

ELEKTRONSKI FAKULTET – NIŠ

KATEDRA ZA ELEKTRONIKU

predmet: ELEKTRONIKA

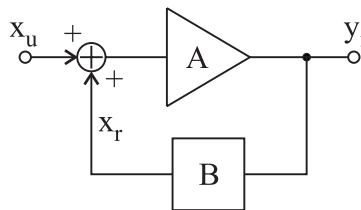
Godina 2005/2006

RAČUNSKE VEŽBE IZ PREDMETA ELEKTRONIKA

II deo

1. NEGATIVNA REAKCIJA

1.1. ZADATAK



Slika 1.1.1

Na slici (Slika 1.1.1) data je opšta šema kola sa povratnom spregom. Prenosna funkcija osnovnog pojačavača je A , a kola povratne sprege je B . Odrediti:

- Prenosnu funkciju kola sa povratnom spregom A_r pod pretpostavkom da kolo povratne sprege ne opterećuje osnovni pojačavač (i obrnuto)
- Frekventnu zavisnost prenosne funkcije kola sa povratnom spregom A_r ako je prenosna funkcija osnovnog pojačavača frekventno zavisna i data izrazom:

$$A = \frac{A_0}{1 + jf/f_p}$$

REŠENJE:

- Ako kolo povratne sprege ne opterećuje pojačavač, sledi:

$$(1.1.1) \quad y_i = Ax_e; \quad x_r = By_i;$$

Signali na ulazu kola, algebarski gledano, mogu da se sabiraju ili oduzimaju. Ako se signali oduzimaju (što je bliže fizičkoj prirodi negativne reakcije) u imeniocu izraza za A_r dobija se $1 + AB$. U suprotnom, rezultat je $1 - AB$.

Usvojimo da se signali sabiraju:

$$(1.1.2) \quad x_e = x_u + x_r.$$

Iz dobijenih izraza sledi:

$$(1.1.3) \quad y_i = A(x_u + By_i);$$

$$(1.1.4) \quad A_r = \frac{y_i}{x_u} = \frac{A}{1-AB}$$

b) Pretpostavka je da je faktor povratne sprege frekventno nezavisan.

$$(1.1.5) \quad A_r = \frac{A}{1-AB} = \frac{A_0}{1-A_0\beta + jf/f_p} = \frac{\frac{A_0}{1-A_0B}}{1 + j\frac{f}{(1-A_0B)f_p}}$$

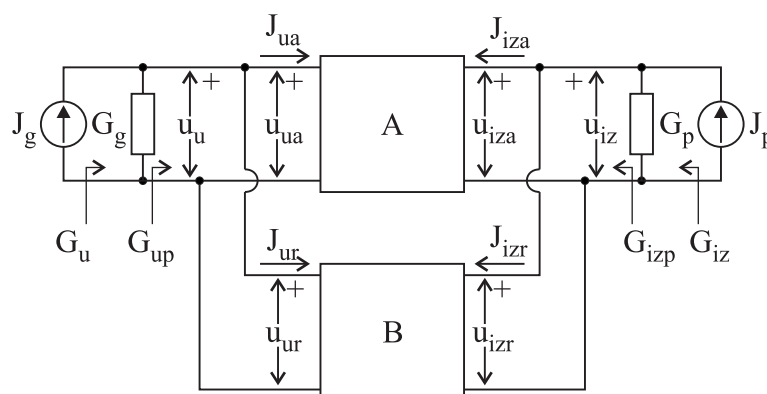
Sledi da negativna povratna sprege proširuje propusni opseg onoliko puta, koliko smanjuje pojačanje pri srednjim učestanostima (tj. da proizvod između širine propusnog opsega i pojačanja ostaje konstantan).

1.2. ZADATAK

Na slici (Slika 1.2.1) prikazano je kolo realnog pojačavača sa paralelnom naponskom negativnom povratnom spregom. Odrediti:

- Prenosnu otpornost pojačavača $R_{Tr} = \frac{u_{iz}}{i_g}$
- Ulaznu odvodnost pojačavača G_{up}
- Izlaznu odvodnost pojačavača G_{izp}

REŠENJE:



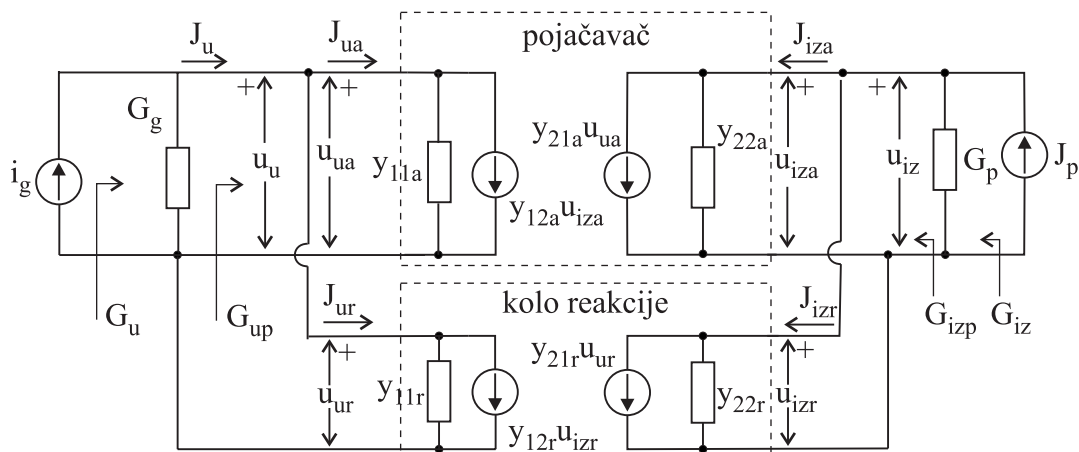
Slika 1.2.1

Za predstavljanje pojačavača i kola reakcije koristićemo linearne modele četvoropola. Najpodesnija reprezentacija u ovom slučaju je linearni 'y' četvoropol. Razlog tome je što su osnovni pojačavač i kolo reakcije na ulazu i na izlazu vezani paralelno. Pošto je reakcija na ulazu i na izlazu naponska (paralelna), pa je ulazni i izlazni napon isti za kolo pojačavača i kolo reakcije, te će ove dve veličine biti uzete za

nezavisne promenljive. Upravo kod 'y' parametra nezavisne veličine su ulazni napon i izlazni napon.

S obzirom na to da je, kod ovog tipa negativne reakcije, sprega na ulazu paralelna, neophodno je da pobuda bude strujna da bi se uopšte ostvarila povratna sprega. Naime, ulazna struja osnovnog pojačavača predstavlja razliku struja pobudnog generatora i ulazne struje kola povratne sprege, te je tako ostvareno oduzimanje signala na ulazu sa slike (Slika 1.1.1).

Ako bi smo kolo pobudili idealnim naponskim generatorom uopšte ne bi bilo reakcije (reakcija se ostvaruje na taj način što reakciona struja prati promene izlaznog napona). Povećanjem reakcione struje dolazi do smanjenja ulazne struje što ima za posledicu da se smanji ulazni napon na osnovnom pojačavaču a samim tim i izlazni napon. Mehanizam negativne reakcija se zasniva na promeni ulaznog napona u osnovni pojačavač. Sa idealnim naponskim generatorom kao pobudom, ulazni napon je konstantan, pa zaključujemo da nema promene napona na osnovnom pojačavaču bez obzira na promene reakcione struje.

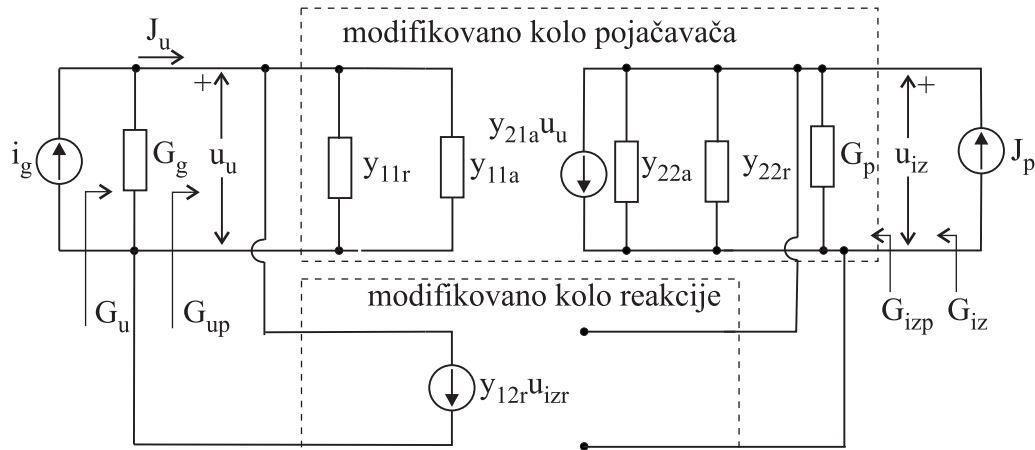


Slika 1.2.2

Prema slici (Slika 1.2.2) mogu da se izračunaju opšti izrazi za prenosnu funkciju pojačavača sa paralelno-naponskom reakcijom. Međutim, koristeći činjenicu da je većina pojačavača unilateralna (prenosi signal od ulaza ka izlazu, a prenos u obrnutom smeru je zanemarljiv) i da je direktan prenos (prenos od ulaza ka izlazu pojačavača preko kola reakcije) zanemarljiv prema prenosu signala kroz osnovni pojačavač, može se uzeti da su zadovoljene relacije:

$$(1.2.1) \quad y_{12a} = 0; |y_{21r}| \ll |y_{21a}|, \text{ tj. } y_{21r} \approx 0.$$

Koristeći prethodne aproksimacije i premeštajući admitanse y_{11r} , i y_{22r} iz kola reakcije u kolo osnovnog pojačavača, dobija se šema na slici (Slika 1.2.3) iz koje se jednostavno računaju parametri pojačavača sa paralelno-naponskom reakcijom



Slika 1.2.3

Poredeći sliku (Slika 1.2.3) sa opštom šemom kola sa reakcijom (Slika 1.1.1), sledi da se kod paralelno-naponske reakcije transfer funkcija definiše kao prenosna otpornost (ulazni signal je struja, izlazni je napon).

Uvedimo sledeće oznake:

$$(1.2.2) \quad G_{u0} = y_{11a} + y_{11r} + G_g$$

$$(1.2.3) \quad G_{i0} = y_{22a} + y_{22r} + G_p$$

Ove veličine predstavljaju ulaznu i izlaznu admitansu modifikovanog kola pojačavača.

Prenosna otpornost je:

$$(1.2.4) \quad R_{Tr} = \left. \frac{u_{iz}}{i_g} \right|_{J_p=0};$$

$$(1.2.5) \quad u_{iz} = -y_{21a} \frac{u_u}{y_{22a} + y_{22r} + G_p} = -y_{21a} \frac{u_u}{G_{i0}};$$

$$(1.2.6) \quad i_g = u_u (G_g + y_{11a} + y_{11r}) + y_{12r} u_{iz};$$

$$(1.2.7) \quad i_g = u_u G_{u0} - u_u y_{12r} \frac{y_{21a}}{G_{i0}};$$

$$(1.2.8) \quad i_g = u_u G_{u0} \left(1 - y_{12r} \frac{y_{21a}}{G_{i0} G_{u0}} \right);$$

$$(1.2.9) \quad R_{Tr} = \frac{-\frac{y_{21a}}{G_{u0} G_{i0}}}{1 - (-y_{12r}) \left(-\frac{y_{21a}}{G_{u0} G_{i0}} \right)}.$$

Ako poredimo poslednji izraz sa opštim izrazom (1.1.4) za prenosnu funkciju kola sa reakcijom dobija se:

$$(1.2.10) \quad A = -\frac{y_{21a}}{G_{u0}G_{i0}} \quad \text{i} \quad B = -y_{12r}.$$

Odredimo sada prenosnu otpornost $R_{T0} = \frac{u'_{iz}}{i_g}$ pod uslovom da su krajevi modifikovanog kola reakcije otvoreni:

$$(1.2.11) \quad R_{T0} = \left. \frac{u'_{iz}}{i_g} \right|_{J_p=0} = -\frac{y_{21a}}{G_{u0}G_{i0}} = A.$$

Dakle važi:

$$(1.2.12) \quad R_{Tr} = \frac{R_{T0}}{1 - BR_{T0}}.$$

Proizilazi da se prenosna funkcija kola sa reakcijom može odrediti na sledeći način:

- 1) Uoče se generator, potrošač, kolo reakcije i osnovni pojačavač.
- 2) Izdvoji se kolo reakcije iz pojačavača i odrede se njegovi 'y' parametri po definiciji.
- 3) Formira se modifikovano kolo osnovnog pojačavača tako što se u potpunom pojačavaču ukloni kolo reakcije, a na mestima na kojima je ono uklonjeno dodaju se admitanse y_{11r} na ulazu i y_{22r} na izlazu. Primetimo da nije potrebno odrediti 'y' parametre osnovnog pojačavača. Izračuna se transfer funkcija modifikovanog kola osnovnog pojačavača i ona je jednaka R_{T0} . Vrednost za koeficijent povratne sprege je $B = -h_{12r}$. Primeni se opšta formula (1.1.4) za pojačavač sa reakcijom.

b) Izračunajmo ulaznu admitansu koju vidi strujni generator i_g u kolu pojačavača sa paralelno-naponskom reakcijom. Ako iskoristimo izraz (1.2.8) možemo da pišemo:

$$(1.2.13) \quad G_u = \left. \frac{i_g}{u_g} \right|_{J_p=0} = G_{u0} \left(1 - y_{12r} \frac{y_{21a}}{G_{u0}G_{i0}} \right) = G_{u0} (1 - R_{T0}B)$$

Ulazna odvodnost pojačavača je:

$$(1.2.14) \quad G_{up} = G_u - G_g = G_{u0} (1 - R_{T0}B) - G_g.$$

Podsetimo da veličina G_{u0} predstavlja ulaznu odvodnost modifikovanog kola pojačavača.

c) Izračunajmo izlaznu admitansu. Po definiciji treba na izlazu priključiti idealni strujni (naponski) test generator J_p pri čemu se ulazi pobudni generator kratkospaja. Količnik struje generatora J_p i napona u_{iz} predstavlja traženu admitansu.

$$(1.2.15) \quad J_p = u_{iz} G_{i0} + y_{21a} u_u$$

$$(1.2.16) \quad u_u = -\frac{u_{iz} y_{12r}}{G_{u0}}$$

$$(1.2.17) \quad G_{iz} = \left. \frac{J_p}{u_{iz}} \right|_{u_g=0} = G_{i0} - \frac{y_{12r} y_{21a}}{G_{u0}} = G_{i0} \left(1 - \frac{y_{12r} y_{21a}}{G_{u0} G_{i0}} \right) = G_{i0} (1 - R_{T0} B)$$

Izlazna odvodnost pojačavača je:

$$(1.2.18) \quad G_{izp} = G_{iz} - G_p = G_{i0} (1 - R_{T0} B) - G_p.$$

Podsetimo da veličina G_{i0} predstavlja izlaznu admitansu modifikovanog kola pojačavača.

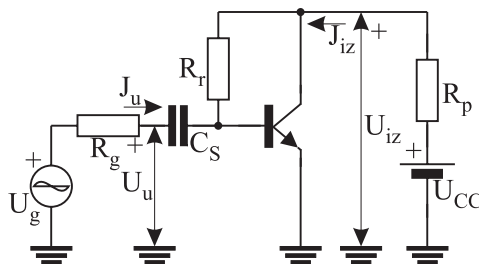
Možemo da zaključimo da paralelno-naponska negativna reakcija smanjuje ulaznu i izlaznu otpornost.

1.3. ZADATAK

Elementi kola, prikazanog na slici (Slika 1.3.1) su: $R_p = 4 \text{ k}\Omega$; $R_r = 40 \text{ k}\Omega$; $R_g = 10 \text{ k}\Omega$; $h_{11E} = 1,1 \text{ k}\Omega$; $h_{21E} = 50$; $h_{12E} = 0$; $h_{22E} = 0$; $C_s \rightarrow \infty$. Odrediti:

- naponsko pojačanje $A = U_{iz}/U_g$;
- ulaznu otpornost $R_{up} = U_u/J_u$;
- izlaznu otpornost $R_{izp} = U_{iz}/J_{iz}$.

REŠENJE:



Slika 1.3.1

a) Kolo sa slike (Slika 1.3.1) predstavlja pojačavač sa paralelnom-naponskom negativnom povratnom spregom. Da bi se to jasnije uočilo, ekvivalentno kolo istog

pojačavača prikazano je na slici (Slika 1.3.2). Dakle, ovde je naponski generator transformisan u ekvivalentni strujni, četvoropol povratne sprege je, zbog lakšeg uočavanja, izdvojen iz pojačavača, a paralelno potrošaču je dodat strujni generator J_p . Upoređujući ovo kolo sa kolom sa slike (Slika 1.3.1) lako je uočiti pojedine elemente pojačavača sa paralelnom-naponskom povratnom spregom. Dakle, četvoropol A sa slike (Slika 1.3.1) je sačinjen od tranzistora u spoju sa zajedničkim emitorom dok je četvoropol B prikazan na slici (Slika 1.3.3).

Na osnovu zaključaka izvedenih u prethodnom zadatku, analizu pojačavača sa slike (Slika 1.3.1), odnosno (Slika 1.3.2), treba započeti analizom četvoropola povratne sprege koji je prikazan na slici (Slika 1.3.3). Ekvivalentni y-parametri ovog kola su:

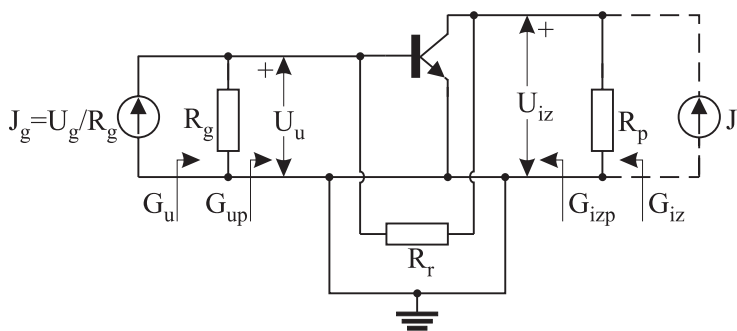
$$(1.3.1) \quad y_{11r} = J_{ur} / U_{ur} |_{U_{izr} = 0};$$

$$(1.3.2) \quad y_{22r} = J_{izr} / U_{izr} |_{U_{ur} = 0};$$

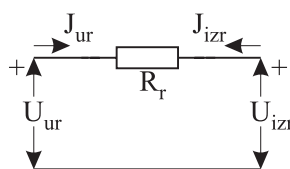
$$(1.3.3) \quad y_{12r} = J_{ur} / U_{izr} |_{U_{ur} = 0},$$

pa je koeficijent povratne sprege:

$$(1.3.4) \quad B = -y_{21r} = -12,82 \mu\text{S}.$$



Slika 1.3.2



Slika 1.3.3

Kolo pojačavača bez povratne sprege prikazano je na slici (Slika 1.3.4). Sa ove slike je moguće odrediti vrednost prenosne otpornosti R_{T0} na sledeći način:

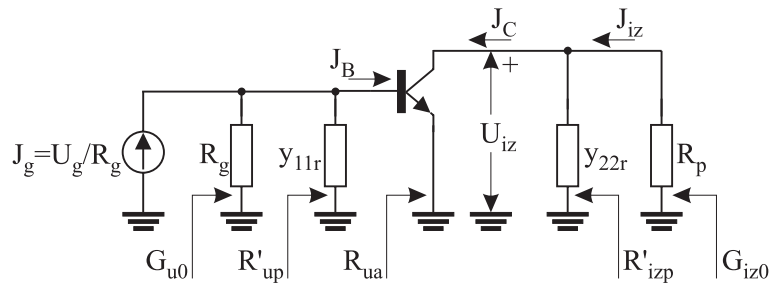
$$(1.3.5) \quad R_{T0} = \frac{U_{iz}}{J_g} = \frac{U_{iz}}{J_{iz}} \cdot \frac{J_{iz}}{J_C} \cdot \frac{J_C}{J_B} \cdot \frac{J_B}{J_g} = -R_p \cdot \frac{R_r}{R_r + R_p} \cdot h_{21E} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_{ua}},$$

pri čemu je $R_B = R_g \parallel R_r$, dok je $R_{ua} = h_{11E}$. Zamenom brojnih vrednosti dobija se da je:

$$(1.3.6) \quad R_{T0} = -160 \text{ k}\Omega.$$

S obzirom da su R_{T0} i B poznati, prenosna otpornost kola sa negativnom povratnom spregom je onda:

$$(1.3.7) \quad R_{Tr} = \frac{R_{T0}}{1 - B \cdot R_{T0}} = -32 \text{ k}\Omega.$$



Slika 1.3.4

Najzad, dobija se da je traženo naponsko pojačanje pojačavača sa povratnom spregom:

$$(1.3.8) \quad A_r = \frac{U_{iz}}{U_g} = \frac{U_{iz}}{J_g} \cdot \frac{J_g}{U_g} = \frac{R_{Tr}}{R_g} = -3,2.$$

b) Kao što se može uočiti sa slike (Slika 1.3.4) odvodnost G_{u0} je jednaka:

$$(1.3.9) \quad G_{u0} = 1/R_g + 1/R_r + 1/R_{ua} = 1/R_g + 1/R_r + 1/h_{11E} = 1,034 \text{ mS}.$$

Ulazna odvodnost pojačavača onda iznosi:

$$(1.3.10) \quad G_{up} = G_{u0} \cdot (1 - B \cdot R_{T0}) - 1/R_g = 5,07 \text{ mS},$$

tako da je ulazna otpornost:

$$(1.3.11) \quad R_{up} = 1/G_{up} = 197,2 \Omega.$$

c) Slično kao pod b) dobija se da je G_{iz0} dato izrazom:

$$(1.3.12) \quad G_{i0} = \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_p} = 0,275 \text{ mS}.$$

Smenom u (1.2.18) dobija se izlazna odvodnost pojačavača:

$$(1.3.13) \quad G_{ip} = G_{iz0} \cdot (1 - B \cdot R_{T0}) - \frac{1}{R_p},$$

izlazna otpornost je:

$$(1.3.14) \quad R_{ip} = \frac{1}{G_{ip}} = 740,7\Omega.$$

Interesantno je na kraju uporediti dobijene rezultate sa parametrima pojačavača bez povratne sprege prikazanog na slici. Ulazna i izlazna otpornost i naponsko pojačanje ovog pojačavača iznose:

$$(1.3.15) \quad R'_{up} = R_r \parallel h_{11E} = 1,07k\Omega;$$

$$(1.3.16) \quad R'_{izp} = R_r = 40k\Omega;$$

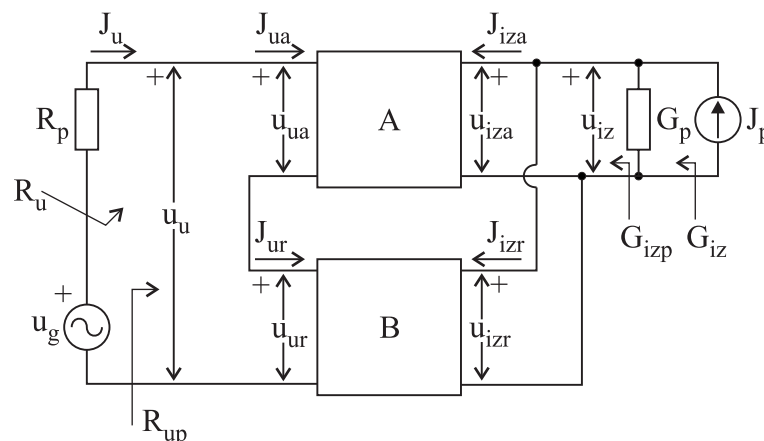
$$(1.3.17) \quad A'_n = \frac{R_{T0}}{R_g} = -16.$$

Iz ovoga se može zaključiti da paralelna-naponska negativna povratna sprega kod pojačavača smanjuje pojačanje kao i ulaznu i izlaznu otpornost.

