

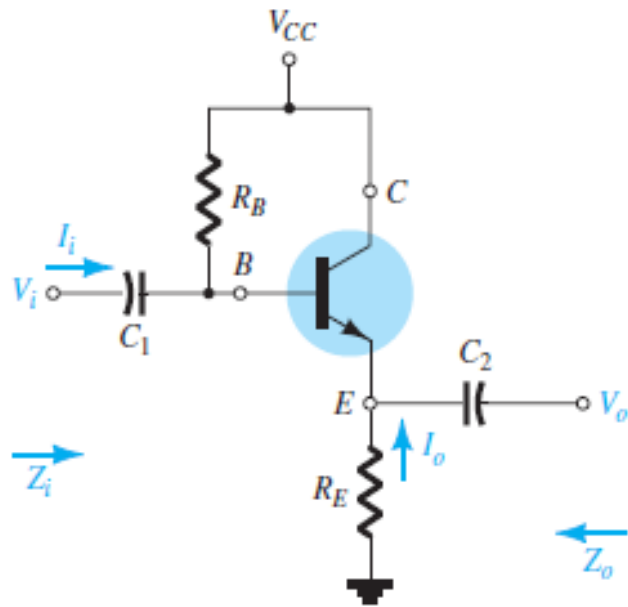
Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj predavanja:

1. Emitersko slijedilo
2. Utjecaj tereta i utjecaj otpora generatora na tranzistorsko pojačalo
3. Strujno pojačanje pojačala
4. Kaskade pojačala

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kada u spoju zajedničkog emitera izlaz uzimamo sa emitorskog terminala tada imamo emitorsko slijedilo. Izlazni napon je uvijek nešto manji nego ulazni napon zbog napona na PN spoju baza emiter (0.7V za Si tranzistor). Za razliku od invertirajućeg pojačala, izlazni signal je u fazi sa ulaznim signalom.

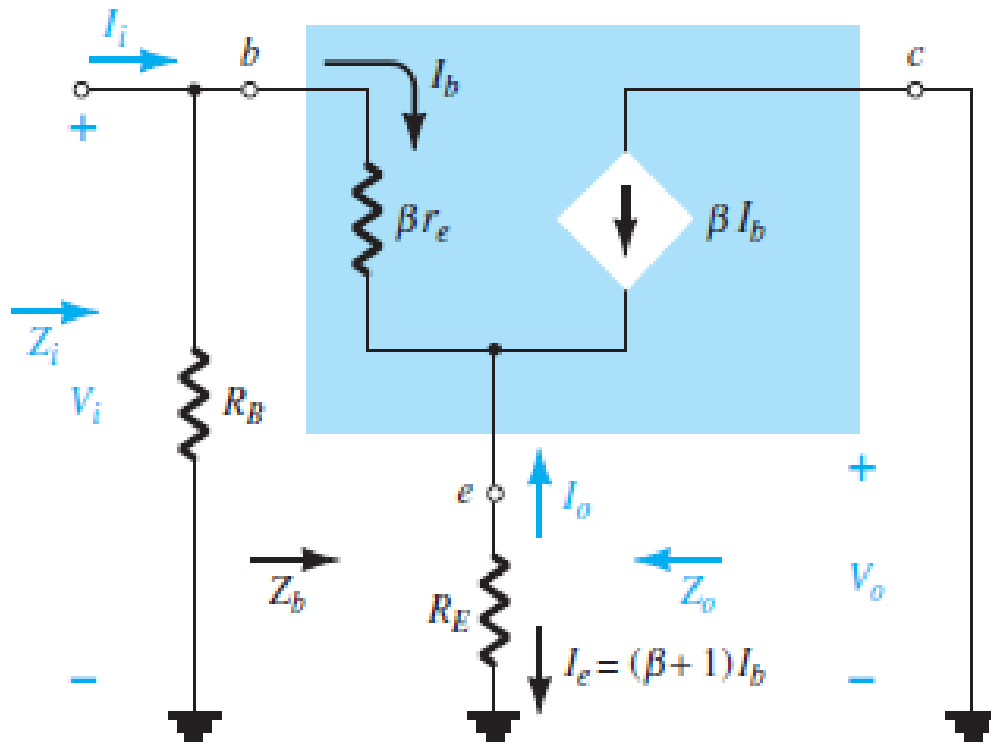


Najčešća konfiguracija emitorskog slijedila je na slici lijevo. Treba primjetiti da je kolektorski otpor uklonjen.

Najčešća uporaba emitorskog slijedila je u svrhu ugođavanja impedancije. Ovakav sklop i visoku impedanciju na ulazu te nisku impedanciju na izlazu.

Elektronički Elementi i Sklopovi

Nadomjesni r_e model emitterskog slijedila jest na slici. Radi jednostavnije analize uklonjen je otpor zbog Earlyjevog efekta r_o .

