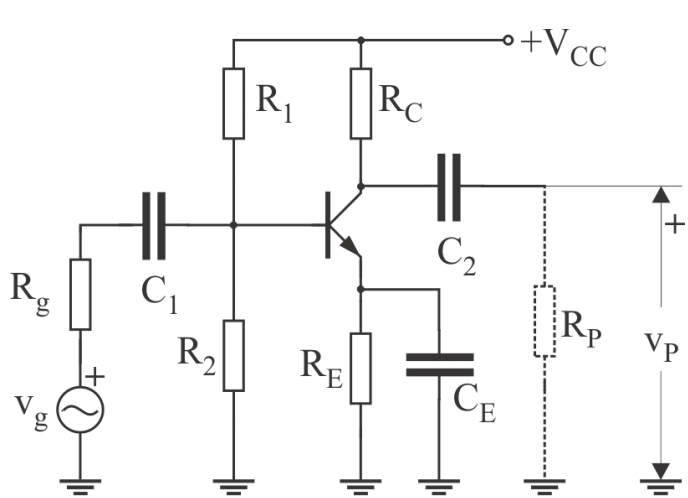
$$R'_{in} = r_{\pi}$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = r_{\pi} \parallel R_1 \parallel R_2$$

Sa R_{BE} je označena ekvivalentna otpornost između ulaznih priključaka tranzistora: $R_{BE} = R_1 \parallel R_2$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = r_{\pi} \parallel R_{BE}$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom



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

$$R_{CE} = R_C \parallel R_P$$

$$r_o \gg R_{CE}$$

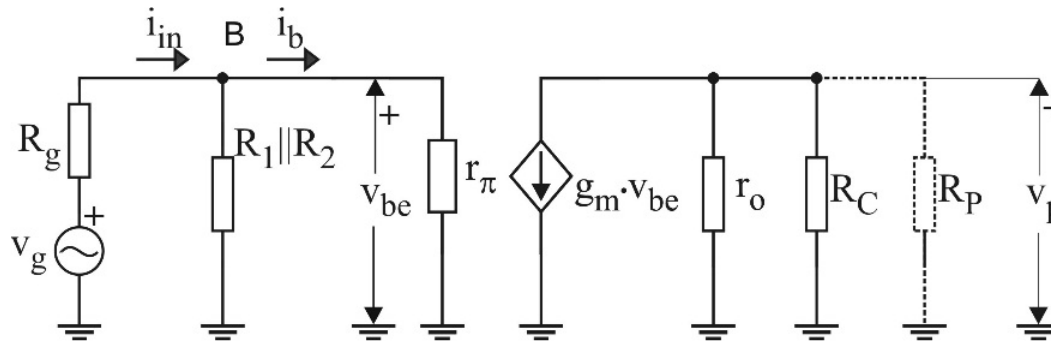
$$A = \frac{v_o}{v_b} = -(r_o \parallel R_{CE}) \cdot g_m \approx -R_{CE} \cdot g_m$$

A je naponsko pojačanje pojačavača

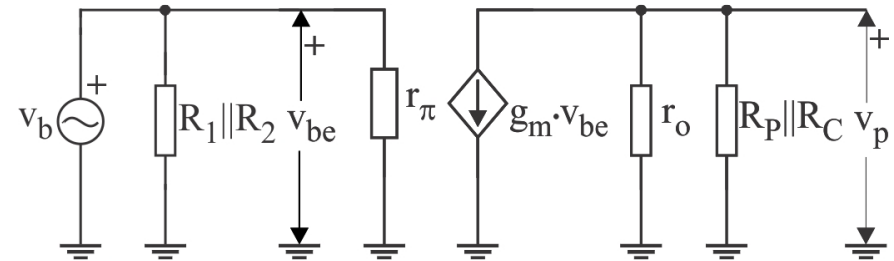
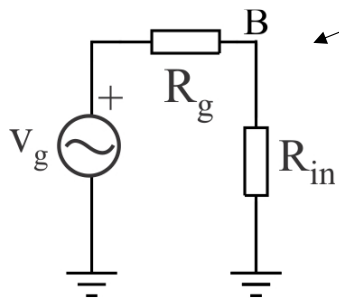
Sa R_{CE} je označena ekvivalentna otpornost između izlaznih priključaka tranzistora: $R_{CE} = R_C \parallel R_P$

$$A = \frac{v_o}{v_b} = -R_{CE} \cdot g_m$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom



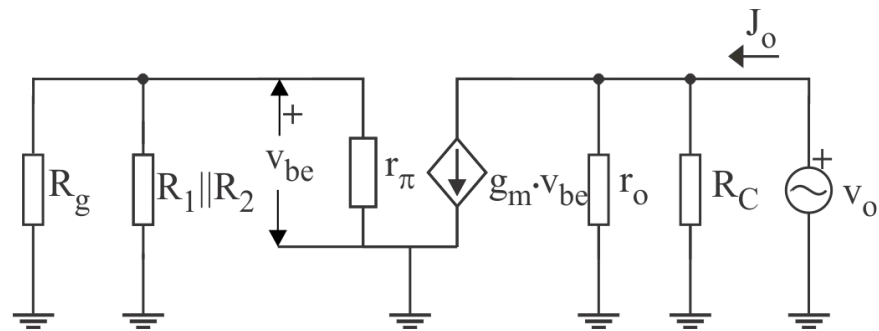
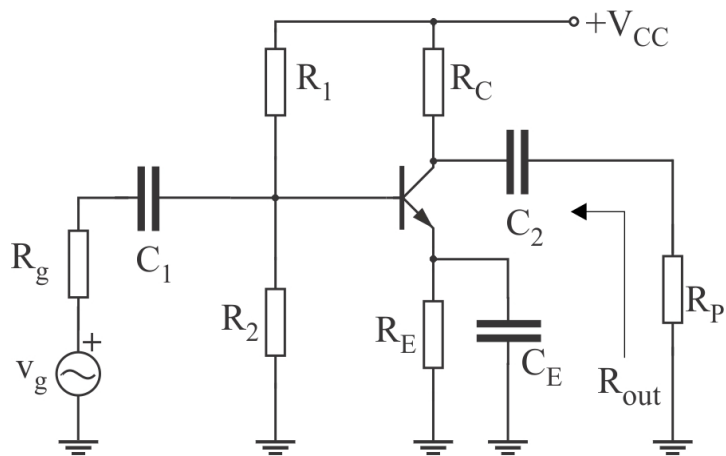
Primenom teoreme o kompenzaciji možemo da zamenimo realni generator sa idealnim naponskim genertoarom čija je elektromotorna sila jednaka naponu na bazi v_b .