1.4. ZADATAK

Na slici (Slika 1.4.1) prikazano je kolo realnog pojačavača sa redno-naponskom negativnom povratnom spregom. Odrediti:

- Naponsko pojačanje pojačavača $A_r = \frac{u_{iz}}{u_g}$
- Ulaznu otpornost pojačavača R_{up}
- Izlaznu odvodnost pojačavača G_{izp}



Slika 1.4.1

REŠENJE:

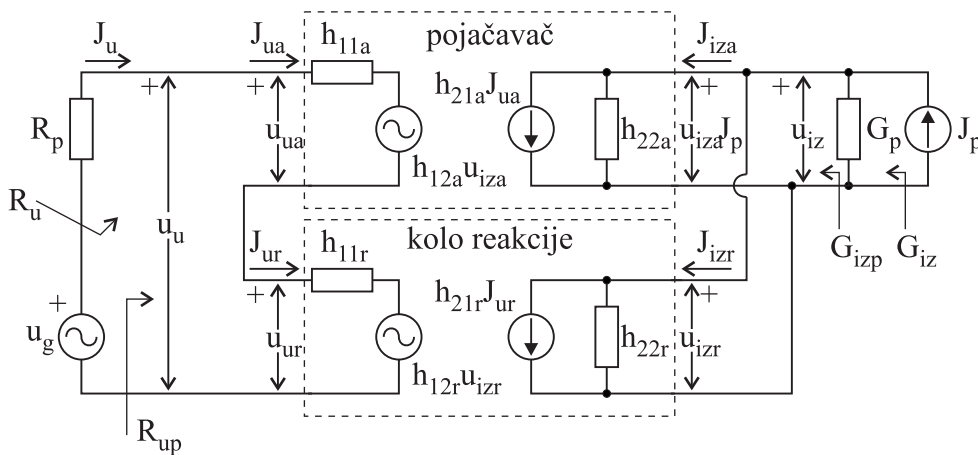
a) Za predstavljanje pojačavača i kola reakcije koristimo linearne modele četvoropola. Najpodesnija reprezentacija u ovom slučaju je linearni 'h' četvoropol. Razlog tome je što su osnovni pojačavač i kolo reakcije na ulazu vezani redno a na izlazu paralelno tj. važi

$$(1.4.1) \quad J_u = J_{ua} = J_{ur}; \quad u_u = u_{ua} + u_{ur}; \quad J_{iz} = J_{iza} + J_{izr}; \quad u_{iz} = u_{iza} = u_{izr}$$

Pošto je reakcija na ulazu redna to je ulazna struja ista za kolo pojačavača i kolo reakcije. Na izlazu je reakcija naponska (paralelna), pa je izlazni napon isti za kolo pojačavača i kolo reakcije, te će ove dve veličine biti uzete za nezavisne promenljive. Upravo kod 'h' parametra nezavisne veličine su ulazna struja i izlazni napon.

S obzirom na to da je, kod ovog tipa negativne reakcije, sprega na ulazu redna, neophodno je da pobuda bude naponska da bi se uopšte ostvarila povratna sprega. Naime, ulazni napon osnovnog pojačavača predstavlja razliku napona na pobudnom generatoru i ulaznog napona kola povratne sprege, te je tako ostvareno oduzimanje signala na ulazu sa slike (Slika 1.1.1).

Ako bi smo kolo pobudili idealnim strujnim generatorom uopšte ne bi bilo reakcije (reakcija se ostvaruje na taj način što reakcioni napon prati promene izlaznog napona). Povećanjem reakcionog napona dolazi do smanjenja ulazne struje što ima za posledicu da se smanji ulazni napon na osnovnom pojačavaču. Mehanizam negativne reakcija se zasniva na promeni ulazne struje. Sa idealnim strujnim generatorom kao pobudom, ulazna struja je konstantna, pa zaključujemo da nema promene napona na osnovnom pojačavaču bez obzira na promene reakcionog napona.

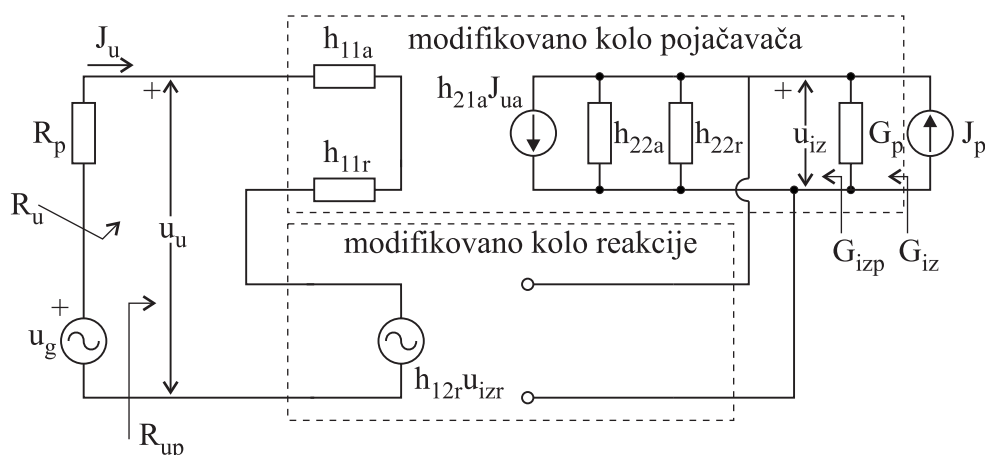


Slika 1.4.2

Prema slici (Slika 1.4.2) mogu da se izračunaju opšti izrazi za prenosnu funkciju pojačavača sa redno-naponskom reakcijom. Međutim, koristeći činjenicu da je većina pojačavača unilateralna (prenosi signal od ulaza ka izlazu, a prenos u obrnutom smeru je zanemarljiv) i da je direktan prenos (prenos od ulaza ka izlazu pojačavača preko kola reakcije) zanemarljiv prema prenosu signala kroz osnovni pojačavač, može se uzeti da su zadovoljene relacije:

$$(1.4.2) \quad h_{12a} = 0; \quad |h_{21r}| \ll |h_{21a}|, \text{ tj. } h_{21r} \approx 0.$$

Koristeći prethodne aproksimacije i premeštajući impendansu h_{11r} , i admitansu h_{22r} iz kola reakcije u kolo osnovnog pojačavača, dobija se šema na slici (Slika 1.4.3) iz koje se jednostavno računaju parametri pojačavača sa redno-naponskom reakcijom



Slika 1.4.3

Poredeći sliku (Slika 1.4.3) sa opštom šemom kola sa reakcijom (Slika 1.1.1), sledi da se kod redno-naponske reakcije transfer funkcija definiše kao naponsko pojačanje (ulazni signal je napon, izlazni je takođe napon).

Uvedimo sledeće oznake:

$$(1.4.3) \quad R_{u0} = h_{11a} + h_{11r} + R_g$$

$$(1.4.4) \quad G_{i0} = h_{22a} + h_{22r} + G_p$$

Ove veličine predstavljaju ulaznu impendansu i izlaznu admitansu modifikovanog kola pojačavača.

Naponsko pojačanje je:

$$(1.4.5) \quad A_r = \left. \frac{u_{iz}}{u_g} \right|_{J_p=0};$$

$$(1.4.6) \quad u_{iz} = -h_{21a} \frac{J_u}{h_{22a} + h_{22r} + G_p} = -h_{21a} \frac{J_u}{G_{i0}};$$

$$(1.4.7) \quad u_g = J_u (R_g + h_{11a} + h_{11r}) + h_{12r} u_{iz};$$

$$(1.4.8) \quad u_g = J_u R_{u0} - J_u h_{12r} \frac{h_{21a}}{G_{i0}};$$

$$(1.4.9) \quad u_g = J_u R_{u0} \left(1 - h_{12r} \frac{h_{21a}}{G_{i0} R_{u0}} \right);$$

$$(1.4.10) \quad A_r = \frac{-\frac{h_{21a}}{G_{i0}R_{u0}}}{1 - (-h_{12r})\left(-\frac{h_{21a}}{G_{i0}R_{u0}}\right)}.$$

Ako poredimo poslednji izraz sa opštim izrazom (1.1.5) za prenosnu funkciju kola sa reakcijom dobija se:

$$(1.4.11) \quad A = -\frac{h_{21a}}{G_{i0}R_{u0}} \quad \text{i} \quad B = -h_{12r}.$$

Odredimo sada naponsko pojačanje $A_0 = \frac{u'_{iz}}{u_g}$ pod uslovom da su krajevi modifikovanog kola reakcije kratkospojeni:

$$(1.4.12) \quad A_0 = \left. \frac{u'_{iz}}{u_g} \right|_{J_p=0} = -\frac{h_{21a}}{R_{u0}G_{i0}} = A.$$

Dakle važi:

$$(1.4.13) \quad A_r = \frac{A_0}{1 - BA_0}.$$

Proizilazi da se prenosna funkcija kola sa reakcijom može odrediti na sledeći način:

- 1) Uoče se generator, potrošač, kolo reakcije i osnovni pojačavač.
- 2) Izdvoji se kolo reakcije iz pojačavača i odrede se njegovi 'h' parametri po definiciji.
- 3) Formira se modifikovano kolo osnovnog pojačavača tako što se u potpunom pojačavaču ukloni kolo reakcije, a na mestima na kojima je ono uklonjeno dodaju se impendansa h_{11r} na ulazu i admitansa h_{22r} na izlazu. Primetimo da nije potrebno odrediti 'h' parametre osnovnog pojačavača. Izračuna se transfer funkcija modifikovanog kola osnovnog pojačavača i ona je jednaka A_0 . Vrednost za koeficijent povratne sprege je $B = -h_{12r}$. Primeni se opšta formula (1.1.5) za pojačavač sa reakcijom.

b) Izračunajmo ulaznu impendansu koju vidi naponski generator u_g u kolu pojačavača sa redno-naponskom reakcijom. Ako iskoristimo izraz (1.4.9) možemo da pišemo:

$$(1.4.14) \quad R_u = \left. \frac{u_g}{J_u} \right|_{J_p=0} = R_{u0} \left(1 - h_{12r} \frac{h_{21a}}{G_{i0}R_{u0}}\right) = R_{u0}(1 - A_0B)$$

Ulazna otpornost pojačavača je:

$$(1.4.15) \quad R_{up} = R_u - R_g = R_{u0}(1 - A_0B) - R_g.$$

Podsetimo da veličina R_{u0} predstavlja ulaznu impedansu modifikovanog kola pojačavača.

c) Izračunajmo izlaznu admitansu. Po definiciji treba na izlazu priključiti idealni strujni (naponski) test generator J_p pri čemu se ulazi pobudni generator kratkospaja. Količnik struje generatora J_p i napona u_{iz} prestavlja traženu admitansu.

$$(1.4.16) \quad J_p = u_{iz} G_{i0} + h_{21a} J_u$$

$$(1.4.17) \quad J_u = -\frac{u_{iz} h_{12r}}{R_{u0}}$$

$$(1.4.18) \quad G_{iz} = \left. \frac{J_p}{u_{iz}} \right|_{u_g=0} = G_{i0} - \frac{h_{12r} h_{21a}}{R_{u0}} = G_{i0} \left(1 - \frac{h_{12r} h_{21a}}{R_{u0} G_{i0}} \right) = G_{i0} (1 - A_0 B)$$

Izlazna odvodnost pojačavača je:

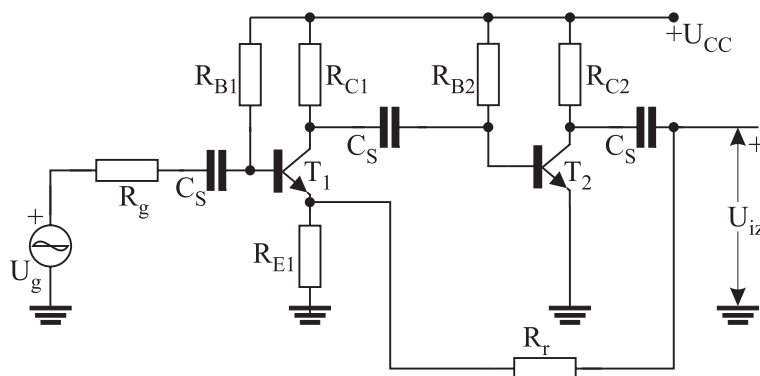
$$(1.4.19) \quad G_{izp} = G_{iz} - G_p = G_{i0} (1 - A_0 B) - G_p.$$

Podsetimo da veličina G_{i0} predstavlja izlaznu admitansu modifikovanog kola pojačavača.

Možemo da zaključimo da redno-naponska negativna reakcija povećava ulaznu i smanjuje izlaznu otpornost.

1.5. ZADATAK

Odrediti naponsko pojačanje ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača sa slike (Slika 1.5.1). Poznato je: $h_{11E} = 1k\Omega$, $h_{12E} = 0$, $h_{21E} = 100$ i $h_{22E} = 0S$. Poznato je $R_{C1} = R_{C2} = 3k\Omega$, $R_g = 1k\Omega$, $R_{E1} = 200\Omega$, $R_r = 20k\Omega$, $R_{B1} = 20k\Omega$, $R_{B2} \rightarrow \infty$.

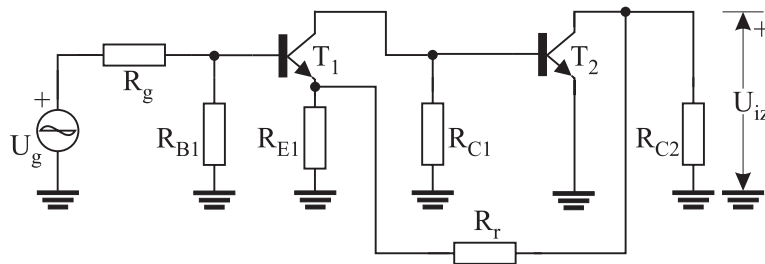


Slika 1.5.1

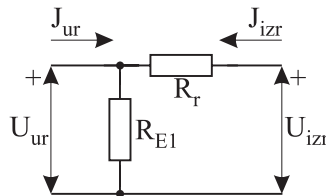
REŠENJE:

Kolo sa slike (Slika 1.5.1) predstavlja pojačavač sa redno-naponskom negativnom povratnom spregom. Da bi se to jasnije uočilo, ekvivalentno kolo istog pojačavača prikazano je na slici (Slika 1.5.2). Dakle, ovde je naponski generator transformisan u ekvivalentni strujni, četvoropol povratne sprege je, zbog lakšeg uočavanja, izdvojen iz pojačavača, a paralelno potrošaču je dodat strujni generator J_p . Upoređujući ovo kolo sa kolom sa slike (Slika 1.5.2) možemo uočiti pojedine elemente pojačavača sa redno-naponskom npovratnom spregom. Dakle, četvoropol A sa slike (Slika 1.5.1) je sačinjen od dvostepenog pojačavača gde su oba pojačavačka stepena u spoju sa zajedničkim emitorom dok je četvoropol B prikazan na slici (Slika 1.5.3).

Na osnovu slike (Slika 1.5.2) zaključuje se da je u pitanju redno-naponska reakcija. Posmatrajući sliku (Slika 1.5.2) vidimo da nije ista struja kroz ulaz pojačavača (struja baze tranzistora T_1) i kolo reakcije (emitorska struja tranzistora T_1), pa prema tome nisu ispunjeni uslovi pod kojima su izvedeni izrazi u prethodnom zadatku. Ipak, kako je emitorska struja srazmerna struji baze ($J_E = (1 + h_{21E})J_B$) napon na reakcionom otporu (h_{11r}) ostaće isti ako smatramo da kroz njega protiče struja J_B a da se njegova vrednost povećala $1 + h_{21E}$ puta. Zaključujemo da ipak možemo da primenimo izvedene rezultate iz prethodnog zadatka stim što treba uvećati vrednost h_{11r} $1 + h_{21E}$ puta.



Slika 1.5.2



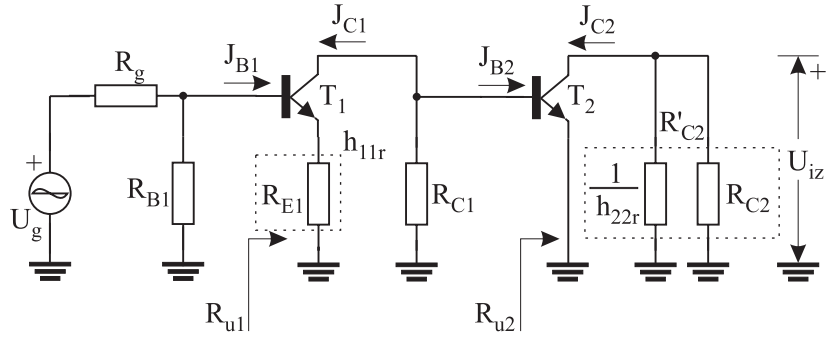
Slika 1.5.3

Prvo treba odrediti 'h' parametre kola reakcije:

$$(1.5.1) \quad h_{11r} = \left. \frac{u_{1r}}{J_{1r}} \right|_{u_{2r}=0} = R_{E1} \parallel R_r \approx R_{E1} = 200\Omega$$

$$(1.5.2) \quad h_{22r} = \left. \frac{J_{2r}}{u_{2r}} \right|_{J_{1r}=0} = \frac{1}{R_{E1} + R_r} = 49,5\mu S$$

$$(1.5.3) \quad h_{12r} = \left. \frac{u_{1r}}{u_{2r}} \right|_{J_{1r}=0} = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_r} \Rightarrow \beta = -h_{12r} = -0,01$$



Slika 1.5.4

$$(1.5.4) \quad R_{u1} = h_{11E} + (1 + h_{21E})R_{E1} = 21,2k\Omega ;$$

$$(1.5.5) \quad R_{u2} = h_{11E} = 1k\Omega ;$$

$$(1.5.6) \quad R'_{C2} = R_{C2} \parallel (1/h_{22r}) \approx R_{C2} .$$

$$(1.5.7) \quad A_0 = \frac{U_{iz}}{J_{iz}} \cdot \frac{J_{iz}}{J_{C2}} \cdot \frac{J_{C2}}{J_{B2}} \cdot \frac{J_{B2}}{J_{C1}} \cdot \frac{J_{C1}}{J_{B1}} \cdot \frac{J_{B1}}{J_g} \cdot \frac{J_g}{U_g}$$

$$= - \left(R_{C2} \parallel \frac{1}{h_{22r}} \right) \frac{-h_{21E}R_{C1}}{R_{C1} + h_{11E}} \frac{h_{21E}R_{B1}}{R_{B1} + R_{u1}} \frac{1}{R_g + (R_{u1} \parallel R_{B1})}$$

$$(1.5.8) \quad A_0 = h_{21E}^2 \frac{R'_{C2}}{R_g + (R_{u1} \parallel R_{B1})} \frac{R_{C1}}{R_{C1} + h_{11E}} \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{u1}} = 997$$

$$(1.5.9) \quad A_r = \frac{A_0}{1 - BA_0} = 90,88$$

b) Ulaznu otpornost određujemo na osnovu izraza (1.4.15)

$$(1.5.10) \quad R_{up} = (R_g \parallel R_{B1} + R_{u1})(1 - BA_0)$$

c) Izlaznu odvodnost određujemo na osnovu izraza (1.4.19)

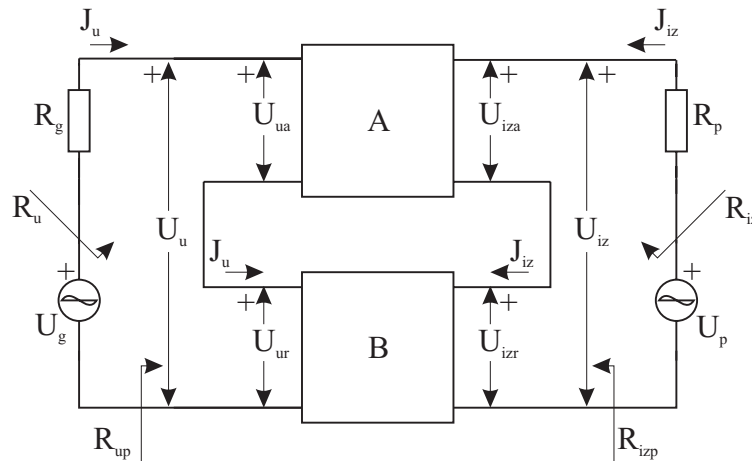
$$(1.5.11) \quad G_{ip} = (1/R_{C2} + 1/h_{22a})(1 - BA_0) - G_p$$

$$(1.5.12) \quad R_{ip} = \frac{1}{G_{ip}} = 238\Omega$$

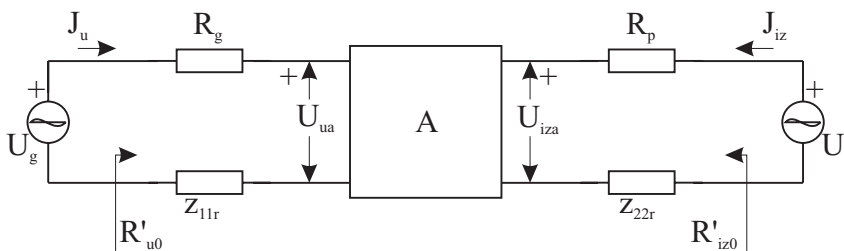
1.6. ZADATAK

Na slici (Slika 1.6.1) prikazano je kolo realnog pojačavača sa rednom-strujnom negativnom povratnom spregom. Odrediti:

- prenosnu odvodnost pojačavača $G_{Tr} = J_{iz}/U_g$,
- ulaznu otpornost pojačavača R_{up} i
- izlaznu otpornost pojačavača R_{izp} .
- Pokazati kako se veličine G_{Tr} , R_{up} i R_{izp} mogu odrediti analizom kola sa (Slika 1.6.2).



Slika 1.6.1



Slika 1.6.2

REŠENJE:

Dokaz da se analiza pojačavača sa rednom-strujnom negativnom povratnom spregom, čija je opšta blok šema prikazana na slici (Slika 1.6.1), može obaviti analizom pojačavača bez povratne sprege sa slike (Slika 1.6.2), tekao bi na isti način kao u zadacima 1.2 i 1.4. Zato on ovde neće biti ponavljan. Ukratko, analiza pojačavača sa rednom-strujnom povratnom spregom može se obaviti na sledeći način:

- Analizom četvoropola povratne sprege treba odrediti sledeće njegove parametre: Z_{11r} , Z_{22r} i Z_{12r} . Na osnovu ovoga odrediti koeficijent povratne sprege $B = -Z_{12r}$.
- Formirati kolo pojačavača bez povratne sprege kao na slici (Slika 1.6.2). Za ovo kolo odrediti otpornosti koje opterećuju generatore U_g i U_p kao i prenosnu odvodnost, odnosno R_{u0} , R_{iz0} i G_{T0} .
- Ulaznu i izlaznu otpornost i prenosnu odvodnost pojačavača sa povratnom spregom treba onda izračunati na sledeći način:

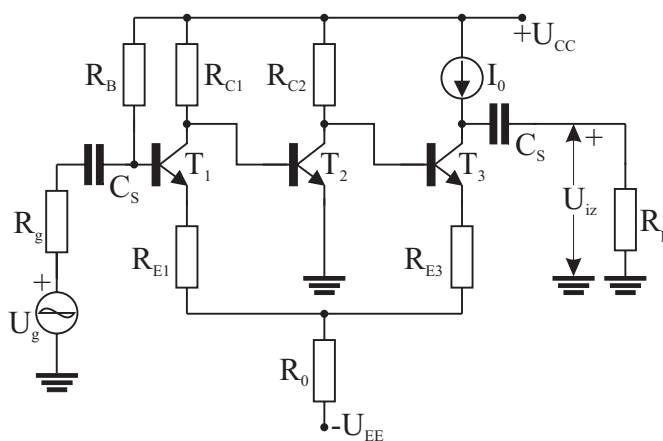
$$(1.6.1) \quad R_{up} = R_{u0}(1 - BG_{T0}) - R_g,$$

$$(1.6.2) \quad R_{izp} = R_{iz0}(1 - BG_{T0}) - R_p \text{ i}$$

$$(1.6.3) \quad G_{Tr} = \frac{G_{T0}}{1 - BG_{T0}}.$$

1.7. ZADATAK

Za pojačavač prikazan na slici (Slika 1.7.1) odrediti naponsko pojačanje, $A=U_{iz}/U_g$, kao i ulaznu otpornost. Poznato je: $R_g = 1 \text{ k}\Omega$; $R_{C1} = 10 \text{ k}\Omega$; $R_{E1} = 200 \Omega$; $R_0 = 200 \Omega$; $R_{C2} = 2 \text{ k}\Omega$; $R_{E3} = 200 \Omega$; $R_p = 2 \text{ k}\Omega$; $C_s \rightarrow \infty$; $R_B \rightarrow \infty$. Tranzistori su identični sa parametrima: $h_{11E} = 2 \text{ k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = 100$; $h_{22E} = 0 \text{ S}$.