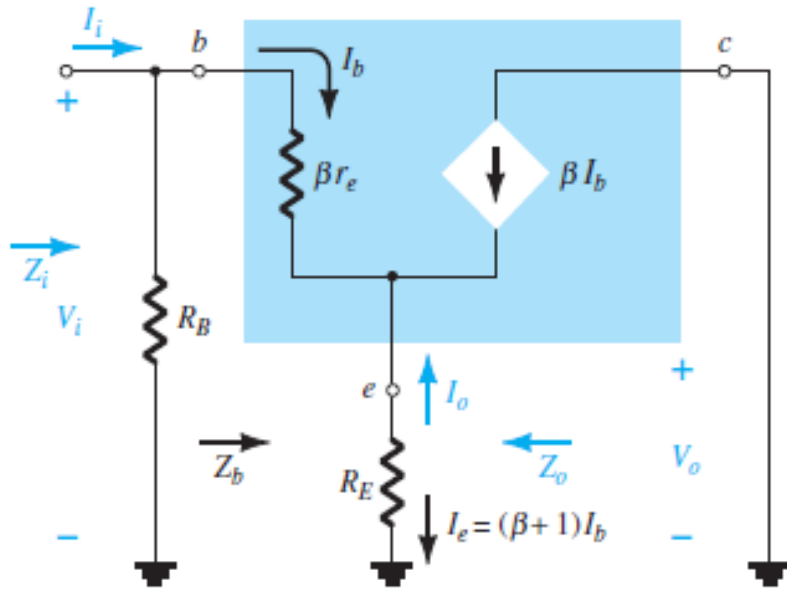


Ulazna impedancija se može odrediti slično kao i kod dosadašnjih sklopova. Radi olakšane analize prvo ćemo odrediti impedanciju Z_b .

Ulazna impedancija Z_i ovisi o impedanciji Z_b :

$$(1) Z_i = R_B \parallel Z_b$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Impedanciju Z_b možemo naći iz Kirchhoffovog zakona za napone:

$$(2) V_i = I_b \beta r_e + I_e R_E$$

Korištenjem izraza $I_e = (\beta + 1)I_b$ jednadžba (2) postaje:

$$(3) V_i = I_b \beta r_e + (\beta + 1)I_b R_E$$

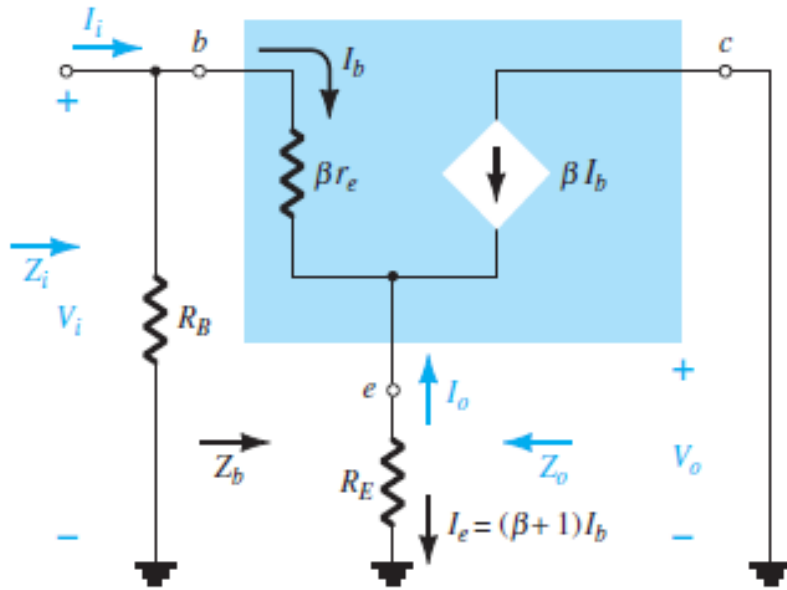
Impedancija Z_b je omjer napona V_i i struje I_b

$$(4) Z_b = \frac{V_i}{I_b}$$

Uvrštavanjem izraza (3) u (4) dobije se impedancija Z_b :

$$(5) Z_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Ako je β dovoljno velik vrijedi da $\beta + 1 \cong \beta$. Zbog toga izraz (5) postaje:

$$(6) Z_b = \beta(r_e + R_E)$$

U dosadašnjim izlaganjima vidjeli samo da je otpor r_e reda veličine $r_e \approx 20 \Omega$. Ako je zadovoljeno da je $R_E \gg r_e$ onda možemo zaključiti:

