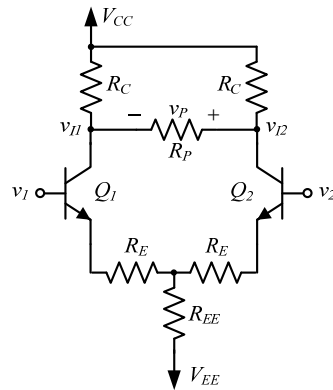


1. U diferencijalnom pojačavaču sa slike 1, parametri tranzistora su $V_{BE} = 0,7V$, $V_{CES} = 0,2V$, $V_A \rightarrow \infty$ i $\beta_F = 100$, dok je $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$, $R_C = 2,2k\Omega$, $R_E = 50\Omega$, $R_{EE} = 3,3k\Omega$ i $R_P = 10k\Omega$.

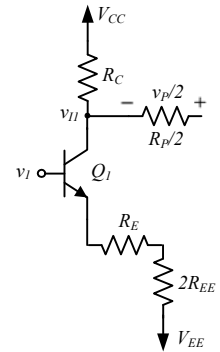
- Odrediti struje kolektora u mirnoj radnoj tački pri $v_1 = v_2 = 0$;
- Odrediti diferencijalna pojačanja $a_d = v_p/v_d$ i $a_{d1} = v_{i1}/v_d$, gde je $v_d = v_1 - v_2$ u okolini mirne radne tačke;
- Odrediti faktore potiskivanja napona srednje vrednosti na ulazu pojačavača $\rho_1 = a_{d1}/a_{s1}$ i $\rho = a_d/a_s$, gde je $a_s = v_p/v_s$ i $a_{s1} = v_{i1}/v_s$, $v_s = (v_1 + v_2)/2$;
- Ako je $v_1 = v_2 = V$, odrediti opseg napona $V_{min} \leq V \leq V_{max}$ u kojem oba tranzistora rade u direktnom aktivnom režimu;
- Ako je $v_1 = -v_2$ i oba tranzistora rade u direktnom aktivnom režimu, odrediti zavisnost $v_p = f(v_1)$;



Slika 1

Rešenje:

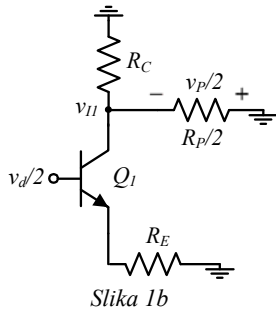
a) Primenom bisekcionne teoreme na kolo u mirnoj radnoj tački dobija se šema prikazana na slici 1a. Prema slici je $I_{C1} = \frac{-V_{BE}-V_{EE}}{R_E+2R_{EE}} = 1,7mA$, $V_{C1} = V_{CC} - R_C I_{C1} = 8,26V$. Zbog simetrije kola je $I_{C2} = I_{C1} = 1,7mA$ i $V_{C2} = V_{C1} = 8,26V$.



Slika 1a

b) Primenom bisekcionne teoreme na kolo za male signale pobuđeno diferencijalnom pobudom, dobija se uprošćena šema prikazana na slici 1b. Parametri u

modelu tranzistora za male signale su $r_{\pi 1,2} = \frac{\beta_0 V_T}{I_{C1,2}} = 1,47k\Omega$.



Slika 1b

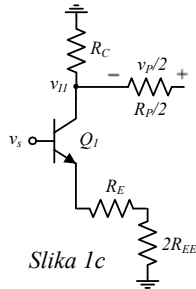
Prema slici 1b je $i_{b1} = \frac{v_d/2}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0)R_E}$, $i_{c1} = \beta_0 i_{b1}$ i $v_{i1} =$

$-(R_C \parallel (R_P/2))i_{c1}$, odakle je $a_{d1} = \frac{v_{i1}}{v_d} = -\frac{1}{2} \frac{\beta_0}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0)R_E} (R_C \parallel (R_P/2)) =$

