

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. Darlingtonov spoj
2. Hibridni ekvivalentni model tranzistora

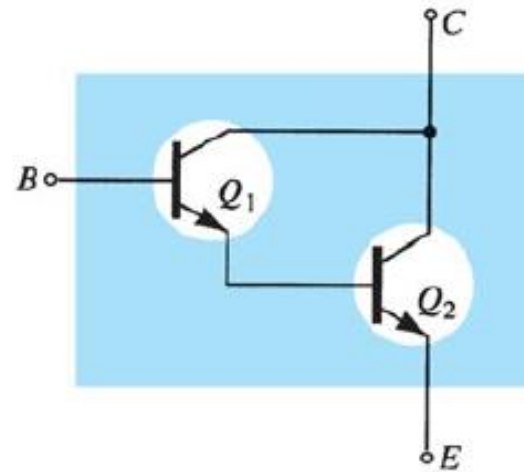
Elektronički Elementi i Sklopovi

Darlingtonov spoj može se shvatiti kao jedan tranzistor sa velikim iznosom strujnog pojačanja β

Strujno pojačanje β u Darlingtonovom spoju jest produkt individualnih pojačanja tranzistora.

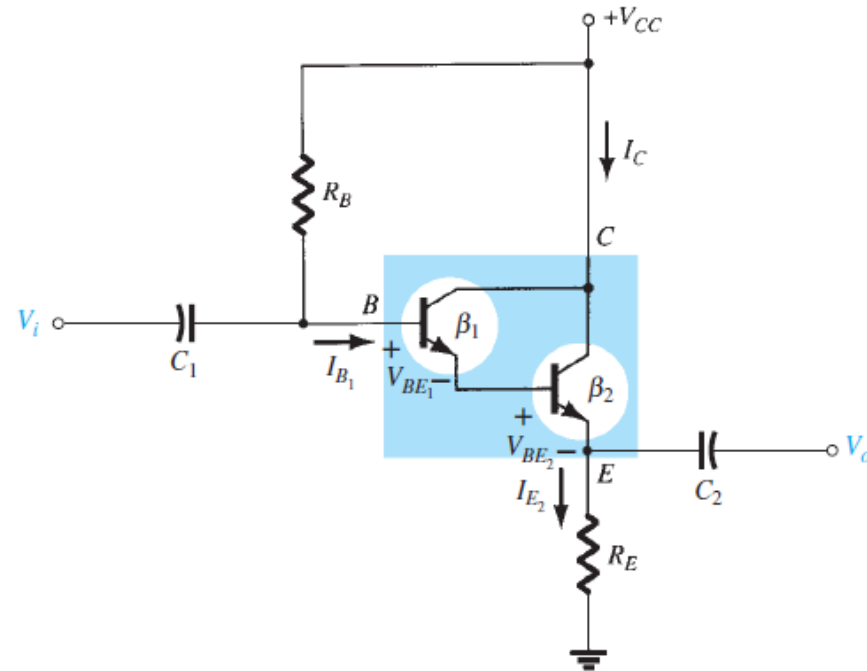
Ako dva tranzistora u Darlingtonovom spoju imaju pojačanja β_1 i β_2 onda je ukupno pojačanje β_D Darlingtonovog spoja jednako:

$$(1) \beta_D = \beta_1 \beta_2$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Darlingtonov spoj možemo koristiti i u konfiguraciji emitorskog slijedila. Razlika između emitorskog slijedila sa jednim tranzistorom i emitorskog slijedila sa Darlingtonovim spojem je u tome što pomoću Darlingtonovog spoja možemo bitno povećati ulaznu impedanciju.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Za DC analizu možemo koristiti Kirchhoffove zakone:

$$(1) V_{CC} = I_{B_1}R_B + V_{BE_1} + V_{BE_2} + I_{E_2}R_E$$

Struju I_{E_2} možemo izraziti kao:

$$(2) I_{E_2} = (\beta_2 + 1)I_{B_2} = (\beta_2 + 1)I_{E_1} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{B_1}$$

Uz uvjet $\beta_1, \beta_2 \gg 1$ jednačba (2) postaje:

$$(3) I_{E_2} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{B_1} \cong \beta_1\beta_2 I_{B_1} = \beta_D I_{B_1}$$

Uvrštavanjem (3) u (1) dobije se:

$$(4) V_{CC} = I_{B_1}R_B + V_{BE_1} + V_{BE_2} + \beta_D I_{B_1}R_E$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz izraza (4) može se naći struja I_{B_1} :

$$(5) I_{B_1} = \frac{V_{CC} - V_{BE_1} - V_{BE_2}}{R_B + \beta_D R_E}$$

Struja kolektora I_{C_2} jest:

$$(6) I_{C_2} = \beta_2 I_{B_2} = \beta_2 I_{E_1} = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B_1} \cong \beta_1 \beta_2 I_{B_1} = \beta_D I_{B_1}$$

