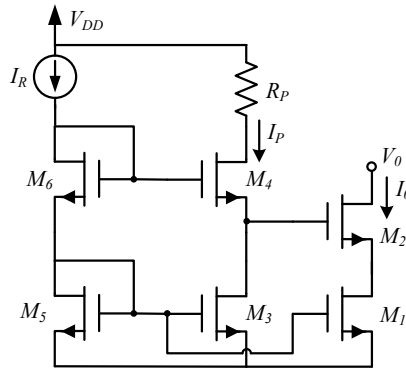


1. U kolu sa slike 1 parametri tranzistora su  $\mu_n C_{ox} = 110 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_T = 0,7\text{V}$ ,  $\lambda_n = 0,04\text{V}^{-1}$  i  $(W/L)_{1-5} = 10/1$ , dok je  $V_{DD} = 3\text{V}$  i  $I_R = 25 \mu\text{A}$ .

- Ako svi tranzistori rade u zasićenju, odrediti struje  $I_0$  i  $I_P$ . Zanimariti uticaj Early-jevog efekta;
- Odrediti izlaznu otpornost strujnog ogledala  $R_0$ ;
- Odrediti otpornost  $R_I$  koju vidi potrošač  $R_P$ ;
- Odrediti otpornost  $R_R$  koju vidi strujni izvor  $I_R$ ;
- Za  $(W/L)_6 = 10/1$  odrediti maksimalnu otpornost potrošača  $R_{P_{\max}}$  pri kojoj su svi tranzistori u zasićenju. Zanimariti uticaj Early-jevog efekta;
- Za  $R_{P_{\max}}$  iz prethodne tačke, odrediti odnos širine i dužine kanala  $(W/L)_6$  tako da napon  $V_0$ , pri kome svi tranzistori rade u zasićenju, bude minimalan. Zanimariti uticaj Early-jevog efekta.



Slika 1

**Rešenje:**

a) Kada su svi tranzistori u zasićenju, tada je  $I_{D4} = I_{D3} = I_P$ ,  $I_{D2} = I_{D1} = I_0$  i  $I_{D6} = I_{D5} = I_R$ . Kako je  $V_{GS} = V_T + \sqrt{2I_D/B}$  i  $V_{GS5} = V_{GS3} = V_{GS1}$ , to je  $\frac{I_{D1}}{B_1} = \frac{I_{D3}}{B_3} = \frac{I_{D5}}{B_5}$ . Zbog  $B_1 = B_3 = B_5$  imamo  $I_{D1} = I_{D3} = I_{D5} = I_R = 25 \mu\text{A} = I_P = I_0$ .

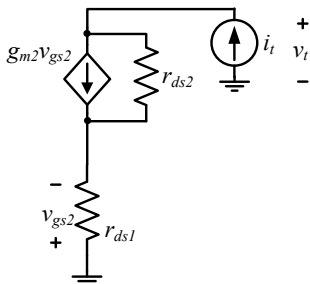
b) Kako struja drejna  $I_{D5} = I_{D6} = I_R$  konstantna, to su i  $v_{GS5}$  i  $v_{GS6}$  konstantni naponi. Zo znači i da je napon gejtova  $V_{G6} = V_{G5} = V_{G4} = V_{G3} = V_{G1}$  konstantan, odnosno na masi u šemi za male signale.

Šema za male signale iz koje se određuje otpornost  $R_0$  data je na slici 1a. Parametri za male signale su  $g_m = g_{m2} = \sqrt{2I_0B} = 234,5 \mu\text{S}$  i  $r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_0} = 1\text{M}\Omega$ .

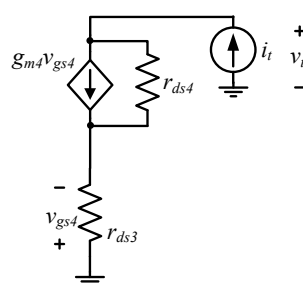
Prema slici 1a je  $v_{gs2} = -i_t r_{ds1}$  i  $v_t = r_{ds1} i_t + r_{ds2} (i_t - g_{m2} v_{gs2})$  odakle je  $R_0 = \frac{v_t}{i_t} = r_{ds1} + r_{ds2} (1 + g_{m2} r_{ds1}) \approx g_{m2} r_{ds1} r_{ds2} = 234,5\text{M}\Omega$ .

c) Prema slici 1b sa koje određujemo otpornost u ovom slučaju, imamo  $v_{gs4} = -i_t r_{ds3}$  i  $v_t = r_{ds3} i_t + r_{ds4} (i_t - g_{m4} v_{gs4})$ , odakle je  $R_I = \frac{v_t}{i_t} = r_{ds3} + r_{ds4} (1 + g_{m4} r_{ds3}) \approx g_{m4} r_{ds3} r_{ds4} = 234,5\text{M}\Omega$ .