$-11,7$. Kako je $v_p = v_{i2} - v_{i1}$ i $v_{i2} = -v_{i1}$, to je $a_d = \frac{v_p}{v_d} = \frac{v_{i2} - v_{i1}}{v_d} = \frac{-2v_{i1}}{v_d} =$

$-2a_{d1} = \frac{\beta_0}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0)R_E} (R_C \parallel (R_P/2)) = 23,4$.

c) Primenom bisekcionne teoreme za napon srednje vrednosti na ulazu pojačavača dobija se uprošćeno kolo prikazano na slici 1c. Zbog simetrije kola je $v_{i1} = v_{i2}$, pa je $v_p = v_{i2} - v_{i1} = 0$, odakle je $a_s = 0$ i $CMRR = \rho = \frac{a_d}{a_s} \rightarrow \infty$.



Slika 1c

Kako je $i_{b1} = \frac{v_s}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0)(R_E + 2R_{EE})}$, $i_{c1} = \beta_0 i_{b1}$ i $v_{i1} = -R_C i_{c1}$ to je $a_{s1} = \frac{v_{i1}}{v_s} = \frac{\beta_0 R_C}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0)(R_E + 2R_{EE})}$, pa je $a_{s1} = -0,327$. Sada je $CMRR_1 = \rho_1 = |a_{d1}/a_{s1}| = 35,8$.

d) Kada je $v_1 = v_2 = V$ i oba tranzistora rade u direktnom aktivnom režimu, tada je prema slici 1d, a na osnovu bisekcionne teoreme $I_{C1} = \frac{V - V_{BE} - V_{EE}}{R_E + 2R_{EE}}$.

Smanjenjem napona V se smanjuju napon emitera i kolektorska struja, dok se napon kolektora povećava. Minimalan napon V određen je zakočenjem tranzistora i iznosi $V_{min} = V_{EE} + V_{BE} = -11,3V$.

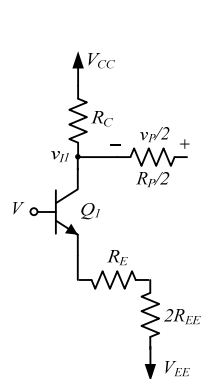
Povećanjem napona V se povećava napon emitera i kolektorska struja, dok se smanjuje napon na kolektoru. Maksimalna vrednost napona V određena je granicom zasićenja, kada je $v_{CE1} = V_{CES}$. Tada je $V_{CC} - R_C I_C = V_{max} - V_{BE} + V_{CES}$, $V_{CC} - R_C \frac{V - V_{BE} - V_{EE}}{R_E + 2R_{EE}} = V_{max} - V_{BE} + V_{CES}$, odakle je

$$V_{max} = \frac{V_{CC} \left(1 - \frac{R_C}{R_E + 2R_{EE}}\right) + V_{BE} \left(1 + \frac{R_C}{R_E + 2R_{EE}}\right) - V_{CES}}{1 + R_C / (R_E + 2R_{EE})} = 6,58V.$$

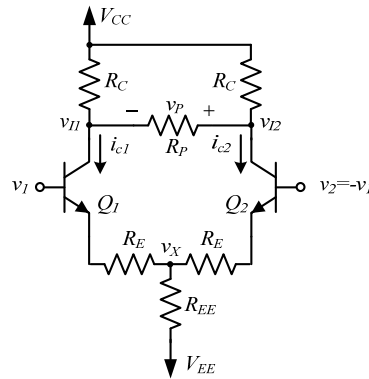
e) Kada oba tranzistora provode u direktnom aktivnom režimu, tada je $\frac{v_1 - V_{BE} - v_X}{R_E} + \frac{-v_1 - V_{BE} - v_X}{R_E} = \frac{v_X - V_{EE}}{R_{EE}}$, odakle je $v_X = \frac{V_{EE} R_E - 2V_{BE} R_{EE}}{R_E + 2R_{EE}} = -785mV$ (slika 1e).

