

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. Uvod u AC analizu sklopova s BJT tranzistorima
2. Energetska bilansa pojačanja BJT tranzistora u AC domeni
3. AC modeliranje sklopova sa BJT tranzistorima
4. r_e model tranzistora
5. AC analiza tranzistora u spoju zajedničkog emitera sa uzemljenim emiterom
6. AC analiza tranzistora u spoju zajedničkog emitera sa naponskim djelilom u ulaznom krugu

Elektronički Elementi i Sklopovi

U dosadašnjim izlaganjima obradili smo osnovne karakteristike tranzistora te DC analizu sklopova s tranzistorima.

Kod AC analize tranzistor mijenjamo odgovarajućim AC modelom tranzistora - ekvivalentnim krugom.

Koji ćemo od AC modela primjeniti ovisi o karakteristikama AC signala.

Kod odluke koji ćemo model koristiti prvo gledamo kolika je amplituda signala. Amplituda signala određuje da li ćemo koristiti tehnike za mali AC signal (eng. *small signal model*) ili za veliki AC signal (eng. *large signal model*).

Kod analize za mali AC signal na raspolaganju imamo različite AC modele: r_e model, hibridni π model, i hibridni ekvivalentni model. Svaki od navedenih AC modela tranzistora ima svoje mane i prednosti.

Elektronički Elementi i Sklopovi

U dosadašnjim izlaganjima je spomenuto da se tranzistor može koristiti kao AC pojačalo.

Pitanje je kako je to uopće moguće? Zakoni konzervacije energije kažu da ukupna izlazna AC snaga P_o ne može biti veća od ulazne AC snage pojačala P_i . Zakoni konzervacije energije također kažu da je efikasnost pojačala η koju definiramo kao $\eta = P_o/P_i$ je uvijek manja od 1.

S druge strane, može nam se učiniti da je efikasnost AC pojačala veća od 1. U tom slučaju, odakle je energija došla?

Ono što nismo uzeli u obzir je DC snaga koju smo doveli na pojačalo. AC pojačalo zapravo uzima dio snage iz DC napajanja pojačala te nam se čini da je $\eta > 1$ iako to zapravo nije slučaj. Ono što treba prihvatiti jest:

Teorem superpozicije možemo primjeniti na električnu mrežu sa BJT tranzistorima te odvojeno analizirati AC i DC dio električne mreže.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Ključ AC modeliranja za mali signal je korištenje ekvivalentnih električnih krugova tranzistora. Ekvivalentni krug možemo definirati kao:

Ekvivalentni električni krug tranzistora jest kombinacija ispravno odabranih električnih elemenata koji najbolje aproksimiraju tranzistor u datim uvjetima operacije tranzistora.

Jednom kada odaberemo odgovarajući ekvivalentni krug tada tranzistor zamijenimo električnom shemom ekvivalentnog električnog kruga.

Kada se analiza sklopova sa tranzistorima tek počela razvijati, isprva se svugdje koristio hibridni ekvivalentni krug. Također, specifikacije tranzistora su navodile parametre hibridnog ekvivalentnog kruga. Manjkavost hibridnog ekvivalentnog kruga je u tome što specifikacije navode parametre kruga za testne uvjete rada tranzistora a ne za stvarne. U najvećem broju slučajeva ovo nije problem ako tranzistor koristimo u uvjetima koji su slični testnim uvjetima proizvođača tranzistora. Proizvođači još uvijek specificiraju parametre hibridnog modela.

Elektronički Elementi i Sklopovi

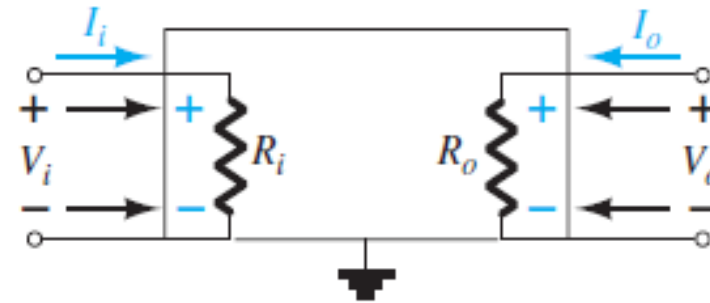
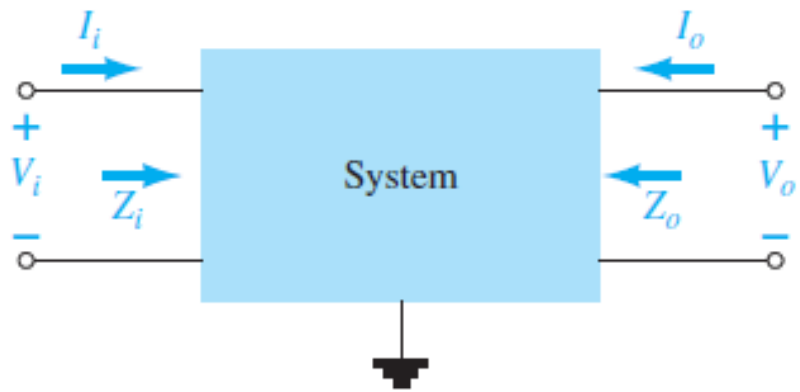
S vremenom se pojavio r_e model tranzistora. Ovaj model je prikladniji u nekim slučajevima zbog toga što se važni parametri r_e model računaju a ne čitaju se iz data-sheeta proizvođača (s iznimkom nekih općenitih parametra). Stoga r_e model tranzistora ne ovisi o testnim uvjetima rada tranzistora od strane proizvođača. Manjkavost r_e modela je u tome što nema element koji opisuje povratnu vezu.

r_e model tranzistora je zapravo reducirani hibridni π model tranzistora koji se gotovo ekskluzivno koristi na visokim frekvencijama. Ovaj model uključuje i povratnu vezu između ulaza i izlaza koja nije modelirana u r_e modelu tranzistora.

U našoj analizi električnih mreža gotovo uvijek ćemo koristiti r_e model tranzistora osim ako to nije drukčije specificirano.