Slika 1.7.1

REŠENJE:

Kako je u prethodnom zadatku rečeno, analizu pojačavača sa rednom-strujnom povratnom spregom treba započeti određivanjem z-parametara četvoropola povratne sprege. Četvoropol povratne sprege pojačavača sa slike (Slika 1.7.1) prikazan je na slici (Slika 1.7.2) pa njegovi parametri iznose:

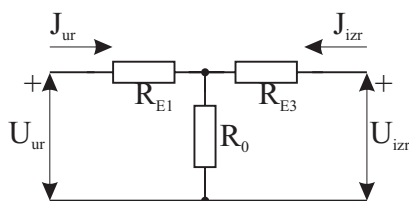
$$(1.7.1) \quad z_{11r} = U_{ur}/J_{ur}|_{J_{izr}=0} = R_{E1} + R_0 = 400\Omega;$$

$$(1.7.2) \quad z_{22r} = U_{izr}/J_{izr}|_{J_{ur}=0} = R_{E3} + R_0 = 400\Omega;$$

$$(1.7.3) \quad z_{12r} = U_{ur}/J_{izr}|_{J_{ur}=0} = R_0 = 200\Omega,$$

odakle je koeficijent povratne sprege:

$$(1.7.4) \quad B = -z_{12r} = -200\Omega.$$



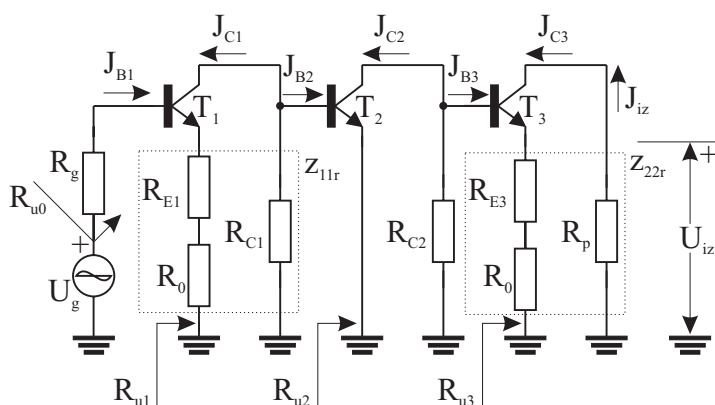
Slika 1.7.2

Kolo pojačavača bez povratne sprege prikazano je na slici (Slika 1.7.3). S ciljem da se dobiju jednostavniji izrazi, uvedimo sledeće oznake:

$$(1.7.5) \quad R_{u3} = h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot (R_{E3} + R_0) = 42k\Omega ;$$

$$(1.7.6) \quad R_{u2} = h_{11E} = 2k\Omega ;$$

$$(1.7.7) \quad R_{u1} = h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot (R_{E1} + R_0) = 42k\Omega .$$



Slika 1.7.3

G_{T0} je sada jednako:

$$(1.7.8) \quad G_{T0} = \frac{J_{iz}}{U_g} = h_{21E} \cdot \frac{-R_{C2}}{R_{C2} + R_{u3}} \cdot h_{21E} \cdot \frac{-R_{C1}}{R_{C1} + R_{u2}} \cdot h_{21E} \cdot \frac{1}{R_g + R_{u1}} ,$$

što, kada se zamene brojne vrednosti, daje $G_{T0} = 0,88 \text{ S}$.

Prenosna odvodnost kola sa negativnom povratnom spregom je onda:

$$(1.7.9) \quad G_{Tr} = \frac{G_{T0}}{1 - B \cdot G_{T0}} = 5mS ,$$

tako da je naponsko pojačanje:

$$(1.7.10) \quad A_n = \frac{U_i}{U_g} = \frac{U_i}{J_i} \cdot \frac{J_i}{U_g} = -G_{Tr} \cdot R_p = -10 .$$

Otpornost koja opterećuje generator U_g u kolu sa slike (Slika 1.7.3) iznosi:

$$(1.7.11) \quad R_{u0} = R_g + R_{u2} = 43k\Omega ,$$

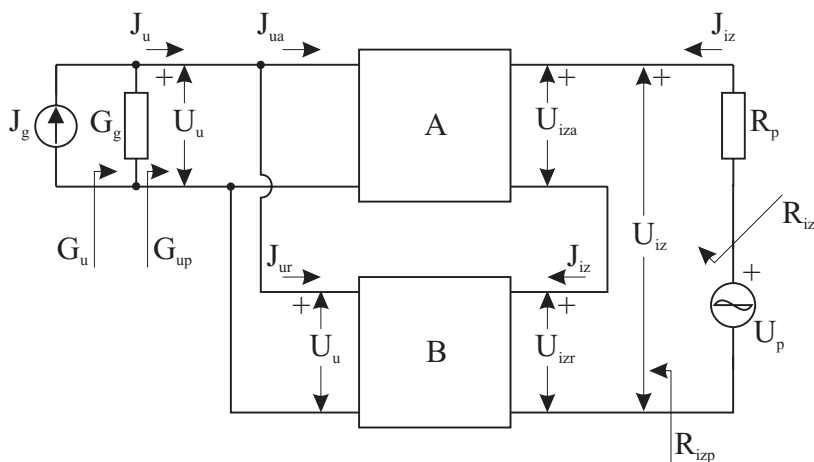
pa je tražena ulazna otpornost pojačavača sa povratnom spregom:

$$(1.7.12) \quad R_{up} = R_{u0} \cdot (1 - B \cdot G_{T0}) - R_g = 7,6M\Omega$$

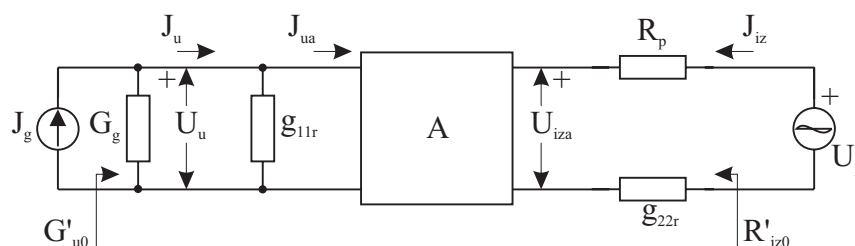
1.8. ZADATAK

Na slici (Slika 1.8.1) prikazano je kolo realnog pojačavača sa paralelnom-strujnom negativnom povratnom spregom. Odrediti:

- strujno pojačanje $A_{sr} = J_{iz}/J_g$,
- ulaznu odvodnost G_{up} i
- izlaznu otpornost R_{izp} .
- pokazati kako se veličine A_{sr} , G_{up} i R_{izp} mogu odrediti analizom kola sa (Slika 1.8.2).



Slika 1.8.1



Slika 1.8.2

REŠENJE:

Dokaz da se analiza pojačavača sa rednom-strujnom negativnom povratnom spregom, čija je opšta blok šema prikazana na slici (Slika 1.8.1), može obaviti analizom pojačavača bez povratne sprege sa slike Slika 1.8.2, tekao bi na isti način kao u zadacima

1.2 i 1.4. Zato on ovde neće biti ponavljan. Ukratko, analiza pojačavača sa rednom-strujnom povratnom spregom može se obaviti na sledeći način:

Postupak analize se uklatko može opisati na sledeći način:

- 1) Analizom četvoropola povratne sprege treba odrediti sledeće njegove parametre: g_{11r} , g_{22r} i g_{12r} . Na osnovu ovoga odrediti koeficijent povratne sprege $B = -g_{12r}$.
- 2) Formirati kolo pojačavača bez povratne sprege kao na slici (Slika 1.8.2). Iz ovog kola odrediti G_{u0} , R_{i0} i A_{s0} .
- 3) Izračunati parametre pojačavača sa negativnom povratnom spregom upotrebom izraza (1.8.1), (1.8.2) i (1.8.3).

Ovaj zadatak će biti rešavan na identičan način kao i zadatak 1.2. Medjutim, zbog specifičnosti sprezanja četvoropola pojačavača i povratne sprege u ovom slučaju, razlike ipak postoje. Da bi topologija sistema jednačina, a samim tim i način analize pojačavača sa ovim tipom povratne sprege ostao isti kao u zadatku 1.2, pojačavač i kolo povratne sprege, s obzirom da su ovde spregnuti paralelno na ulazu i redno na izlazu, treba predstaviti ekvivalentnim "g" parametrima. Takodje, pojačavač se pobudjuje strujnim generatorom J_g unutrašnje odvodnosti G_g a opterećen je potrošačem otpornosti R_p . Generator za određivanje izlazne otpornosti je u ovom slučaju naponski (U_p) i dodat je redno potrošaču. Iz istih razloga, u ovom slučaju treba potražiti strujno pojačanje, ulaznu odvodnost i izlaznu otpornost pojačavača.

$$(1.8.1) \quad A_{sr} = \frac{A_{s0}}{1 - B \cdot A_{s0}}.$$

$$(1.8.2) \quad G_{up} = G_{u0} \cdot (1 - B \cdot A_{s0}) - G_g;$$

$$(1.8.3) \quad R_{izp} = R_{iz0} \cdot (1 - B \cdot A_{s0}) - R_p,$$

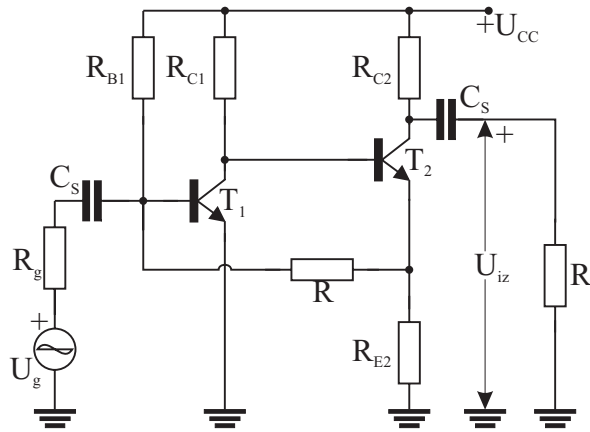
gde je:

$$(1.8.4) \quad G_{u0} = g_{11a} + g_{11r} + G_g;$$

$$(1.8.5) \quad R_{iz0} = g_{22a} + g_{22r} + R_p.$$

1.9. ZADATAK

Elementi pojačavača sa slike (Slika 1.9.1) imaju sledeće vrednosti: $R_{C1} = 3 \text{ k}\Omega$; $R_{B1} = 100 \text{ k}\Omega$; $R_{C2} = 500 \text{ }\Omega$; $R_{E2} = 50 \text{ }\Omega$; $R = R_g = 1,2 \text{ k}\Omega$; $R_p = 1 \text{ k}\Omega$, $C_s \rightarrow \infty$. Upotrebljeni su identični tranzistori sa parametrima: $h_{11E} = 1,1 \text{ k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = 50$; $h_{22E} = 0 \text{ S}$. Odrediti naponsko pojačanje pojačavača ($A = U_{iz}/U_g$), ulaznu i izlaznu otpornost.



Slika 1.9.1

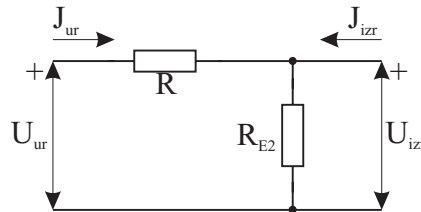
REŠENJE:

Kako se može videti sa slike (Slika 1.9.1), reč je o pojačavaču sa paralelnom-strujnom negativnom povratnom spregom. Kolo povratne sprege je za ovaj slučaj prikazano na slici Slika 1.9.2 a njegovi g-parametri imaju sledeće vrednosti:

$$(1.9.1) \quad g_{11r} = J_{ur} / U_{ur} \Big|_{J_{izr}=0} = 1 / (R + R_{E2}) = 0,8 \text{ mS};$$

$$(1.9.2) \quad g_{22r} = U_{izr} / J_{izr} \Big|_{U_{ur}=0} = R_{E2} \parallel R = 48 \Omega;$$

$$(1.9.3) \quad g_{12r} = J_{ur} / J_{izr} \Big|_{U_{ur}=0} = -R_{E2} / (R_{E2} + R) = -0,04.$$



Slika 1.9.2

Koeficijent povratne sprege je onda jednak:

$$(1.9.4) \quad B = -g_{12r} = 0,04.$$

Slika (Slika 1.9.3) prikazuje kolo pojačavača bez povratne sprege. Njegovo strujno pojačanje je:

$$(1.9.5) \quad A_{s0} = \frac{J_{iz}}{J_g} = \frac{J_{iz}}{J_{C2}} \cdot \frac{J_{C2}}{J_{B2}} \cdot \frac{J_{B2}}{J_{C1}} \cdot \frac{J_{C1}}{J_{B1}} \cdot \frac{J_{B1}}{J_g}$$

$$= \frac{R_{C2}}{R_{C2} + R_p} \cdot h_{21E} \cdot \frac{-R_{C1}}{R_{C1} + R_{u2}} \cdot h_{21E} \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{11E}}$$

gde su R_B i R_{u2} sledeće otpornosti:

$$(1.9.6) \quad R_B = R_g \parallel (R + R_{E2}) = 612 \Omega;$$

$$(1.9.7) \quad R_{u2} = h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot (R \parallel R_{E2}) = 3,55 k\Omega.$$

Zamenom brojnih vrednosti u izraz (1.9.5) dobija se da je:

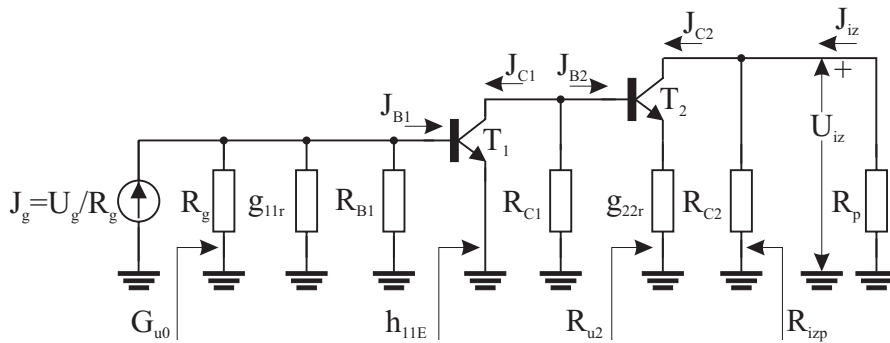
$$(1.9.8) \quad A_{s0} = -135,8.$$

Strujno pojačanje pojačavača sa povratnom spregom je onda:

$$(1.9.9) \quad A_{sr} = \frac{A_{s0}}{1 - B \cdot A_{s0}} = -21,$$

dok je naponsko:

$$(1.9.10) \quad A_n = \frac{U_{iz}}{U_g} = - \frac{R_p \cdot J_{iz}}{R_g \cdot J_g} = - \frac{R_p}{R_g} \cdot A_{sr} = 17,4.$$



Slika 1.9.3

Kako je odvodnost koju vidi generator J_g u kolu sa slike (Slika 1.9.3) jednaka:

$$(1.9.11) \quad G_{u0} = 1/R_g + 1/(R + R_{E2}) + 1/R_{B1} + 1/h_{11E} = 2,54 \text{ mS},$$

ulaznu otpornost pojačavača sa povratnom spregom je moguće izračunati na sledeći način:

$$(1.9.12) \quad G_{up} = (1/R_g + 1/(R + R_{E2}) + 1/h_{11E}) \cdot (1 - B \cdot A_{s0}) - 1/R_g.$$

$$(1.9.13) \quad R_{up} = 1/G_{up} = 23 \Omega.$$

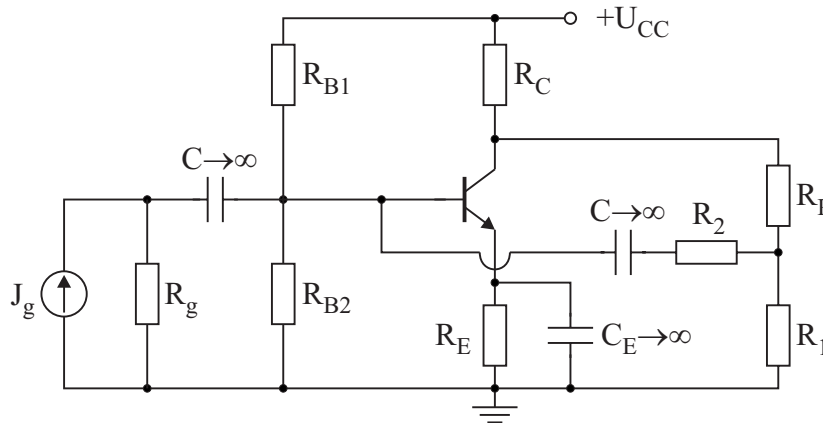
Izlazna otpornost pojačavača sa slike (Slika 1.9.1) jednaka je paralelnoj vezi izlazne otpornosti drugog pojačavačkog stepena i otpornika R_{C2} . Kako je izlazna otpornost drugog pojačavačkog stepena beskonačna to je izlazna otpornost pojačavača:

$$(1.9.14) \quad R_{izp} = R_{C2} = 500 \Omega.$$

1.10. ZADATAK

Odrediti kružno pojačanje pojačavače sa slike (Slika 1.10.1).

Poznato je: $R_{B1} = R_{B2} \gg R_g = 2\text{k}\Omega$; $R_C = 2\text{k}\Omega$; $R_P = 1\text{k}\Omega$; $R_1 = 2\text{k}\Omega$; $R_2 = 1\text{k}\Omega$; $h_{11E} = 2\text{k}\Omega$; $h_{21E} = 200$; $h_{12E} = 0$; $h_{22E} = 0\text{S}$.



Slika 1.10.1

REŠENJE:

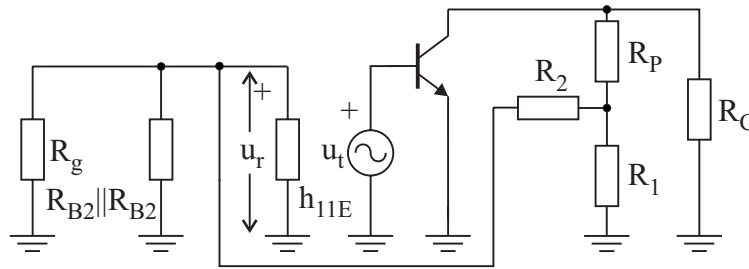
Postupak određivanja kružnog pojačanja βA sastoji se u sledećem:

1. Uočiti βA krug i smer toka signala
2. Ukinuti nezavisne generatore
3. Preseći βA krug na pogodnom mestu
4. Povezati test generator u smeru toka signala
5. Izračunati impedansu koju vidi test generator
6. Priključiti izračunatu impedansu sa druge strane preseka
7. Izračunati napon na test impedansi u_r prema istom referentnom smeru kao što je smer test generatora
8.
$$\beta A = \frac{u_r}{u_t}$$

Navedeni algoritam primenićemo na konkretnom primeru.

βA krug treba prekinuti na pogodnom mestu. S obzirom na to da ćemo u tački prekida da povežemo generator, i da će biti neophodno odrediti impedansu koju taj generator vidi, najbolje je izabrati tačku gde će to određivanje impedanse biti što jednostavnije. U ovom slučaju znamo da je ulazna impedansa tranzistora sa zajedničkim emitorom jednaka h_{11E} , tako da ćemo prekinuti kolo na bazi tranzistora.

Nakon prekidanja kola, ukidanja pobude, povezivanja test generatora i impedanse koju on vidi, dobija se kolo prikazano na slici (Slika 1.10.2).



Slika 1.10.2

Ako uvedemo oznaku:

$$(1.10.1) \quad R_{EK} = R_C \parallel (R_P + (R_1 \parallel (R_2 + R_g \parallel h_{11E}))) = 1k\Omega$$

za kružno pojačanje se dobija:

$$(1.10.2) \quad \begin{aligned} \beta A &= \frac{u_r}{u_t} \\ &= \frac{R_g \parallel h_{11E}}{R_g \parallel h_{11E} + R_2} \frac{(R_2 + R_g \parallel h_{11E}) \parallel R_1}{(R_2 + R_g \parallel h_{11E}) \parallel R_1 + R_P} \left(-\frac{h_{21E} R_{EK}}{h_{11E}} \right) \\ &= -25 \end{aligned}$$

2. DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ

2.1. ZADATAK:

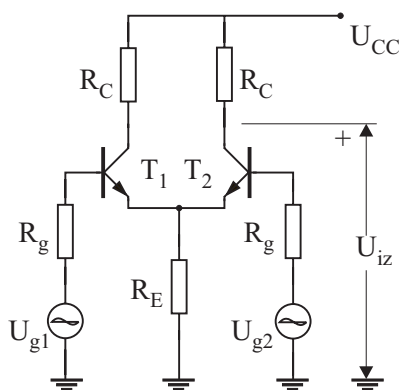
Za diferencijalni pojačavač sa nesimetričnim izlazom prikazan na slici (Slika 2.1.1) odrediti:

e) diferencijalno pojačanje $A_d = U_{iz}/(U_{g1} - U_{g2})$,

f) pojačanje srednje vrednosti signala $A_c = U_i/[(U_{g1} + U_{g2})/2]$,

g) faktor potiskivanja $\rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$.

Parametri tranzistora su $h_{11E} = 1 \text{ k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = 100$; $h_{22E} = 0 \text{ S}$; $R_g = 1 \text{ k}\Omega$; $R_C = 5 \text{ k}\Omega$; $R_E = 2,5 \text{ k}\Omega$.



Slika 2.1.1

REŠENJE:

a) Ukupan izlazni napon je:

$$(2.1.1) \quad U_i = A_d \cdot (U_{g1} - U_{g2}) + A_c \cdot (U_{g1} + U_{g2})/2.$$

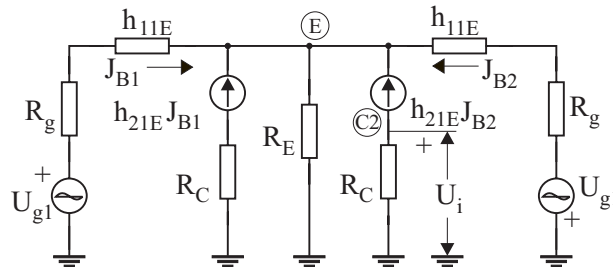
Kako je diferencijalni pojačavač sa gornje slike simetričan, analizu možemo uprostiti tako što ćemo primeniti nesimetričnu pobudu, $U_{g1} = -U_{g2}$, i u tom slučaju je:

$$(2.1.2) \quad A_d = U_i/(2 \cdot U_{g1}).$$

Ekvivalentna šema za ovaj slučaj data je na slici (Slika 2.1.2). Napišimo jednačine za čvorove (E) i (C2):

$$(2.1.3) \quad E: \quad -(1 + h_{21E}) \cdot J_{B1} + U_E/R_E - (1 + h_{21E}) \cdot J_{B2} = 0$$

$$(2.1.4) \quad C2: \quad U_i/R_C + h_{21E} \cdot J_{B1} = 0 \Rightarrow U_{iz} = -h_{21E} \cdot R_C \cdot J_{B1}$$



Slika 2.1.2

Ukoliko uvedemo oznaku $R_B = R_g + h_{11E}$, tada za bazne struje možemo da pišemo:

$$J_{B1} = (U_{g1} - U_E)/R_B, \quad J_{B2} = (-U_{g1} - U_E)/R_B.$$

Zamenom u (2.1.3) dobija se da je $U_E=0$ V, odakle sledi da je $J_{B2} = -U_{g1}/R_B$. Na osnovu (2.1.4) sledi da je:

$$(2.1.5) \quad U_{iz} = -h_{21E} \cdot R_C \cdot U_{g1}/R_B,$$

što znači da je:

$$(2.1.6) \quad A_d = \frac{U_{iz}}{2 \cdot U_{g1}} = -\frac{R_C \cdot h_{21E}}{2 \cdot (R_g + h_{11E})} = -125.$$

b) Pojačanje srednje vrednosti signala ćemo naći primenom simetrične pobude na ulazima, tj. $U_{g1}=U_{g2}=U_g$. Sada će ekvivalentna šema biti identična onoj sa slike (Slika 2.1.2), s tim što je polarizacija U_{g1} na bazi T_2 suprotna u odnosu na onu sa slike. Za pojačanje srednje vrednosti važiće sledeći izraz

$$(2.1.7) \quad A_c = U_{iz}/U_{g1}.$$

Sada je očigledno da je $J_{B1} = J_{B2} = (U_{g1} - U_E)/R_B$, što zamenom u jednačine (2.1.3) i (2.1.4) daje U_{iz} u funkciji od U_{g1} , odakle je pojačanje srednje vrednosti signala:

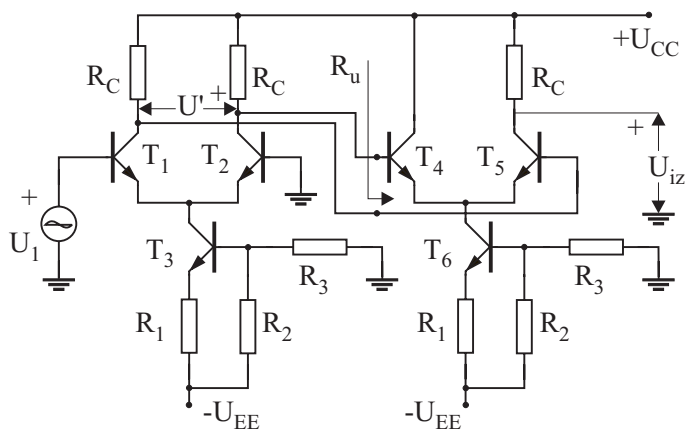
$$(2.1.8) \quad A_c = -\frac{R_C \cdot h_{21E}}{R_g + h_{11E} + 2 \cdot R_E \cdot (1 + h_{21E})} = -1.$$

c) Faktor potiskivanja se sada jednostavno nalazi kao:

$$(2.1.9) \quad \rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 1 + \frac{R_E}{R_g + h_{11E}} \cdot (1 + h_{21E}) = 126,75.$$

2.2. ZADATAK

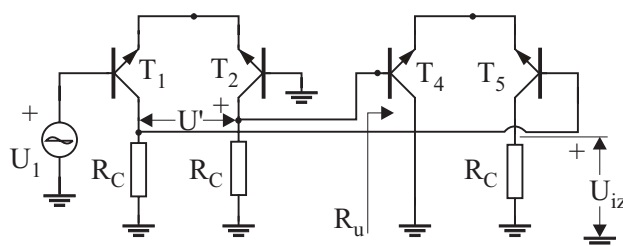
Na slici (Slika 2.2.1) je prikazan dvostepeni pojačavač sa diferencijalnim pojačavačem. Odrediti ukupno pojačanje pojačavača ako su parametri svih tranzistora jednaki i ako je $h_{11E} = 5 \text{ k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = 50$; $h_{22E} = 0 \text{ S}$. Poznato je: $R_C = 5 \text{ k}\Omega$.