Napon kolektora na oba tranzistora:

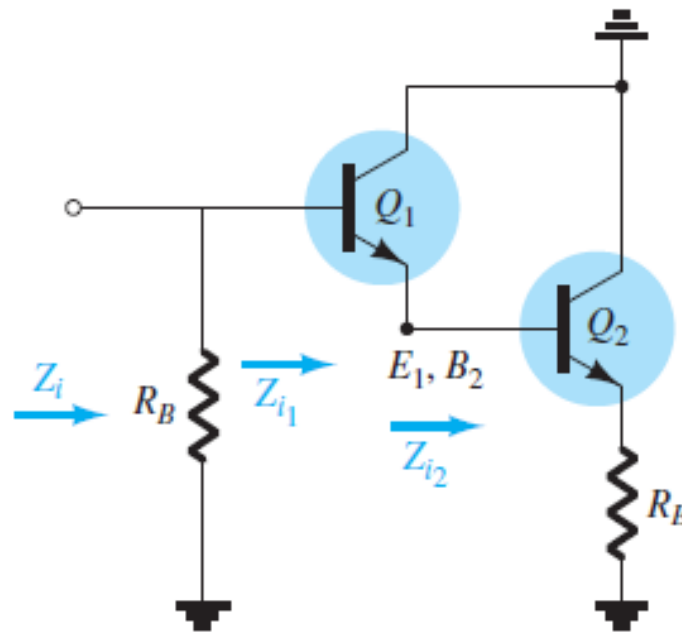
$$(7) V_{C_1} = V_{C_2} = V_{CC}$$

Napon emitera tranzistora Q_2 :

$$(8) V_{E_2} = I_{E_2} R_E$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Za AC analizu Darlingtonovog spoja koristimo ekvivalentnu shemu (DC izvori uzemljeni, kondenzatori kratko spojeni):



Elektronički Elementi i Sklopovi

Da bi našli ulaznu impedanciju Z_i treba prvo naći ulaznu impedanciju tranzistora Q_2 . Iz r_e modela tranzistora slijedi:

$$(9) Z_{i_2} = \beta_2(r_{e_2} + R_E)$$

$$(10) Z_{i_1} = \beta_1(r_{e_1} + Z_{i_2})$$

Kombinirajući jednačbe (9) i (10) dobije se izraz:

$$(11) Z_{i_1} = \beta_1(r_{e_1} + \beta_2(r_{e_2} + R_E))$$

Ako uzmemo da je $R_E \gg r_{e_2}$ jednačba (11) postaje:

$$(12) Z_{i_1} = \beta_1(r_{e_1} + \beta_2 R_E)$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Budući da vrijedi da je $\beta_2 R_E \gg r_{e_1}$ jednačba (12) postaje:

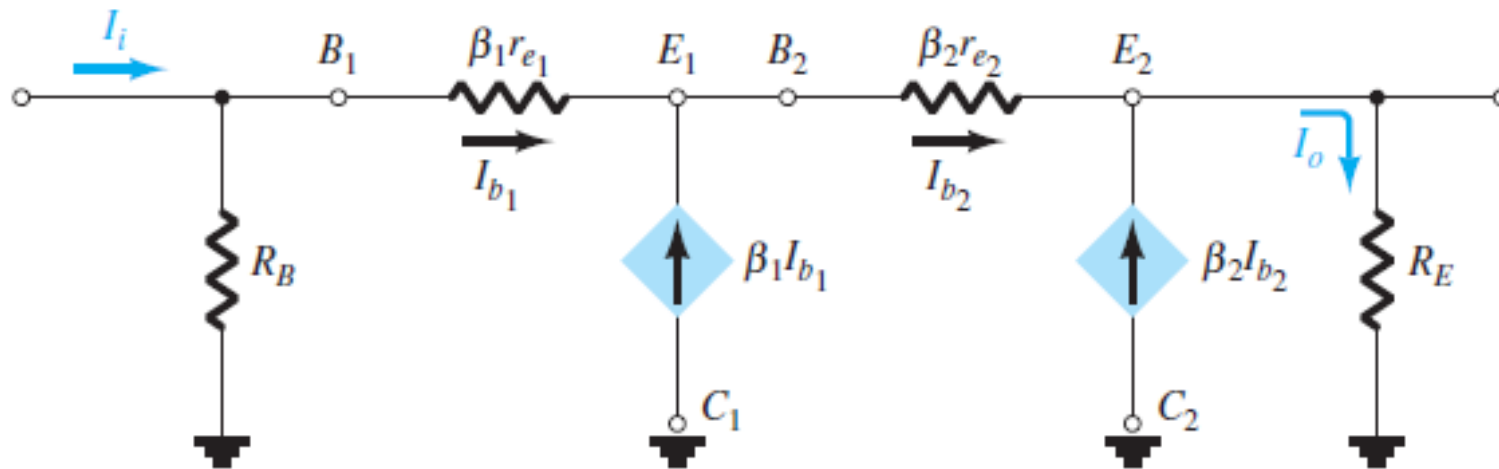
$$(13) Z_{i_1} = \beta_1 \beta_2 R_E = \beta_D R_E$$