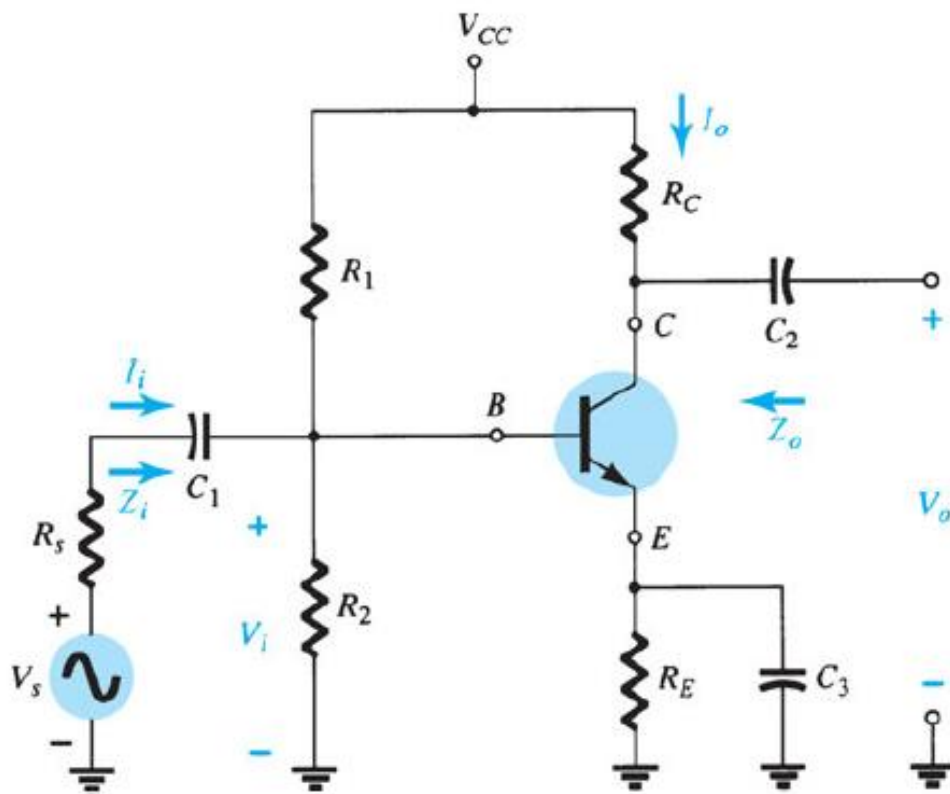
Elektronički Elementi i Sklopovi

Da bismo analizirali mreže sa BJT tranzistorima trebamo definirati ulazne i izlazne parametre četvoropola. Ulazni parametri su: Z_i (ulazna impedancija), I_i (ulazna struja), V_i (ulazni napon) dok su izlazni parametri: Z_o , I_o , V_o .



Parametri na slici nisu rezervirani samo za BJT tranzistore već se mogu primjeniti na svaku električnu mrežu.

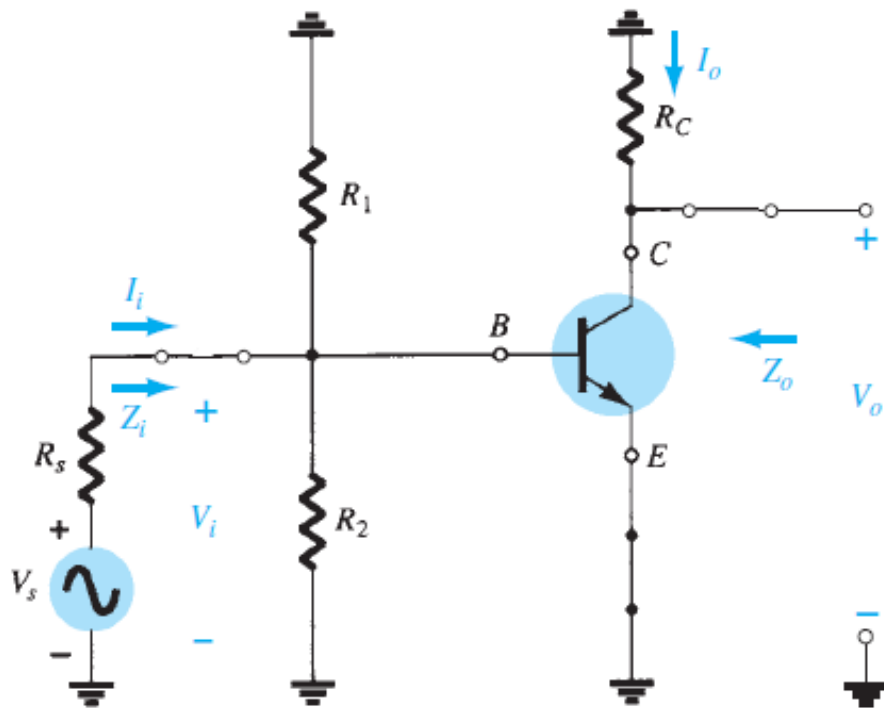
Elektronički Elementi i Sklopovi



Na slici je tranzistorsko pojačalo u spoju zajedničkog emitera (ZE). Struje, naponi i impedancije Z_i , I_i , V_i , Z_o , I_o , V_o su označene na slici.