Slika 2.2.1

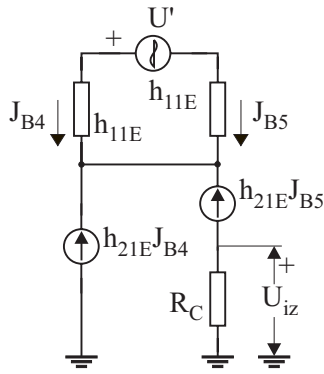
REŠENJE:

Tranzistori T_3 i T_6 nemaju pojačavačko svojstvo, već kao izvori konstantne struje igraju ulogu velike dinamičke impedanse. U ekvivalentnoj šemi kola za naizmenične signale ove tranzistore izostavljamo s obzirom da predstavljaju prekid u kolu. Kolo za naizmeičnu struju prikazano je na slici (Slika 2.2.2).

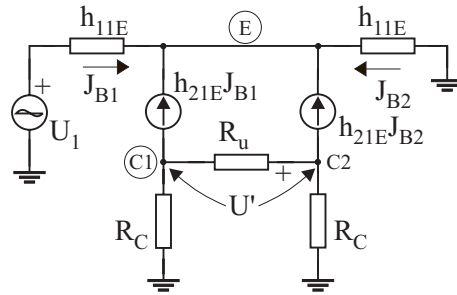


Slika 2.2.2

Ekvivalentno kolo drugog stepena (kada se zamene modeli tranzistora) na čijem ulazu je napon U' , dato je na slici (Slika 2.2.3).



Slika 2.2.3



Slika 2.2.4

Sa gornje slike je očigledno da je:

$$(2.2.1) \quad J_{B4} = -J_{B5} = U' / (2h_{11E})$$

$$(2.2.2) \quad U_2 = -R_C \cdot h_{21E} \cdot J_{B5} = (R_C \cdot h_{21E}) / (2h_{11E}) \cdot U'$$

odakle se nalazi naponsko pojačanje drugog stepena:

$$(2.2.3) \quad A_{n2} = U_2 / U' = (h_{21E} \cdot R_C) / (2h_{11E}).$$

Ekvivalentna šema prvog stepena, ako se pretpostavi da je za emitore vezana velika otpornost, data je na slici (Slika 2.2.4). Sa R_u je označena otpornost narednog stepena i ona iznosi $R_u = 2h_{11E}$. Sistem jednačina čvorova za tri nepoznata napona ovog kola glasi:

$$(2.2.4) \quad E: \quad -(1 + h_{21E}) \cdot J_{B1} - (1 + h_{21E}) \cdot J_{B2} = 0;$$

$$(2.2.5) \quad C1: \quad U_{C1} / R_C + (U_{C1} - U_{C2}) / R_u + h_{21E} \cdot J_{B1} = 0;$$

$$(2.2.6) \quad C2: \quad U_{C2} / R_C + (U_{C2} - U_{C1}) / R_u + h_{21E} \cdot J_{B2} = 0.$$

Iz jednačine (2.2.4) sledi da je $J_{B1} = -J_{B2}$, a tada je $U_E = U_1 / 2$, odnosno $J_{B1} = U_1 / (2h_{11E})$. Imajući ovo u vidu, uz notaciju $U' = U_{C2} - U_{C1}$, rešavanjem (2.2.5) i (2.2.6) po U' dobija se:

$$(2.2.7) \quad U' = \frac{R_C \cdot R_u}{2R_C + R_u} \cdot \frac{h_{21E}}{h_{11E}} \cdot U_1,$$

odakle sledi:

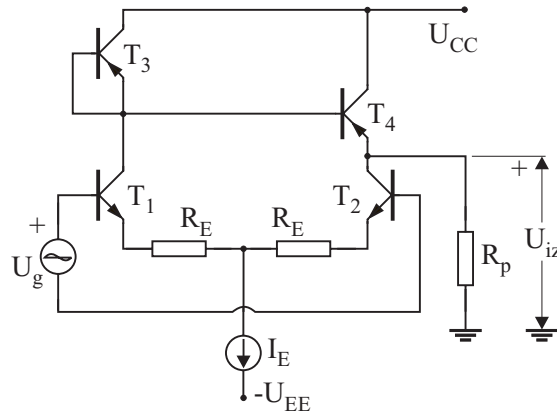
$$(2.2.8) \quad A_1 = U' / U_1 = h_{21E} \cdot R_C / (R_C + h_{11E}).$$

Ukupno pojačanje je:

$$(2.2.9) \quad A = A_1 \cdot A_2 = \frac{(h_{21E} \cdot R_C)^2}{2h_{11E} \cdot (h_{11E} + R_C)}.$$

2.3. ZADATAK

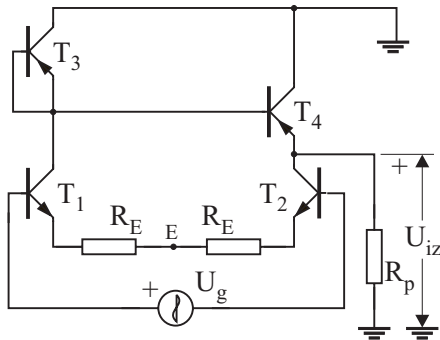
Odrediti naponsko pojačanje $A = U_{iz}/U_g$ diferencijalnog pojačavača sa slike (Slika 2.3.1). Parametri svih tranzistora su jednaki i iznose $h_{11E} = 1 \text{ k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = 100$; $h_{22E} = 0 \text{ S}$. Elementi kola su $R_E = 50 \Omega$; $R_p = 1 \text{ k}\Omega$.



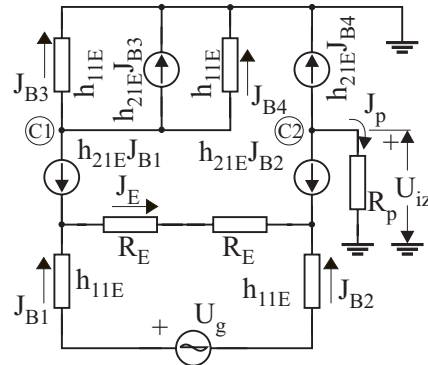
Slika 2.3.1

REŠENJE:

Kolo za naizmeničnu struju prikazano je na slici (Slika 2.3.2). Po zameni ekvivalentnog h-modela za bipolarne tranzistore šema za analizu naizmeničnog režima transformiše se u šemu sa slike (Slika 2.3.3).



Slika 2.3.2



Slika 2.3.3

Mogu se uočiti sledeće relacije

$$(2.3.1) \quad J_{B1} = -J_{B2} ,$$

$$(2.3.2) \quad J_{B3} = J_{B4} = U_{C1}/h_{11E} .$$

Kako je $J_E = (1+h_{21E})J_{B1}$, primenom II Kirhofovog zakona na konturu u dnu šeme, dobija se:

$$(2.3.3) \quad U_g = 2 \cdot J_{B1} \cdot [h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot R_E] ,$$

te se, uz kombinaciju sa (2.3.1), za struju J_{B2} ima:

$$(2.3.4) \quad J_{B2} = -U_g / \{2 \cdot [h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot R_E]\}.$$

Iz jednačine za čvor C_1 se dobija:

$$(2.3.5) \quad C_1: (h_{21E} + 2)J_{B4} + h_{21E}J_{B1} = 0 \Rightarrow J_{B4} = h_{21E}J_{B2} / (h_{21E} + 2).$$

Sada se za struju kroz potrošač može pisati (čvor C_2):

$$(2.3.6) \quad C_2: J_p = -h_{21E} \cdot (J_{B2} + J_{B4}) = -\frac{2 \cdot h_{21E} \cdot (h_{21E} + 1)}{h_{21E} + 2} \cdot J_{B2}.$$

Izlazni napon je jednak padu napona koji stvara struja J_p na otporniku R_p . Dakle, naponsko pojačanje je:

$$(2.3.7) \quad A = U_p / U_g = R_p \cdot J_p / U_g.$$

Smenom (2.3.6) u prethodni izraz, uz respektovanje (2.3.4) pojačanje postaje:

$$(2.3.8) \quad A = h_{21E} \cdot \frac{(h_{21E} + 1) \cdot R_p}{(h_{21E} + 2) \cdot [h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot R_E]} = 16,4.$$

2.4. ZADATAK

Za kolo diferencijalnog pojačavača sa slike (Slika 2.4.1) odrediti:

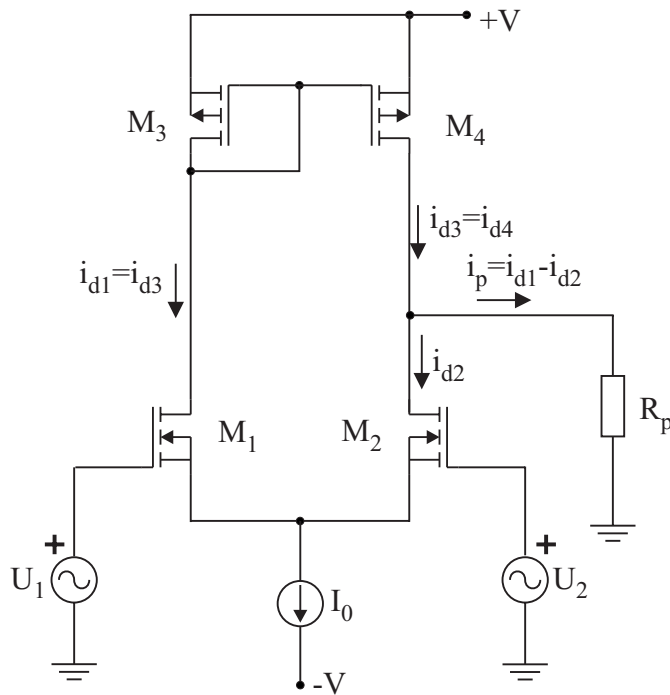
h) strmine svih tranzistora u kolu

i) diferencijalno pojačanje $A_d = \frac{U_i}{U_1 - U_2}$

Poznato je:

$$A_1 = A_2 = 2,5 \text{ mA/V}^2; A_3 = A_4 = 0,625 \text{ mA/V}^2 \quad R_p = 10 \text{ k}\Omega; I_0 = 200 \mu\text{A}.$$

Izlazna otpornost tranzistora je velika i može se zanemariti. Tranzistori M_1 i M_2 su identični, takođe tranzistori M_3 i M_4 su identični.



Slika 2.4.1

REŠENJE:

Za kolo diferencijalnog pojačavača sa slike (zadatak 2.1) izlazni napon je $U_{iz} = R_C(i_{C1} - i_{C2})$. U većini slučajeva potreban je jedan izlaz (asimetrični izlaz) i u tom slučaju imamo da je izlazni napon $U_{iz} = R_C i_{C1}$ pa imamo dva puta manje pojačanje (naizmenične komponente struje tranzistora T_1 i T_2 su u protiv fazi). Da bi koristili jedan izlaz a da pri tom ne smanjimo pojačanje umesto otpornika kao opterećenje u kolu kolektora (drejna) koristi se strujno ogledalo. Sa slike (Slika 2.4.1) struje drejna tranzistora $i_{d1} = i_{d3}$; $i_{d3} = i_{d4}$ i $i_{d2} = i_{d4}$ struja kroz potrošač je $i_p = i_{d4} - i_{d2} = i_{d1} - i_{d2}$. Izlazni napon je $U_{iz} = R_p(i_{d1} - i_{d2})$ kao i kod simetričnog izlaza.

REŠENJE:

a) Strminu računamo po formuli: $S = 2\sqrt{I_D A}$

Za jednosmerni režim naizmenični generatori su kratak spoj. Oba N-kanalna tranzistora imaju iste napone između gejta i sorsa, isto A i isti napon praga, pa zaključujemo da imaju iste struje drejna. Kako je $I_{D1} = I_{D2}$; $I_{D1} = I_{D3}$; i $I_{D2} = I_{D4}$ zaključujemo da svi tranzistori imaju istu struju drejna i ona je jednaka $I_0/2 = 100 \mu A$.

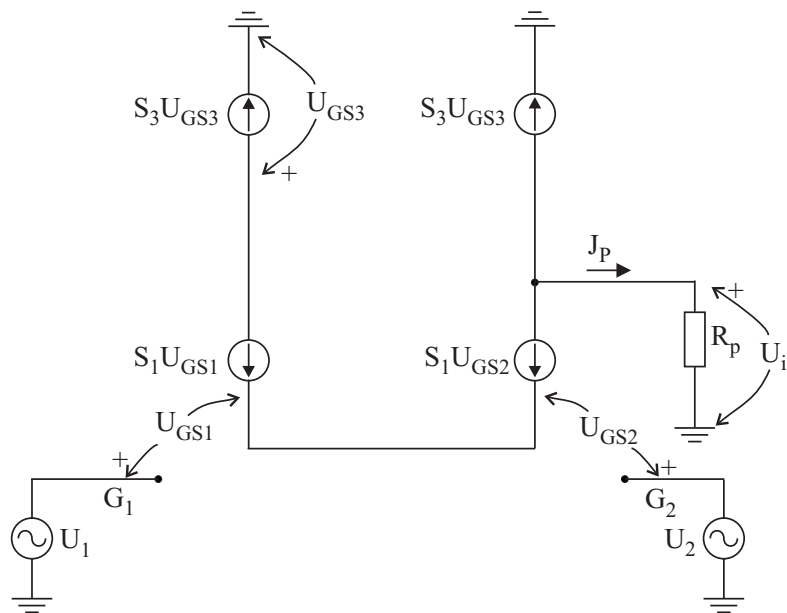
Dakle, strmine tranzistora su:

$$(2.4.1) \quad S_1 = S_2 = 2\sqrt{I_0 A_1 / 2} = 1 \text{ mS}$$

$$(2.4.2) \quad S_3 = S_4 = 2\sqrt{I_0 A_3 / 2} = 0,5 \text{ mS}$$

b) S obzirom da su tranzistori M_3 i M_4 vezani u strujno ogledalo važi:

$$(2.4.3) \quad U_{GS3} = U_{GS4}$$



Slika 2.4.2

Za izlazni čvor važi:

$$(2.4.4) \quad J_P = -(S_1 U_{GS2} + S_3 U_{GS3})$$

Za čvor drejna tranzistora M_1 važi:

$$(2.4.5) \quad S_1 U_{GS1} = -S_3 U_{GS3}$$

Dobijamo da je:

$$(2.4.6) \quad J_P = -(S_1 U_{GS2} - S_1 U_{GS1})$$

Sa slike je:

$$(2.4.7) \quad U_{GS1} - U_{GS2} = U_1 - U_2$$

Konačno je:

$$(2.4.8) \quad U_i = J_P R_p = S_1 (U_1 - U_2) R_p$$

odakle za pojačanje dobijamo:

$$(2.4.9) \quad A_d = \frac{U_i}{U_1 - U_2} = S_1 R_p = 10$$

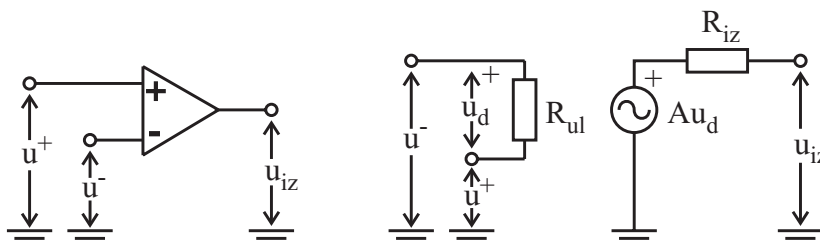
3. OPERACIONI POJAČAVAČ

3.1. ZADATAK

Navesti model operacionog pojačavača. Navesti osobine idealnog i tipičnog realnog operacionog pojačavača. Izvesti pravila za rešavanje kola sa idealnim operacionim pojačavačima.

REŠENJE:

Pojednostavljeni model realnog operacionog pojačavača prikazan je na slici (Slika 3.1.1).



Slika 3.1.1

Operacioni pojačavač se najčešće modeluje pomoću ulazne otpornosti R_{ul} , izlazne otpornosti R_{iz} i pojačanja pri neopterećenom pojačavaču A .

Pojačanje operacionog pojačavača je frekvencijski zavisno, što se često aproksimira sa:

$$(3.1.1) \quad A(jf) = \frac{A_0}{1 + jf/f_g}$$

gde je sa f_g označena gornja granična frekvencija.

Osobine idealnog operacionog pojačavača i tipične veličina modela kod realnog operacionog pojačavača date su u tabeli (Tabela 3.1.1).

Kod idealnog operacionog pojačavača ($R_{iz} \rightarrow \infty$) važi $u_{iz} = A \cdot u_d$. S obzirom na to da važi $A \rightarrow \infty$, da bi se dobila konačna vrednost izlaznog napona, mora da važi $u_d \rightarrow 0$. Dakle, između ulaznih priključaka idealnog operacionog pojačavača ne postoji razlika potencijala.

S obzirom na to da je ulazna otpornost idealnog operacionog pojačavača beskonačna, može da se zaključiti da su ulazne struje jednake nuli.

S obzirom na to da je izlaz idealnog operacionog pojačavača zapravo vezan u modelu za idealni naponski generator, za izlazni čvor operacionog pojačavača ne sme se pisati jednačina po metodu potencijala čvorova.

Tabela 3.1.1

	Idealni OP	Realni OP
R_{ul}	$\rightarrow \infty$	$\sim M\Omega$
R_{iz}	$\rightarrow 0$	$\sim 50 \Omega$
A_0	$\rightarrow \infty$	$\sim 10^5$
f_g	$\rightarrow \infty$	$\sim 10 \text{ Hz}$

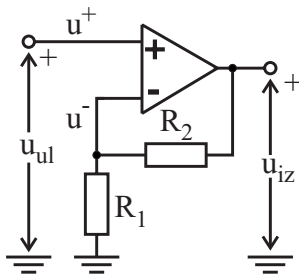
3.2. ZADATAK

Odrediti pojačanje:

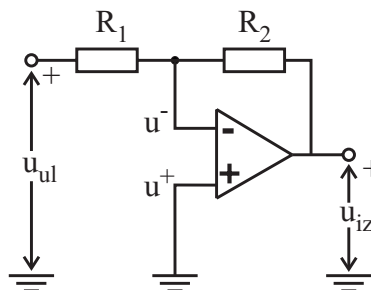
j) neinvertujućeg pojačavača (Slika 3.2.1);

k) invertujućeg pojačavača (Slika 3.2.2).

Upotrebjeni operacioni pojačavači su idealni.



Slika 3.2.1



Slika 3.2.2

REŠENJE:

a) S obzirom na to da ne postoji razlika napona između ulaznih priključaka idealnog operacionog pojačavača može se zaključiti da važi:

$$(3.2.1) \quad u^- = u^+ = u_{ul}$$

Struja koja protiče kroz otpornik R_1 iznosi:

$$(3.2.2) \quad I_{R1} = \frac{u^-}{R_1} = \frac{u_{ul}}{R_1}$$

S obzirom na to da je ulazna struja operacionog pojačavača jednaka nuli, zaključujemo da je $I_{R2} = I_{R1}$, odnosno da je izlazni napon

$$(3.2.3) \quad u_{iz} = (R_2 + R_1)I_{R1} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} u_{ul}$$

odakle se za pojačanje dobija:

$$(3.2.4) \quad A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

b) S obzirom na to da ne postoji razlika potencijala između ulaznih priključaka idealnog operacionog pojačavača može se zaključiti

$$(3.2.5) \quad u^+ = 0 \Rightarrow u^- = 0$$

Za struju koja protiče kroz otpornik R_1 važi:

$$(3.2.6) \quad I_{R1} = \frac{u_{ul} - u^-}{R_1} = \frac{u_{ul}}{R_1}$$

S obzirom na to da je ulazna struja operacionog pojačavača jednaka nuli, zaključujemo da je $I_{R2} = I_{R1}$, odnosno da je izlazni napon

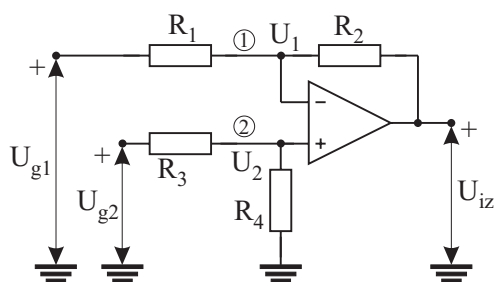
$$(3.2.7) \quad u_{iz} = -R_2 I_{R2} + u^- = -\frac{R_2}{R_1} u_{ul}$$

odakle se za pojačanje dobija:

$$(3.2.8) \quad A = -R_2/R_1$$

3.3. ZADATAK

Za realizaciju diferencijalnog pojačavača (kola za oduzimanje) upotrebom jednog pojačavača koristi se šema prikazana na slici (Slika 3.3.1). Odrediti uslove koje moraju zadovoljiti elementi ovog kola da bi izlazni napon bio srazmeran razlici ulaznih napona. Upotrebljeni operacioni pojačavač je idealni.



Slika 3.3.1

REŠENJE:

Za čvorove U_1 i U_2 pojačavača sa slike (Slika 3.3.1) može se napisati sledeći sistem jednačina:

$$(3.3.1) \quad (U_1 - U_{g1})/R_1 + (U_1 - U_{iz})/R_2 = 0;$$

$$(3.3.2) \quad (U_2 - U_{g2})/R_3 + U_2/R_4 = 0.$$

Za operacioni pojačavač sa beskonačnim pojačanjem važi relacija:

$$(3.3.3) \quad U_1 = U_2.$$

Rešavanjem navedenog sistema jednačina uz korišćenje relacije (3.3.3) dobija se izraz za izlazni napon:

$$(3.3.4) \quad U_{iz} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{g2} - \frac{R_2}{R_1} U_{g1}.$$

Treba napomenuti da smo traženi izraz za izlazni napon mogli mnogo jednostavnije da dobijemo primenom principa superpozicije. Ovaj način će biti opisan u nastavku.

Na osnovu ovog principa, ukupni izlazni napon može da se dobije kao zbir doprinosa generatora U_{g1} i U_{g2} .

Doprinos generatora U_{g1} dobićemo pod uslovom da ukinemo generator U_{g2} , odnosno da uvedemo $U_{g2} = 0$. Za generator U_{g1} ova sprega predstavlja invertujući pojačavač, pa je doprinos ovog generatora jednak:

$$(3.3.5) \quad U_{iz}|_{U_{g2}=0} = -\frac{R_2}{R_1} U_{g1}.$$

Doprinos generatora U_{g2} dobićemo pod uslovom da ukinemo generator U_{g1} , odnosno da uvedemo $U_{g1} = 0$. Za generator U_{g2} ova sprega predstavlja neinvertujući pojačavač, pa je doprinos ovog generatora jednak:

$$(3.3.6) \quad U_{iz}|_{U_{g1}=0} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{g2}.$$

Ukupni izlazni napon jednak je zbiru pojedinačnih doprinosa, čime se dobija izraz (3.3.4).