Konačno, ulazna impedancija emitorskog slijedila sa tranzistorima u Darlingtonovom spoju jest jednaka paralelnoj kombinaciji otpora R_B i impedancije Z_{i_1} :

$$(14) Z_i = R_B \parallel Z_{i_1} = R_B \parallel \beta_D R_E$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Strujno pojačanje A_i se može naći korištenjem r_e modela para tranzistora Q_1 i Q_2 :



u ekvivalentnoj shemi smo zanemarili otpor zbog Earlyevog efekta r_o .

Elektronički Elementi i Sklopovi

Po definiciji, strujno pojačanje A_i je omjer izlazne struje I_o i ulazne struje I_i :

$$(15) A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

Izlazna struja I_o može se naći iz Kirchhoffovog zakona za struje u čvoru E_2 :

$$(16) I_o = I_{b_2} + \beta_2 I_{b_2} = (\beta_2 + 1)I_{b_2}$$

Za čvor E_1 možemo opet koristiti Kirchhoffov zakon za struje:

$$(17) I_{b_2} = I_{b_1} + \beta_1 I_{b_1} = (\beta_1 + 1)I_{b_1}$$

Uvrštavanjem (17) u (16) dobije se:

$$(18) I_o = (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)I_{b_1}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Za ulazni krug možemo primjeniti Kirchhoffov zakon za napone:

$$(19) (I_i - I_{b_1})R_B = I_{b_1}Z_{i_1}$$

Iz jednadžbe (19) slijedi:

$$(20) I_{b_1} = \frac{R_B}{R_B + Z_{i_1}} I_i$$

Jednadžba (20) predstavlja strujno djelilo u ulaznom krugu. Uvrštavanjem izraza (13) ($Z_{i_1} = \beta_D R_E$) u (20) dobije se:

$$(21) I_{b_1} = \frac{R_B}{R_B + \beta_D R_E} I_i$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Izraz (21) sada možemo uvrstiti u izraz (18):

$$(22) I_o = (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)I_{b_1} = (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1) \frac{R_B}{R_B + \beta_D R_E} I_i$$

Budući da je $\beta_1, \beta_2 \gg 1$ te da imamo $\beta_D = \beta_1 \beta_2$ jednačba (22) postaje:

$$(23) I_o = \frac{\beta_D R_B}{R_B + \beta_D R_E} I_i$$

Da bi dobili strujno pojačanje A_i jednačbu (23) treba uvrstiti u (15):

$$(24) A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta_D R_B}{R_B + \beta_D R_E}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

U stvarnosti strujno pojačanje Darlingtonovog spoja je dosta veliko. Dijeleći brojnik i nazivnik izraza (24) sa $\beta_D R_B$ dobije se:

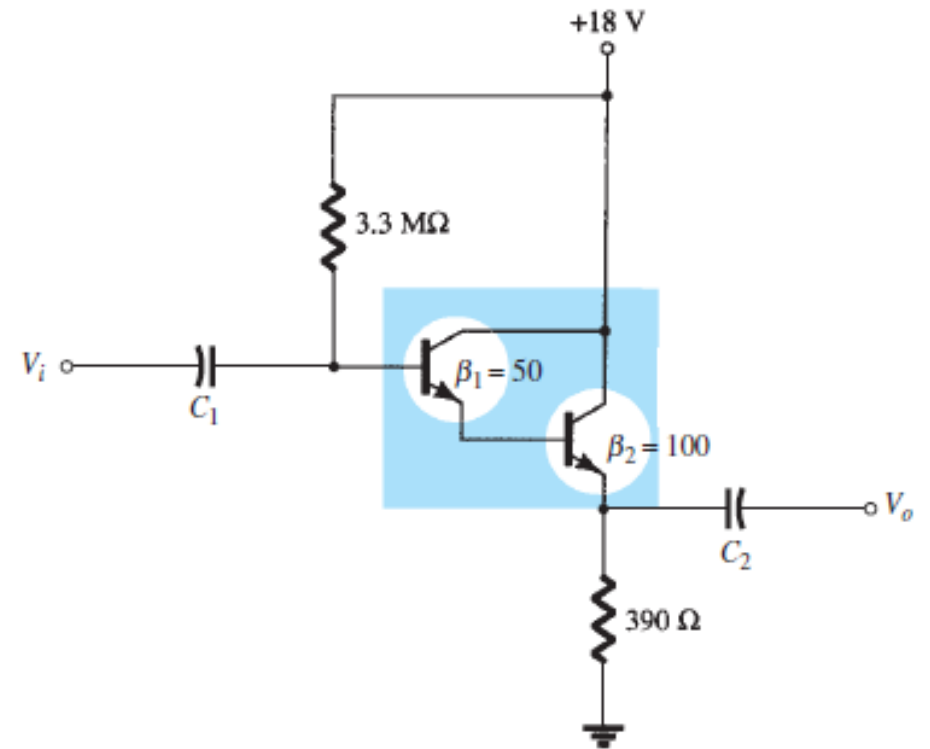
$$(25) A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta_D R_B}{R_B + \beta_D R_E} \cdot \frac{\frac{1}{\beta_D R_B}}{\frac{1}{\beta_D R_B}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_D} + \frac{R_E}{R_B}}$$

Budući da je $\beta_D = \beta_1 \beta_2$ te da je $\beta_1, \beta_2 \approx 100$ možemo

zanemariti član $\frac{1}{\beta_D}$:

$$(26) A_i = \frac{1}{\frac{1}{\beta_D} + \frac{R_E}{R_B}} \cong \frac{1}{\frac{R_E}{R_B}} = \frac{R_B}{R_E}$$

Ako su otpori R_B i R_E odabrani kao na slici strujno pojačanje iznosi $A_i \approx 8500$!



Elektronički Elementi i Sklopovi

Naponsko pojačanje A_v možemo odrediti koristeći nadomjesnu shemu gdje su tranzistori Q_1 i Q_2 zamijenjeni r_e modelom. Za izlazni napon V_o i ulazni napon V_i može se pisati:

$$(27) V_o = I_o R_E$$

$$(28) V_i = I_i Z_i$$

Ulazna impedancija Z_i jest:

$$(29) Z_i = R_B \parallel Z_{i_1} = R_B \parallel \beta_D R_E = \frac{\beta_D R_B R_E}{R_B + \beta_D R_E}$$

Naponsko pojačanje se može naći kao:

$$(30) A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o R_E}{I_i Z_i} = A_i \frac{R_E}{Z_i} = A_i \frac{R_E (R_B + \beta_D R_E)}{\beta_D R_B R_E}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

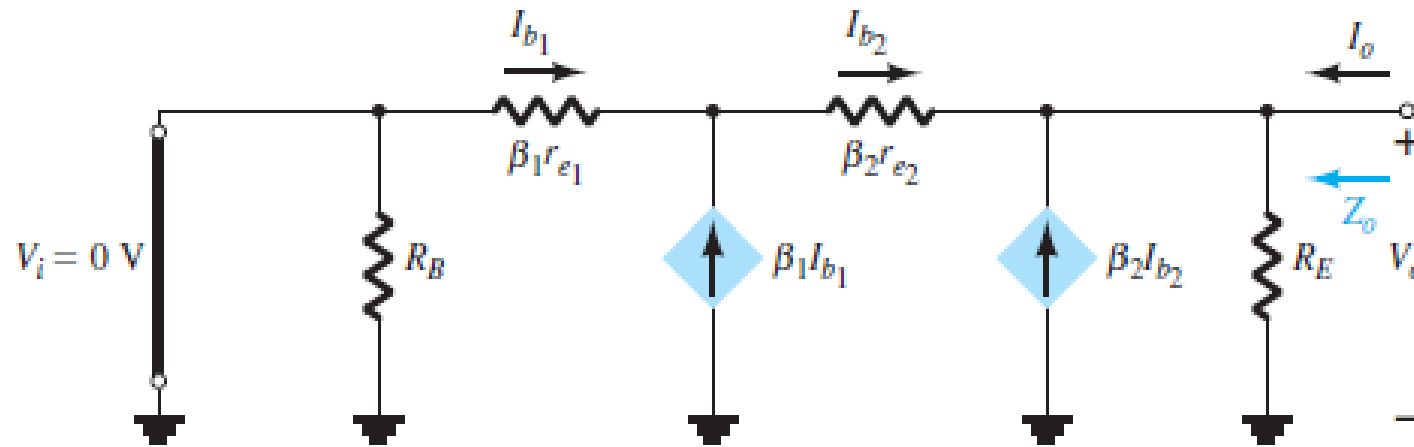
Uvrštavajući izraz za strujno pojačanje A_i (jed. 24) u izraz (30) dobije se:

$$(31) A_v = A_i \frac{R_E(R_B + \beta_D R_E)}{\beta_D R_B R_E} = \frac{\beta_D R_B}{R_B + \beta_D R_E} \frac{R_E(R_B + \beta_D R_E)}{\beta_D R_B R_E} = 1$$

U stvarnosti je strujno pojačanje emitorskog slijedila nešto manje od 1.