A je naponsko pojačanje računato u odnosu na elektromotornu silu v_g

$$A = \frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{v_b} \cdot \frac{v_b}{v_g} = -R_{CE} \cdot g_m \cdot \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}}$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom



Uticaj izlazne dinamičke otpornosti r_o ne može da se zanemari ukoliko je otpornost u kolu kolektora, R_C , nekoliko desetina kilooma. Ta situacija se javlja jedino kada je polarizacija tranzistora realizovana izvorom konstantne struje (potkolo koje obezbeđuje približno konstantnu vrednost struje) umesto otpornikom. Izvori konstantne struje se primenjuju u integrisanim kolima, odnosno direktno spregnutim pojačavačima (na slici je dat pojačavač sa kapacitivnom spregom).

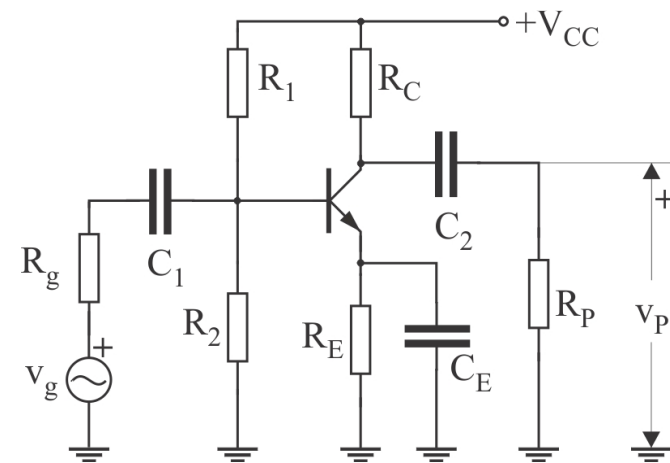
$$v_{be} = 0$$

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

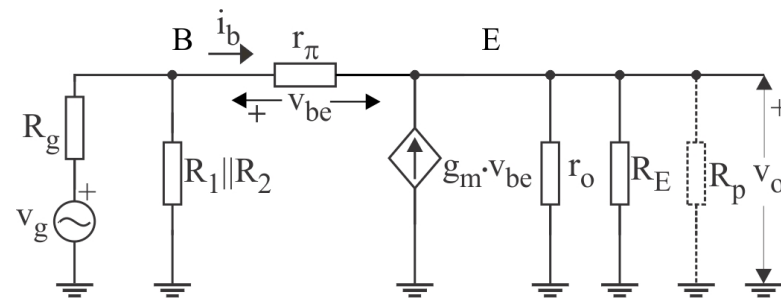
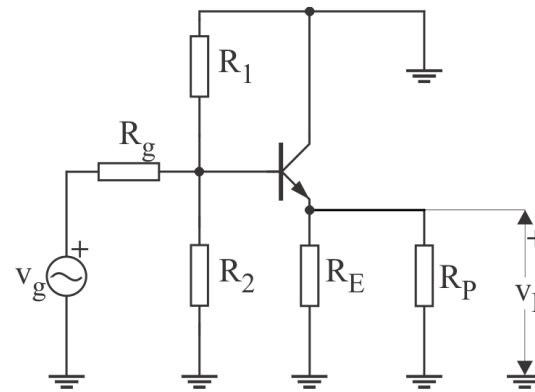
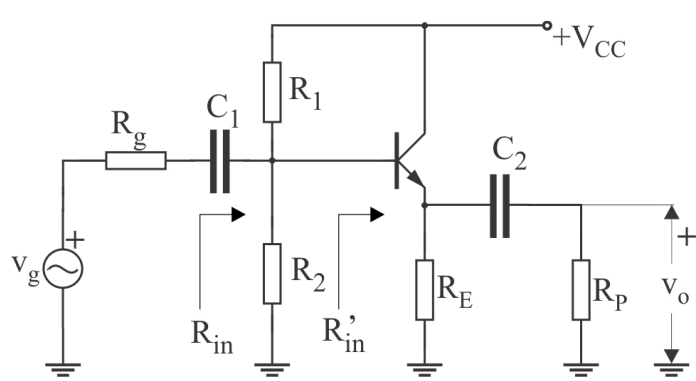
$$R_{out} = R_C$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

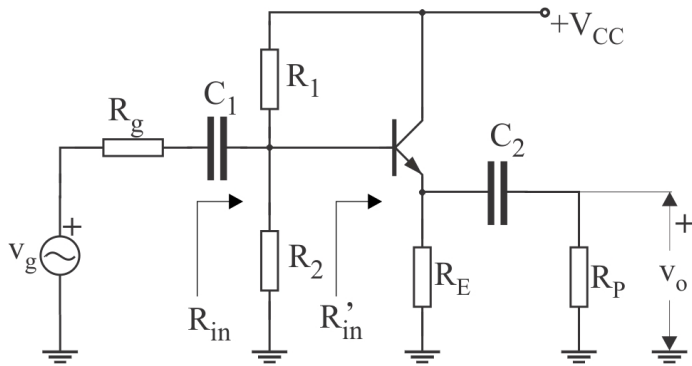
- Pojačavač sa zajedničkim emitorom pojačava i napon i struju. Ovom spregom postiže se najveće pojačanje snage.
- Pojačanje napona je negativno pojačanje (obrće fazu).
- Ulazna otpornost je mala. Izlazna otpornost je približno jednaka otporniku za polarizaciju kolu kolektora R_C ukoliko se kolo ne polariše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



Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



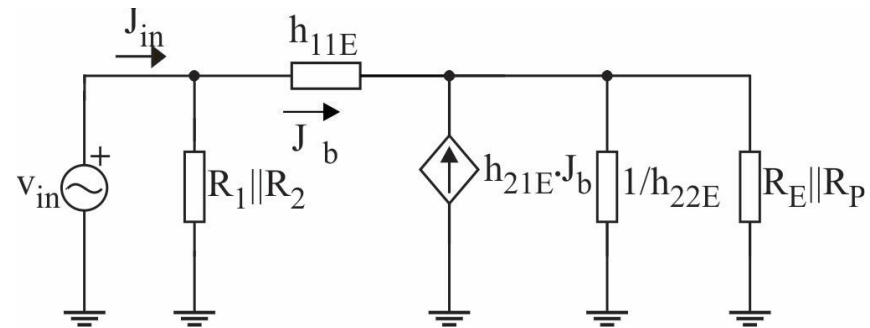
Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Sa R_{EC} je označena ekvivalentna otpornost između izlaznih priključaka tranzistora koja uzima u obzir otpornike za polarizaciju i otpornost potrošača:

$$R_{EC} = R_E \parallel R_P$$

$$h_{11e} = r_\pi \quad g_m = \frac{h_{21e}}{r_\pi}$$



$$R_{EC} \ll \frac{1}{h_{22e}} \Rightarrow R_{EC} \parallel \frac{1}{h_{22e}} \approx R_{EC}$$

$$v_b = i_b \cdot h_{11e} + v_o$$

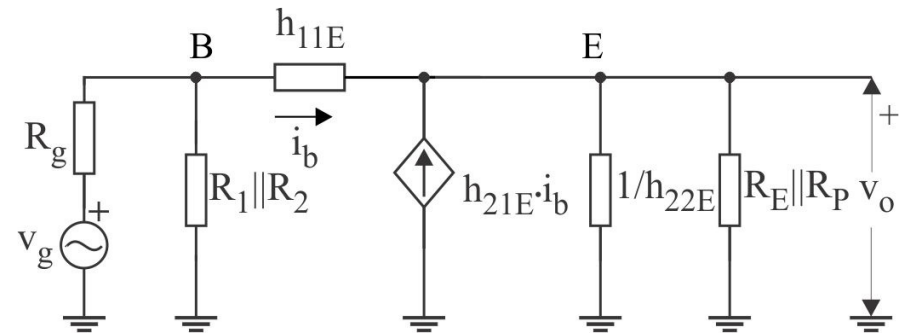
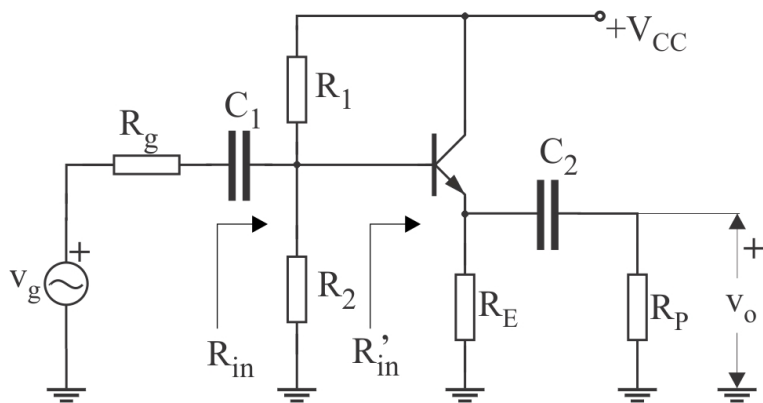
$$v_o = i_b \cdot (h_{21e} + 1) \cdot R_{EC} \approx i_b \cdot h_{21e} \cdot R_{EC}$$

$$v_b = i_b \cdot r_\pi \cdot (1 + g_m \cdot R_{EC})$$

$$R'_{in} = \frac{v_{in}}{i_b} = r_\pi \cdot (1 + g_m \cdot R_{EC})$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R'_{in} \parallel R_1 \parallel R_2$$

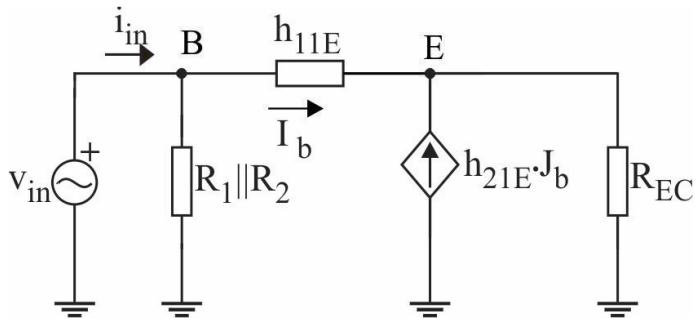
Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



$$R_{EC} = R_E \parallel R_P$$

$$R_{EC} \ll \frac{1}{h_{22e}} \Rightarrow R_{EC} \parallel \frac{1}{h_{22e}} \approx R_{EC}$$

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



$$v_o = i_b \cdot (h_{21e} + 1) \cdot R_{EC}$$

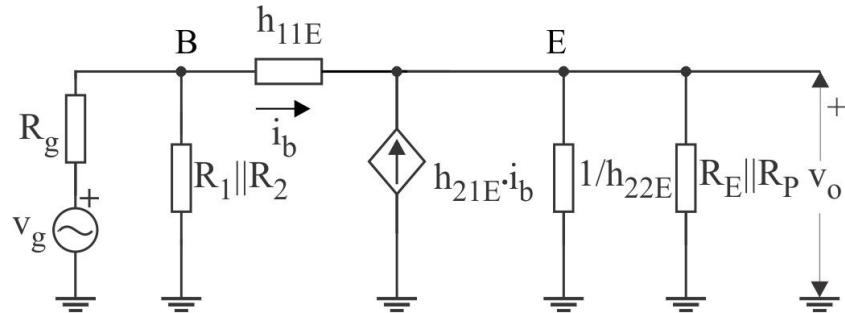
$$i_b = \frac{(v_b - v_o)}{h_{11e}}$$

$$A = \frac{v_o}{v_b} = \frac{(1 + h_{21e}) \cdot R_{EC}}{h_{11e} + (1 + h_{21e}) \cdot R_{EC}} \approx \frac{h_{21e} \cdot R_{EC}}{h_{11e} + h_{21e} \cdot R_{EC}}$$

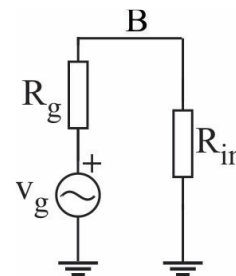
$$h_{11e} = r_{\pi} \quad g_m = \frac{h_{21e}}{r_{\pi}}$$

$$A = \frac{v_o}{v_b} = \frac{g_m \cdot R_{EC}}{1 + g_m \cdot R_{EC}} \approx 1$$

Naponsko pojačanje je manje od 1 i približno jednako 1.



