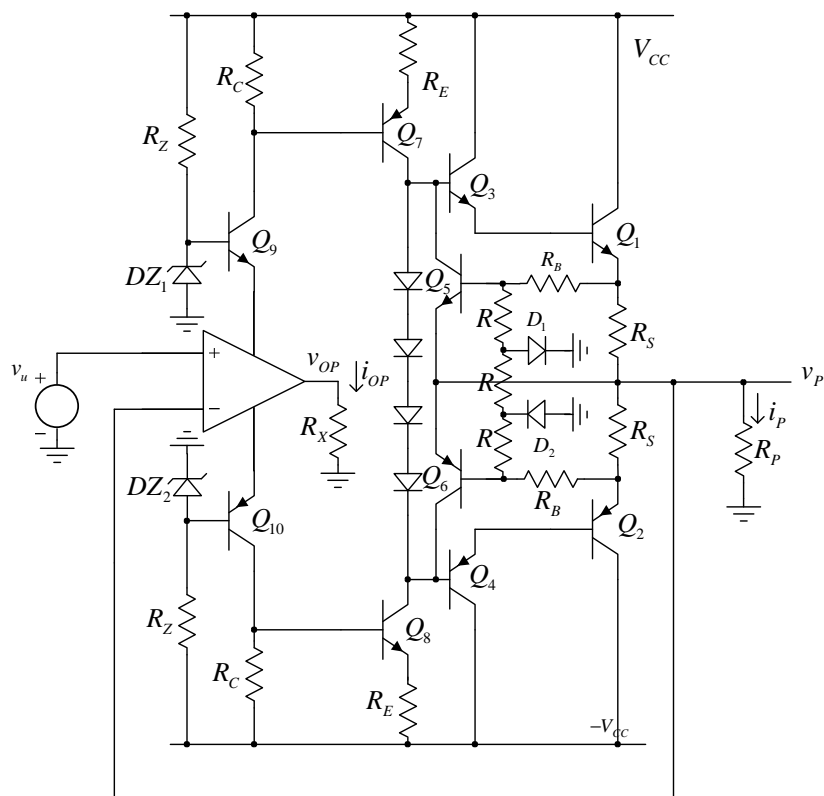


3. Struja potrošnje operacionog pojačavača u kolu sa slike 3 može se zanemariti. Parametri poluprovodničkih komponenti su:  $\beta(Q_1 - Q_4) = 29$ ,  $\beta(Q_5 - Q_{10}) \rightarrow \infty$ ,  $|V_{BE}| = V_D = |V_\gamma| = 0.6 \text{ V}$ ,  $V_{CES} = 0.2 \text{ V}$ ,  $V_Z = 15 \text{ V}$ . Vrednosti ostalih elemenata u kolu su  $V_{CC} = 24 \text{ V}$ ,  $R_Z = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_X = R_C = R_E = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 0.3 \Omega$ ,  $R_P = 5 \Omega$ . Na ulazu kola prisutan je napon sinusoidalnog talasnog oblika amplitude  $V_u$  i ugaone učestanosti  $\omega$ .

- [5] U  $v_p - i_p$  ravni ucrtati granice oblasti mogućih vrednosti napona i struje potrošača (karakteristiku strujne zaštite)
- [4] Odrediti vrednost maksimalno dozvoljene amplitude ulaznog napona, tako da se na izlazu dobija simetričan neizobličen signal.
- [1] Odrediti graničnu vrednost otpornosti potrošača  $R_P$ , tako da se na izlazu kola može ostvariti simetričan neizobličen signal amplitude  $15 \text{ V}$ .

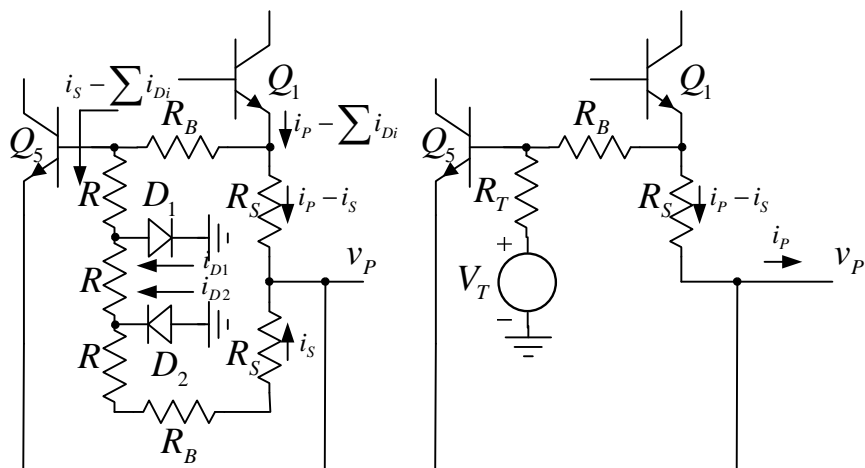


Slika 3

**Rešenje:**

a)