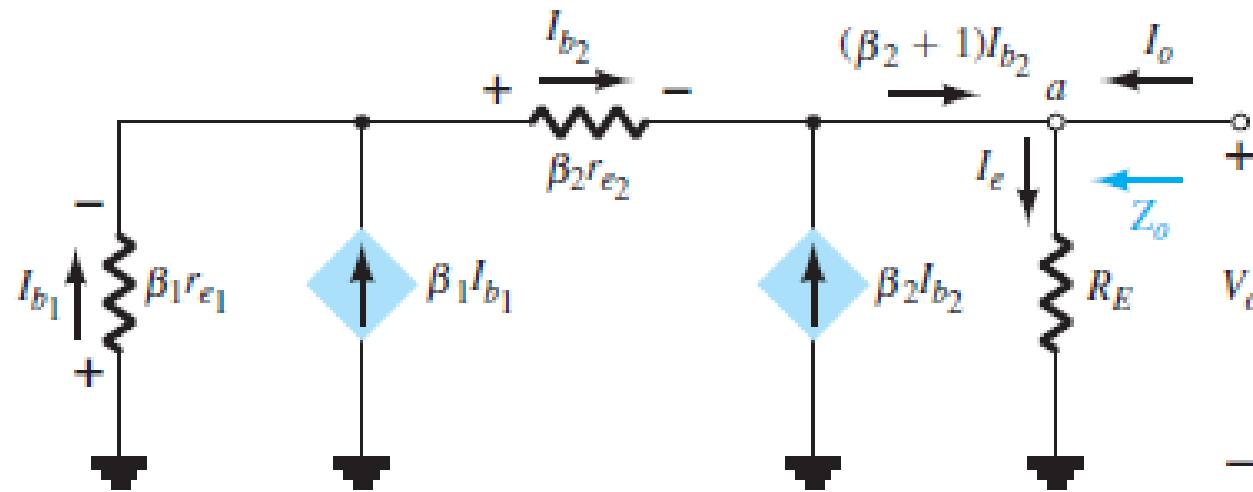
Elektronički Elementi i Sklopovi

Izlazno pojačanje se može dobiti iz nadomjesne sheme kada postavimo da je ulazni napon $V_i = 0$.



Elektronički Elementi i Sklopovi

Budući da je otpor baze R_B sada premošćen, shema na prethodnoj slici se može nacrtati kao:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Korištenjem Kirchhoffovog zakona za struje, za točku (a) možemo pisati:

$$(32) I_o = I_e - (\beta_2 + 1)I_{b_2}$$

Kirchhoffovog zakona za napone možemo primjeniti za cjelokupnu vanjsku petlju sa prethodne slike:

$$(33) V_o = -I_{b_1}\beta_1 r_{e_1} - I_{b_2}\beta_2 r_{e_2}$$

Koristeći izraz $I_{b_2} = (\beta_1 + 1)I_{b_1}$ jednačba (33) postaje:

$$(34) V_o = -I_{b_1}\beta_1 r_{e_1} - I_{b_1}(\beta_1 + 1)\beta_2 r_{e_2}$$

Iz izraza (34) može se naći struja I_{b_1} :

$$(35) I_{b_1} = -\frac{V_o}{\beta_1 r_{e_1} + (\beta_1 + 1)\beta_2 r_{e_2}}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

S druge strane, sa slike je vidljivo da je struja I_o :

$$(36) I_o = I_e - (\beta_2 + 1)I_{b_2}$$

Budući da je struja $I_{b_2} = (\beta_1 + 1)I_{b_1}$ izraz (36) postaje:

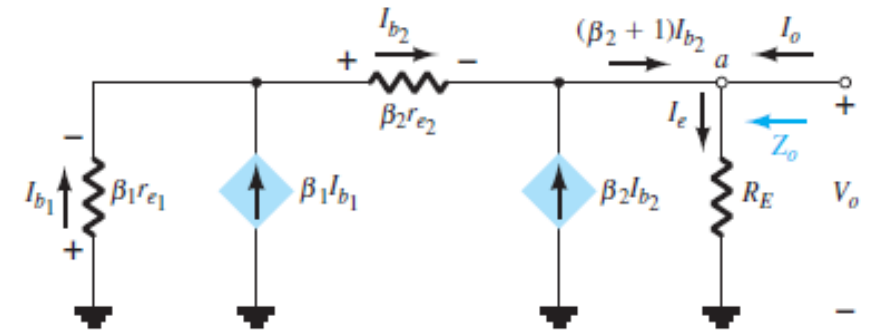
$$(37) I_o = I_e - (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)I_{b_1}$$

Uvrštavanjem (35) u (37) dobije se:

$$(37) I_o = I_e + \frac{(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)V_o}{\beta_1 r_{e_1} + (\beta_1 + 1)\beta_2 r_{e_2}}$$

Pošto je struja emitera $I_e = V_o / R_E$ jednačba (37) se može pisati kao:

$$(38) I_o = \frac{V_o}{R_E} + \frac{(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1)V_o}{\beta_1 r_{e_1} + (\beta_1 + 1)\beta_2 r_{e_2}}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Budući da $\beta_1, \beta_2 \gg 1$ te da $\beta_1\beta_2 = \beta_D$ izraz (38) postaje:

$$(38) I_o = \frac{V_o}{R_E} + \frac{(\beta_1+1)(\beta_2+1)V_o}{\beta_1 r_{e1} + (\beta_1+1)\beta_2 r_{e2}} \approx \frac{V_o}{R_E} + \frac{\beta_1\beta_2 V_o}{\beta_1 r_{e1} + \beta_1\beta_2 r_{e2}}$$

Dijeleći brojnik i nazivnik drugog člana sa desne strane u izrazu (38) sa $\beta_1\beta_2$ dobijemo:

$$(39) I_o \approx \frac{V_o}{R_E} + \frac{\beta_1\beta_2 V_o}{\beta_1 r_{e1} + \beta_1\beta_2 r_{e2}} = \frac{V_o}{R_E} + \frac{V_o}{\frac{r_{e1}}{\beta_2} + r_{e2}} = V_o \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{\frac{r_{e1}}{\beta_2} + r_{e2}} \right)$$

Nadalje kako je obično $R_E \gg \frac{r_{e1}}{\beta_2} + r_{e2}$ onda se (39) pojednostavni:

$$(40) I_o \approx V_o \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{\frac{r_{e1}}{\beta_2} + r_{e2}} \right) \approx V_o \frac{1}{\frac{r_{e1}}{\beta_2} + r_{e2}}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz izraza (40) slijedi da je izlazna impedancija Z_o jednaka:

$$(41) Z_o = \frac{V_o}{I_o} \approx \frac{r_{e1}}{\beta_2} + r_{e2} \approx r_{e2}$$

Budući da u Darlingtonovom spoju teče veća struja emitera I_E nego što je to slučaj za samo jedan tranzistor, otpor r_{e2} je mali, reda veličine nekoliko Ω . Dakle, izlazna impedancija Darlingtonovog spoja je vrlo mala!

Elektronički Elementi i Sklopovi

Hibridni model je tranzistora je bio popularan prije razvoja r_e modela. Prednost r_e modela je u tome što parametri r_e modela ovise o radnim uvjetima, tj. ovise o DC statičkoj radnoj točki tranzistora.

Za razliku od r_e modela, parametri hibridnog modela su dani za bilo koje radne uvjete, što možda nije najbolje rješenje.

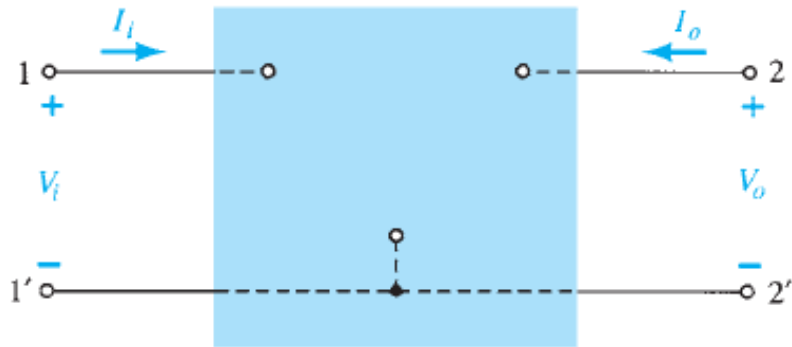
Manjkavost r_e modela je u tome što nema povratne veze između ulaznog i izlaznog kruga.