Primenom teoreme o kompenzaciji od početne šeme kreiraju se dve šeme.



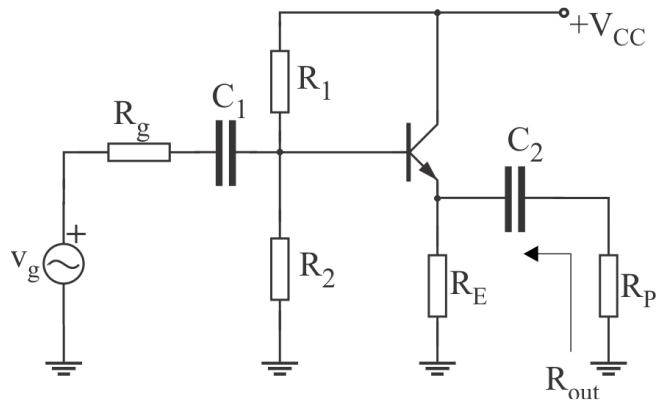
$$\frac{v_b}{v_g} = \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}}$$

$$A_u = \frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{v_b} \cdot \frac{v_b}{v_g} = \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}} \cdot A$$

A je naponsko pojačanje

A_u naponsko pojačanje u odnosu na elektromotornu silu

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

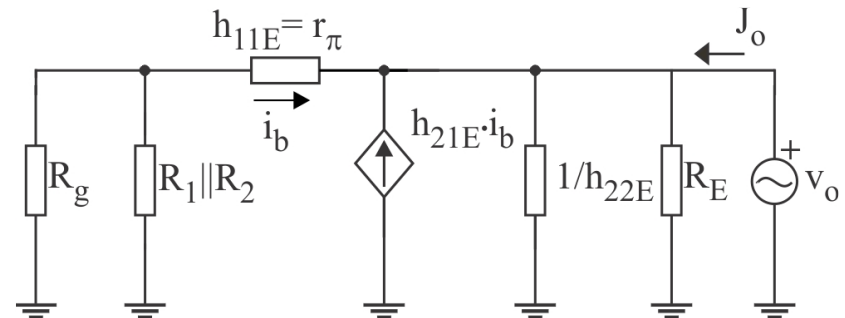


$$r_{\pi} = h_{11E} \quad h_{21E} = \beta \quad R_{BC} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_g$$

$$R_E \ll \frac{1}{h_{22E}} \Rightarrow R_E \parallel \frac{1}{h_{22E}} \approx R_E$$

Sa R_{BC} je označena ekvivalentna otpornost između ulaznih priključaka tranzistora:

$$R_{BC} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_g$$



$$i_o = \frac{v_o}{R_E} - h_{21E} \cdot i_b - i_b + v_o \cdot h_{22E}$$

$$i_b = -\frac{v_o}{h_{11E} + R_{BC}}$$

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

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = R_E \parallel \frac{r_{\pi} + R_{BC}}{(1 + \beta)} \approx \frac{r_{\pi} + R_{BC}}{\beta}$$

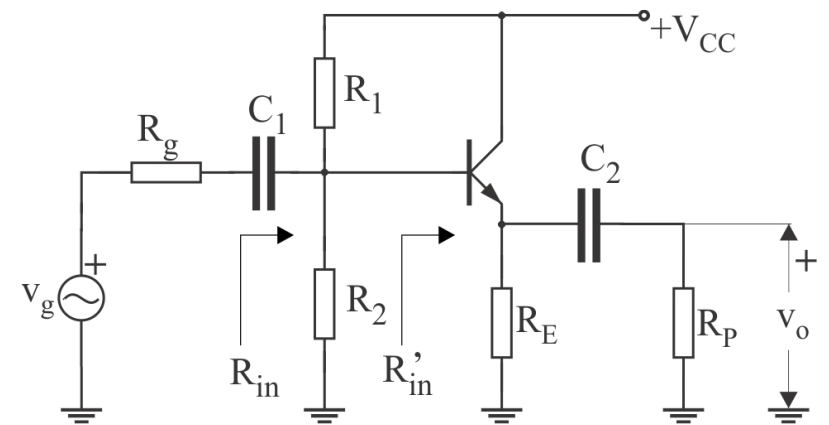
$$R_o = \frac{r_{\pi} + R_{BC}}{\beta}$$