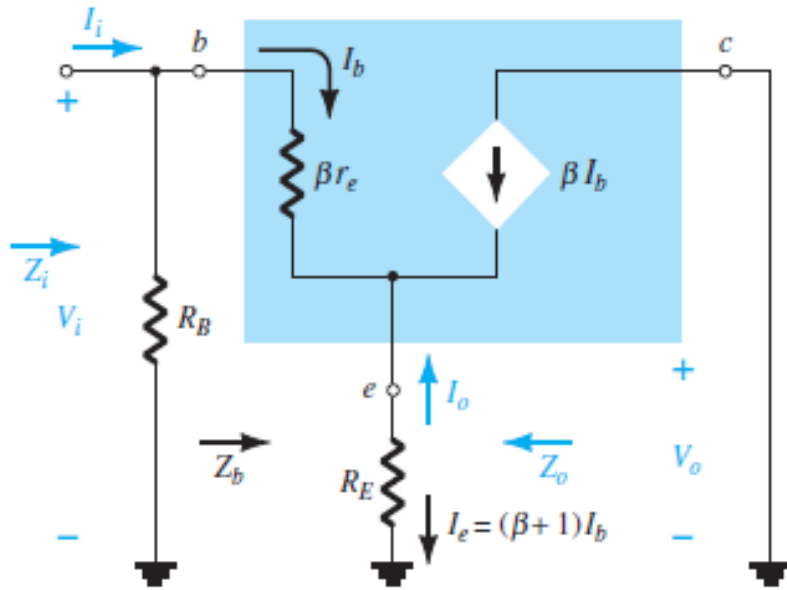
$$(7) Z_b \cong \beta R_E \text{ uz uvjet } R_E \gg r_e$$

Izlaznu impedanciju možemo računati iz izraza:

$$(8) Z_o = \frac{V_o}{I_e}$$

gdje je V_o izlazni napon a I_e jest struja emitera.

Elektronički Elementi i Sklopovi



Struju emitera I_e možemo naći iz izraza:

$$(9) I_e = (\beta + 1)I_b$$

Struja baze I_b se može izraziti pomoću relacije:

$$(10) I_b = \frac{V_i}{Z_b}$$

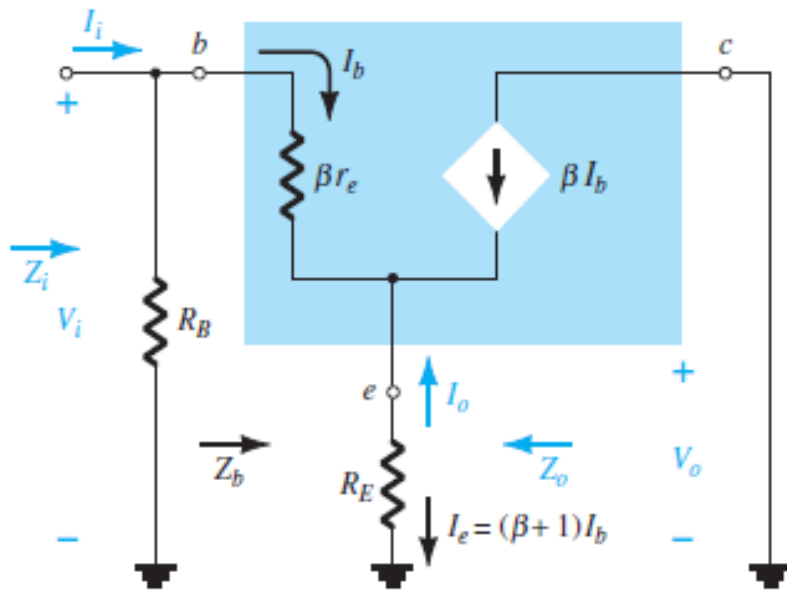
Uvrštavanjem izraza (5) ($\beta r_e + (\beta + 1)R_E$) u (10) dobije se:

$$(11) I_b = \frac{V_i}{\beta r_e + (\beta + 1)R_E}$$

Uvrštavanjem (11) u (9) dobije se struja emitera I_e :

$$(12) I_e = \frac{(\beta + 1)V_i}{\beta r_e + (\beta + 1)R_E}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Brojnik i nazivnik u izrazu (12) možemo podijeliti sa $\beta + 1$:

$$(13) I_e = \frac{V_i}{\frac{\beta}{\beta+1}r_e + R_E}$$

Ako je $\beta \gg 1$ tada vrijedi:

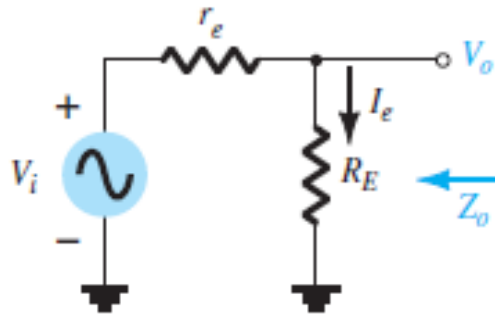
$$(14) \frac{\beta}{\beta+1}r_e \approx r_e$$

Uvrštavanjem (14) u (13) struja emitera I_e se izrazi kao:

$$(15) I_e \cong \frac{V_i}{r_e + R_E}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz jednadžbe (15) može se konstruirati mreža na slici:



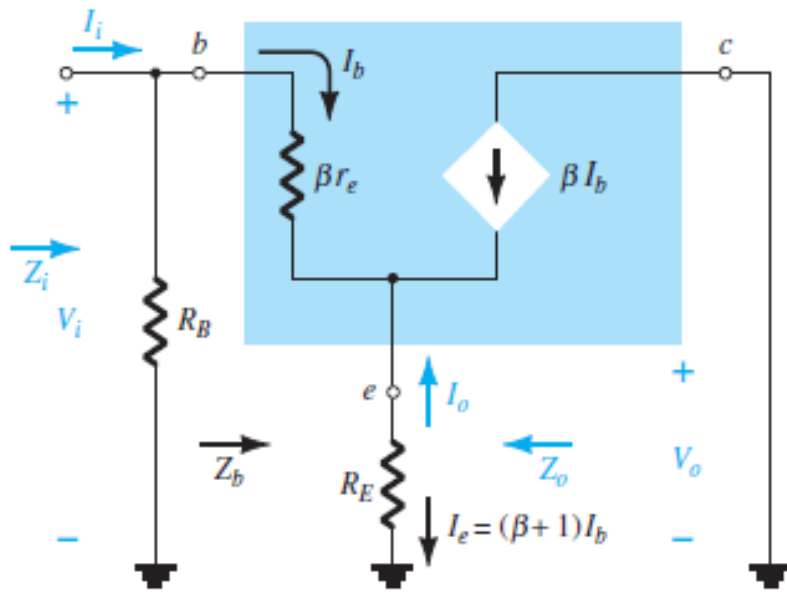
Da bi se odredila izlazna impedancija Z_o treba postaviti da je $V_i = 0$. Tada je izlazna impedancija jednaka paralelnom spoju otpora r_e i R_E :

$$(16) Z_o = r_e \parallel R_E$$

Otpor R_E je tipično bitno veći od otpora r_e . Zbog toga se može pisati:

$$(17) Z_o = r_e \quad \text{uz uvjet } R_E \gg r_e$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Naponsko pojačanje je omjer izlaznog napona V_o i ulaznog napona V_i :

$$(18) A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

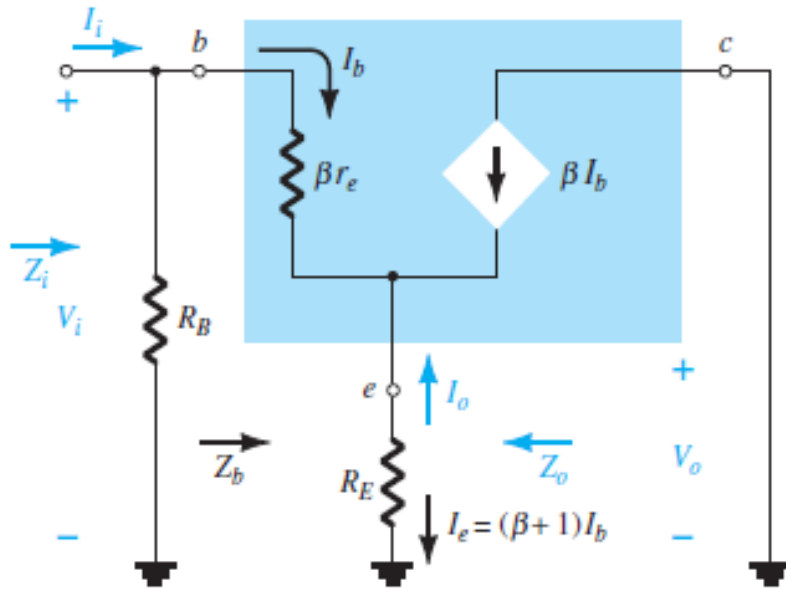
Iz nadomjesne sheme na slici je vidljivo da je $V_o = I_e R_E$. Stoga izraz (18) se može napisati kao:

$$(19) A_v = \frac{I_e R_E}{V_i}$$

Nadalje pošto je $I_e = (\beta + 1)I_b$ imamo da vrijedi:

$$(20) A_v = \frac{I_b}{V_i} (\beta + 1) R_E$$

Elektronički Elementi i Sklopovi



Omjer $V_i/I_b = Z_b$. Stoga uvrštavanjem izraza (5) u izraz (20) imamo:

$$(20) A_v = \frac{I_b}{V_i} (\beta + 1) R_E = \frac{1}{Z_b} (\beta + 1) R_E = \frac{(\beta + 1) R_E}{\beta r_e + (\beta + 1) R_E}$$