Sada je $i_{C1} = \frac{v_1 - V_{BE} - v_X}{R_E} = 20mS \cdot v_1 + 1,7mA$. Slično je $i_{C2} = \frac{-v_1 - V_{BE} - v_X}{R_E} = -20mS \cdot v_1 + 1,7mA$.

Kako je $\frac{V_{CC} - v_{I1}}{R_C} = i_{C1} - v_P / R_P$ i $\frac{V_{CC} - v_{I2}}{R_C} = i_{C2} + v_P / R_P$, to je $v_P = \frac{R_C(i_{C1} - i_{C2})}{1 + 2R_C / R_P} = \frac{2R_C / R_E}{1 + 2R_C / R_E} v_1 = 61 \cdot v_1$.



Slika 1d

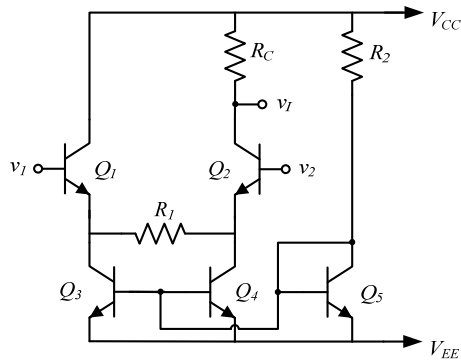


Slika 1e

2. U diferencijalnom pojačavaču sa slike 2 je $R_C = 5k\Omega$, $R_1 = 500\Omega$, $R_2 = 19,4k\Omega$, $V_{CC} = -V_{EE} = 10V$, $V_{BE} = 0,6V$, $\beta = 100$ $V_A \rightarrow \infty$.

- a) Odrediti diferencijalno pojačanje $a_d = v_i/v_d$ gde je $v_d = v_1 - v_2$ u okolini mirne radne tačke;
- b) Odrediti faktor potiskivanja napona srednje vrednosti na ulazu pojačavača $\rho = a_d/a_s$ gde je $a_s = v_i/v_s$ i $v_s = (v_1 + v_2)/2$;
- c) Odrediti ulaznu otpornost za diferencijalni signal R_{ud} , ulaznu otpornost za signal srednje vrednosti R_{us} i izlaznu otpornost R_i .

Ponoviti zadatak ukoliko je $V_A = 100V$ i usvajajući pretpostavku da se može primeniti bisekciona teorema.



Slika 2

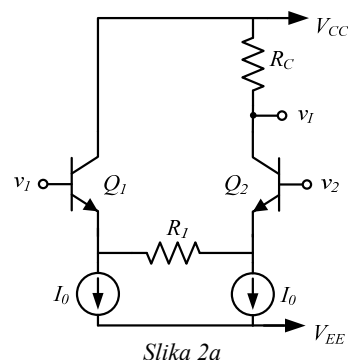
Rešenje:

Tranzistori Q_5, Q_4 i Q_3 čine strujno ogledalo struje $I_0 = \frac{V_{CC}-V_{EE}-V_{BE}}{R_2} = 1mA$. Uprošćena šema data je na slici 2a.

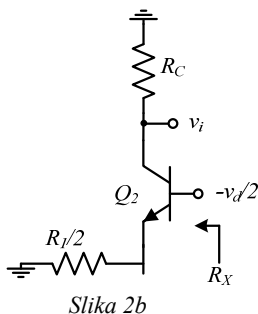
a) Kolo nije simetrično, pa se ne može primeniti bisekciona teorema. Dodavanjem otpornika R_C u kolektor tranzistora Q_1 se ne utiče na ostatak kola, dok celo kolo postaje simetrično. Primenom bisekcione teoreme na takvo kolo dobija se šema na slici 2b. Parametri za male signale su $g_m = \frac{I_0}{V_T} = 4mS$ i $r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \frac{\beta V_T}{I_0} = 25k\Omega$.