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

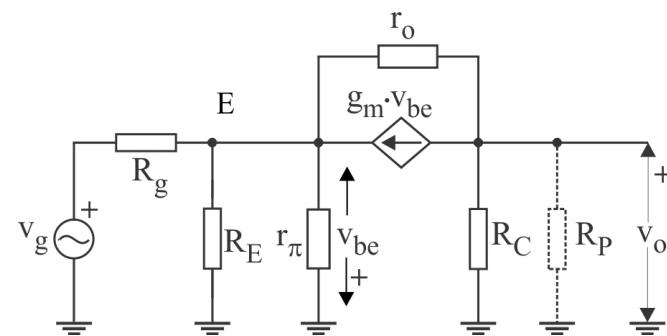
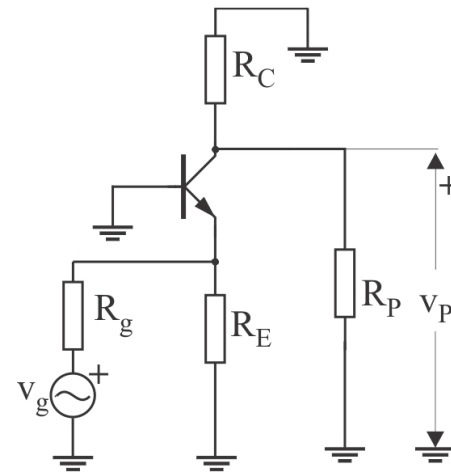
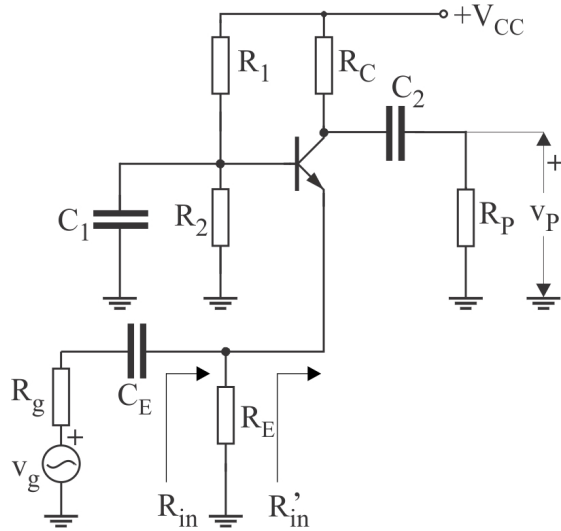
- Pojačavač sa zajedničkim kolektorom ne pojačava napon. Naponsko pojačanje je manje od 1 i veoma blizu jediničnog.
- Najveća vrednost strujnog pojačanje je približno β .

$$A_i = \frac{i_e}{i_b} = 1 + \beta$$

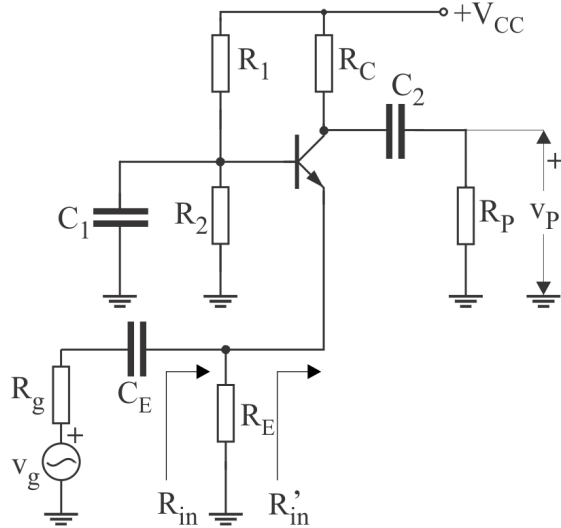
- Ulazna otpornost je vrlo velika, izlazna otpornost je vrlo mala.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Najčešće se primenjuje kao poslednji pojačavački stepene za prilagođenje po impedansi i to u slučaju kada je otpornost potrošača veoma mala. Prilagođenje po impedansi znači približno izjednačavanje izlazne otpornosti pojačavača sa otpornošću potrošača, jer se najveće pojačanje snage dobija kada su ove dve otpornosti jednake.



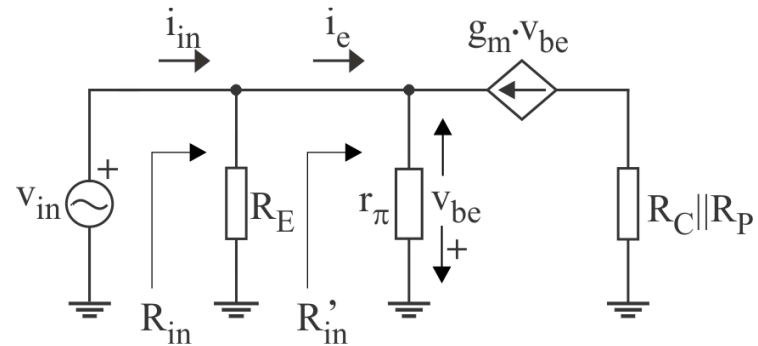
Pojačavač sa zajedničkom bazom



Pojačavač sa zajedničkom bazom



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



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

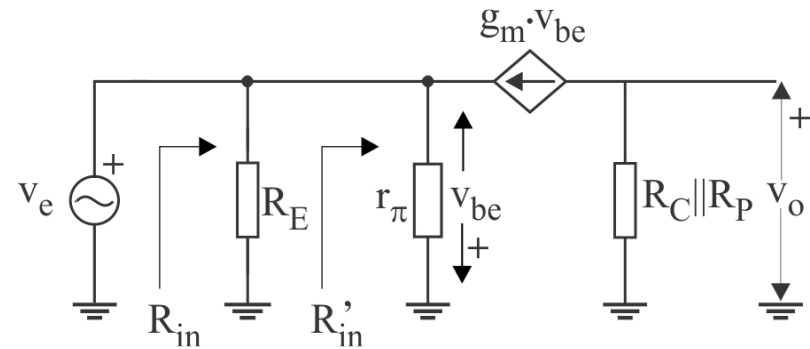
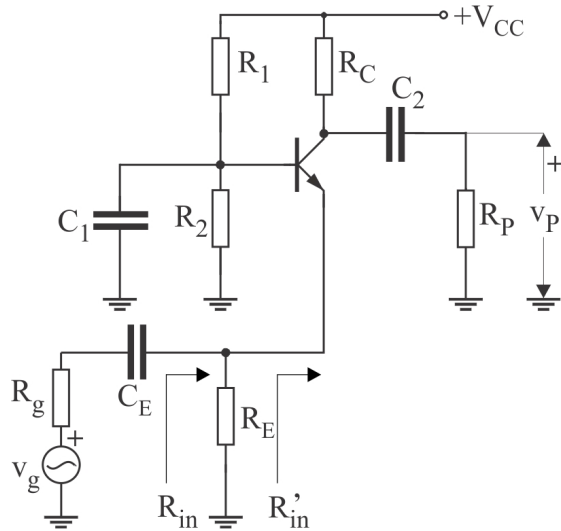
$$R'_{in} = \frac{v_e}{i_E} = \frac{r_\pi}{(1 + \beta)} = r_e$$

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

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

r_e je dinamička otpornost emitorskog pn spoja. Određuje se kao $r_e = \frac{V_T}{I_E}$ i njen red veličine je nekoliko destina oma.