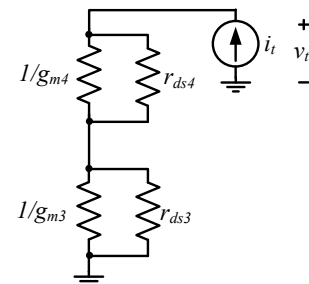
d) Na osnovu šeme za male signale na slici 1c je  $R_R = \frac{v_t}{i_t} = r_{ds6} \parallel \frac{1}{g_{m6}} + r_{ds5} \parallel \frac{1}{g_{m5}} = 8,52\text{k}\Omega$ .



Slika 1a



Slika 1b



Slika 1c

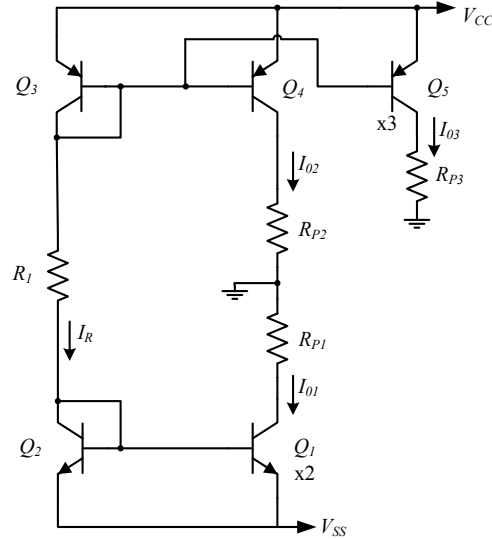
e) Maksimalna vrednost otpornosti potrošača određena je ulaskom tranzistora  $M_4$  u triodnu oblast. Tada je  $V_{DD} - R_{P\max} I_P = V_{GS5} + V_{GS6} + V_{DG4\min}$ ,  $V_{DD} - R_{P\max} I_P = 2V_{GS3} - V_T = 2(V_T + \sqrt{2I_P/B}) - V_T$ , odakle je  $R_{P\max} = \frac{V_{DD} - V_T - 2\sqrt{2I_P/B}}{I_P} = 75\text{k}\Omega$ .

f) Minimalna vrednost napona  $V_0$  određena je ulaskom tranzistora  $M_2$  u triodnu oblast. Tada je  $V_{0\min} = V_{G2} - V_T$ . Kako je  $V_{G2} = V_{GS5} + V_{GS6} - V_{GS4}$ , a zbog istih parametara i struja drejna tranzistora  $M_4$  i  $M_5$  je  $V_{GS4} = V_{GS5}$ , to je  $V_{G2} = V_{GS6}$ , odakle je  $V_{0\min} = V_{GS6} - V_T$ . Smanjivanjem napona  $V_{GS6}$  se smanjuje minimalna vrednost izlaznog napona  $V_0$ , ali i naopon sorsa tranzistora  $M_2$ . U граничном slučaju, tranzistor  $M_1$  se nalazi na ivici triodne oblasti i zasićenja.

Na granici triodne oblasti i zasićenja tranzistora  $M_1$  je  $V_{DS1\min} = \sqrt{2I_0/B}$ . Kako je  $V_{GS2} = V_T + \sqrt{2I_0/B}$ , to je  $V_{G2\min} = V_{DS1\min} + V_{GS2} = V_T + 2\sqrt{2I_0/B}$ . Sa druge strane je  $V_{GS6} = V_T + \sqrt{2I_R/B_6}$ . Kako je  $V_{G2} = V_{GS6}$ , to je  $V_T + 2\sqrt{2I_0/B} = V_T + \sqrt{2I_R/B_6}$ , odakle je  $B_6 = \frac{B}{4}$ , dakle  $(W/L)_6 = \frac{1}{4}(W/L)_{1-4}$ .

Minimalni napon  $V_0$  na izlazu je sada  $V_{0\min} = V_{G2\min} - V_T = V_T + 2\sqrt{2I_0/B} - V_T = 426\text{mV}$ .