Izraz za izlazni napon može da se napiše u obliku:

$$(3.3.7) \quad U_{iz} = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_4}{R_2} \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} U_{g2} - U_{g1} \right).$$

Da bi kolo sa slike (Slika 3.3.1) predstavljalo diferencijalni balansni pojačavač koeficijenti uz U_{g1} i U_{g2} u ovom izrazu moraju biti jednaki, čime se definiše potreban odnos otpornika u kolu:

$$(3.3.8) \quad \frac{R_4}{R_2} \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} = 1, \text{ odnosno } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}.$$

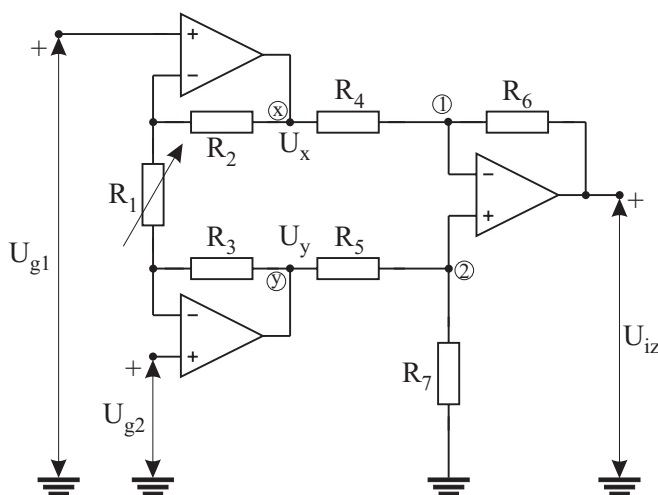
U tom slučaju je napon na izlazu diferencijalnog balansnog pojačavača proporcionalan razlici ulaznih napona i dat je izrazom:

$$(3.3.9) \quad U_{iz} = \frac{R_2}{R_1} (U_{g2} - U_{g1}) = A_{db} (U_{g2} - U_{g1}),$$

gde je konstanta proporcionalnosti (pojačanje diferencijalnog balansnog pojačavača) označena sa A_{db} .

3.4. ZADATAK

Za kolo instrumentacionog pojačavača sa slike (Slika 3.4.1) odrediti pojačanje definisano kao $A = U_{iz} / (U_{g1} - U_{g2})$. Upotrebljeni operacioni pojačavači su idealni. Poznato je $R_1 = 0,2k\Omega$, $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10k\Omega$.



Slika 3.4.1

REŠENJE:

Instrumentacioni pojačavač je kolo sa velikom ulaznom impedansom koje se veoma često koristi u elektronskim mernim instrumentima. Za ovo kolo mogu se napisati sledeći izrazi koji su izvedeni iz jednačina čvorova:

Za čvor (x)

$$(3.4.1) \quad U_x = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{g1} - \frac{R_2}{R_1} U_{g2},$$

Za čvor (y)

$$(3.4.2) \quad U_y = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) U_{g2} - \frac{R_3}{R_1} U_{g1},$$

Za čvorove (1) i (2)

$$(3.4.3) \quad U_{iz} = -\frac{R_6}{R_4} U_x + \left(1 + \frac{R_6}{R_4}\right) \frac{R_7}{R_5 + R_7} U_y.$$

Smenom izraza (3.4.1) i (3.4.2) u (3.4.3) dobija se

$$(3.4.4) \quad U_{iz} = \left[\frac{R_2 R_6}{R_1 R_4} + \frac{R_7}{R_5 + R_7} \left(1 + \frac{R_6}{R_4}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \right] U_{g2} - \left[\frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{R_3}{R_1} \frac{R_7}{R_5 + R_7} \left(1 + \frac{R_6}{R_4}\right) \right] U_{g1}$$

Ukoliko se usvoji da je $R_2=R_3$, $R_4=R_5=R_6=R_7$ dobija se znatno uprošćen izraz za izlazni napon koji je proporcionalan razlici ulaznih napona:

$$(3.4.5) \quad U_{iz} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (U_{g2} - U_{g1}) = A_{ip} (U_{g2} - U_{g1}),$$

sa konstantom proporcionalnosti (pojačanje instrumentacionog pojačavača) A_{ip} . Očigledno je da se pojačanje unstrumentacionog pojačavača može menjati promenom samo jednog otpornika u kolu (R_1).

Na osnovu zadatih brojnih vrednosti dobija se:

$$(3.4.6) \quad A_{ip} = 101$$

3.5. ZADATAK

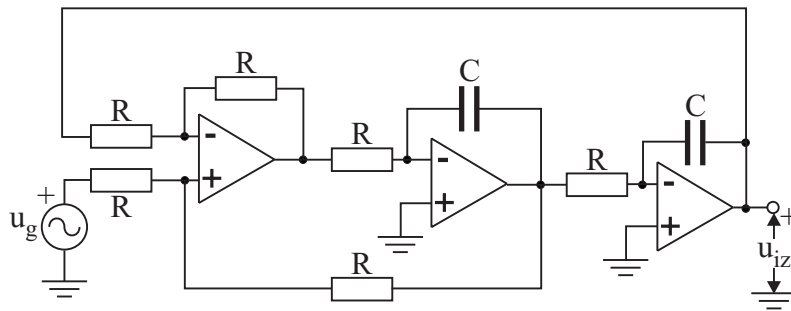
Za kolo aktivnog filtra sa slike (Slika 3.5.1):

$$l) \text{ Odrediti prenosnu funkciju: } H(s) = \frac{U_{iz}(s)}{U_g(s)}.$$

m) Odrediti vrednost otpornika R tako da je na frekvenciji $f = 1\text{kHz}$ moduo prenosne funkcije $|H(j\omega)|[\text{dB}] = -5\text{dB}$.

n) Skicirati asimptotsku aproksimaciju modula i faznu karakteristiku prenosne funkcije.

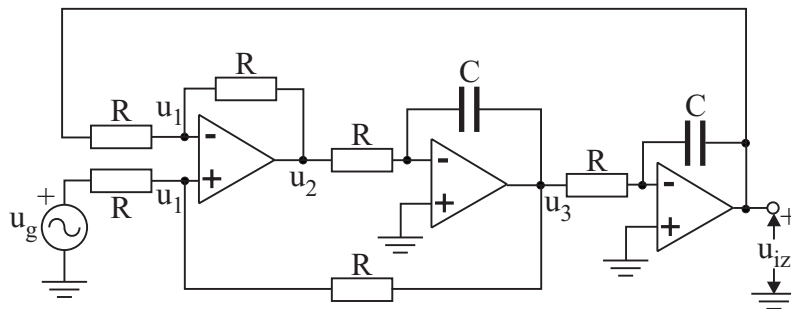
Poznato je $C = 10\text{nF}$. Operacioni pojačavači su idealni.



Slika 3.5.1

REŠENJE:

a) Sistem jednačina kojim se opisuje kolo je:



Slika 3.5.2

$$(3.5.1) \quad u_1 \left(\frac{2}{R} \right) - u_{iz} \frac{1}{R} - u_2 \frac{1}{R} = 0$$

$$(3.5.2) \quad u_1 \left(\frac{2}{R} \right) - u_g \frac{1}{R} - u_3 \frac{1}{R} = 0$$

$$(3.5.3) \quad -u_2 \frac{1}{R} - u_3 sC = 0$$

$$(3.5.4) \quad -u_3 \frac{1}{R} - u_{iz} sC = 0$$

Na osnovu ovih jednačina dobija se:

$$(3.5.5) \quad H(s) = \frac{1}{1 + sCR + (sCR)^2}$$

b) Iz uslova $|H(j\omega)|[\text{dB}] = -5\text{dB}$ dobija se:

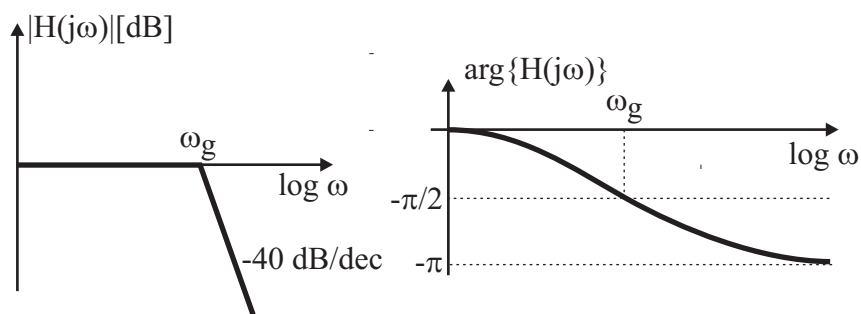
$$(3.5.6) \quad |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\omega CR)^2)^2 + (\omega CR)^2}} = 10^{-5/20}$$

odakle se dobija:

$$(3.5.7) \quad \omega CR = 1,435, \text{ odnosno } R = \frac{1,435}{2\pi fC} = 2,3k\Omega$$

c) Asimptotska aproksimacija amplitude i fazna karakteristika prenosne funkcije prikazane su na slici (Slika 3.5.3)

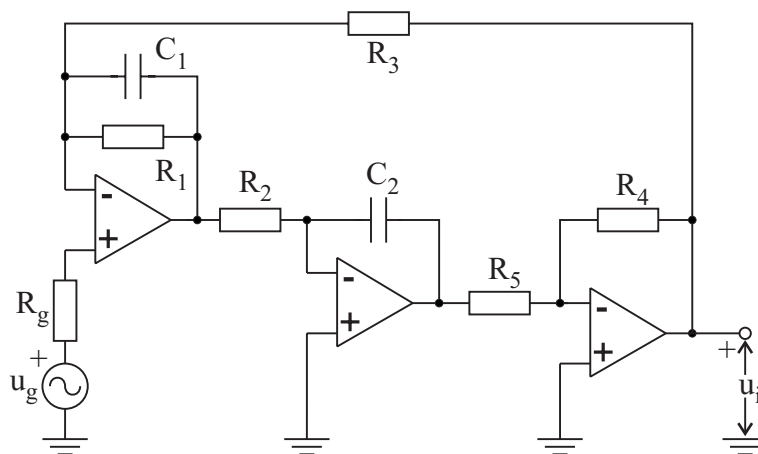
$$(3.5.8) \quad \omega_g = \frac{1}{RC} = 4,3 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$



Slika 3.5.3

3.6. ZADATAK

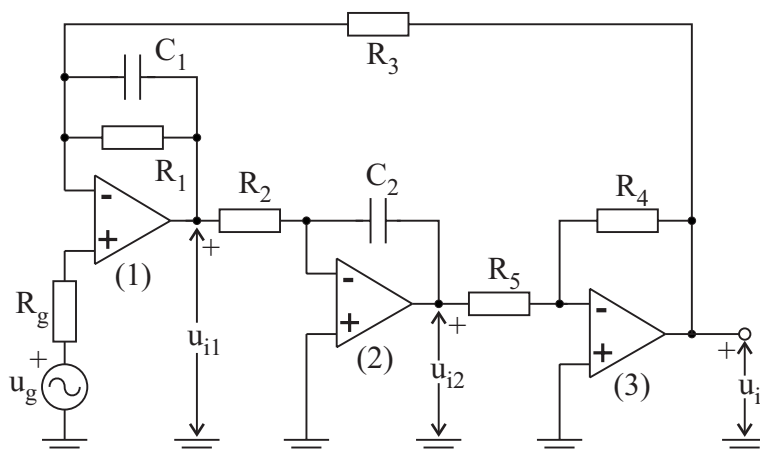
Za kolo aktivnog filtra sa slike (Slika 3.6.1) odrediti prenosnu funkciju $H(s) = u_i(s)/u_g(s)$.



Slika 3.6.1

REŠENJE:

Prenosnu funkciju ovog aktivnog filtra možemo, kao u prethodnom zadatku, odrediti tako što ćemo postaviti sistem jednačina koje opisuju ovo kolo. U ovom primeru ćemo, međutim, rešiti kolo na drugačiji način.



Slika 3.6.2

Naime, može se uočiti da je operacioni pojačavač (3) vezan kao invertujućii pojačavač, pa važi:

$$(3.6.1) \quad u_i = -\frac{R_4}{R_5} u_{i2}$$

Operacioni pojačavač (2) je vezan kao integrator, što predstavlja specijalan slučaj invertujućeg pojačavača, pa važi:

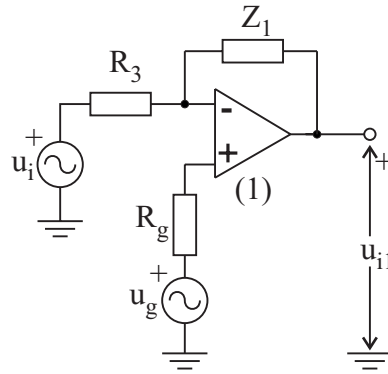
$$(3.6.2) \quad u_{i2} = -\frac{1/(sC_2)}{R_2} u_{i1} = -\frac{1}{sC_2 R_2} u_{i1}$$

Sada možemo da nađemo vezu:

$$(3.6.3) \quad u_i = \frac{R_4}{sC_2 R_2 R_5} u_{i1}$$

Ostalo je još da u_{i1} izrazimo preko u_g i u_i . U tom cilju analiziraćemo operacioni pojačavač (1), čija je sprega prikazana na slici (Slika 3.6.3), gde je:

$$(3.6.4) \quad Z_1 = \frac{1}{sC_1} \parallel R_1 = \frac{R_1}{1 + sC_1 R_1}$$



Slika 3.6.3

Korišćenjem principa superpozicije, imajući u vidu da je za signal u_i operacioni pojačavač vezan kao invertujući, dok je za signal u_g vezan kao neinvertujući, dobijamo:

$$(3.6.5) \quad u_{i1} = -\frac{Z_1}{R_3} u_i + \left(1 + \frac{Z_1}{R_3}\right) u_g$$

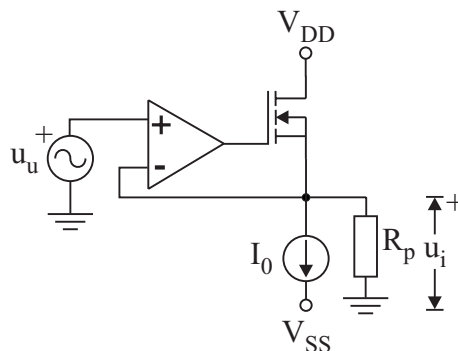
Zamenom (3.6.5) u (3.6.3) i sređivanjem dobija se:

$$(3.6.6) \quad H(s) = \frac{R_1 + R_3}{R_1} \frac{1 + sC_1 \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}}{1 + sC_2 \frac{R_2 R_3 R_5}{R_1 R_4} + s^2 C_1 C_2 \frac{R_2 R_3 R_5}{R_4}}$$

3.7. ZADATAK

Za kolo sa slike (Slika 3.7.1) odrediti prenosnu funkciju: $H(s) = U_i(s)/U_u(s)$.

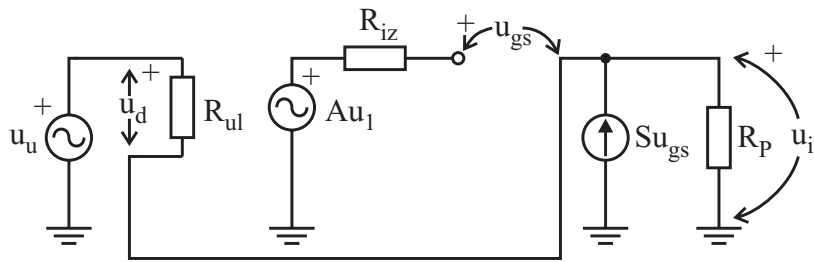
Za operacioni pojačavač je poznato: ulazna otpornost $R_{ul} = 1M\Omega$, izlazna otpornost $R_{iz} = 10k\Omega$, pojačanje pri niskim frekvencijama $A_0 = 1000$, gornja granična učestanost $f_0 = 20kHz$. Parametri MOSFET-a su: $S = 4mS$ i $R_i \rightarrow \infty$. Otpornost potrošača je $R_p = 500k\Omega$.



Slika 3.7.1

REŠENJE:

a) Ekvivalentna šema kola za naizmenični režim prikazana je na slici (Slika 3.7.2)



Slika 3.7.2

Kolo je opisano jednačinama:

$$(3.7.1) \quad u_i \left(\frac{1}{R_P} + \frac{1}{R_{ul}} \right) - u_u \frac{1}{R_{ul}} - Su_{gs} = 0$$

$$(3.7.2) \quad u_{gs} = A(s)u_1 - u_i$$

$$(3.7.3) \quad u_1 = u_u - u_i$$

Na osnovu ovih jednačina dobija se:

$$(3.7.4) \quad H(s) = \frac{\frac{1}{R_{ul}} + S \cdot A(s)}{\frac{1}{R_P} + \frac{1}{R_{ul}} + (A(s)+1) \cdot S}$$

Pojačanje pojačavača je dato u obliku $A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_0}$, gde je $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Zamenom $A(s)$ u poslednju jednačinu dobija se:

$$(3.7.5) \quad H(s) = H_0 \frac{1 + s/\omega_z}{1 + s/\omega_p}$$

gde je:

$$H_0 = \frac{R_P(1 + SR_{ul}A_0)}{R_{ul} + R_P + SR_P R_{ul}(A_0 + 1)} \approx 1;$$

$$\omega_z = \omega_0(1 + SR_{ul}A_0) = 5 \cdot 10^{11} \text{ rad/s};$$

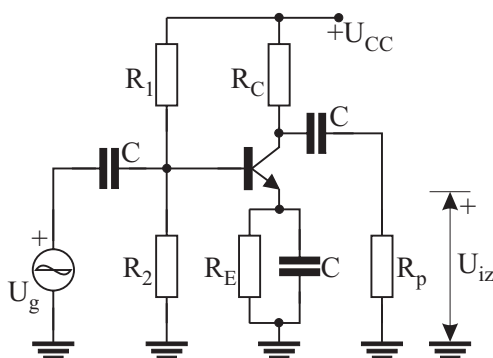
$$\omega_p = \omega_0 \frac{R_{ul} + R_P + SR_P R_{ul}(A_0 + 1)}{R_{ul} + R_P + SR_P R_{ul}} = 1,25 \cdot 10^8 \text{ rad/s}$$

4. POJAČAVAČI SNAGE

4.1. ZADATAK

Za pojačavač snage koji radi u klasi A, i koji je prikazan na slici (Slika 4.1.1), poznato je: $U_{CC} = 10 \text{ V}$; $R_E = 0,1 \text{ k}\Omega$; $R_p = 1 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 9 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $h_{11E} = 1 \text{ k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = \beta = 100$; $h_{22E} = 0 \text{ S}$; $C \rightarrow \infty$.

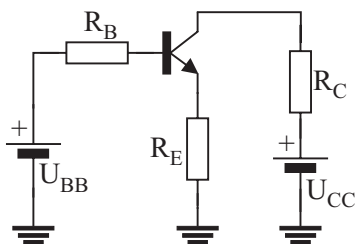
- Odrediti vrednost otpornosti otpornika R_C tako da se na izlazu pojačavača dobije maksimalni neizobličeni simetrični napon.
- Za tako nađeno R_C odrediti maksimalnu korisnu snagu na potrošaču, P_k .
- Odrediti naponsko pojačanje pojačavača za male signale ($A = U_{iz}/U_g$).



Slika 4.1.1

REŠENJE:

a) Za rešavanje ovog zadatka neophodno je prvo odrediti vrednosti kolektorske struje i napona između kolektora i emitora kojima su definisane statička i dinamička radna prava, kao i mirna radna tačka. U tom cilju treba prvo razmatrati kolo za jednosmerni režim rada, koje je prikazano na slici (Slika 4.1.2).



Slika 4.1.2

Na osnovu slike (Slika 4.1.1) može se pisati da su otpornost i napon Theveninovog generatora dati pomoću:

$$(4.1.1) \quad R_B = R_1 \parallel R_2 = 0,9 \text{ k}\Omega ,$$

odnosno:

$$(4.1.2) \quad U_{BB} = U_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 1 \text{ V} .$$

Kao što je moguće uočiti sa slike (Slika 4.1.2) struja baze bipolarnog tranzistora u mirnoj radnoj tački data je sledećim izrazom:

$$(4.1.3) \quad I_{BM} = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) \cdot R_E} = 27,3 \text{ }\mu\text{A} .$$

Sada je struja kolektora u mirnoj radnoj tački jednaka:

$$(4.1.4) \quad I_{CM} = \beta \cdot I_{BM} = 2,73 \text{ mA} .$$

S obzirom na činjenicu da je nepoznata vrednost otpornosti R_C nemoguće je odrediti vrednost napona između kolektora i emitora u mirnoj radnoj tački. U tu svrhu neophodno je napisati jednačine koje definišu statičku:

$$(4.1.5) \quad I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C + R_E} ,$$

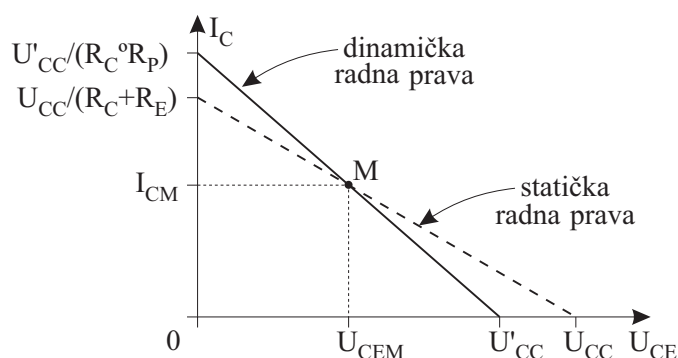
i dinamičku:

$$(4.1.6) \quad I_C - I_{CM} = -(U_{CE} - U_{CEM}) / (R_C \parallel R_P)$$

radnu pravu.

Statička i dinamička radna prava prikazane su na slici (Slika 4.1.3). Može se pisati na osnovu jednačine za dinamičku radnu pravu da je U'_{CC} definisano pomoću:

$$(4.1.7) \quad U'_{CC} = U_{CE} \Big|_{I_C=0} = U_{CEM} + I_{CM} \cdot R_C \parallel R_P .$$



Slika 4.1.3

Sa druge strane, da bi se na izlazu pojačavača dobio maksimalni neizobličeni simetrični napon, što znači da amplituda napona između kolektora i emitora ne sme biti veća od U_{CEM} jer bi došlo do odsecanja, neophodno je da U'_{CC} bude jednak:

$$(4.1.8) \quad U_{CC}' = 2 \cdot U_{CEM}.$$

Izjednačavanjem (4.1.8) i (4.1.7) dobija se da je:

$$(4.1.9) \quad U_{CEM} = I_{CM} \cdot R_C \parallel R_p.$$

Zamenom ovog izraza u jednačinu statičke radne prave (4.1.5), pri čemu su U_{CE} i I_C uzeti u mirnoj radnoj tački, dobija se:

$$(4.1.10) \quad U_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_{CM} = R_C \parallel R_p \cdot I_{CM}.$$

Sređivanjem jednačine (4.1.10) dobija se sledeća kvadratna jednačina po R_C :

$$(4.1.11) \quad R_C^2 + R_C \cdot (2R_p + R_E - U_{CC}/I_{CM}) + R_p \cdot (R_E - U_{CC}/I_{CM}) = 0,$$

čijim rešavanjem se za R_C dobija kao jedino pozitivno rešenje:

$$(4.1.12) \quad R_C = 2,82 \text{ k}\Omega.$$

Sada se može pisati da je napon između kolektora i emitora u mirnoj radnoj tački jednak:

$$(4.1.13) \quad U_{CEM} = R_C \parallel R_p \cdot I_{CM} = 2 \text{ V}.$$

b) S obzirom na činjenicu da je napon na potrošaču za naizmenični režim rada praktično jednak naponu između kolektora i emitora ($1/(\omega C) \approx 0$), maksimalna vrednost napona na potrošaču je jednaka:

$$(4.1.14) \quad U_{iz \max} = U_{CEM},$$

dok je maksimalna vrednost struje, na osnovu strujnog razdelnika (pri čemu je za maksimalnu amplitudu struje kolektora uzeta kolektorska struja u mirnoj radnoj tački) jednaka:

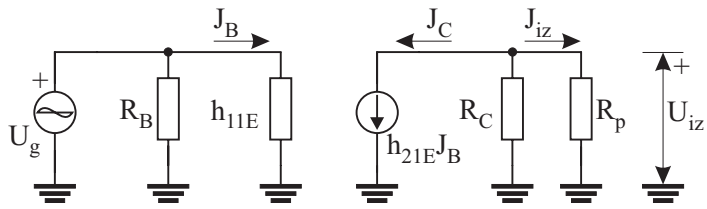
$$(4.1.15) \quad J_{iz \max} = I_{CM} \cdot R_C / (R_C + R_p).$$

Sada se može pisati da je maksimalna snaga na potrošaču jednaka:

$$(4.1.16) \quad P_{k \max} = 0,5 \cdot U_{iz \max} \cdot J_{iz \max} = 2 \text{ mW}.$$

c) Da bi se došlo do vrednosti naponskog pojačanja za male signale neophodno je poći od ekvivalentne šeme kola za naizmenični režim rada, prikazane na slici (Slika 4.1.4). Na osnovu ove slike može se pisati da je naponsko pojačanje jednako:

$$(4.1.17) \quad A_n = \frac{u_i}{u_g} = \frac{u_i}{J_p} \cdot \frac{J_p}{J_C} \cdot \frac{J_C}{J_B} \cdot \frac{J_B}{u_g} = R_p \cdot \left(-\frac{R_C}{R_C + R_p} \right) \cdot h_{21E} \cdot \frac{1}{h_{11E}}.$$



Slika 4.1.4

Kada se zamene brojne vrednosti dobija se da je naponsko pojačanje jednako:

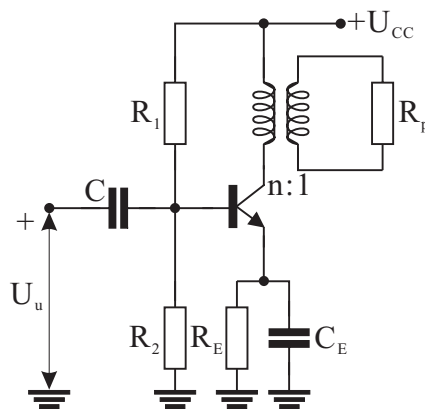
$$(4.1.18) \quad A_n = -73.$$

4.2. ZADATAK

Za pojačavač snage koji radi u klasi A, i koji je prikazan na slici (Slika 4.2.1), odrediti:

- mirnu radnu tačku tranzistora (U_{CEM} , I_{CM});
- vrednost otpornosti otpornika R_p za koju se na izlazu dobija maksimalni neizobličeni simetrični napon i skicirati statičku i dinamičku radnu pravu pojačavača;
- maksimalnu amplitudu napona i struje kroz potrošač;
- stepen iskorišćenja pojačavača.