Ulazna otpornost sa slike 2b je $R_X = r_\pi + (1 + \beta) \frac{R_1}{2} = 50k\Omega$, pa je $i_b = \frac{-v_d/2}{R_X}$. Sada je $v_i = -i_c R_C = -\beta i_b R_C = \frac{1}{2} \frac{\beta_0 v_d}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0) R_1/2} R_C$.

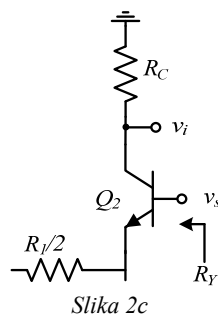
Odavde je $a_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{1}{2} \frac{\beta_0}{r_{\pi 1} + (1 + \beta_0) R_1/2} R_C \approx \frac{g_m R_C}{2} = 5$.



Slika 2a



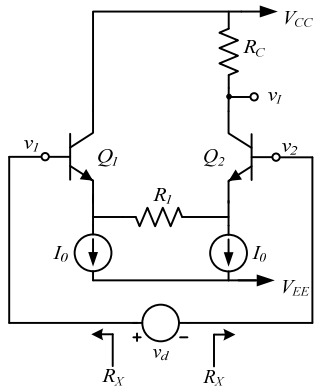
Slika 2b



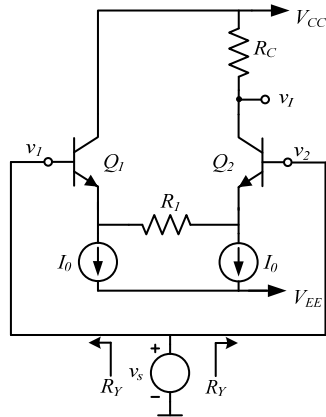
Slika 2c

b) Šema po kojoj se određuje pojačanje signala srednje vrednosti, dobijena bisekcionom teoremom, data je na slici 2c. Prema ovoj šemi je $i_b = 0$, pa je $i_c = 0$, odnosno $v_i = 0$. Sada je $a_s = 0$, odakle je $\rho = \frac{a_d}{a_s} \rightarrow \infty$. Kako je $i_b = 0$, otpornost R_Y koja se vidi na ulazu je $R_Y \rightarrow \infty$.

c) Šema sa koje se određuje ulazna otpornost za diferencijalni signal R_{ud} data je na slici 2d, dok je šema sa koje se određuje ulazna otpornost za diferencijalni signal R_{us} data na slici 2e.



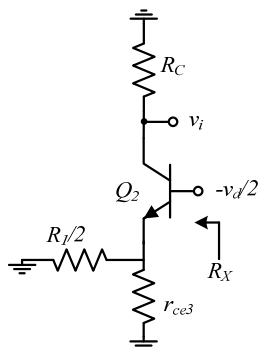
Slika 2d



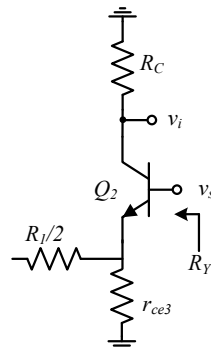
Slika 2e

Prema ovim šemama je $R_{ud} = 2R_X = 100\text{k}\Omega$ i $R_{us} = \frac{R_Y}{2} = \infty$. Izlazna otpornost je $R_i = R_C = 5\text{k}\Omega$.

U slučaju $V_A = 100\Omega$, u šeme za male signale treba uključiti i otpornosti r_{ce} koje su posledice Early-jevog efekta (slike 2f i 2g).



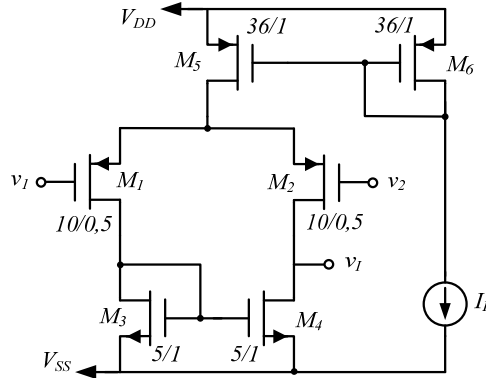
Slika 2f



Slika 2g

3. U diferencijalnom pojačavaču sa slike 3 je $V_T = 0,7V$, $\mu_n C_{ox} = 110\mu A/V^2$, $\mu_p C_{ox} = 50\mu A/V^2$, $\lambda_n = 0,04V^{-1}$, $\lambda_p = 0,05V^{-1}$, $I_B = 50\mu A$, $V_{DD} = -V_{SS} = 3V$, dok su geometrije tranzistora date pored svakog tranzistora na slici 3.