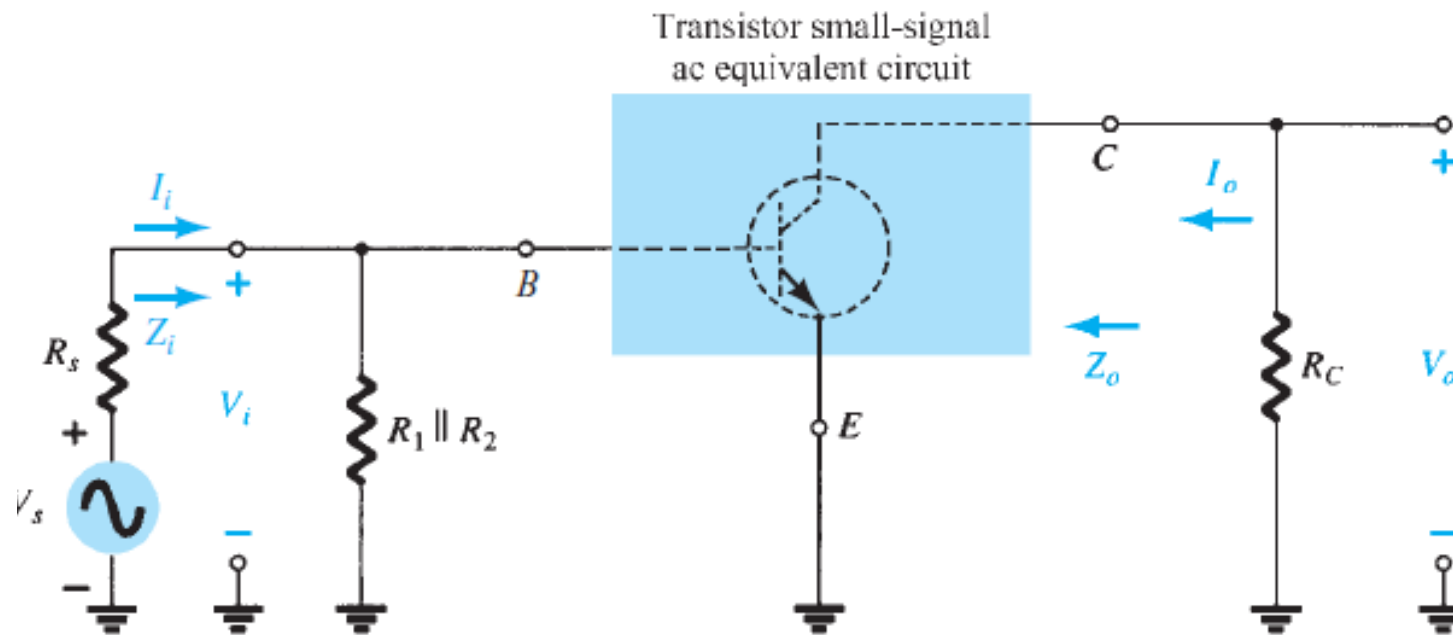
Elektronički Elementi i Sklopovi

Kada provodimo AC analizu sve DC naponske izvore uzemljimo, a svi kondenzatori su kratko spojeni (ako je frekvencija dovoljno niska).



Elektronički Elementi i Sklopovi

Neovisno o tome koji ćemo model tranzistora primjeniti, tranzistor se nadomjesti nadomjesnim modelom kao na slici.



Elektronički Elementi i Sklopovi

AC ekvivalentna električna mreža se svodi na slijedeće korake:

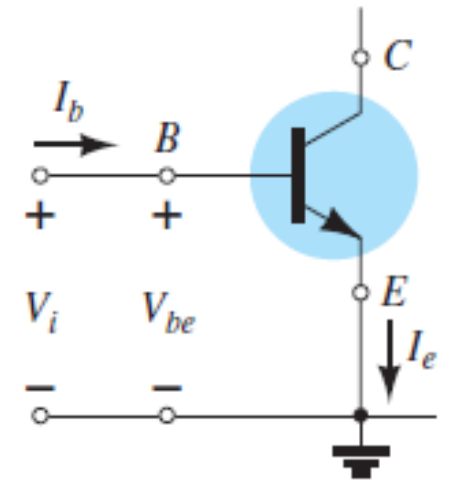
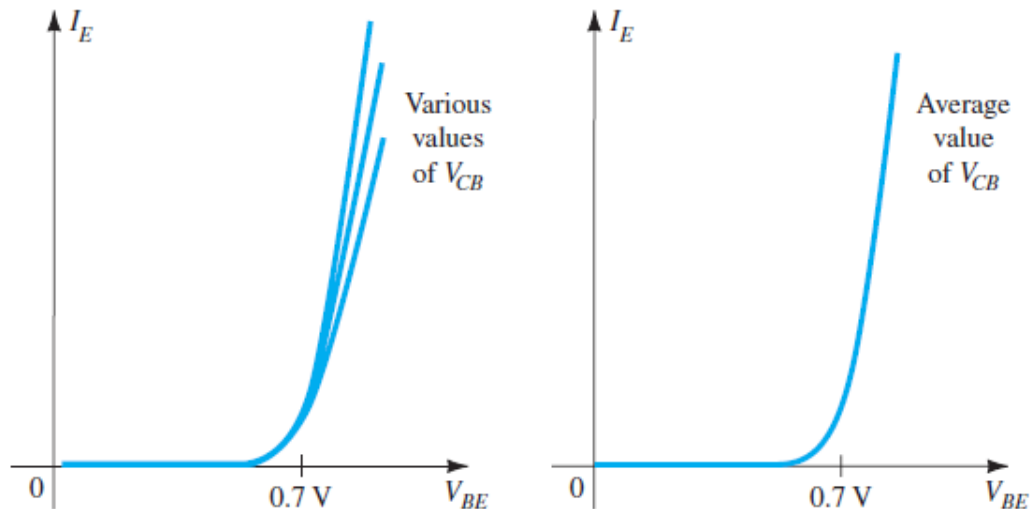
- 1. Svi DC naponski izvori se uzemlje*
- 2. Svi kondenzatori se kratko spoje*
- 3. Uklone se svi suvišni elementi koji su postali suvišni zbog koraka 1. i 2.*
- 4. Električna mreža se nacrtava na logičniji način*

Elektronički Elementi i Sklopovi

r_e model tranzistora je različit u konfiguracijama zajedničkog emitera, zajedničke baze i zajedničkog kolektora.

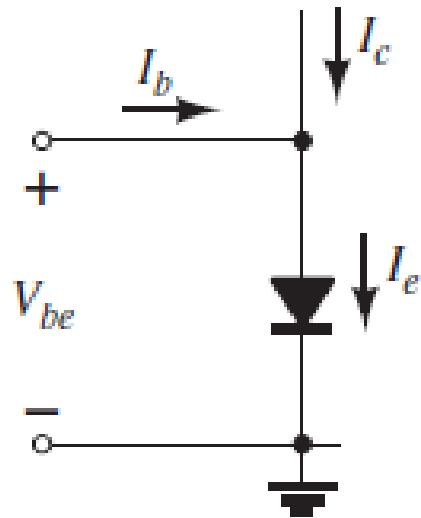
Za spoj zajedničkog emitera, na strani ulaza imamo da je ulazni napon V_i jednak naponu baza emiter V_{be} . Ulazna struja I_i je jednaka struji baze I_b .