Dijeljenjem brojnika i nazivnika sa $(\beta + 1)$ dobijemo:

$$(21) A_v = \frac{R_E}{\frac{\beta}{\beta + 1} r_e + R_E}$$

Budući da je zadovoljeno da $\beta \gg 1$ tada $\beta + 1 \cong \beta$ te (21) postaje:

$$(21) A_v = \frac{R_E}{r_e + R_E}$$

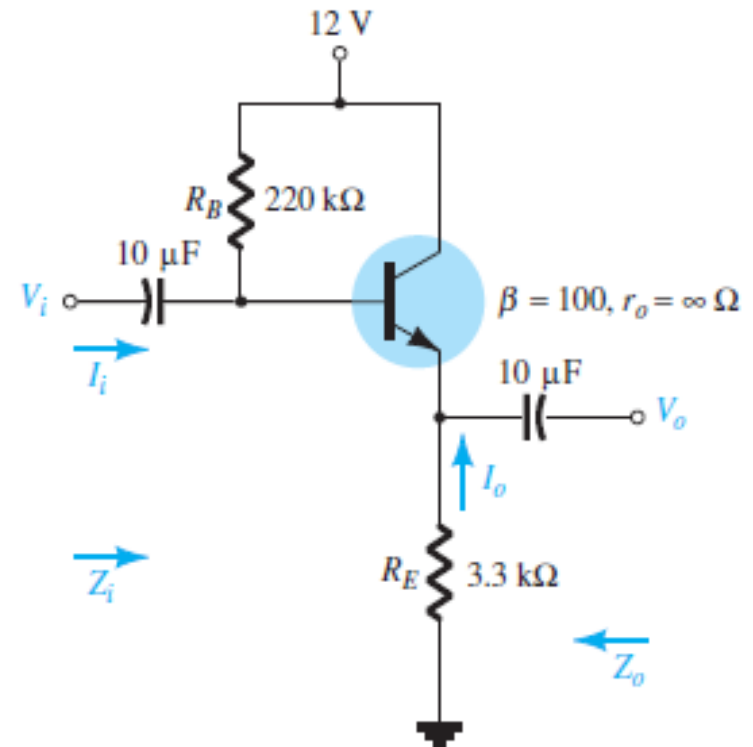
Ako je ispunjeno da je $R_E \gg r_e$ tada imamo:

$$(22) A_v = \frac{R_E}{r_e + R_E} \cong \frac{R_E}{R_E} = 1$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

PRIMJER 1. Za emitorsko slijedilo na slici treba naći:

- a) dinamički otpor PN spoja emiter-baza r_e
- b) ulaznu impedanciju Z_i
- c) izlaznu impedanciju Z_o
- d) naponsko pojačanje A_v



Elektronički Elementi i Sklopovi

Rješenje:

a) otpor r_e je jednak dinamičkom otporu:

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

struja emitera I_E jest:

$$a.2) I_E = (\beta + 1)I_B$$

struju baze I_B možemo naći iz Kirchhoffovog zakona za napone:

$$a.3) V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

Uvrštavanjem (a.2) u (a.3) dobijemo:

Elektronički Elementi i Sklopovi

$$\text{a.4) } I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{12V - 0.7V}{220 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 3.3 \text{ k}\Omega} = 20.42 \mu A$$

Struja emitera I_E dobije se iz (a.2):

$$\text{a.5) } I_E = (\beta + 1)I_B = 101 \cdot 20.42 \mu A = 2.062 \text{ mA}$$

Uvrštavanjem struje emitera I_E u (a.1) dobije se otpor r_e :

$$\text{a.6) } r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = 12.61 \Omega$$

b) Ulaznu impedanciju Z_i možemo naći iz izraza:

$$\text{b.1) } Z_i = R_B \parallel Z_b$$

Impedanciju Z_b nađemo korištenjem jednadžbe (5):

Elektronički Elementi i Sklopovi

$$\text{b.2) } Z_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E = 100 \cdot 12.61\Omega + 101 \cdot 3.3\text{k}\Omega = 334.56 \text{ k}\Omega$$

Ako koristimo izraz $Z_b = \beta R_E$ onda dobijemo:

$$\text{b.3) } Z_b = 100 \cdot 3.3\text{k}\Omega = 330 \text{ k}\Omega$$

Uvrštavanjem (b.3) u (b.1) dobije se ulazna impedancija Z_i :

$$\text{b.4) } Z_i = R_B \parallel Z_b = \frac{R_B \cdot Z_b}{R_B + Z_b} = \frac{220 \text{ k}\Omega \cdot 334.56 \text{ k}\Omega}{220 \text{ k}\Omega + 334.56 \text{ k}\Omega} = 132.72 \text{ k}\Omega$$

c) Izlazna impedancija Z_o može se naći korištenjem izraza (16):

$$\text{(c.1) } Z_o = r_e \parallel R_E = \frac{r_e \cdot R_E}{r_e + R_E} = \frac{12.61\Omega \cdot 3.3\text{k}\Omega}{12.61\Omega + 3.3\text{k}\Omega} = 12.56 \Omega$$