- Odrediti diferencijalno pojačanje $a_d = v_i/v_d$ gde je $v_d = v_1 - v_2$ u okolini mirne radne tačke;
- Odrediti izlaznu otpornost R_i ;
- Ako je $v_1 = v_2 = V$, odrediti opseg napona $V_{min} \leq V \leq V_{max}$ u kojem oba tranzistora rade u direktnom aktivnom režimu;
- Odrediti faktor potiskivanja napona srednje vrednosti na ulazu pojačavača $\rho = a_d/a_s$ gde je $a_s = v_i/v_s$ i $v_s = (v_1 + v_2)/2$;

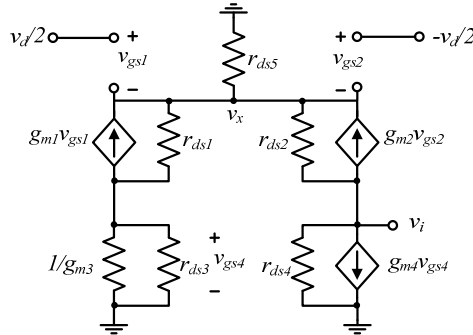


Slika 3

Rešenje:

a) Šema za male signale data je na slici 3a. Kako je $I_{D5} = I_{D6} = I_B$ i $I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = \frac{I_B}{2}$, to je $r_{ds1,2} = 800k\Omega$, $r_{ds3,4} = 1M\Omega$, $r_{ds5} = 400k\Omega$, $g_{m1,2} = 250\mu S$ i $g_{m3,4} = 165,8\mu S$.

Na originalno se ne može primeniti bisekciona teorema, s obzirom da nije simetrično. Šema za male signale sa slike 2a se može tačno rešiti, ali u cilju lakšeg rešavanja usvojićemo aproksimaciju da je $v_x = 0$ u slučaju diferencijalne pobude. U slučaju da je kolo potpuno simetrično, imali bi $v_x = 0$ iz bisekcione teoreme. Uz ovu pretpostavku, kolo se mnogo jednostavnije rešava.



Slika 3a

Prema slici 3a je $v_{gs4} = -\frac{g_{m1}v_d}{2} \left(r_{ds1} \parallel r_{ds3} \parallel \frac{1}{g_{m3}} \right) \approx -\frac{g_{m1}}{g_{m3}} \frac{v_d}{2}$. Sada je $v_i = -\left(g_{m2} \left(-\frac{v_d}{2} \right) + g_{m4} v_{gs4} \right) (r_{ds2} \parallel r_{ds4}) = \left(g_{m2} \frac{v_d}{2} + g_{m4} \frac{g_{m1}}{g_{m3}} \frac{v_d}{2} \right) (r_{ds2} \parallel r_{ds4}) = v_d g_{m1} (r_{ds2} \parallel r_{ds4})$. Dakle $a_d = \frac{v_i}{v_d} = g_{m1} = (r_{ds2} \parallel r_{ds4}) = 111$.

- Prema pretpostavkama iz prethodne tačke je $R_i = r_{ds2} \parallel r_{ds4} = 444k\Omega$.

c) Pri promeni napona $v_1 = v_2 = V$ su sve struje dregnova tranzistora nepromenjene, sve dok su svi tranzistoru u zasićenju. To znači i da se svi naponi gejst-sors ne menjaju.