2. U kolu strujnog izvora sa slike 2 tranzistor  $Q_1$  ima dva puta veću površinu emitera, a tranzistor  $Q_5$  tri puta veću površinu emitera od ostalih tranzistora u kolu. Ostali parametri tranzistora su  $\beta_{FN} = 100$ ,  $\beta_{FP} = 50$ ,  $|V_{CES}| = 0,2V$ ,  $|V_{BE}| = 0,6V$ ,  $V_A \rightarrow \infty$ . Poznato je  $V_{CC} = -V_{EE} = 5V$ ,  $R_1 = 8,8k\Omega$ ,  $R_{P1} = 2k\Omega$ ,  $R_{P2} = 3k\Omega$  i  $R_{P3} = 1k\Omega$ . Odrediti struje strujnih izvora  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  i  $I_{03}$ .



Slika 2

**Rešenje:**

Tranzistori  $Q_2$  i  $Q_3$  vode u direktnom aktivnom režimu, pa je stoga  $I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - V_{EB3} - V_{EE}}{R_1} = 1\text{mA}$ .

Pretpostavimo da su i ostali tranzistori u direktnom aktivnom režimu.

Kako je  $V_{BE1} = V_{BE2}$  to je  $V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}}$ , odakle je  $\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{S1}}{I_{S2}}$ . Kako je površina emitera tranzistora  $Q_1$  dva puta veća od površine emitera tranzistora  $Q_2$ , to je  $I_{S1} = 2I_{S2}$ , pa je  $I_{01} = I_{C1} = 2I_{C2}$ .

Kako je  $I_R = I_{C2} + I_{B2} + I_{B1}$  i  $I_{C2} = I_{01}/2$ ,  $I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_{FN}} = \frac{I_{01}}{2\beta_{FN}}$  i  $I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_{FN}} = \frac{I_{01}}{\beta_{FN}}$ , to je  $I_R = \frac{I_{01}}{2} + \frac{I_{01}}{2\beta_{FN}} + \frac{I_{01}}{\beta_{FN}} = I_{01} \frac{3 + \beta_{FN}}{2\beta_{FN}}$ , odakle se dobija  $I_{01} = 2I_R \frac{\beta_{FN}}{3 + \beta_{FN}} = 1,94\text{mA}$ .

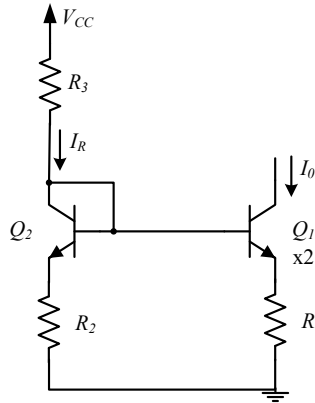
Kako je  $V_{EB3} = V_{EB4} = V_{EB5}$ , to je  $\frac{I_{C3}}{I_{S3}} = \frac{I_{C4}}{I_{S4}} = \frac{I_{C5}}{I_{S5}}$ . Iz odnosa površina emitera dobijamo  $I_{S5} = 3I_{S4} = 3I_{S3}$ , odnosno  $I_{C5} = I_{03}$ ,  $I_{C4} = I_{02} = \frac{I_{03}}{3}$  i  $I_{C3} = \frac{I_{03}}{3}$ .

Kako je  $I_R = I_{C3} + I_{B3} + I_{B4} + I_{B5}$  i  $I_{C3} = I_{02}$ ,  $I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta_{FP}} = \frac{I_{02}}{\beta_{FP}}$ ,  $I_{B4} = \frac{I_{C4}}{\beta_{FP}} = \frac{I_{02}}{\beta_{FP}}$  i  $I_{B5} = \frac{I_{C5}}{\beta_{FP}} = \frac{I_{03}}{\beta_{FP}}$ , to je  $I_R = I_{02} + \frac{I_{02}}{\beta_{FP}} + \frac{I_{02}}{\beta_{FP}} + \frac{I_{03}}{\beta_{FP}} = I_{02} \left(1 + \frac{2}{\beta_{FN}} + \frac{3}{\beta_{FN}}\right) = I_{02} \frac{5 + \beta_{FN}}{\beta_{FN}}$  odakle je  $I_{02} = I_R \frac{\beta_{FN}}{5 + \beta_{FN}} = 0,91\text{mA}$ .