vidimo da je impedancija $Z_o \approx r_e$

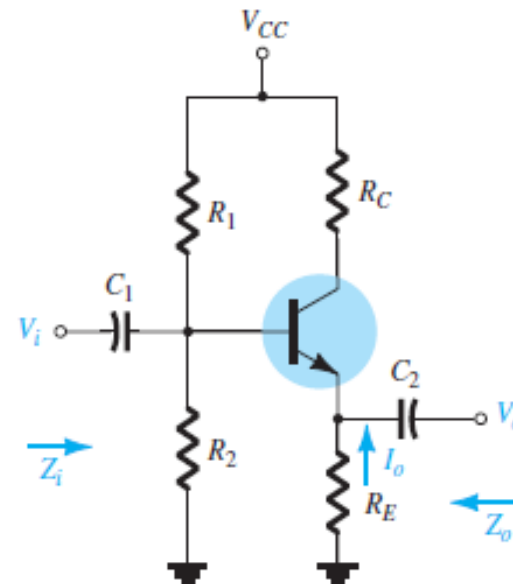
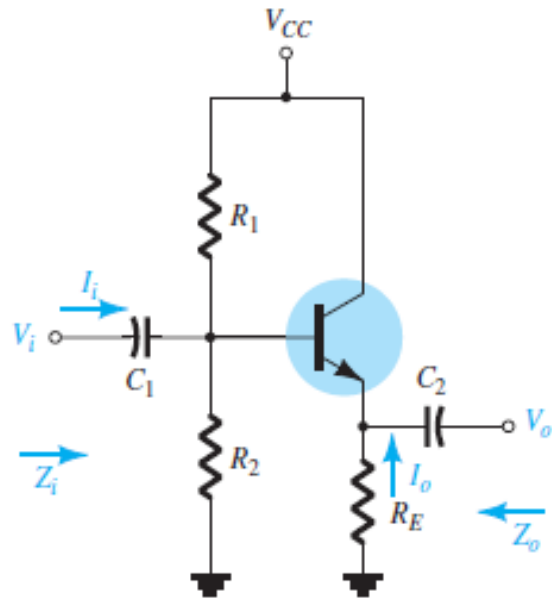
Elektronički Elementi i Sklopovi

d) Pojačanje A_v može se dobiti korištenjem izraza (22)

$$d.1) A_v = \frac{R_E}{r_e + R_E} = \frac{3.3k\Omega}{12.56\Omega + 3.3k\Omega} = 0.996 \cong 1$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Još neke konfiguracije emitterskog sljedila:



Elektronički Elementi i Sklopovi

Do sada su se pojačanja pojačala računala bez uzimanja u obzir impedancije tereta i generatora. Uvodimo sljedeće simbole za pojačanje neopterećenog pojačala, pojačala opterećenog teretom R_L i pojačala sa realnim naponskim generatorom koji ima konačni izlazni otpor R_S :

$A_{v_{NL}}$ - pojačanje neopterećenog pojačala sa idealnim naponskim generatorom na ulazu

A_{v_L} - pojačanje pojačala opterećenog teretom R_L sa idealnim naponskim generatorom na ulazu

A_{v_S} - pojačanje pojačala opterećenog teretom R_L sa realnim naponskim generatorom izlaznog otpora R_S

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sklopovska analiza će pokazati slijedeće:

(i) Pojačanje pojačala opterećenog teretom R_L je uvijek manje nego ono od neopterećenog pojačala

(ii) Pojačanje pojačala spojenog na realni naponski izvor unutarnjeg otpora R_S je uvijek manje nego pojačanje neopterećenog pojačala i uvijek je manje od pojačanja pojačala opterećenog teretom R_L

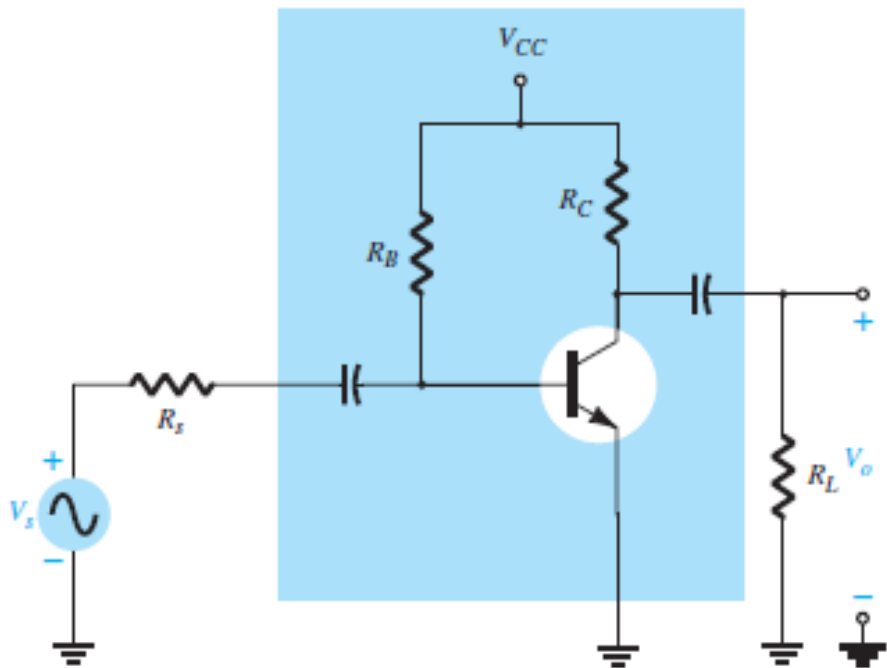
(iii) Za istu konfiguraciju uvijek vrijedi $A_{v_{NL}} > A_{v_L} > A_{v_S}$