Pojačavač sa zajedničkom bazom



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

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

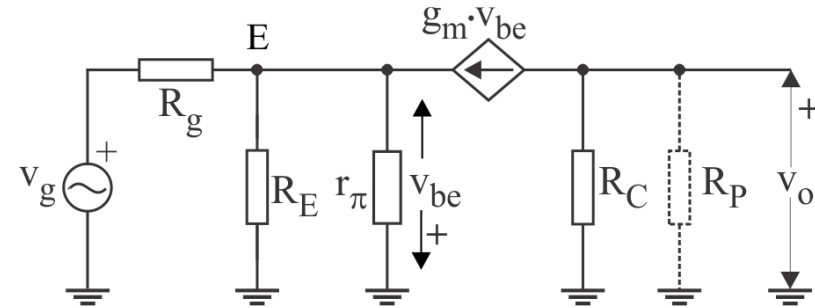
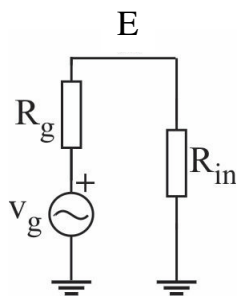
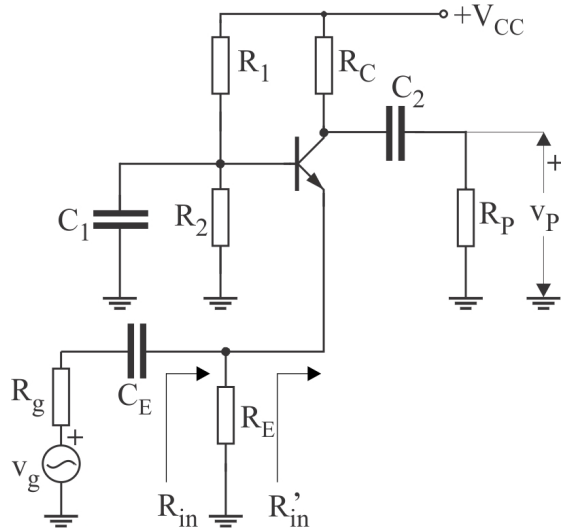
$$A = \frac{v_o}{v_e} = g_m \cdot R_{CB}$$

Može se pokazati da r_o u ovoj sprezi nema uticaj na naponsko pojačanje.

Sa R_{CB} je označena ekvivalentna otpornost između izlaznih priključaka tranzistora:

$$R_{CB} = R_C \parallel R_P$$

Pojačavač sa zajedničkom bazom



Naponsko pojačanje u odnosu na elektromotornu silu A_u je:

$$A_u = \frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{v_e} \cdot \frac{v_e}{v_g} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} \cdot g_m \cdot R_{CB}$$

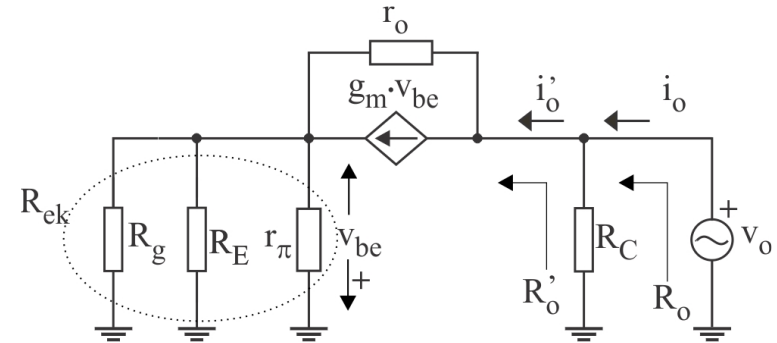
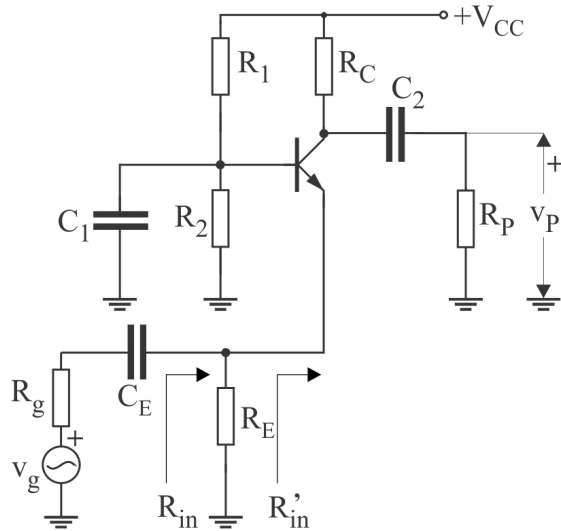
$$R_{in} \approx \frac{1}{g_m}$$

$$A_u = \frac{v_o}{v_g} = \frac{g_m \cdot R_{CB}}{1 + g_m \cdot R_g}$$

$$\text{Kada je } g_m R_g \gg 1 \text{ sledi da je } A_u \approx \frac{R_{CB}}{R_g}$$

Kada je ispunjen gornji uslov pojačanje ne zavisi od parametara tranzistora i utoliko je veće što je otpornost potrošača veća u odnosu na otpornost generatora.