Poznato je: $U_{CC} = 24 \text{ V}$; $n = 4$; $R_E = 10 \text{ } \Omega$; $C, C_E \rightarrow \infty$; $R_1 = 0,9 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 0,1 \text{ k}\Omega$. Karakteristike tranzistora su: $\beta = 100$; $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $U_{Cemin} = 0 \text{ V}$. Transformator je idealan.



Slika 4.2.1

REŠENJE:

a) Za izračunavanje mirne radne tačke tranzistora neophodno je prethodno transformisati kolo sa slike (Slika 4.2.1) za jednosmerni režim rada. Transformisano kolo

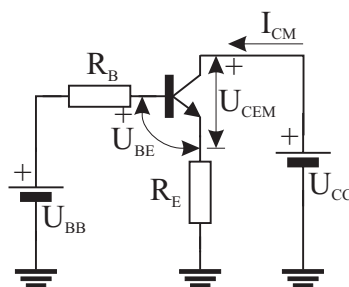
prikazano je na slici (Slika 4.2.2), pri čemu su elementi Theveninovog generatora u kolu baze:

$$(4.2.1) \quad R_B = R_1 \parallel R_2 = 90 \, \Omega, \text{ i}$$

$$(4.2.2) \quad U_{BB} = U_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 2,4 \text{ V} .$$

Uz pretpostavku da je $\beta \gg 1$, tj, da je kolektorska struja u mirnoj radnoj tački približno jednaka emitorskoj struji, može se na osnovu jednačine za čvor baze i modela tranzistora pisati da je kolektorska struja jednaka:

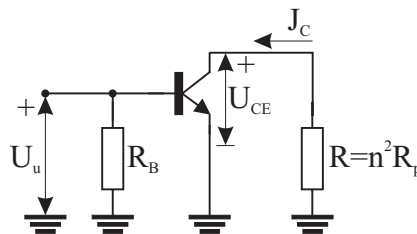
$$(4.2.3) \quad I_{CM} = \beta \cdot \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + \beta \cdot R_E} = 0,15 \text{ A} .$$



Slika 4.2.2

Dalje, analizom kolektorskog kola, dobija se da je napon između kolektora i emitora jednak:

$$(4.2.4) \quad U_{CEM} = U_{CC} - R_E \cdot I_{CM} = 22,5 \text{ V} .$$



Slika 4.2.3

b) Otpornost R_p je moguće odrediti na osnovu dinamičke radne prave napisane tako da se na izlazu dobije maksimalni neizobličeni simetrični napon. Kao što se može uočiti sa slike (Slika 4.2.2) statička radna prava je definisana pomoću:

$$(4.2.5) \quad I_C = (U_{CC} - U_{CE}) / R_E ,$$

dok se sa slike (Slika 4.2.3) vidi da je dinamička radna prava definisana otpornošću R_p :

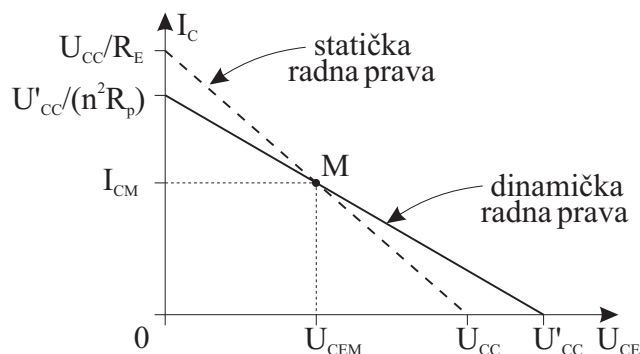
$$(4.2.6) \quad I_C = (U'_{CC} - U_{CE}) / R = (U'_{CC} - U_{CE}) / n^2 \cdot R_p ,$$

gde je U'_{CC} , iz uslova da se na izlazu dobije maksimalni neizobličeni signal, jednako:

$$(4.2.7) \quad U'_{CC} = 2 \cdot U_{CEM} .$$

Statička i dinamička radna prava prikazane su na slici (Slika 4.2.4). Zamenom (4.2.7) u jednačinu dinamičke radne prave (4.2.6), pri čemu treba za I_C i U_{CE} uzeti vrednosti u mirnoj radnoj tački, moguće je odrediti R_p , na sledeći način:

$$(4.2.8) \quad R_p = U_{CEM} / (n^2 \cdot I_{CM}) = 9,37 \Omega .$$



Slika 4.2.4

c) Maksimalna amplituda kolektorske struje jednaka je:

$$(4.2.9) \quad J_{Cmax} = I_{CM} ,$$

tako da je maksimalna amplituda struje kroz potrošač:

$$(4.2.10) \quad J_{pmax} = n \cdot J_{Cmax} = n \cdot I_{CM} = 0,6 \text{ A} .$$

Slično kao što je dato za struju, maksimalna vrednost napona između kolektora i emitora je:

$$(4.2.11) \quad U_{CEmax} = U_{CEM} ,$$

odakle je maksimalna amplituda napona na potrošaču jednaka:

$$(4.2.12) \quad U_{pmax} = U_{CEmax} / n = U_{CEM} / n = 5,62 \text{ V} .$$

d) Stepen iskorišćenja pojačavača se definiše kao količnik korisne snage disipirane na potrošaču i snage koju baterija predaje pojačavaču. Stoga je za njegovo određivanje neophodno prethodno odrediti ove dve snage. Korisna snaga na potrošaču jednaka je:

$$(4.2.13) \quad P_k = 0,5 \cdot U_{pmax} \cdot J_{pmax} = 1,68 \text{ W} ,$$

dok je snaga koju baterija predaje pojačavaču:

$$(4.2.14) \quad P = U_{CC} \cdot I_{CM} = 3,6 \text{ W} .$$

Stepen iskorišćenja je sada:

$$(4.2.15) \quad \eta = P_k / P = 0,46 ,$$

odnosno u procentima je:

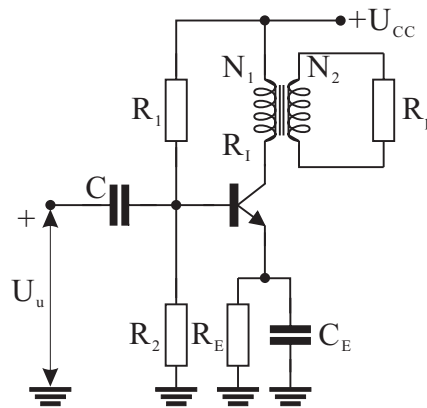
$$(4.2.16) \quad \eta(\%) = 46 \% .$$

4.3. ZADATAK

Na slici (Slika 4.3.1) prikazan je pojačavač snage koji radi u klasi A. Poznato je: $U_{CC} = 12\text{ V}$; $R_1 = 3,8\text{ k}\Omega$; $R_2 = 2,2\text{ k}\Omega$; $R_E = 750\ \Omega$; $C, C_E \rightarrow \infty$. Primar transformatora je realan, tj, poseduje parazitnu otpornost R_I . Broj namotaja u primaru i sekundaru je $N_1 = 75$ i $N_2 = 15$, respektivno. Tranzistor je okarakterisan sa: $U_{BE} = 0,65\text{ V}$; $U_{CEmin} = 0\text{ V}$, i $\beta = 100$. Odrediti:

- nepoznatu otpornost primara transformatora R_I , tako da statička radna prava prolazi kroz tačku $U_{CEmin} = 0\text{ V}$, $I_C = 15\text{ mA}$;
- mirnu radnu tačku tranzistora (U_{CEM} , I_{CM});
- vrednost otpornika R_p , tako da maksimalna promena napona između kolektora i emitora bude $\Delta U_{CE} = 8\text{ V}$;
- maksimalnu amplitudu struje i napona kroz potrošač;
- stepen iskorišćenja pojačavača.

Skicirati statičku i dinamičku radnu pravu i naznačiti kritične vrednosti.

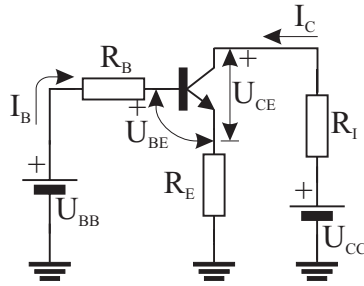


Slika 4.3.1

REŠENJE:

a) Kolo za jednosmerni režim rada prikazano je na slici (Slika 4.3.2). S obzirom da je $\beta \gg 1$, kolektorska struja je približno jednaka emitorskoj, tako da je na osnovu slike (Slika 4.3.2) statička radna prava definisana sa:

$$(4.3.1) \quad I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_I + R_E}.$$



Slika 4.3.2

Zamenjujući $I_C = 15 \text{ mA}$, za $U_{CE} = 0 \text{ V}$, u jednačinu statičke radne prave dobija se da je nepoznata otpornost primara transformatora jednaka:

$$(4.3.2) \quad R_I = U_{CC}/I_C - R_E = 50 \Omega .$$

b) Theveninov generator u bazi tranzistora kola sa slike (Slika 4.3.2) opisan je pomoću:

$$(4.3.3) \quad U_{BB} = U_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 4,4 \text{ V} ;$$

$$(4.3.4) \quad R_B = R_1 \parallel R_2 = 1,4 \text{ k}\Omega .$$

Bazna struja jednaka:

$$(4.3.5) \quad I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) \cdot R_E} \approx 50 \mu\text{A} ,$$

tako da je sada kolektorska struja u mirnoj radnoj tački:

$$(4.3.6) \quad I_{BM} = \beta \cdot I_B = 5 \text{ mA} .$$

Sada je napon između kolektora i emitora u mirnoj radnoj tački na osnovu jednačine statičke radne prave (4.3.1), jednak:

$$(4.3.7) \quad U_{CEM} = U_{CC} - I_{CM} \cdot (R_I + R_E) = 8 \text{ V} .$$

c) Kao što se može uočiti sa slike (Slika 4.3.3), maksimalna promena napona U_{CE} , $\Delta U_{CE} = 8 \text{ V}$, odgovara promeni struje od $\Delta I_C = 5 \text{ mA}$. Ove dve veličine su povezane sledećom relacijom:

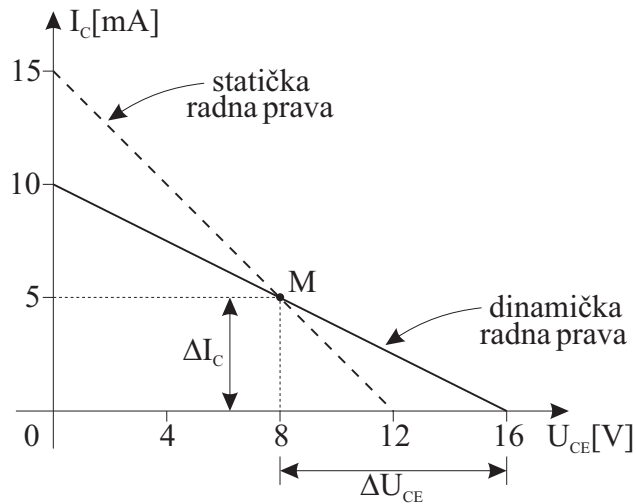
$$(4.3.8) \quad \Delta U_{CE} = R_P'' \cdot \Delta I_C ,$$

gde je:

$$(4.3.9) \quad R_P'' = R_I + R_P' .$$

Otpornost R_P' predstavlja otpornost potrošača preslikanu u primar transformatora:

$$(4.3.10) \quad R_P' = (N_1/N_2)^2 \cdot R_P .$$



Slika 4.3.3

Kombinacijom izraza (4.3.10), (4.3.9) i (4.3.8) može se pisati da je nepoznata otpornost potrošača data izrazom:

$$(4.3.11) \quad R_p = (N_2/N_1)^2 \cdot (\Delta U_{CE}/\Delta I_C - R_I),$$

što, kada se zamene brojne vrednosti, daje otpornost potrošača od:

$$(4.3.12) \quad R_p = 62 \, \Omega.$$

d) Maksimalna amplituda napona na potrošaču jednaka je:

$$(4.3.13) \quad U_{p \max} = \frac{U_{CEM}}{N_1/N_2} = 1,6 \, \text{V},$$

dok je maksimalna amplituda struje kroz potrošač:

$$(4.3.14) \quad J_{p \max} = I_{CM} \cdot N_1/N_2 = 25 \, \text{mA}.$$

e) Poznavajući vrednosti maksimalnih amplituda napona na potrošaču, i struje kroz isti, kao i vrednost kolektorske struje u radnoj tački, može se pisati da je korisna snaga na potrošaču jednaka:

$$(4.3.15) \quad P_K = 0,5 \cdot U_{Pm} \cdot I_{Pm} = 20 \, \text{mW},$$

odnosno da je snaga koju izvor napajanja predaje pojačavaču:

$$(4.3.16) \quad P_B = U_{CC} \cdot I_{CM} = 60 \, \text{mW}.$$

Odavde se lako izračunava da

$$(4.3.17) \quad \eta = P_K/P_B = 0,333,$$

odnosno u procentima:

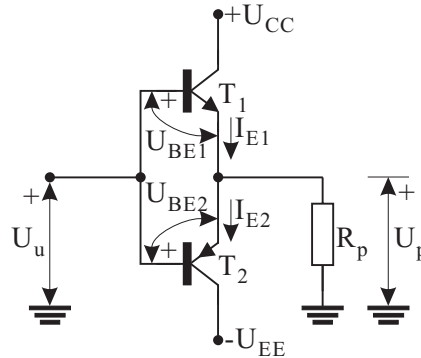
$$(4.3.18) \quad \eta(\%) = 33,3 \, \%.$$

4.4. ZADATAK

Na slici (Slika 4.4.1) prikazan je pojačavač snage sa komplementarnim parom, koji radi u klasi B.

- Nacrtati prenosnu karakteristiku pojačavača $U_p = f(U_u)$.
- Odrediti optimalnu vrednost otpornosti R_p pri kojoj se dobija maksimalna snaga na potrošaču.
- Odrediti talasne oblike napona na potrošaču i struju kroz tranzistore ukoliko se pojačavač pobudi signalom oblika $u_u = U_{um} \sin \omega t$
- Odrediti stepen iskorišćenja, η .

Naponi napajanja su $U_{CC} = U_{EE} = 12 \text{ V}$, dok je maksimalna snaga disipacije svakog tranzistora $P_{dmax} = 3,6 \text{ W}$. Poznato je: $U_{BE1} = -U_{BE2} = 0,7 \text{ V}$; $U_{\gamma1} = -U_{\gamma2} = 0,4 \text{ V}$; $U_{BES1} = -U_{BES2} = 0,8 \text{ V}$; $U_{CES1} = -U_{CES2} = 0,2 \text{ V}$.



Slika 4.4.1

REŠENJE:

a) Za početak analize ovog kola najpogodnije je staviti da je napon na ulazu negativan i po modulu veći od napona napajanja U_{CC} (pretpostavimo da je $U_u = -15 \text{ V}$). Takođe, pretpostavimo da oba tranzistora ne vode. U tom slučaju napon na potrošaču je jednak $U_p = 0 \text{ V}$. Sada su naponi između baze i emitora oba tranzistora jednaki:

$$(4.4.1) \quad U_{BE1} = U_u - U_p = U_u < 0;$$

$$(4.4.2) \quad U_{BE2} = U_u - U_p = U_u < U_{\gamma2}.$$

S obzirom na dobijene vrednosti, očigledno je da je spoj baza-emitor tranzistora T_1 inverzno polarisan, tako da ovaj tranzistor ne vodi, dok je spoj baza-emitor tranzistora T_2 direktno polarisan, što znači da pretpostavka nije tačna, odnosno tranzistor T_2 vodi. Da bismo odredili oblast rada tranzistora T_2 , podimo od pretpostavke da on vodi u aktivnoj oblasti rada. U ovom slučaju se dobija da je napon na potrošaču:

$$(4.4.3) \quad U_p = U_u - U_{BE2} = -14,3 \text{ V}.$$

Sada se za napon između kolektora i emitora drugog tranzistora dobija da je:

$$(4.4.4) \quad U_{CE2} = -U_{CC} - U_p = 2,3 \text{ V},$$

tj, dobija se da je kolektor na višem potencijalu od emitora, što znači da pretpostavka da tranzistor radi u aktivnoj oblasti nije tačna. Dakle, tranzistor T_2 radi u oblasti zasićenja, tj, $U_{CE2} = U_{CEs2} = -0,2 \text{ V}$, tako da je napon na potrošaču jednak $U_p = -11,8 \text{ V}$.

Povećanjem ulaznog napona doći će do promene oblasti rada T_2 , koji će pri određenom ulaznom naponu preći u aktivnu oblast. Taj napon je:

$$(4.4.5) \quad U_{u \text{ min}} = -U_{EE} - U_{CEs2} + U_{BEs2} = -12,6 \text{ V},$$

i pri ovom ulaznom naponu, napon na potrošaču je jednak:

$$(4.4.6) \quad U_{p \text{ min}} = -U_{EE} - U_{CEs2} = -11,8 \text{ V}.$$

Daljim povećanjem ulaznog napona tranzistor T_1 i dalje ne vodi, dok T_2 prelazi u aktivnu oblast. On će raditi u aktivnoj oblasti, sve dok ulazni napon ne padne na vrednost $U_{\gamma 2}$, kada tranzistor prestaje da vodi. Znači, za ulazne napone $-U_{EE} - U_{CEs2} + U_{BEs2} \leq U_u < U_{\gamma 2}$ napon na potrošaču će se menjati po zakonu:

$$(4.4.7) \quad U_p = U_u - U_{BE2}.$$

Za ulazne napone veće od $U_{\gamma 2}$ ne vode ni jedan ni drugi tranzistor, i napon na potrošaču je $U_p = 0 \text{ V}$. Ova situacija je validna, sve dok ulazni napon ne dostigne vrednost $U_{\gamma 1}$, kada tranzistor T_1 počinje da vodi i to u aktivnoj oblasti. Napon na potrošaču je sada:

$$(4.4.8) \quad U_p = U_u - U_{BE1}.$$

Ovo će važiti sve dok tranzistor T_1 ne pređe u oblast zasićenja, što će se dogoditi pri naponu na ulazu:

$$(4.4.9) \quad U_{u \text{ max}} = U_{CC} - U_{CEs1} + U_{BEs1} = 12,6 \text{ V},$$

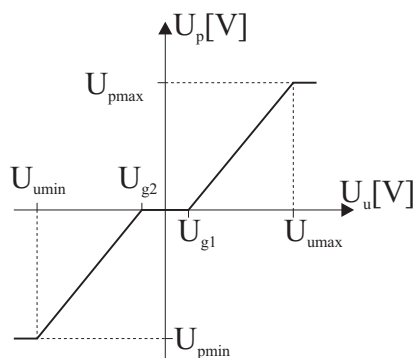
i tada je:

$$(4.4.10) \quad U_{p \text{ max}} = U_{CC} - U_{CEs1} = 11,8 \text{ V}.$$

Daljim povećanjem ulaznog napona situacija u kolu ostaje nepromenjena. Na kraju kompletan izraz za prenosnu karakteristiku kola je:

$$(4.4.11) \quad U_p = \begin{cases} -U_{EE} - U_{CEs2} & , U_u < -U_{EE} - U_{CEs2} + U_{BEs2} \\ U_u - U_{BE2} & , -U_{EE} - U_{CEs2} + U_{BEs2} \leq U_u \leq U_{\gamma 2} \\ 0 & , U_{\gamma 2} \leq U_u \leq U_{\gamma 1} \\ U_u - U_{BE1} & , U_{\gamma 1} \leq U_u \leq U_{CC} - U_{CEs1} + U_{BEs1} \\ U_{CC} - U_{CEs1} & , U_u > U_{CC} - U_{CEs1} + U_{BEs1} \end{cases}$$

Ova prenosna karakteristika je grafički prikazana na slici (Slika 4.4.2).

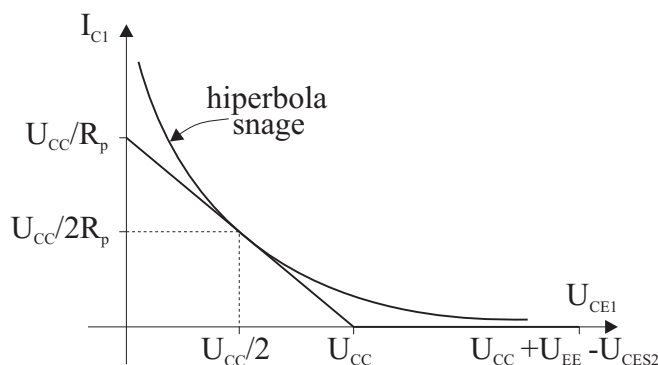


Slika 4.4.2

b) Za određivanje optimalne vrednosti otpornika R_p pri kojoj se dobija maksimalna snaga na potrošaču, mora se voditi računa o tome da radna prava tangira hiperbolu snage, kao što je to prikazano na slici (Slika 4.4.3). Očigledno je sa slike (Slika 4.4.1) da se dinamička i statička radna prava poklapaju. Na slici (Slika 4.4.3) prikazan je rad kola u pozitivnoj poluperiodi ulaznog signala. Radna prava koja je nacrtana opisana je jednačinom:

$$(4.4.12) \quad I_{C1} = (U_{CC} - U_{C1})/R_p .$$

Ona je napisana uz konstataciju da je donji tranzistor zakočen. Pretpostavljeno je da je R_p tako izabrano da se dobija maksimalna korisna snaga.



Slika 4.4.3

Trenutna vrednost snage u pozitivnoj poluperiodi ulaznog signala, koja se disipira na potrošaču jednaka je:

$$(4.4.13) \quad p_p = u_{CE} \cdot i_C = (U_{CC} - R_p \cdot i_C) \cdot i_C .$$

Za određivanje optimalne vrednosti R_p prvo treba odrediti vrednost struje i_C , pri kojoj se disipira maksimalna snaga na potrošaču. Ova vrednost se određuje izjednačavanjem prvog izvoda trenutne vrednosti snage p_d po struji i_C sa nulom:

$$(4.4.14) \quad dp_p/di_C = U_{CC} - 2R_p \cdot i_C = 0 .$$

Odavde je struja J_{Cm} pri kojoj se dobija maksimalna snaga jednaka:

$$(4.4.15) \quad J_{Cm} = U_{CC}/(2R_p) .$$

Sada je maksimalna snaga na potrošaču:

$$(4.4.16) \quad P_{p \max} = (U_{CC} - R_p J_{Cm}) J_{Cm} = U_{CC}^2 / (4R_p).$$

Dakle, optimalna vrednost otpornosti R_p iznosi:

$$(4.4.17) \quad R_{popt} = U_{CC}^2 / (4P_{p \max}) = 10\Omega.$$

c) Talasni oblici napona i struja u kolu prikazani su na slici (Slika 4.4.4). Srednja vrednost struje koja protiče kroz bateriju U_{CC} može se odrediti kao:

$$(4.4.18) \quad I_{CC} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_{C1}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/2} J_{C1m} \sin \omega t \cdot dt,$$

gde je $J_{C1m} = U_{cc}/(2R_p)$ maksimalna vrednost struje kolektora tranzistora T_1 .