		Min.	Max.	
Input impedance ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{ie}	0.5	7.5	$\text{k}\Omega$
Voltage feedback ratio ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{re}	0.1	8.0	$\times 10^{-4}$
Small-signal current gain ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{fe}	20	250	—
Output admittance ($I_C = 1 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1 \text{ kHz}$)	h_{oe}	1.0	30	$1 \mu\text{S}$

Parametri h modela iz specifikacije proizvođača za tranzistor 2N4400

Elektronički Elementi i Sklopovi

Opis hibridnog modela možemo započeti definiranjem četveropola:



Izlazni napon V_o i izlazna struja I_o je u vezi sa ulaznom strujom I_i i ulaznim naponom V_i putem relacija:

$$(41) V_i = h_{11}I_i + h_{12}V_o$$

$$(42) I_o = h_{21}I_i + h_{22}V_o$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Hibridni parametri se označavaju još kao i hibridni h –parametri. Parametar h_{11} se dobije ako se izlaz četvoropola kratko spoji ($V_o = 0$). U tom slučaju iz jednadžbe (41) slijedi:

$$(43) h_{11} = \left. \frac{V_i}{I_i} \right|_{V_o=0}$$

Ovaj parameter se naziv još *short-circuit input-impedance parameter* ili h_i . Ako je ulazna struja $I_i = 0$ onda možemo naći parameter h_{12} :

$$(44) h_{12} = \left. \frac{V_o}{V_i} \right|_{I_i=0}$$

Parametar h_{21} možemo također naći ako se izlaz četvoropola kratko spoji ($V_o = 0$):

$$(45) h_{21} = \left. \frac{I_o}{I_i} \right|_{V_o=0}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Parametar h_{22} se opet nađe ako je ulazna struja $I_i = 0$:

$$(44) h_{22} = \left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{I_i=0}$$

Parametri h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} se često označavaju oznakama h_i , h_r , h_f , h_o :

$h_i = h_{11}$ - ulazna impedancija

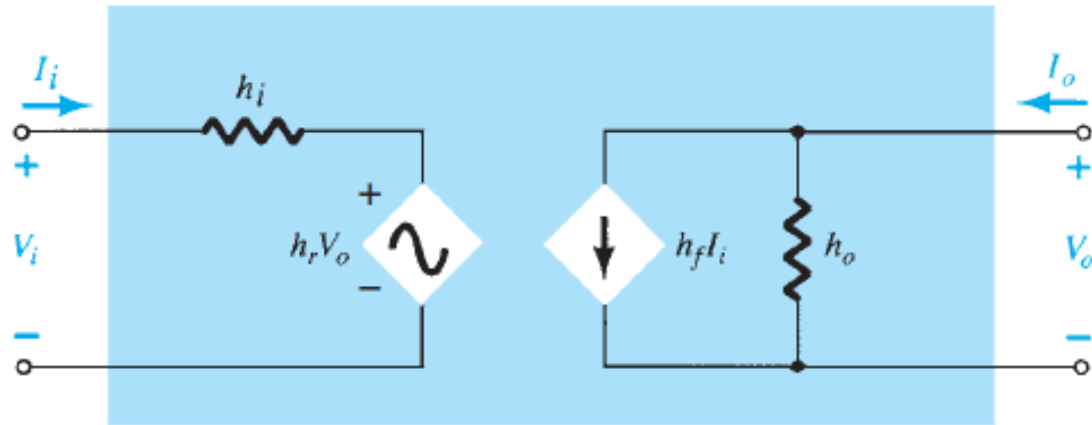
$h_r = h_{12}$ - omjer izlaznog i ulaznog napona