Pojačavač sa zajedničkom bazom



Sa R_{EB} je označena ekvivalentna otpornost između izlaznih priključaka tranzistora:

$$R_{EB} = R_g \parallel R_E$$

R_o izlazna otpornost pojačavača

R'_o izlazna otpornost pojačavača kada se uzme u obzir otpornost otpornika za polarizaciju.

$$R_{ek} = R_g \parallel R_E \parallel r_{\pi}$$

$$v_{be} = -i'_o \cdot R_{ek}$$

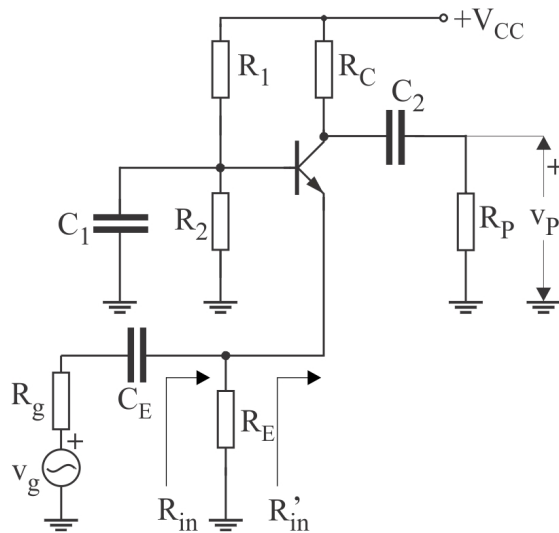
$$v_o = r_o \cdot (i'_o - g_m \cdot v_{be}) + R_{ek} \cdot i'_o$$

$$R'_o = \frac{v_o}{i'_o} = r_o \cdot (1 + g_m \cdot R_{ek}) + R_{ek}$$

$$R'_o = \frac{v_o}{i'_o} \approx r_o \cdot g_m \cdot r_{\pi} \parallel R_{EB}$$

$$R_o = R'_o \parallel R_C \approx R_C$$

Pojačavač sa zajedničkom bazom



- Najveća vrednost strujnog pojačanje je manje od 1 i veoma je blizu jediničnog.

$$A_i = \frac{i_c}{i_e} = \frac{\beta}{1 + \beta} = \alpha$$

Gde je α koeficijent strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom. Vrednost ovog koeficijenta je nešto manja od 1.

- Naponsko pojačanje srazmerno ekvivalentnoj otpornosti na izlaznom pristupu ($R_C \parallel R_P$). Što je ova otpornost veća pojačanje je veće. Mogu se dobiti velike vrednosti naponskog pojačanja.
- Ulazna otpornost je vrlo mala, izlazna otpornost vrlo velika.
- Ova sprega daje pozitivno pojačanje (ne obrće fazu).
- Koristi se za prilagođenje po impedansi, ukoliko je otpornost potrošača veoma velika ili ukoliko je unutrašnja otpornost pobudnog generatora 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°	$-R_{CE} \cdot g_m$	β	$r_\pi R_{BE}$	R_C
Zajednički kolektor	0°	≈ 1	$1+\beta$	$r_\pi \cdot (1 + g_m \cdot R_{EC})$	$\frac{r_\pi + R_{BC}}{\beta}$
Zajednička baza	0°	$g_m \cdot R_{CB}$	$\alpha \approx 1$	$\frac{r_\pi}{(1 + \beta)} = r_e$	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 kao 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)

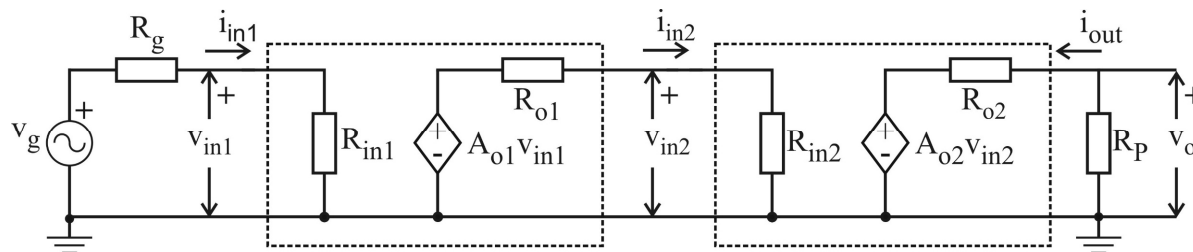
Višestepeni pojačavači

Analiza višestepnih pojačavača se sprovodi primenom Tevenenove teoreme. Pri tome se svaki pojačavački stepen na izlazu modelira naponskim generatorom čija je unutrašnja otpornost jednaka izlaznoj otpornosti pojačavačkog stepena, R_{oi} . Isto tako na ulazu se svaki pojačavački stepen modelira ulaznom otpornošću, R_{in} . Dakle smatra se da su svi pojačavački stepeni unilateralni, odnosno da se signal prenosi od ulaza ka izlazu.

Ulazna impedansa određenog pojačavačkog stepena se u opštem slučaju može odrediti 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.

$$\frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{v_{in2}} \cdot \frac{v_{in2}}{v_{in1}} \cdot \frac{v_{in1}}{v_g}$$

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

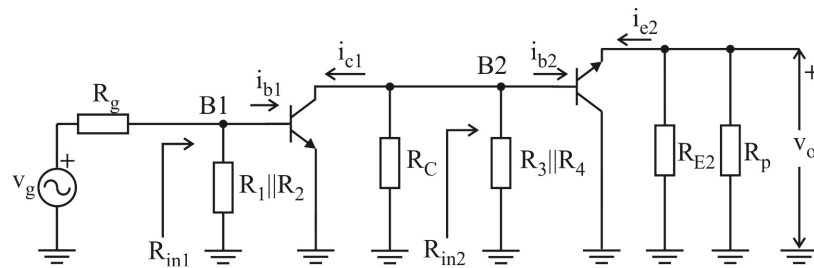
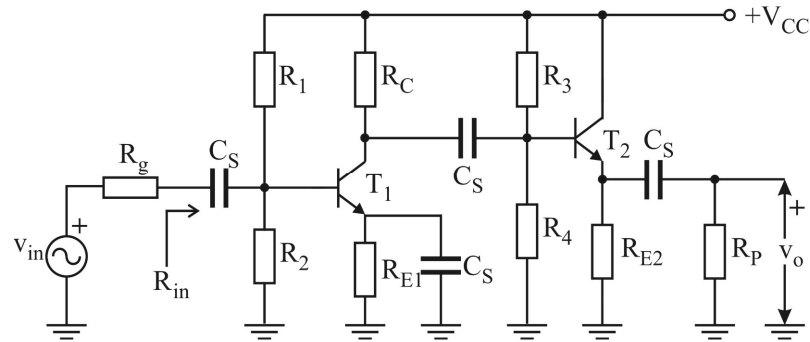