Iz dosadašnjih izlaganja imamo struja emitera I_E ovisi kao na slici:



Elektronički Elementi i Sklopovi

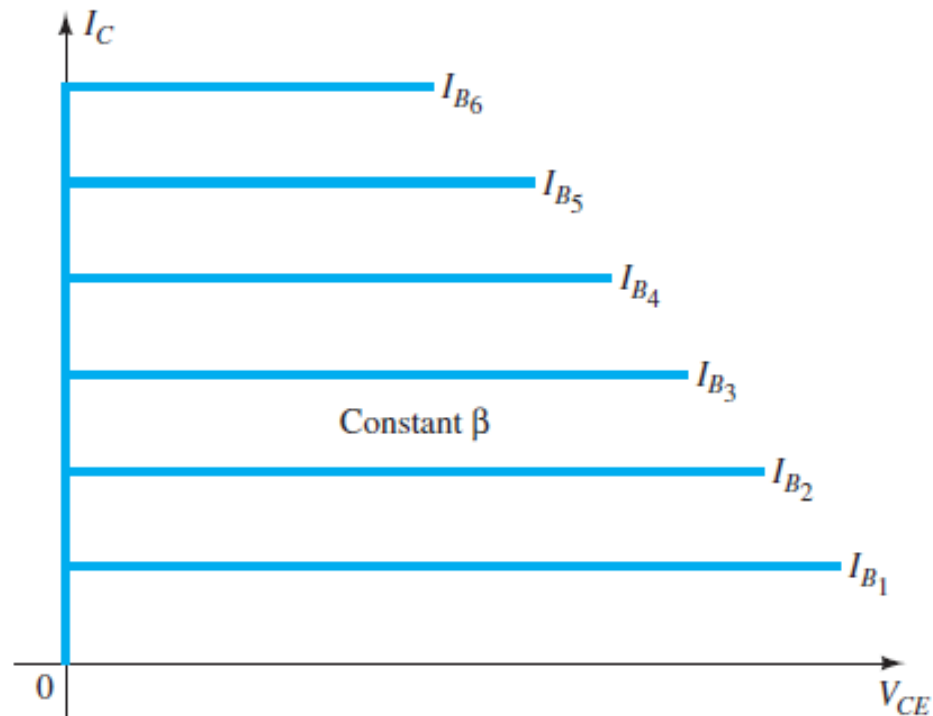
To znači da ulazni krug možemo modelirati jednostavno, pomoću diode:



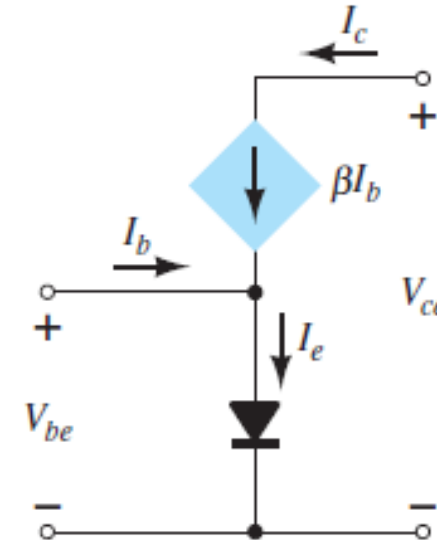
Dakle, ekvivalentni ulazni krug jest jednostavna dioda.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Ako podrazumijevamo da je β konstantan onda je izlazna karakteristika kao na slici:



U tom slučaju se izlazni krug tranzistora može modelirati pomoću strujnog izvora βI_b :



Elektronički Elementi i Sklopovi

Sklop na prethodnoj slici je nezgodan za uporabu zbog diode u ulaznom krugu. Model možemo pojednostavniti ako diodu zamijenimo sa dinamičkim otporom emitterske diode r_e . Iznos emitorskog dinamičkog otpora možemo otprilike izračunati iz jednadžbe:

$$(1) r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

Sada možemo naći i ulaznu impedanciju:

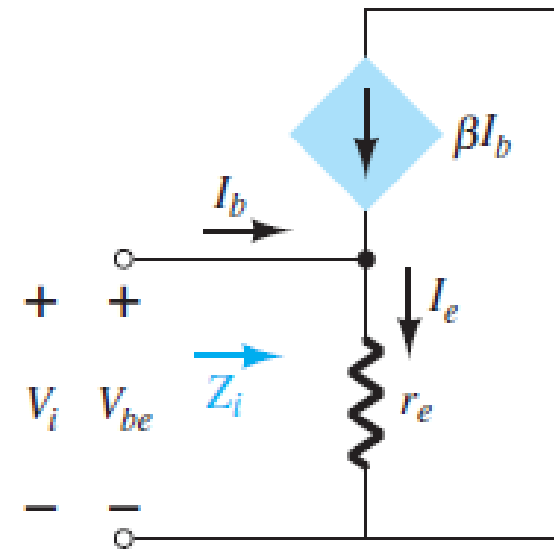
$$(2) Z_i = \frac{V_i}{I_b} = \frac{V_{be}}{I_b}$$

Napon V_{be} možemo naći kao:

$$(3) V_{be} = I_e r_e = (I_c + I_b) r_e = (\beta + 1) I_b r_e$$

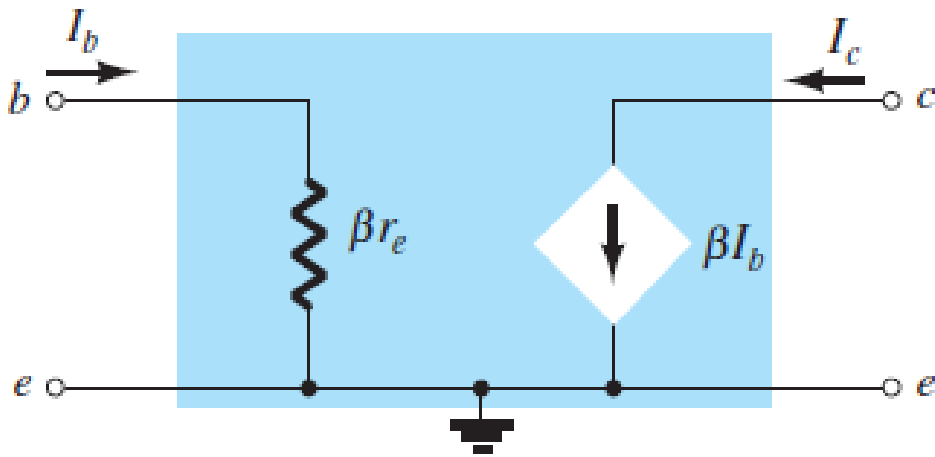
Uvrštavanjem (3) u (2) dobije se ulazna impedancija:

$$(4) Z_i = (\beta + 1) r_e \approx \beta r_e$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Nadomjesni sklop iz prethodne slike možemo rekonfigurirati. Ako primjetimo da je ulazni napon na prethodnoj slici $V_i = I_e r_e = (\beta + 1)I_b r_e \cong \beta I_b r_e$ onda sklop sa prethodne električne sheme možemo crtati kao:

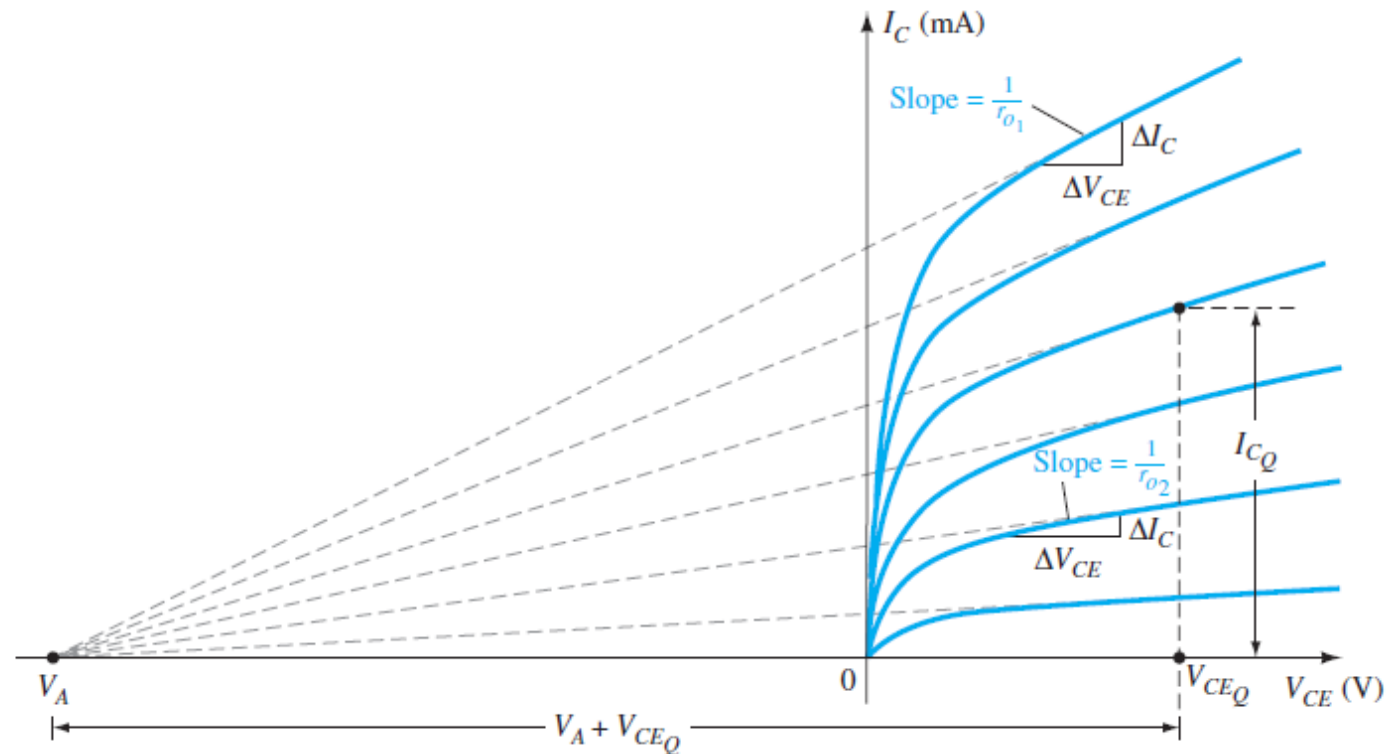


Elektronički Elementi i Sklopovi

Nadomjesna shema na prethodnoj slici dobro modelira ulazni krug, ali nije dobra reprezentacija izlazne impedancije kruga jer izlazna karakteristika ima veći nagib nego što smo početno podrazumijevali.

Ako pogledamo gdje se sijeku nagibi krivulja na izlaznoj karakteristici, vidimo da se svi sijeku u jednoj točki.

Napon (točka) V_A gdje se ovi pravci sijeku se naziva još i Earlyev Napon



Elektronički Elementi i Sklopovi

Nagib svake od krivulja možemo izraziti kao $1/r_o$. Ovaj nagib ovisi o Earlyevom naponu, naponu statičke radne točke V_{CEQ} i struji u statičkoj radnoj točki I_{CQ} kao:

$$(5) r_o = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

Tipično, Earlyev napon $V_A \gg V_{CEQ}$ te možemo pisati:

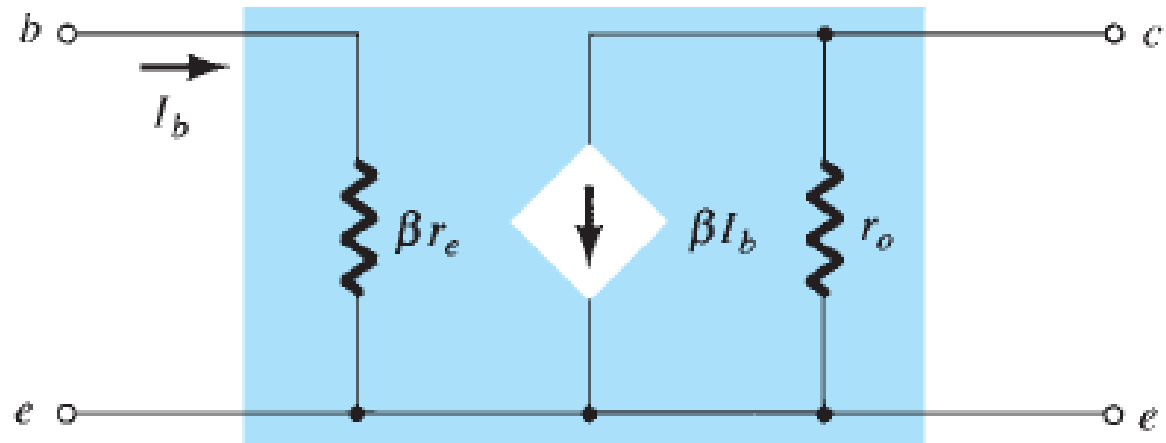
$$(6) r_o = \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