$h_f = h_{21}$ - omjer izlazne i ulazne struje

$h_o = h_{22}$ - izlazna vodljivost

Elektronički Elementi i Sklopovi

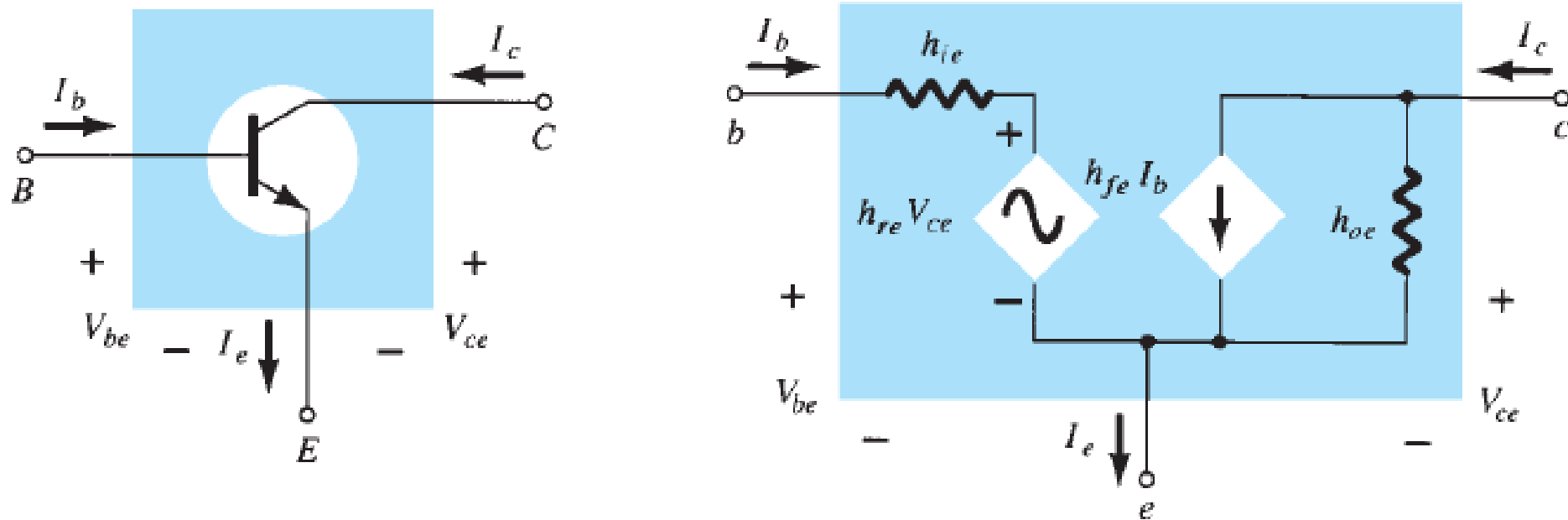
Hibridni h -model se može predstaviti i nadomjesnom shemom:



Ako se nadomjesni sklop h -model koristi za spoj zajedničkog emitera onda hibridni h -parameteri h_i, h_r, h_f, h_o imaju pridodan subskript e , tj. označavaju se kao $h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$.

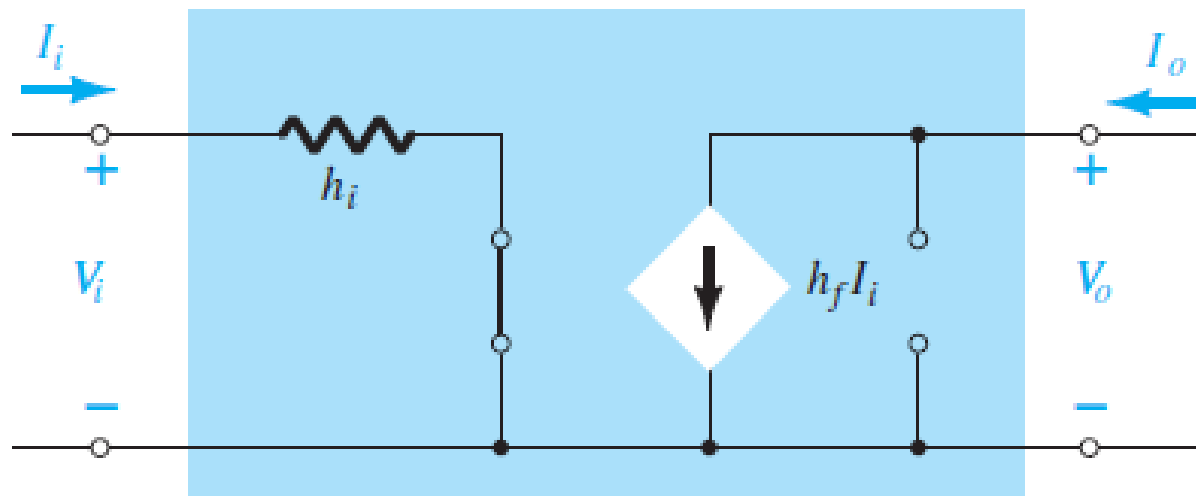
Elektronički Elementi i Sklopovi

Za svaku konfiguraciju (zajednička baza, zajednički emiter, zajednički kolektor) imamo različite h -parametre h_i, h_r, h_f, h_o .



Elektronički Elementi i Sklopovi

Parametar h_r je obično vrlo malen te je vodljivost h_o također vrlo malena tako da možemo koristiti slijedeću nadomjesnu shemu:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz nadomjesne sheme sa prethodne slike mogu se povezati parametri r_e modela i hibridnog h -modela:

$$(45) \beta r_e = h_{ie}$$

$$(46) \beta_{ac} = h_{fe}$$