Ostalo je još da proverimo početnu pretpostavku o radu svih tranzistora u direktnom aktivnom režimu. Kako je  $0 - R_{P1}I_{01} = -3,88V > -4,8V = V_{EE} + V_{CES}$ ,  $R_{P2}I_{02} = 2,73V < 4,8V = V_{CC} - V_{ECS}$  i  $R_{P3}I_{03} = 2,73V < 4,8V = V_{CC} - V_{ECS}$ , to su početne pretpostavke opravdane.

3. U kolu strujnog izvora sa slike 3 tranzistor  $Q_1$  ima 2 puta veću površinu emitera od tranzistora  $Q_2$ . Ostale karakteristike tranzistora su  $\beta_F = \beta_0 = 200$ ,  $V_{CES} = 0,2V$  i  $V_A = 100V$ . Poznato je  $V_{CC} = 5V$ ,  $V_T = 25mV$  i  $R_2 = 500\Omega$ .

- Odrediti vrednosti otpornika  $R_1$  i  $R_3$  tako da bude  $I_{C2} = 500\mu A$  i  $I_0 = 1mA$ . Smatrati da je  $V_{BE2} = 0,6V$  i zanemariti uticaj Early-jevog efekta.
- Odrediti minimalnu vrednost napona  $V_0$  za koju su svi tranzistori u direktnom aktivnom režimu.
- Odrediti izlaznu otpornost strujnog izvora  $R_0$ .



Slika 3

**Rešenje:**

a) Potencijali baza oba tranzistora su jednaki, tako da je  $R_2 I_{E2} + V_{BE2} = R_1 I_{E1} + V_{BE1}$ , odnosno  $R_2 I_{E2} + V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} = R_1 I_{E1} + V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}}$ . Kako je  $I_{C2} = 2I_0 = 2I_{C1}$  i  $2I_{S2} = I_{S1}$ , to je  $R_2 I_{E2} - R_1 I_{E1} = V_T \ln \frac{I_{S1} I_{C1}}{I_{S2} I_{C2}} = V_T \ln 1 = 0$ , odakle se dobija  $R_1 = \frac{R_2 I_{E2}}{I_{E1}} = \frac{R_2 I_{C2}}{I_{C1}} = \frac{R_2}{2} = 250\Omega$ .

Pošto je  $I_R = I_{C2} + I_{B2} + I_{B1} = I_{C2} + \frac{I_{C2}}{\beta_F} + \frac{I_0}{\beta_F} = 507\mu A$  i  $I_{E1} = \frac{1+\beta_F}{\beta_F} I_{C1} = 502\mu A$  to iz  $V_{CC} - R_3 I_R - V_{BE2} - R_2 I_{E2} = 0$ , dobijamo  $R_3 = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - R_2 I_{E2}}{I_R} = 8,17k\Omega$ .

b) Minimalna vrednost napona  $V_0$  određena je ulaskom tranzistora  $Q_1$  u zasićenje  $V_{0min} = R_1 I_{E1} + V_{CES} = 0,45V$ .

c) Na slici 3a je prikazana šema za male signale kojom određujemo izlaznu otpornost. Parametri za male signale su  $r_{\pi 1} = \frac{\beta_0 V_T}{I_0} = 5k\Omega$ ,  $g_{m2} = \frac{I_{C2}}{V_T} = 20mS$ ,  $r_{\pi 2} = \frac{\beta V_T}{I_{C2}} = 10k\Omega$ ,  $r_{ce1} = \frac{V_A}{I_{C1}} = 100k\Omega$  i  $r_{ce2} = \frac{V_A}{I_{C2}} = 200k\Omega$ .

Otpornost  $R_B$  je  $R_B = R_3 \parallel \left[ \left( \frac{1}{g_{m2}} + r_{\pi 2} + r_{ce2} \right) + R_2 \right] \approx R_3 \parallel \left[ \frac{1}{g_{m2}} + R_2 \right] = 515\Omega$ .

Sada je  $v_t = r_{ce1} (i_t - \beta i_{b1}) + (R_1 \parallel (r_{\pi 1} + R_B)) i_t$  i  $i_{b1} = -i_t \frac{R_1}{R_1 + r_{\pi 1} + R_B}$ , odakle je

$$R_0 = \frac{v_t}{i_t} = r_{ce1} \left( 1 + \beta \frac{R_1}{R_1 + r_{\pi 1} + R_B} \right) + R_1 \parallel (r_{\pi 1} + R_B) = 967\Omega.$$