(iv) Što je veći teret R_L to je pojačanje pojačala veće

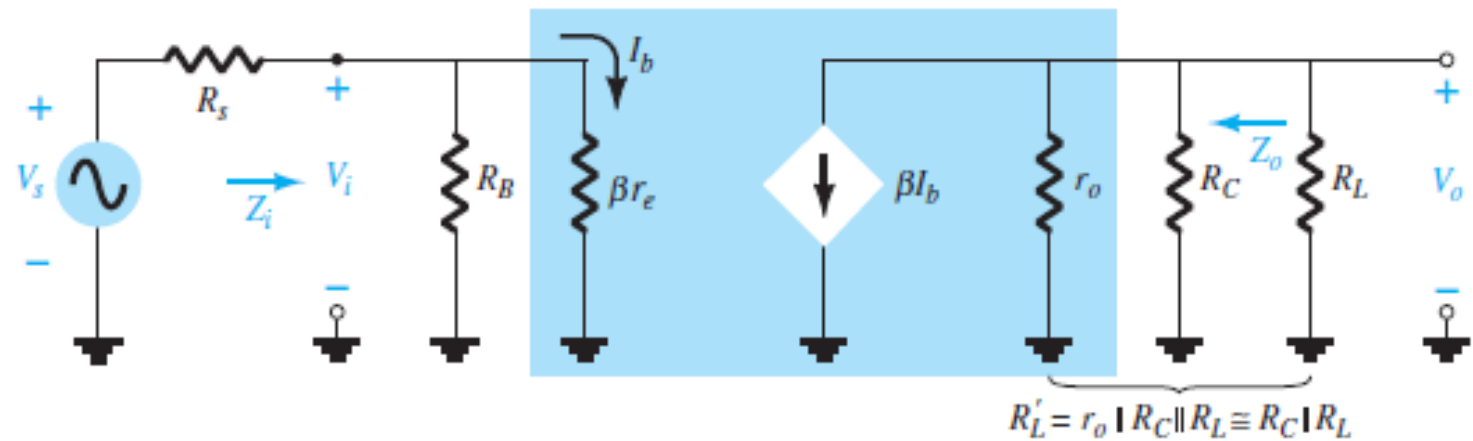
(v) Što je manji unutarnji otpor naponskog generatora R_S to je pojačanje veće

(vi) za bilo koje pojačalo koja ima kondenzatore na ulazu i izlazu unutarnji otpor naponskog generatora R_S i teret R_L ne utiču na statičku radnu točku pojačala

Elektronički Elementi i Sklopovi



Opterećeno pojačalo



Nadomjesna shema za AC analizu sa r_e modelom tranzistora

Elektronički Elementi i Sklopovi

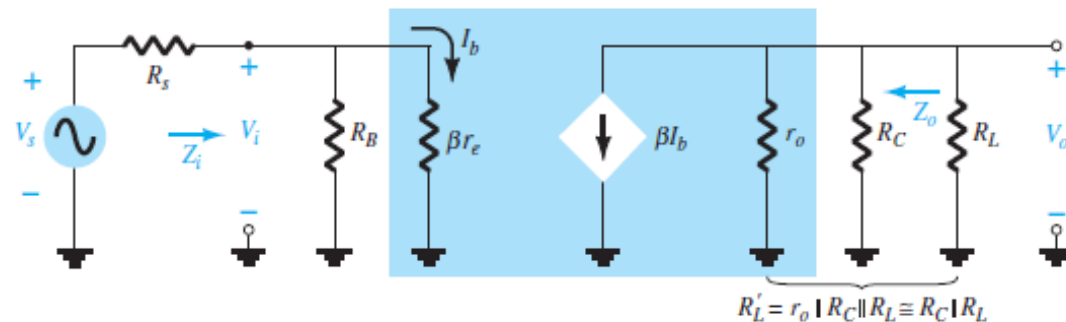
Za izlazni krug možemo pisati:

$$(23) R'_L = r_o \parallel R_C \parallel R_L \cong R_C \parallel R_L \text{ uz uvjet } r_o \gg R_C, R_L$$

$$(24) V_o = -\beta I_b R'_L$$

$$(25) I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

$$(26) A_{vL} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e}$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