Ako ne znamo Earlyev napon V_A za dati tranzistor onda ga možemo aproksimirati iz izlazne karakteristike kao:

$$(7) r_o \cong \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$$

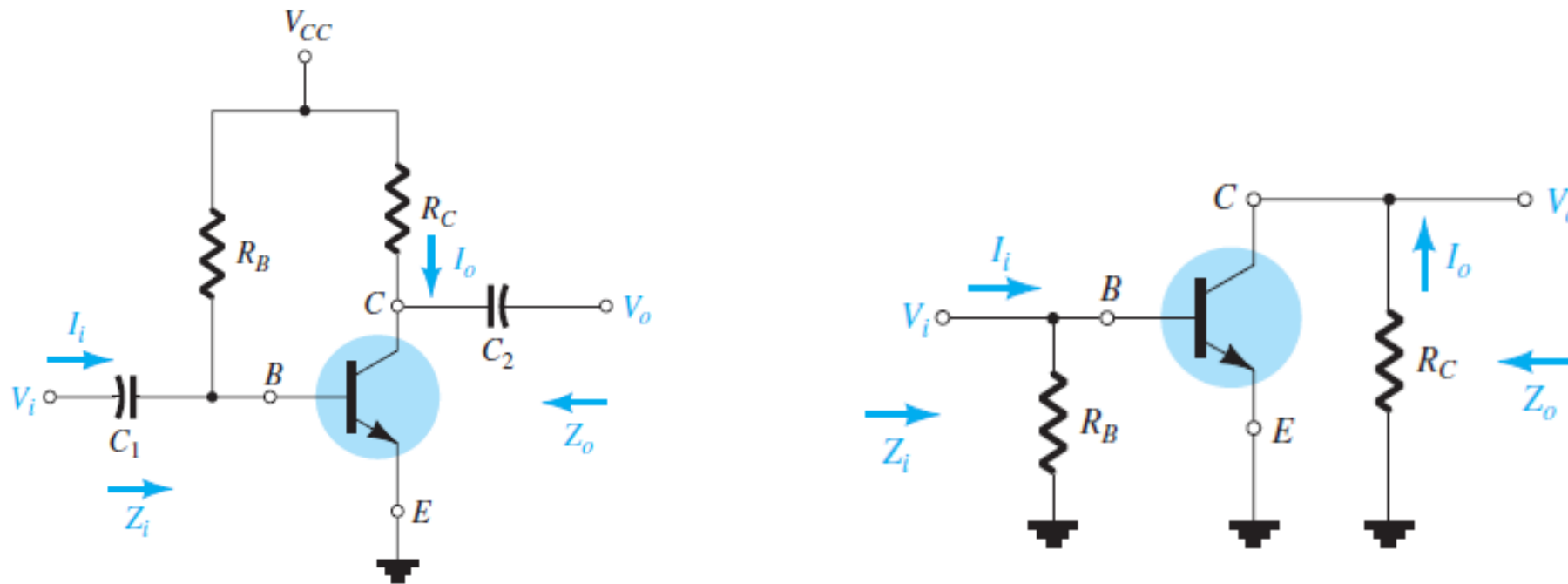
Elektronički Elementi i Sklopovi

Impedancija r_o se pojavljuje u izlaznom krugu r_e modela tranzistora.



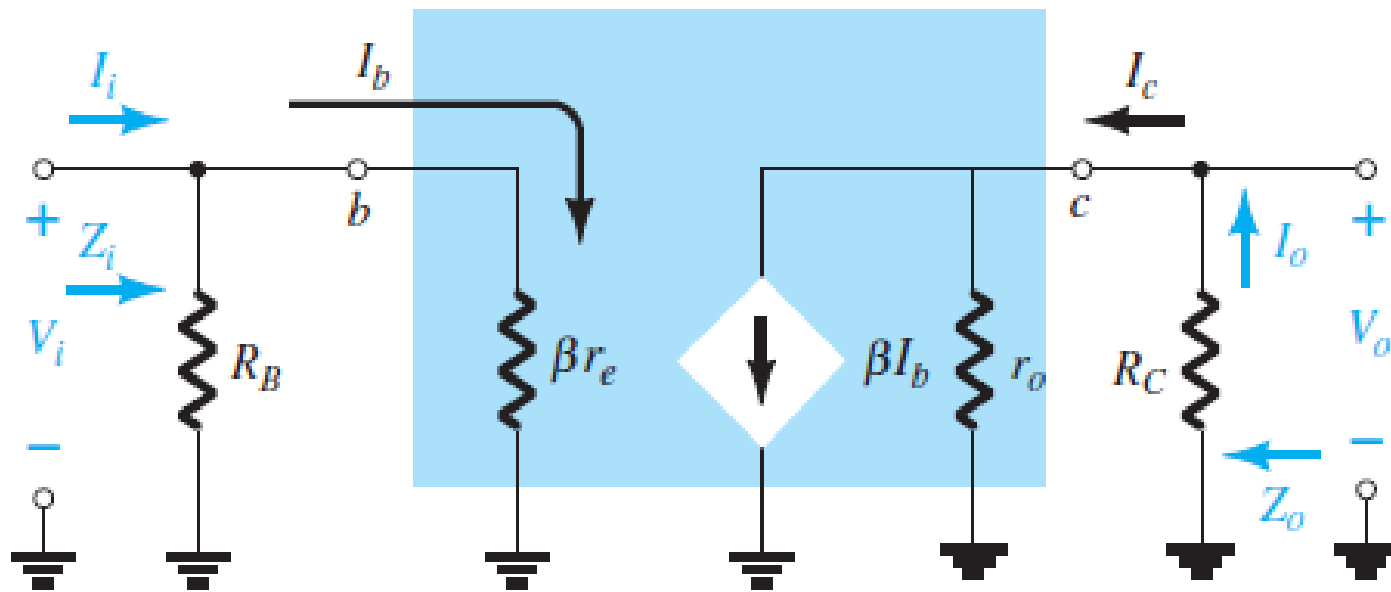
Elektronički Elementi i Sklopovi

Na slici je tranzistorsko pojačalo u spoju zajedničkog emitera sa uzemljenim emiterom. Treba naći AC pojačanje i ostale veličine. AC analizu započinjemo tako što naponske izvore uzemljimo i sve kondenzatore kratko spojimo.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Nakon što su DC naponski izvori uzemljeni te kondenzatori kratko spojeni, tranzistor zamijenimo nadomjesnim r_e modelom tranzistora.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz slike je jasno da je ulazna impedancija Z_i jednaka:

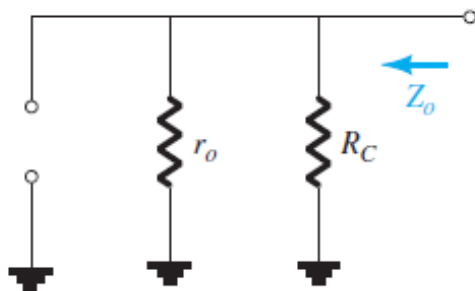
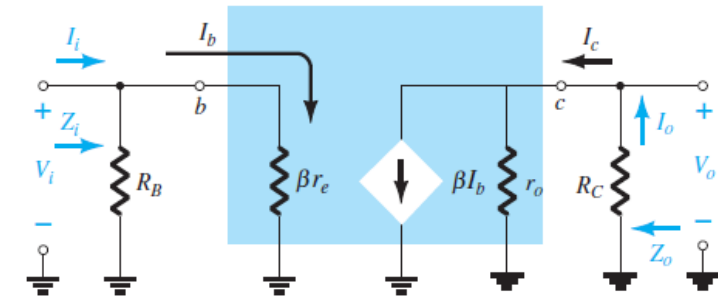
$$(8) Z_i = R_B \parallel \beta r_e$$

U najvećem broju slučajeva vrijedi da je $R_B \gg \beta r_e$ te izraz (8) postaje:

$$(9) Z_i \cong \beta r_e$$

Primjerice, ako je $R_B = 10\beta r_e$ onda uzimamo da vrijedi $R_B \gg \beta r_e$.

Izlazna impedancija bilo koje električne mreže je ona izlazna impedancija kada je ulazni napon $V_i = 0$. Ako je $V_i = 0$, onda je $I_b = 0$. Stoga možemo koristiti ekvivalentnu mrežu izlaznog kruga:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz ovako pojednostavljenog izlaznog kruga možemo odrediti izlaznu impedanciju Z_o kao:

$$(10) Z_o = R_C \parallel r_o$$

Ako je otpor $r_o \geq 10 R_C$ tada se može koristiti aproksimacija:

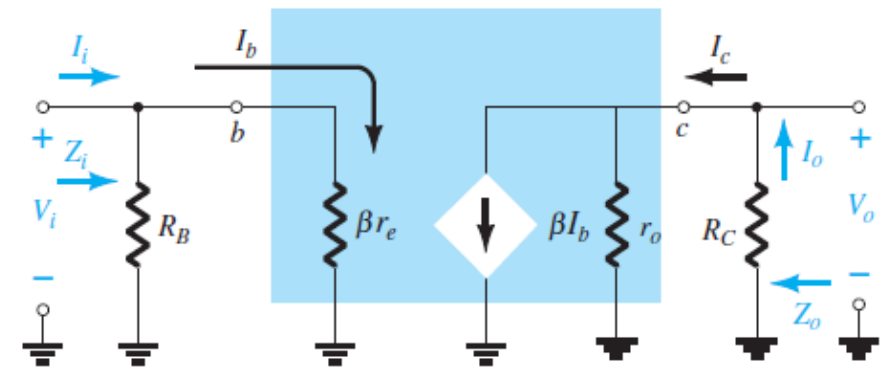
$$(11) Z_o \cong R_C$$

Naponsko pojačanje A_v jest jednako omjeru:

$$(12) A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

Izlazni napon V_o možemo odrediti iz izlaznog kruga kao:

$$(13) V_o = -\beta I_b (R_C \parallel r_o)$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

S druge strane struju I_b možemo dovesti u vezu sa ulaznim naponom V_i :

$$(14) I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

Uvrštavajući izraz (14) u (13) dobi je se izraz za izlazni napon V_o :

$$(15) V_o = -\beta \frac{V_i}{\beta r_e} (R_C \parallel r_o) = -\frac{V_i}{r_e} (R_C \parallel r_o)$$

Ako uvrstimo izraz (15) u (12) dobijemo izraz za naponsko pojačanje A_v spoja zajedničkog emitera sa uzemljenim emiterom:

$$(16) A_v = -\frac{(R_C \parallel r_o)}{r_e}$$

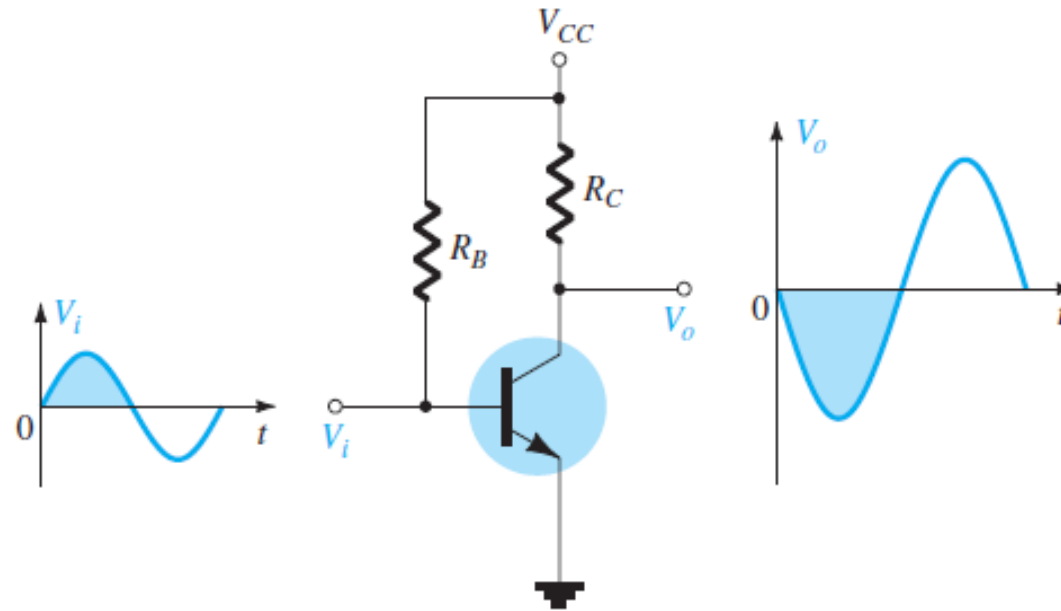
Ako je otpor R_C odabran tako da vrijedi $r_o \geq 10R_C$ onda izraz (16) postaje:

$$(17) A_v = -\frac{R_C}{r_e}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Treba primjetiti da jednađba (17) ne ovisi o pojačanju β (iako β treba koristiti za izračun dinamičkog otpora r_e).

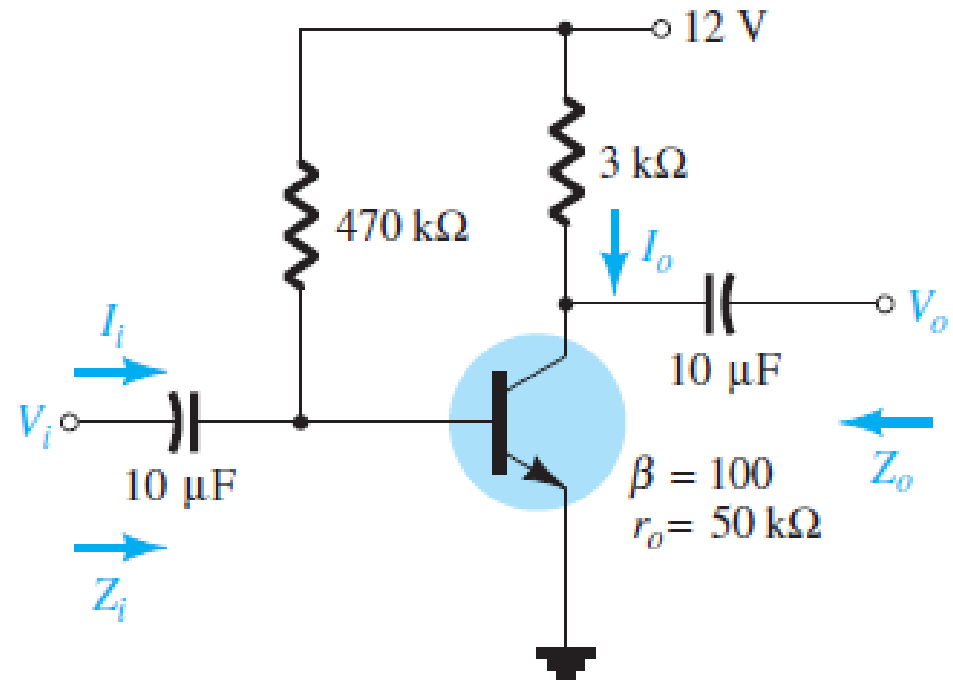
Također, jednađba (17) je negativnog predznaka. To znači da je izlazni signal pomaknut u fazi za 180° u odnosu na ulazni.



Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Za mrežu na slici treba odrediti

- a) otpor r_e
- b) Ulaznu impedanciju Z_i (ako je $r_o = \infty\Omega$)
- c) Izlaznu impedanciju Z_o (ako je $r_o = \infty\Omega$)
- d) Naponsko pojačanje A_v (ako je $r_o = \infty\Omega$)
- e) Ponoviti (c) i (d) ako je $r_o = 50\text{ k}\Omega$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje:

a) dinamički otpor r_e možemo naći iz DC analize. Prvo nađemo struju baze iz izraza:

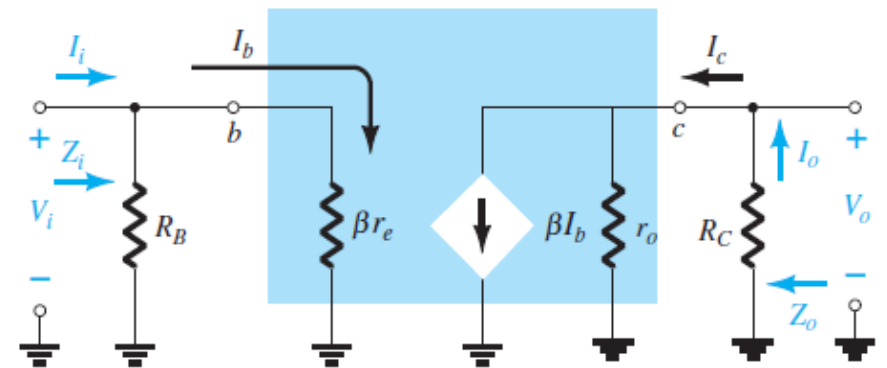
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12V - 0.7V}{470 k\Omega} = 24.04 \mu A$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (101) \cdot 24.04 \mu A = 2.428 \text{ mA}$$

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{2.428 \text{ mA}} = 10.71 \Omega$$

b) Ulaznu impedanciju Z_i možemo naći iz nadomjesnog sklopa kao:

$$Z_i = R_B \parallel \beta r_e = 470 k\Omega \parallel 1.071 k\Omega = 1.07 k\Omega$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

c) izlaznu impedanciju možemo naći iz izraza:

$$Z_o = R_C \parallel r_o$$

budući da je zadano $r_o = \infty \Omega$ izlazna impedancija postaje:

$$Z_o = R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

d) Naponsko pojačanje A_v možemo naći kao:

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{3 \text{ k}\Omega}{10.71 \Omega} = -280.11$$

e) $Z_o = R_C \parallel r_o = 3 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega = 2.83 \text{ k}\Omega$

$$A_v = -\frac{(R_C \parallel r_o)}{r_e} = -264.24$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