Izračunavanjem ovog integrala se dobija da je struja I_{CC} jednaka:

$$(4.4.19) \quad I_{CC} = J_{C1m} / \pi.$$

Slično ovome, srednja vrednost struje koja protiče kroz bateriju U_{EE} je:

$$(4.4.20) \quad I_{EE} = -J_{C2m} / \pi,$$

gde je $J_{C2m} = U_{EE}/(2R_p)$ moduo maksimalne vrednosti struje kolektora tranzistora T_2 , i on je jednak $J_{C2m} = J_{C1m}$, s obzirom da su naponi U_{EE} i U_{CC} jednaki. Odavde sledi da je $I_{CC} = -I_{EE}$.

d) Snaga koju predaju izvori za napajanje može se izračunati kao:

$$(4.4.21) \quad P = U_{CC} \cdot I_{CC} - U_{EE} \cdot I_{EE},$$

što je, zamenom izraza za I_{CC} i I_{EE} , dalje jednako:

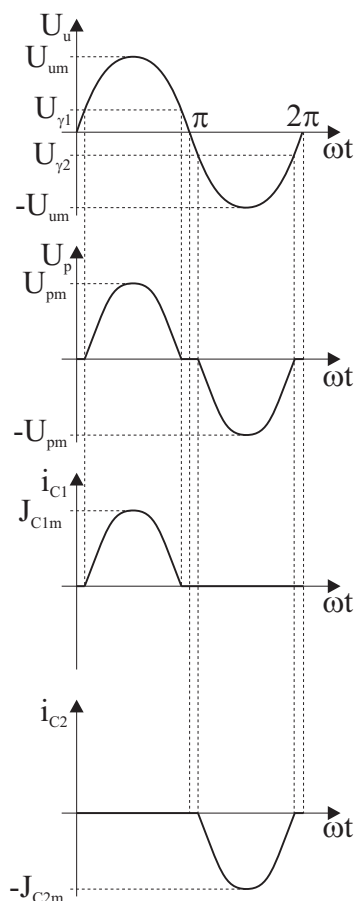
$$(4.4.22) \quad P = 2U_{CC} \cdot J_{C1m} / \pi.$$

Korisna snaga koja se disipira na potrošaču može se odrediti kao:

$$(4.4.23) \quad P_K = 0,5 \cdot U_{pm} \cdot J_{C1m},$$

a stepen iskorišćenja je:

$$(4.4.24) \quad \eta = \frac{P_K}{P} = \frac{\pi U_{pm}}{4 U_{CC}},$$



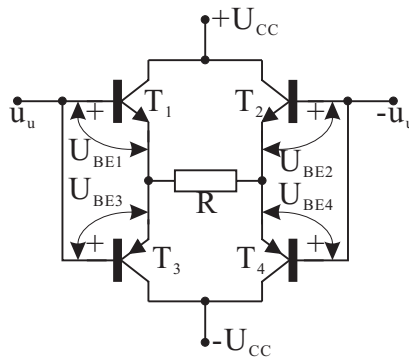
Slika 4.4.4

Kada se uzme u obzir da je $U_{pm} \approx U_{CC}$, dobija se da je stepen iskorišćenja u procentima jednak:

4.5. ZADATAK

Na slici (Slika 4.5.1) prikazan je pojačavač snage koji radi u klasi B. Poznato je: $U_{CC} = 40 \text{ V}$; $R = 25 \Omega$; $u_u = U_m \sin \omega t$. Odrediti:

- maksimalnu trenutnu snagu disipiranu na R, ako je $U_{CEmin} = 0 \text{ V}$;
- maksimum srednje neizobličene snage na otporniku R;
- maksimum srednje snage disipirane na bilo kom tranzistoru;
- izlaznu otpornost pojačavača koju vidi otpornik R, pod pretpostavkom da se kolo pobuđuje signalom male amplitude, ako je: $h_{12E} = 0$ i $h_{22E} = 0 \text{ S}$;
- stepen iskorišćenja η pojačavača snage.



Slika 4.5.1

REŠENJE:

a) U cilju određivanja maksimalne snage neophodno je prvo uočiti princip rada ovog kola. Očigledno je da se tranzistori u kolu dovode u provodno stanje pomoću ulaznog napona u_u . Takođe je očigledno da u pozitivnoj poluperiodi napona u_u vode tranzistori T_1 i T_4 (spojevi baza-emitor su direktno polarisani, tj. $U_{BE1} > 0$ i $U_{BE4} < 0$), dok u negativnoj poluperiodi vode tranzistori T_2 i T_3 ($U_{BE2} > 0$ i $U_{BE3} < 0$). Treba primetiti da su naponi između kolektora i emitora tranzistora koji vode u jednoj poluperiodi jednaki u svakom trenutku zbog identičnih karakteristika tranzistora. Posmatrano u jednoj poluperiodi, moguće je uočiti da, kada je između kolektora i emitora onih dvaju tranzistora koji vode u toj poluperiodi, napon minimalan, $U_{CEmin} = 0$ V, napon na otporniku će biti maksimalan i iznositi $U_{Rmax} = 2U_{CC}$. Znači maksimalna trenutna snaga koja se disipira na otporniku R jednaka je sada:

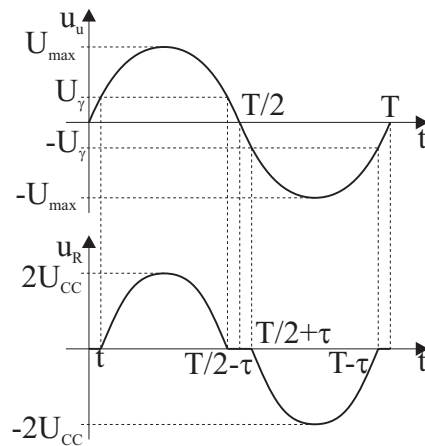
$$(4.5.1) \quad P_{R \max} = U_{R \max}^2 / R = (2U_{CC})^2 / R = 256 \text{ W} .$$

b) Za određivanje maksimuma srednje neizobličene snage na otporniku neophodno je analizirati talasni oblik napona na otporniku, koji je prikazan na slici (Slika 4.5.2). Kao što je moguće uočiti sa ove slike u intervalu od τ do $(T/2 - \tau)$ vodiće tranzistori T_1 i T_4 , dok će u intervalu od $(T/2 + \tau)$ do $(T - \tau)$ voditi tranzistori T_2 i T_3 . Amplituda ove izobličene sinusoide očigledno je jednaka $2U_{CC}$, kao što je pokazano pod a). S obzirom na vrednosti napona u kolu moguće je smatrati da je τ zanemarljivo malo, tj. da $\tau \rightarrow 0$. Uzimajući ovo u obzir dobija se da je vremenska zavisnost napona na otporniku:

$$(4.5.2) \quad u_R(t) = 2U_{CC} \cdot \sin \omega t .$$

Sada je moguće pisati da je maksimalna srednja neizobličena snaga na otporniku R jednaka:

$$(4.5.3) \quad P_R = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{(u_R(t))^2}{R} dt = \frac{2U_{CC}^2}{R} = 128 \text{ W} .$$



Slika 4.5.2

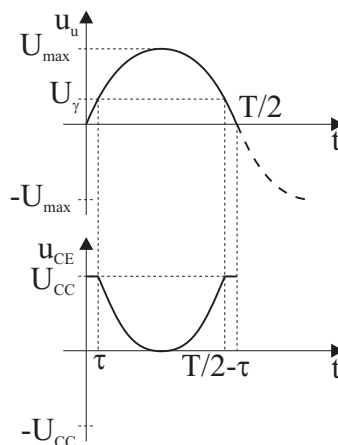
c) Pri određivanju maksimalne srednje snage na jednom tranzistoru neophodno je prvo odrediti trenutnu vrednost ove snage. Ovo je moguće uraditi ako se prvo odredi trenutna vrednost napona između kolektora i emitora, kao i trenutna vrednost struje kolektora. Jasno je sa slike (Slika 4.5.2) da je napon između kolektora i emitora u jednoj poluperiodi suprotan naponu na otporniku (pod ovim se misli da je napon između kolektora i emitora maksimalan po modulu kada je napon na otporniku jednak 0 V, odnosno da je jednak nuli kada je napon na otporniku maksimalan po modulu). Talasni oblik napona u_{CE} u prvoj poluperiodi za tranzistor T_1 definisan je izrazom

$$(4.5.4) \quad u_{CE}(t) = 0,5 \cdot [2U_{CC} - u_R(t)] = U_{CC}(1 - \sin \omega t)$$

i prikazan je na slici (Slika 4.5.3).

Struja kolektora bilo kog tranzistora koji vodi jednaka je struji kroz otpornik, odnosno jednaka je količniku napona na otporniku i otpornosti R :

$$(4.5.5) \quad i_C(t) = i_R(t) = (2U_{CC}/R) \cdot \sin \omega t .$$



Slika 4.5.3

Trenutna vrednost snage disipacije na tranzistoru je sada:

$$(4.5.6) \quad p_T(t) = u_{CE} \cdot i_C = \left(2U_{CC}^2/R\right) \cdot (1 - \sin \omega t) \cdot \sin \omega t ,$$

tako da se maksimalna srednja snaga na jednom tranzistoru može izračunati kao:

$$(4.5.7) \quad P_T = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} p_T(t) \cdot dt .$$

Zamenom izraza (4.5.6) i izračunavanjem integrala dobija se da je:

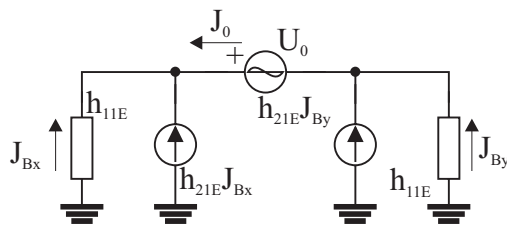
$$(4.5.8) \quad P_T = \frac{2U_{CC}^2}{R} \cdot \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) = 8,744 \text{ W} .$$

d) S obzirom da su tranzistori identični i da u jednoj poluperiodi vode dva tranzistora, izlaznu otpornost pojačavača koju vidi otpornik R moguće je odrediti analizom kola za naizmenični režim u jednoj poluperiodi, prikazanog na slici (Slika 4.5.4). Prema oznakama sa slike moguće je pisati da je struja J_0 jednaka:

$$(4.5.9) \quad J_0 = -(1 + h_{21E}) \cdot J_{Bx} = (1 + h_{21E}) \cdot J_{By} ,$$

gde je $x \in (1, 2)$ i $y \in (3, 4)$. Iz jednakosti (4.5.9) sledi da je $J_{By} = -J_{Bx}$, i na osnovu slike moguće je pisati da je ova struja jednaka:

$$(4.5.10) \quad J_{By} = U_0 / (2h_{11E}) .$$



Slika 4.5.4

Zamenom (4.5.10) u (4.5.9) za izlaznu otpornost pojačavača dobija se:

$$(4.5.11) \quad R = \frac{2h_{11E}}{1 + h_{21E}} .$$

e) Snaga koju baterija predaje kolu jednaka je:

$$(4.5.12) \quad P_B = 4P_T + P_R ,$$

tako da je sada koeficijent korisnog dejstva jednak:

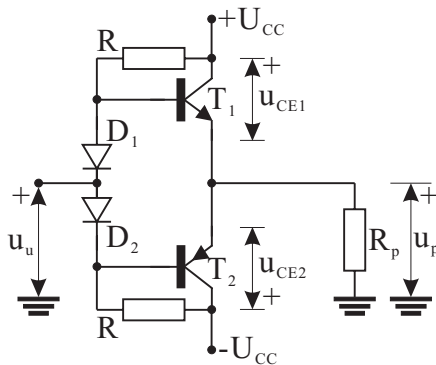
$$(4.5.13) \quad \eta(\%) = \frac{P_R}{P_B} \cdot 100\% = 78,5 \% .$$

4.6. ZADATAK

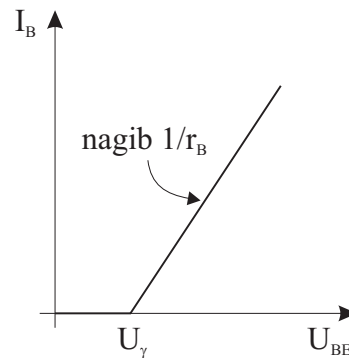
Na slici (Slika 4.6.1) prikazan je pojačavač snage koji radi u klasi B. Pojačavač snage može da preda 50 W maksimalne srednje vrednosti snage otporniku R_p na izlazu. Ukoliko se na ulaz kola dovodi pobudni napon $u_u(t) = U_m \sin \omega t$, dovoljno velike amplitude U_m , odrediti:

- najmanju vrednost napona napajanja U_{CC} , koja može biti upotrebljena;
- vrednost sinusoidalnog napona na izlazu kola za koju tranzistori T_1 i T_2 disipiraju maksimalnu srednju snagu na kolektoru ($P_C = I_C U_{CE}$), kao i P_{Cmax} ;
- maksimalnu srednju vrednost snage koja može biti predata od izvora napajanja U_{CC} i $-U_{CC}$;
- stepen iskorišćenja pojačavača snage.

Smatrati da je $U_{CEmin} = 0$ V, da su diode idealne i da su ulazne karakteristike tranzistora date na slici (Slika 4.6.2). Poznato je $R_p = 10 \Omega$.



Slika 4.6.1



Slika 4.6.2

REŠENJE:

a) Analizirajući kolo sa slike (Slika 4.6.1) moguće je uočiti da u pozitivnoj poluperiodi vodi tranzistor T_1 , dok u negativnoj poluperiodi vodi tranzistor T_2 . Tokom pozitivne poluperiode ulaznog napona, napon na potrošaču jednak je $u_p = U_{CC} - u_{CE1}$, dok je tokom negativne poluperiode napon na potrošaču jednak $u_p = -U_{CC} - u_{CE2}$. Ukoliko su tranzistori simetrični na izlazu se dobija napon sinusnog oblika, prikazan na slici (Slika 4.6.3). Po definiciji snagu na potrošaču moguće je izračunati kao:

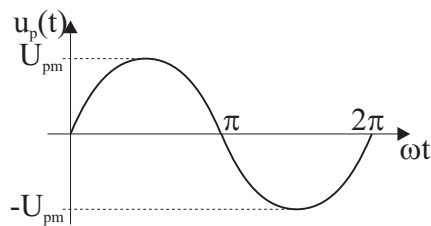
$$(4.6.1) \quad P_p = 0,5 \cdot U_{pm} \cdot I_{pm}$$

Za određivanje maksimalne vrednosti napona na potrošaču, u funkciji napona U_{CC} , dovoljno je analizirati pojačanje kola tokom jedne poluperiode ulaznog signala. Uzimajući u obzir da je napon na potrošaču u toku pozitivne poluperiode $u_p = U_{CC} - u_{CE1}$, očigledno je da će napon u_p biti maksimalan kada je u_{CE1} minimalno, odnosno:

$$(4.6.2) \quad U_{pm} = U_{CC} - U_{CEmin} = U_{CC},$$

a tada je:

$$(4.6.3) \quad I_{pm} = \frac{U_{pm}}{R_p} = \frac{U_{CC}}{R_p}.$$



Slika 4.6.3

Zamenom izraza (4.6.2) i (4.6.3) u izraz za maksimalnu vrednost snage na otporniku R_p , (4.6.1), i sređivanjem dobijenog izraza po U_{CC} , dobija se da je minimalna vrednost napona napajanja koja može biti upotrebljena:

$$(4.6.4) \quad U_{CCmin} = \sqrt{2R_p \cdot P_p} = 31,62 \text{ V}.$$

b) Za određivanje maksimalne vrednosti sinusoidalnog napona na izlazu kola za koju tranzistori disipiraju maksimalnu srednju snagu na kolektoru, neophodno je odrediti izraz za srednju snagu na kolektoru. Zbog simetričnosti kola, ponovo je dovoljno analizirati rad kola samo u jednoj poluperiodi.

Za određivanje srednje snage disipacije na kolektoru jednog od tranzistora potrebno je prethodno odrediti talasne oblike kolektorske struje i napona između kolektora i emitora, kao i izraze za ove dve veličine.

U pozitivnoj poluperiodi vodi tranzistor T_1 i tada je struja kolektora ovog tranzistora jednaka struji kroz otpornik R_p . Ovo dalje znači da se kolektorska struja tranzistora T_1 menja po sinusoidalnom zakonu, i da je njena amplituda jednaka amplitudi struje kroz R_p , odnosno da se kolektorska struja tranzistora T_1 u ovoj poluperiodi može opisati sa:

$$(4.6.5) \quad i_{C1}(t) = (U_{pm}/R_p) \cdot \sin \omega t,$$

pri čemu treba voditi računa da je ona jednaka nuli u negativnoj poluperiodi.

Što se napona između kolektora i emitora tranzistora T_1 tiče, moguće je uočiti da je on u trenutku kada tranzistor počinje da vodi maksimalan i iznosi U_{CC} . Daljim porastom ulaznog napona napon između kolektora i emitora se smanjuje po sinusoidalnom zakonu, i u trenutku kada ulazni napon dostigne maksimalnu vrednost, ovaj napon je jednak naponu napajanja U_{CC} umanjenom za amplitudu napona na otporniku R_p , odnosno:

$$(4.6.6) \quad u_{CE1}(t) = (U_{CC} - U_{pm} \cdot \sin \omega t).$$

Taladni oblici kolektorske struje i napona između kolektora i emitora tranzistora T_1 prikazani su na slici 6.8.3. Srednja snaga disipacije na kolektoru tranzistora T_1 (pri čemu je ova snaga jednaka odgovarajućoj za tranzistor T_2 , ali u negativnoj poluperiodi) sada je jednaka:

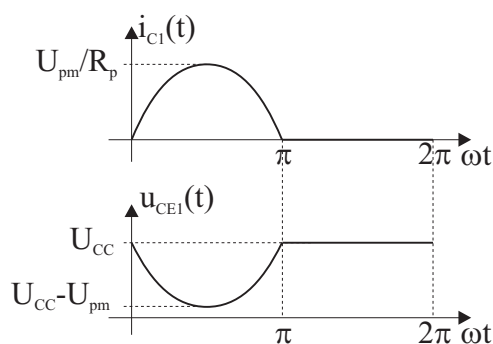
$$(4.6.7) \quad P_{C1} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_{C1}(t) \cdot u_{CE1}(t) \cdot dt.$$

Zamenom izraza za i_{C1} i u_{CE1} u izraz (4.6.7) i rešavanjem integrala dobija se da je srednja snaga disipacije na kolektoru u funkciji amplitude napona na otporniku R_p :

$$(4.6.8) \quad P_{C1} = \frac{U_{pm} \cdot U_{CC}}{\pi \cdot R_p} - \frac{U_{pm}^2}{4R_p}.$$

Za određivanje tražene vrednosti U_{pm} potrebno je diferencirati prethodni izraz po U_{pm} , i dobijeni izraz izjednačiti sa nulom. Odavde se dobija da je vrednost sinusoidalnog napona na otporniku R_p za koju tranzistori disipiraju maksimalnu snagu:

$$(4.6.9) \quad U_{pm} = (2U_{CC})/\pi = 20,13 \text{ V}.$$



Slika 4.6.4

Zamenom ove brojne vrednosti u (4.6.8) dobija se maksimalna srednja snaga disipacije na kolektoru jednog tranzistora, i ona iznosi:

$$(4.6.10) \quad P_{Cmax} = 10,13 \text{ W}.$$

c) Kod određivanja maksimalne srednje vrednosti snage koja može biti predata od izvora za napajanje, U_{CC} i $-U_{CC}$, neophodno je prethodno odrediti srednju vrednost struje koja protiče kroz ove izvore. Očigledno je da se ova srednja vrednost struje može izračunati kao:

$$(4.6.11) \quad I_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{U_{CC}}{R_p} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_{CC}}{\pi \cdot R_p}.$$

Maksimalna srednja vrednost snage koju predaje jedan izvor napajanja je sada jednaka:

$$(4.6.12) \quad P_{CC} = U_{CC} \cdot I_{CC} = U_{CC}^2 / (\pi \cdot R_p) = 31,83 \text{ W}.$$

d) S obzirom da postoje dva izvora napajanja, stepen iskorišćenja u ovom slučaju iznosi:

$$(4.6.13) \quad \eta = P_K / (2P_{CC}),$$

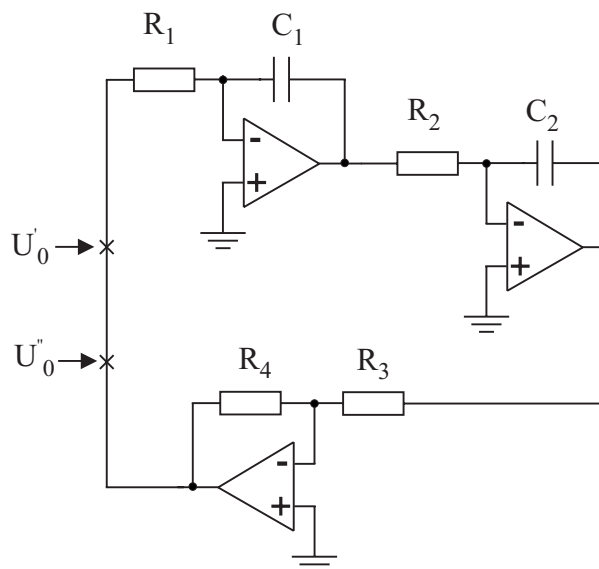
Zamenom brojnih vrednosti, pri čemu je uzeto $P_p = 50 \text{ W}$, dobija se:

$$(4.6.14) \quad \eta(\%) = 78,5 \%$$

5. OSCILATORI

5.1. ZADATAK

Na slici (Slika 5.1.1) prikazano je kolo oscilatora prostoperiodičnih oscilacija. Odrediti učestanost oscilovanja ako je $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$; $C_1 = C_2 = 1,6 \mu\text{F}$. Smatrati da su operacioni pojačavači idealni.



Slika 5.1.1

REŠENJE:

Posle raskidanja kola povratne sprege dobija se kolo (Slika 5.1.2).

Kružno pojačanje može da se dobije kao:

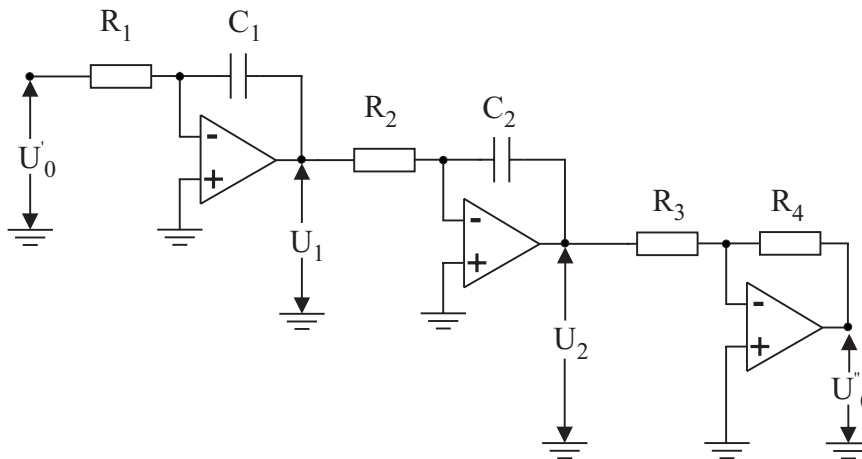
$$(5.1.1) \quad A\beta = \frac{U_0''}{U_0'} = \frac{U_0''}{U_2} \frac{U_2}{U_1} \frac{U_1}{U_0'} = -\frac{R_4}{R_3} \frac{U_2}{U_1} \frac{U_1}{U_0'}$$

gde potrebni odnosi mogu da se dobiju kao:

$$(5.1.2) \quad \frac{U_1}{U_0'} = -\frac{1/(j\omega C_1)}{R_1} = -\frac{1}{j\omega C_1 R_1}$$

$$(5.1.3) \quad \frac{U_2}{U_1} = -\frac{1/(j\omega C_2)}{R_2} = -\frac{1}{j\omega C_2 R_2}$$

$$(5.1.4) \quad A\beta = \frac{U_0''}{U_0'} = \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{\omega^2 C_1 R_1 C_2 R_2}$$



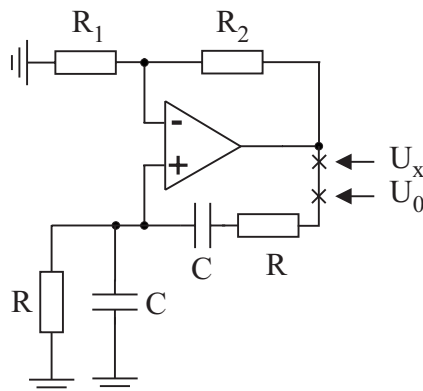
Slika 5.1.2

Uslov oscilovanja je $A\beta = 1$. Smenom izraza za kružno pojačanje u izraz za uslov oscilovanja dobijamo frekvenciju oscilovanja kao:

$$(5.1.5) \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2 R_3 / R_4}}$$

5.2. ZADATAK

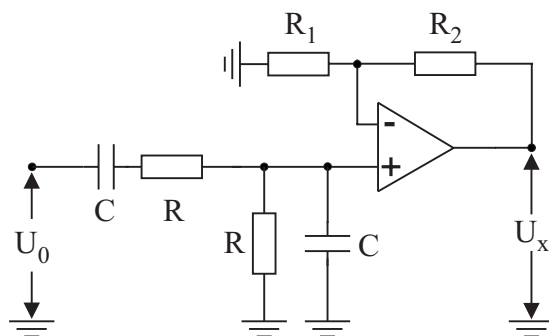
Za Vinov oscilator sa slike (Slika 5.2.1) odrediti uslov i frekvenciju oscilovanja. Elementi kola su: $R = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 1,6 \text{ nF}$.