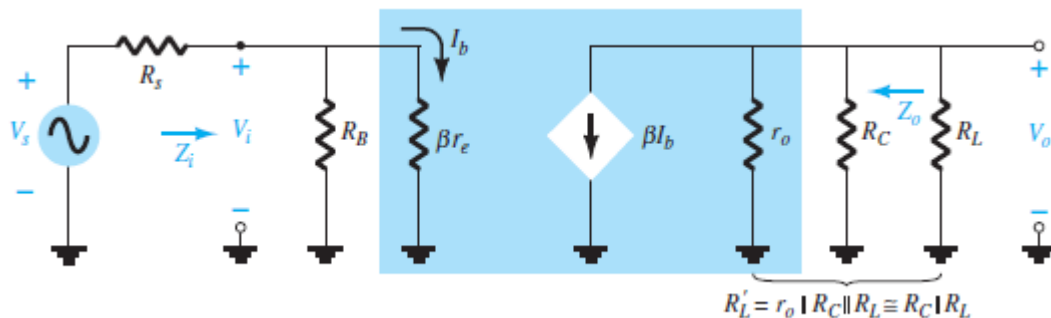
Iz (26) slijedi da je otpor $R_L \gg R_C$ onda imamo

$$(27) A_{v_L} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C}{r_e} \quad \text{uz uvjet } R_L \gg R_C$$

Dakle, što je otpor tereta veći to otpor tereta R_L manje utječe na pojačanje!

Ako primjetimo naponsko djelilo u ulaznom krugu ulazni napon V_i se može izraziti kao:

$$(28) V_i = \frac{Z_i}{Z_i + R_S} V_S$$



Elektronički Elementi i Sklopovi

Iz jednadžbe (28) može se naći omjer:

$$(29) \frac{V_i}{V_s} = \frac{Z_i}{Z_i + R_S}$$

Pojačanje pojačala sa neidealnim generatorom na ulazu unutarnjeg otpora R_S i opterećenog teretom R_L jest omjer izlaznog i ulaznog napona:

$$(30) A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s}$$

Množenjem brojnika i nazivnika u izrazu (30) sa naponom V_i dobije se:

$$(31) A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_s} \cdot \frac{V_i}{V_i} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_s} = A_{v_L} \cdot \frac{V_i}{V_s}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

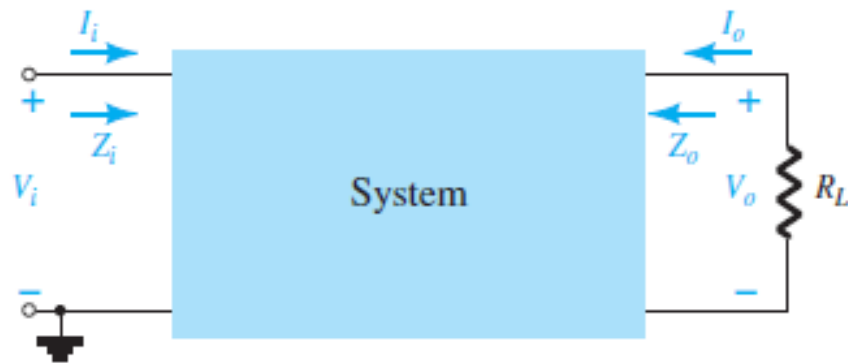
Uvrštavanjem (29) u (31) dobijemo pojačanje pojačala opterećenog teretom R_L i sa unutarnjim otporom generatora R_S :

$$(31) A_{v_s} = A_{v_L} \cdot \frac{Z_i}{Z_i + R_S}$$

Budući da je $\frac{Z_i}{Z_i + R_S} \leq 1$ to znači da pojačanje pojačala sa naponskim generatorom unutarnjeg otpora R_S uvijek manje od pojačanja pojačala sa idealnim generatorom!

Elektronički Elementi i Sklopovi

Do sada nismo govorili o strujnom pojačanju A_i jer se strujno pojačanje može naći direktno iz naponskog pojačanja A_v .



Strujno pojačanje A_i možemo definirati kao omjer izlazne struje I_o i ulazne struje I_i :

$$(32) A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Za ulazni krug, iz Ohmovog zakona slijedi:

$$(33) I_i = \frac{V_i}{Z_i}$$

Također, za izlazni krug, iz Ohmovog zakona imamo:

$$(34) I_o = -\frac{V_o}{R_L}$$

Uvrštavanjem (33) i (34) u (32) dobije se:

$$(35) A_i = \frac{I_o}{I_i} = -\frac{\frac{V_o}{R_L}}{\frac{V_i}{Z_i}} = -\frac{Z_i V_o}{R_L V_i} = -A_{vL} \frac{Z_i}{R_L}$$

Elektronički Elementi i Sklopovi

Kaskada pojačala se sastoji od niza pojačala spojenih u seriju. Naponsko pojačanje kaskade pojačala A_{vT} je jednako produktu pojačanja pojedinačnih pojačala A_{v_i} :

$$(36) A_{vT} = A_{v_1} \cdot A_{v_2} \cdot \dots \cdot A_{v_n}$$

Strujno pojačanje kaskade pojačala jest:

$$(37) A_{iT} = -A_{vT} \frac{Z_{i1}}{R_L}$$