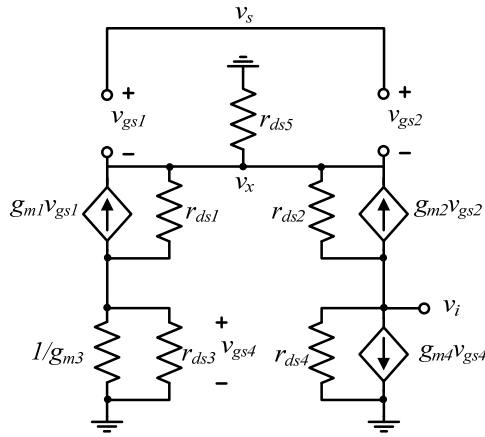
Pri povećanju napona $v_1 = v_2 = V$ se povećava i napon sorsova tranzistora $M1$ i $M2$, odnosno napon drejna tranzistora $M5$, $V_{S2} = V_{S1} = V_{D5} = V + V_{GS1,2}$. U graničnom slučaju će tranzistor $M5$ biti na granici zasićenja i triodne oblasti, odakle je

$$V_{max} = V_{DD} - V_{SD5min} - V_{SG1,2} = V_{DD} - \sqrt{2I_B/B_5} - \left(V_T + \sqrt{\frac{2I_B}{B_3}} \right) = 1,85V.$$

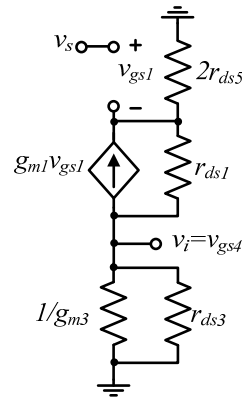
Pri smanjenju napona $v_1 = v_2 = V$ se smanjuje napon gejta tranzistora $M1$ i $M2$, dok se napon drejna $M3$ ne menja, odnosno napon V_{GD1} se smanjuje. U graničnom slučaju je tranzistor $M1$ na granici zasićenja i triodne oblasti, odakle je

$$V_{min} = V_{SS} + V_{DS3min} + V_{GD1min} = V_{SS} + \left(V_T + \sqrt{\frac{2I_B}{B_3}} \right) - V_T = -2,7V.$$

d) Šema za male signale data je na slici 3b.



Slika 3b



Slika 3c

Primenom prvog Kirhofovog zakona za čvorove na slici 3b dobija se

$$v_{gs4}(g_{m3} + g_{ds3}) + v_{gs1}g_{m1} + (v_{gs4} - v_x)g_{ds1} = 0$$

$$v_i g_{ds4} + v_{gs4}g_{m4} + (v_i - v_x)g_{ds2} + g_{m2}v_{gs2} = 0$$

Oduzimanjem ovih jednačina i korišćenjem $g_{m3} = g_{m4}$, $g_{m1} = g_{m2}$, $v_{gs1} = v_{gs2}$, dobija se $v_{gs4} = v_i$.

Ovo znači da je kolo simetrično i da se može primeniti bisekciona teorema, odakle se dobija kolo sa slike 3c. Prema ovoj šemi je

$$v_{gs1} = v_s - v_{s1}$$

$$v_{s1} = -2r_{ds5}v_i(g_{ds3} + g_{m3})$$

$$v_i(g_{ds3} + g_{m3}) + v_{gs1}g_{m1} + (v_i + v_{s1})g_{ds1} = 0$$

$$a_s = \frac{v_i}{v_s} = -\frac{g_{m1}}{(g_{ds3} + g_{m3})(1 + 2r_{ds5}(g_{m1} + g_{ds1})) + g_{ds1}}$$

$$a_s \approx -\frac{g_{m1}}{2g_{m3}r_{ds5}g_{m1}} = -\frac{1}{2g_{m3}r_{ds5}} = -7,54 \cdot 10^{-3}$$

Sada je $\rho = 2g_{m1}g_{m3}r_{ds5}(r_{ds2} \parallel r_{ds4}) = \frac{a_d}{a_s} = 14730$.