Slika 5.2.1

REŠENJE:

Uslov oscilovanja je da je kružno pojačanje jednako jedinici. Kolo povratne sprege je prekinuto na izlazu operacionog pojačavača i ekvivalentno kolo je prikazano na slici (Slika 5.4.2). U opštem slučaju bilo bi neophodno sa druge strane preseka vezati otpornost koju vidi generator U_0 . S obzirom na to da je operacioni pojačavač idealan, kakva god impedansa da se veže na njegov izlaz, ona neće imati nikakvog uticaja. Iz tog razloga je izlaz operacionog i izabran kao pogodna tačka za prekid.



Slika 5.2.2

Kružno pojačanje može da se izrazi kao:

$$(5.2.1) \quad A\beta = \frac{U_x}{U_0} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

gde je

$$(5.2.2) \quad Z_1 = R \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R}{1 + j\omega CR} \quad \text{i} \quad Z_2 = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega CR}{j\omega C}$$

Sređivanjem se dobija:

$$(5.2.3) \quad A\beta = \frac{j\omega CR}{1 + 3j\omega CR - \omega^2 C^2 R^2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Iz $A\beta = 1 + j0$ dobija se učestanost oscilovanja:

$$(5.2.4) \quad \omega_0 = 1/(RC)$$

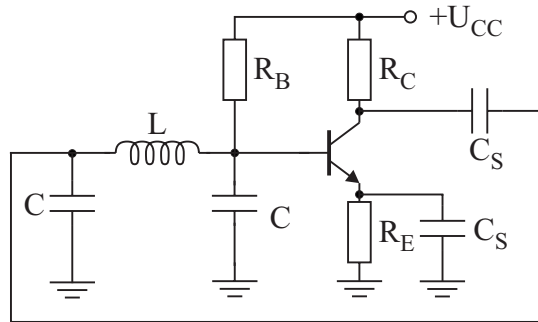
i uslov oscilovanja

$$(5.2.5) \quad R_2 = 2R_1.$$

5.3. ZADATAK

Za Kolpikov oscilator sa slike (Slika 5.3.1) odrediti frekvenciju oscilovanja i potrebnu vrednost parametra h_{21E} da bi se održale oscilacije u kolu. Poznato je:

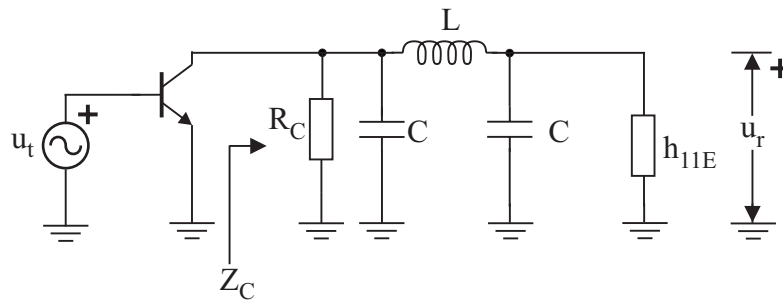
$R_C = 5 \text{ k}\Omega$, $L = 100 \text{ }\mu\text{H}$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$, $C_S \rightarrow \infty$, $R_B \gg h_{11E}$, $h_{11E} = 1 \text{ k}\Omega$, $h_{12E} = 0$ i $h_{22E} = 0 \text{ S}$.



Slika 5.3.1

REŠENJE:

Zadatak rešavamo presecanjem kola povratne sprege na pogodnom mestu, u ovom slučaju na bazi tranzistora, i izračunavanjem kružnog pojačnja $\beta A = u_r / u_t$.



Slika 5.3.2

Uvodimo oznake:

$$(5.3.1) \quad Z_1 = h_{11E} \parallel C = \frac{h_{11E}}{1 + j\omega h_{11E}C}$$

$$(5.3.2) \quad Z_2 = R_C \parallel C = \frac{R_C}{1 + j\omega R_C C}$$

$$(5.3.3) \quad Z_C = Z_2 \parallel (j\omega L + Z_1)$$

Kružno pojačanje može da se dobije kao:

$$(5.3.4) \quad \beta A = \frac{u_r}{u_t} = \frac{u_r}{u_c} \frac{u_c}{u_t} = \frac{Z_1}{j\omega L + Z_1} \left(-\frac{h_{21E}}{h_{11E}} Z_C \right) = -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + j\omega L}$$

Uslov oscilovanja je da je kružno pojačanje jednako jedinici. Iz imaginarnog dela dobijamo frekvenciju oscilovanja:

$$(5.3.5) \quad j2\omega CR_C h_{11E} + j\omega L - j\omega^3 C^2 h_{11E} R_C L = j0$$

$$(5.3.6) \quad 2CR_C h_{11E} + L = \omega^2 C^2 h_{11E} R_C L$$

$$(5.3.7) \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C^2 h_{11E} R_C} + \frac{2}{CL}} \approx 4,5 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Iz realnog dela kružnog pojačanja dobijamo potrebnu vrednost parametra h_{21E} da bi se održale oscilacije u kolu.

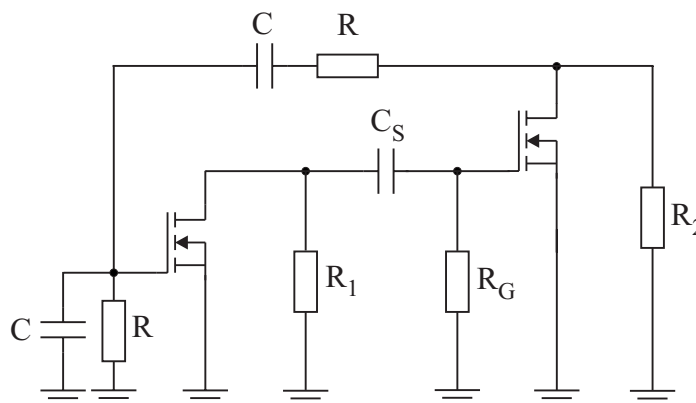
$$(5.3.8) \quad -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} \frac{h_{11E} R_C}{h_{11E} + R_C - \omega_0^2 LC(h_{11E} + R_C)} \geq 1$$

Kako je $\omega_0^2 = \frac{L + 2CR_C h_{11E}}{C^2 h_{11E} R_C L}$ dobijamo:

$$(5.3.9) \quad h_{21E} \geq \left(1 + \frac{h_{11E}}{R_C}\right) \left(1 + \frac{L}{h_{11E} R_C C}\right) = 1,224.$$

5.4. ZADATAK

Za kolo oscilatora čija je principijelna šema data na slici (Slika 5.4.1) odrediti frekvenciju oscilovanja i potrebnu vrednost strmine da bi se održale oscilacije u kolu ako je poznato: $R_1 = 0,25 \text{ k}\Omega$; $R = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$; $C = 1,4 \text{ nF}$; $C_S, R_G \rightarrow \infty$. Tranzistori su identični sa vrlo velikom unutrašnjom otpornošću.



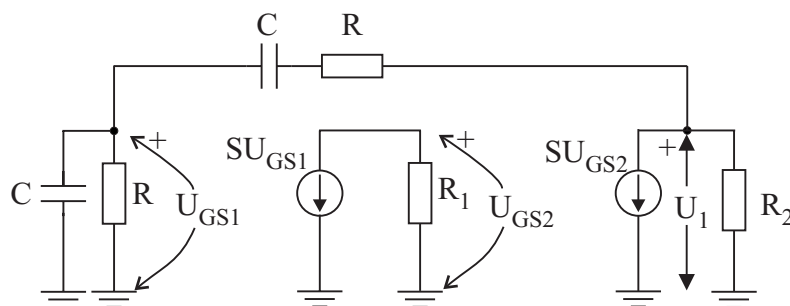
Slika 5.4.1

REŠENJE:

Uslov oscilovanja $A\beta=1$ iako je vrlo jednostavan po analitičkoj i fizičkoj interpretaciji, nije uvek primenljiv. Razlog tome je činjenica da nije ivek moguće jasno identifikovati šta je kolo pojačavača, a šta kolo povratne sprege. Stoga se pristupa drugačijem načinu određivanja uslova i frekvencije oscilovanja.

Ako se aktivni elementi u kolu zamene svojim modelima nastaje električno kolo koje se može analizirati, na primer, metodom potencijala čvorova. Rešavanjem sistema jednačina koji opisuje kolo uz činjenicu da kod oscilatora nema pobude dobija se da determinanta sistema mora da bude jednaka nuli kako bi sistem imao nenulta rešenja. Determinanta sistema je kompleksna veličina pa se ovaj kriterijum svodi na dve posebne jednačine, da realni i imaginarni deo determinante sistema bude jednak nuli.

Šema oscilatora za naizmenični režim data je na slici (Slika 5.4.2).



Slika 5.4.2

Za dato kolo važi:

$$(5.4.1) \quad U_{GS2} = -SU_{GS1}R_1$$

$$(5.4.2) \quad U_{GS1} \left(j\omega C + \frac{1}{R} \right) + \frac{U_{GS1} - U_1}{R + 1/(j\omega C)} = 0$$

$$(5.4.3) \quad SU_{GS2} + \frac{U_1}{R_2} + \frac{U_{GS1} - U_1}{R + 1/(j\omega C)} = 0$$

Zamenom (5.4.1) u (5.4.2) i (5.4.3) dobija se sistem jednačina koje opisuju kolo:

$$(5.4.4) \quad U_{GS1} \left(\frac{1 + j\omega CR}{R} + \frac{j\omega C}{1 + j\omega CR} \right) - U_1 \left(\frac{j\omega C}{1 + j\omega CR} \right) = 0$$

$$(5.4.5) \quad U_{GS1} \left(S^2 R_1 + \frac{j\omega C}{1 + j\omega CR} \right) + U_1 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{j\omega R}{1 + j\omega CR} \right) = 0$$

Uslov oscilovanja je:

$$(5.4.6) \quad \begin{vmatrix} \frac{1 + j\omega CR}{R} + \frac{j\omega C}{1 + j\omega CR} & -\frac{j\omega C}{1 + j\omega CR} \\ S^2 R_1 + \frac{j\omega C}{1 + j\omega CR} & \frac{1}{R_2} + \frac{j\omega R}{1 + j\omega CR} \end{vmatrix} = 0 + j0$$

Sređivanjem determinante i izdvajanjem realnog i imaginarnog dela dobija se:

$$(5.4.7) \quad \frac{1}{RR_2} - \omega^2 C^2 R \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} \right) = 0$$

$$(5.4.8) \quad j\omega C \left(\frac{3}{R_2} + \frac{1}{R} - s^2 R_1 \right) = j0$$

odakle se dobija učestanost oscilacija, kao i uslov oscilovanja

$$(5.4.9) \quad \omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{(1+R_2/R_1)}} = 5 \cdot 10^5 \text{ rad/s}$$

$$(5.4.10) \quad S = \sqrt{\frac{3R + R_1}{RR_1R_2}} = 4 \text{ mS}$$

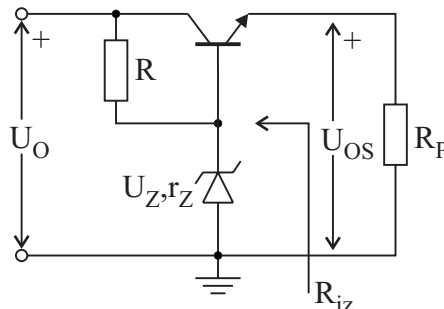
6. STABILIZATORI

6.1. ZADATAK

Za kolo rednog stabilizatora prikazanog na slici (Slika 6.1.1) odrediti:

- Izlazni napon U_{OS}
- Faktor stabilizacije
- Izlaznu otpornost R_{iz}

Poznato je: $R = 200\Omega$; $R_P = 50\Omega$; $U_O = 10V$. Parametri diode su: $U_Z = 6,8V$; $r_Z = 10\Omega$. Parametri tranzistora su: $U_{BE} = 0,7V$; $h_{11E} = 1k\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{21E} = \beta = 100$; $h_{22E} = 0$.



Slika 6.1.1

REŠENJE:

Zadatak stabilizatora je da omogući da izlazni napon U_{OS} bude što je moguće manje osetljiv na bilo kakve promene u kolu. Kao mera osetljivosti izlaznog napona na promene ulaznog napona uvodi se veličina *faktor stabilizacije* kao

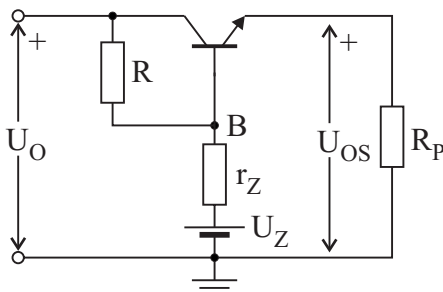
$$(6.1.1) \quad S = \frac{\Delta U_{OS}}{\Delta U_O}$$

Ova veličina, očigledno, treba da ima što je moguće manju vrednost.

Da bi izlazni napon bio što manje osetljiv na promenu otpornosti potrošača R_P , potrebno je da izlazna otpornost stabilizatora R_{iz} bude što je moguće manja, odnosno da se na izlazu stabilizator što više približi idealnom naponskom generatoru.

Element koji omogućava održavanje konstantnog napona je zener dioda. Na osnovu karakteristike ove diode može se videti, da je u oblasti proboja napon na diodi približno konstantan (U_Z) i za velike promene struje kroz diodu.

a) Na slici (Slika 6.1.2) prikazana je šema kola za analizu u jednosmernom režimu, pri čemu je zener dioda zamenjena modelom za oblast proboja.



Slika 6.1.2

Za kolo važe sledeće jednačine:

$$(6.1.2) \quad \frac{U_O - U_B}{R} = I_B + \frac{U_B - U_Z}{r_Z}$$

$$(6.1.3) \quad U_{OS} = (1 + \beta) \cdot I_B \cdot R_P$$

$$(6.1.4) \quad U_B = U_{OS} + U_{BE}$$

Na osnovu prethodnih jednačina dobija se:

$$(6.1.5) \quad U_{OS} = \frac{(U_O r_Z + U_Z R) / (R + r_Z) - U_{BE}}{1 + (R \parallel r_Z) / ((1 + \beta) R_P)} = 6,24V$$

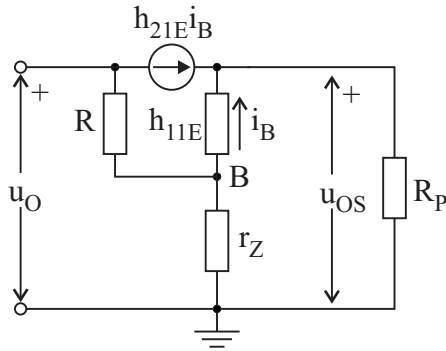
Treba napomenuti da se izlazni napon može približno dobiti kao:

$$(6.1.6) \quad U_{OS} \approx U_Z - U_{BE} = 6,1V$$

b) Faktor stabilizacije je definisan sa:

$$S = \frac{\Delta U_{OS}}{\Delta U_O} = \frac{u_{OS}}{u_O}$$

gde možemo, s obzirom na to da se radi o priraštajima, traženu vrednost da nađemo analizom kola u naizmeničnom režimu, prikazanom na slici (Slika 6.1.3).



Slika 6.1.3

Za prikazano kolo važe jednačine:

$$(6.1.7) \quad \frac{u_{OS} - u_B}{R} = i_B + \frac{u_B}{r_Z}$$

$$(6.1.8) \quad u_{OS} = (1 + h_{21E}) \cdot R_P \cdot i_B$$

$$(6.1.9) \quad i_B = (u_B - u_{OS}) / h_{11E}$$

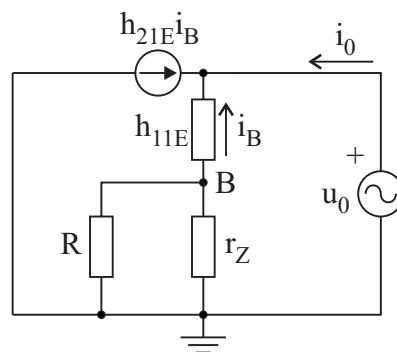
Na osnovu prethodnih jednačina dobija se:

$$(6.1.10) \quad S = \frac{u_{OS}}{u_O} = \frac{1}{1 + \frac{h_{11E} + R}{(1 + h_{21E})R_P} + \left(1 + \frac{h_{11E}}{(1 + h_{21E})R_P}\right) \frac{R}{r_Z}} = 0,04$$

Treba uočiti da se prethodni izraz može aproksimirati sa:

$$(6.1.11) \quad S \approx \frac{r_Z}{R} = 0,05$$

c) Izlaznu otpornost odredićemo na osnovu kola sa slike (Slika 6.1.4)



Slika 6.1.4

Dobija se:

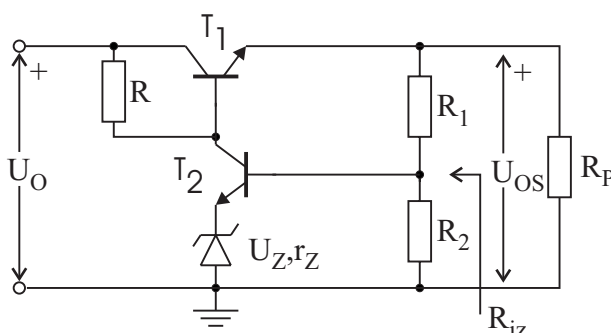
$$(6.1.12) \quad R_{iz} = \frac{h_{11E} + R \parallel r_Z}{1 + h_{21E}} \approx \frac{h_{11E} + r_Z}{1 + h_{21E}} = 10\Omega$$

6.2. ZADATAK

Za kolo rednog stabilizatora prikazanog na slici (Slika 6.2.1) odrediti:

- d) Izlazni napon U_{OS}
- e) Faktor stabilizacije
- f) Izlaznu otpornost R_{iz}

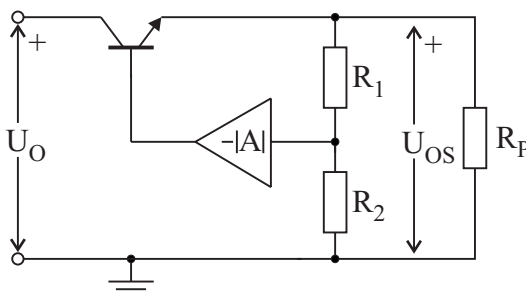
Poznato je: $R_1 = R_2 = 4\text{k}\Omega$; $R_P = 2\Omega$; $R = 10\text{k}\Omega$, $U_O = 40\text{V}$. Parametri diode su: $U_Z = 10\text{V}$; $r_Z = 0\Omega$. Parametri tranzistora su: $U_{BE} = 0,7\text{V}$; $h_{11E} = 1\text{k}\Omega$; $h_{12E} = 0$; $h_{22E} = \beta = 100$; $h_{21E} = 0$.



Slika 6.2.1

REŠENJE:

Kolo sa slike (Slika 6.2.1) predstavlja poboljšanu varijantu kola sa slike (Slika 6.1.1). Poboljšanje je ostvareno uvođenjem negativne povratne sprege (Slika 6.2.2) koja se protivi promenama izlaznog napona, pa samim tim smanjuje vrednosti faktora stabilizacije i izlazne otpornosti.



Slika 6.2.2

a) Za kolo važe sledeće jednačine:

$$(6.2.1) \quad U_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - U_{OS} \frac{1}{R_1} + I_{B1} = 0$$

$$(6.2.2) \quad U_2 \frac{1}{R} - U_O \frac{1}{R} + I_{B1} + \beta I_{B2} = 0$$

$$(6.2.3) \quad U_{OS} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_P} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - (\beta + 1) I_{B1} = 0$$

Imajući u vidu da važi i:

$$(6.2.4) \quad U_1 = U_Z + U_{BE} \quad \text{i} \quad U_2 = U_{OS} + U_{BE}$$

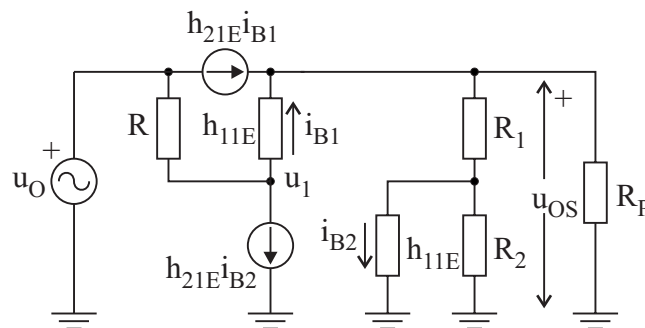
dobija se:

$$(6.2.5) \quad U_{OS} = \frac{(U_Z + U_{BE}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{\beta(\beta+1)}{R_1 \parallel R_2} \right) + (U_O - U_{BE}) \frac{\beta+1}{R}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_P} + (\beta+1) \frac{1}{R} - \beta(\beta+1) \frac{1}{R_1}} = 21,13V$$

Treba uočiti da se približna vrednost izlazno napona može jednostavnije dobiti, ukoliko se zanemari struja I_{B2} , kao:

$$(6.2.6) \quad U_{OS} = (U_Z - U_{BE}) \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 18,6V$$

b) Faktor stabilizacije se može dobiti analizom kola u naizmenim režimu, čija je šema data na slici (Slika 6.2.3)



Slika 6.2.3

Kolo se može opisati jednačinama:

$$(6.2.7) \quad u_1 \frac{1}{R} - u_O \frac{1}{R} + i_{B1} + h_{21E} i_{B2} = 0$$

$$(6.2.8) \quad u_{OS} \left(\frac{1}{R_{ek}} + \frac{1}{R_P} \right) - (h_{21E} + 1) i_{B1} = 0$$

gde je $R_{ek} = R_1 + h_{11E} \parallel R_2$.

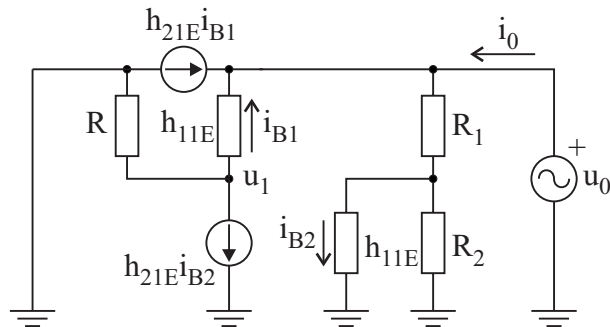
Imajući u vidu da važi:

$$(6.2.9) \quad i_{B1} = \frac{u_1 - u_{OS}}{h_{11E}} \quad \text{ i } \quad i_{B2} = \frac{R_2}{h_{11E} + R_2} \frac{u_{OS}}{R_{ek}}$$

dobijamo:

$$(6.2.10) \quad S = \frac{u_{OS}}{u_O} = \frac{1}{\frac{h_{11E} + R}{(1 + h_{21E})R_{ek} \parallel R_P} + \frac{h_{21E}R_2R}{(h_{11E} + R_2)R_{ek}} + 1} = 5,96 \cdot 10^{-3}$$

c) Izlaznu otpornost dobijamo analizom kola sa slike (Slika 6.2.4)



Slika 6.2.4

Za izlaznu otpornost dobija se:

$$(6.2.11) \quad R_{iz} = \frac{u_0}{i_0} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ek}} + \frac{(1 + h_{21E})R}{R + R_{ek}} \left(\frac{1}{R} + \frac{h_{21E}R_2}{(h_{11E} + R_2)R_{ek}} \right)} = 0,65\Omega$$

Treba uočiti da su vrednosti faktora stabilizacije i izlazne otpornosti povoljnije nego za slučaj osnovnog kola rednog stabilizatora, što je i bilo očekivano.