A_{o1} i A_{o2} označavaju naponsko pojačanje pojačavačkih stepena u praznom hodu

R_{in1} i R_{in2} označavaju ulazne otpornosti pojačavačkih stepena

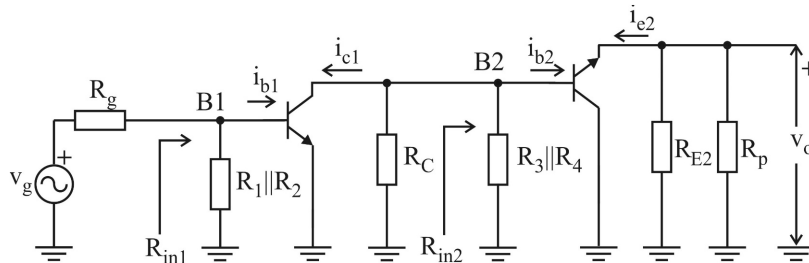
R_{o1} i R_{o2} označavaju izlazne otpornosti pojačavačkih stepena

Višestepeni pojačavači



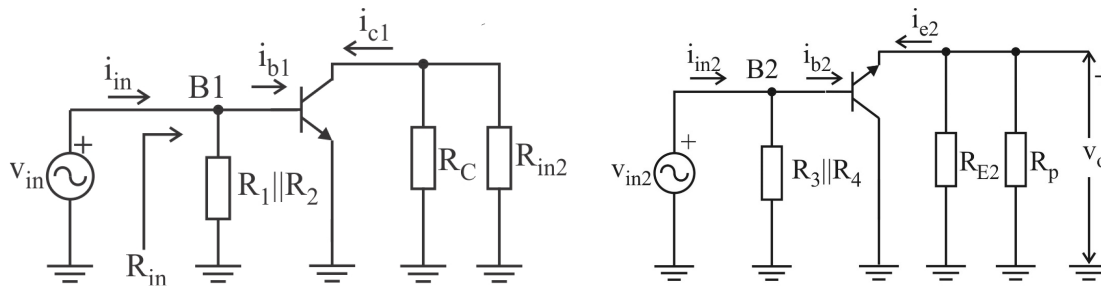
Višestepeni pojačavači

Primer analize višestepenog pojačavača – određivanje ulazne otpornosti



Najpre se određuje ulazna drugog pojačavačkog stepena R_{in2} , a nakon toga ulazna otpornost prvog pojačavačkog stepena.

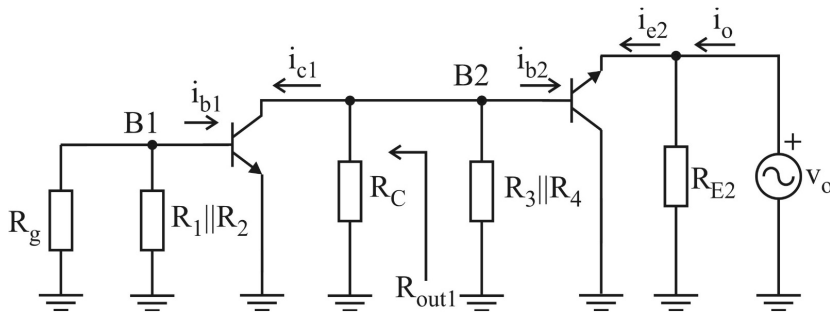
$$R_{in2} = \frac{v_{in2}}{i_{in2}}$$



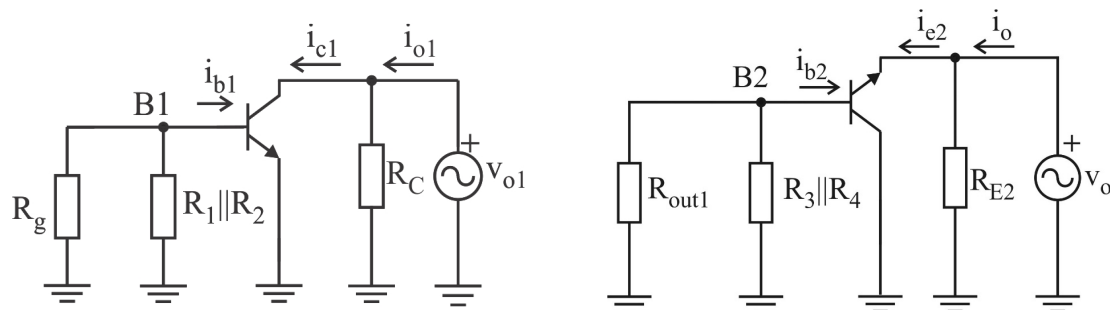
$$R_{in} = R_{in1} = \frac{v_{in}}{i_{in}}$$

Višestepeni pojačavači

Primer analize višestepenog pojačavača - određivanje izlazne otpornosti



Najpre se određuje izlazna otpornost prvog pojačavačkog stepena R_{out1} , a nakon toga izlazna otpornost drugog pojačavačkog stepena



$$R_{out1} = \frac{v_{o1}}{i_{o1}}$$

$$R_{out} = R_{out2} = \frac{v_o}{i_o}$$

Elementarna pitanja

1. Model tranzistora sa h parametrima (električna šema i izrazi za h_{iE} , h_{fE}).
2. Sprege bipolarnih tranzistora u pojačavačkim kolima.
3. Pi model bipolarnog tranzistora (električna šema i izrazi za r_{π} , r_o , g_m).

Ostala ispitna pitanja

4. Određivanje h- parametara sa statičkih karakteristika
5. Određivanje difuzione otpornosti r_{π} iz modela za velike signale.
6. Određivanje izlazne otpornosti r_o iz modela za velike signale.
7. Pojačavač sa zajedničkim emitorom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
8. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
9. Pojačavač sa zajedničkom bazom (ulazna otpornost, izlazna otpornost, naponsko pojačanje, osobine)
10. Višestepeni pojačavači.