**U trenutku uključenja strujne zaštite kada je  $i_p > 0$ :**



$$v_{B5} = v_P + V_\gamma = \frac{R_B}{R_B + R_T} V_T + \frac{R_T}{R_B + R_T} (v_P + R_S (i_P - i_S))$$

$i_S$  je struja koja teče kroz kolo strujne zaštite (ne kroz tranzistor)

$V_T$  i  $R_T$  ekvivalentiraju kolo strujne zaštite u konkretnom slučaju

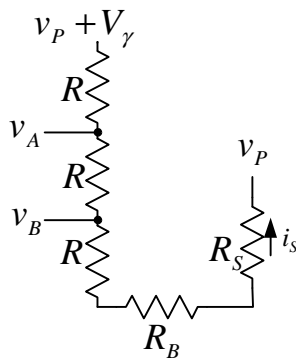
$$i_P = i_S + \frac{R_B}{R_E R_T} v_P + \frac{R_B + R_T}{R_E R_T} V_\gamma - \frac{R_B}{R_E R_T} V_T$$

Ako su  $D_1$  i  $D_2$  isključene:

$$R_T = 3R + R_B + R_S, \quad V_T = v_P$$

$$i_S = \frac{V_\gamma}{3R + R_B + R_S}$$

$$i_P = \frac{V_\gamma}{3R + R_B + R_S} \left( 1 + \frac{3R + R_B + R_S}{R_S} \right) \approx \frac{V_\gamma}{R_S} = 2 \text{ A}$$



Opseg važnosti:

$$v_A < V_D$$

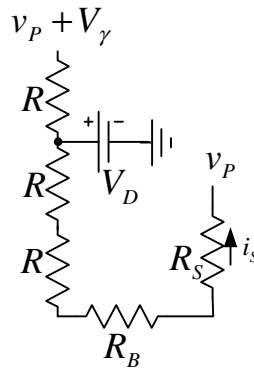
$$v_B > -V_D$$

$$v_P < \frac{R}{3R + R_B + R_S} V_\gamma \approx \frac{V_\gamma}{3} = 0.2 \text{ V}$$

$$v_P > - \left( 1 + \frac{R}{3R + R_B + R_S} \right) V_\gamma \approx -\frac{4}{3} V_\gamma = -0.8 \text{ V}$$

Kada je

$$v_P > 0.2 \text{ V}$$



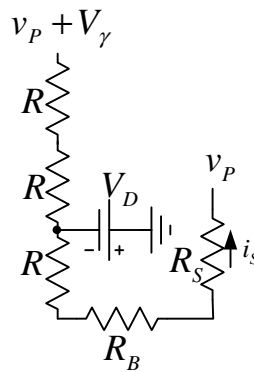
$$R_T = R, V_T = V_D$$

$$i_s = \frac{V_D - v_p}{2R + R_B + R_S}$$

$$i_p = v_p \left( \frac{R_B}{RR_S} - \frac{1}{2R + R_B + R_S} \right) + V_D \left( \frac{1}{R_S} + \frac{1}{2R + R_B + R_S} \right) \approx v_p \frac{R_B}{RR_S} + \frac{V_D}{R_S} = 0.033v_p + 2 \text{ A}$$

Kada je

$$v_p < -0.8 \text{ V}$$



$$R_T = 2R, V_T = -V_D$$

$$i_s = \frac{-V_D - v_p}{R + R_B + R_S}$$

$$i_p = v_p \left( \frac{R_B}{2RR_S} - \frac{1}{R + R_B + R_S} \right) + V_D \left( \frac{1}{R_S} - \frac{1}{R + R_B + R_S} \right) \approx v_p \frac{R_B}{2RR_S} + \frac{V_D}{R_S} = 0.017v_p + 2 \text{ A}$$

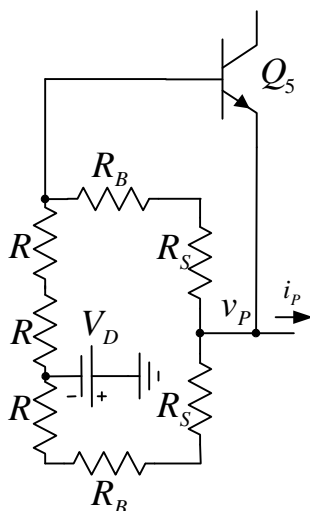
Ova zavisnost prestaje da važi kada postane  $i_{Q1} = 0$ , odnosno  $i_p = i_{D2}$

$$i_{D2} = \frac{-V_D - v_p}{R + R_B + R_S} - \frac{v_p + V_\gamma + V_D}{2R}$$

$$i_{D2} = \frac{-V_D - v_p}{R} - \frac{v_p + 2V_D}{2R} = -\frac{2V_D}{R} - \frac{3v_p}{2R}$$

$$i_p = i_{D2} \Rightarrow v_p = -V_D \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_S} \right) \frac{2R}{\frac{R_B}{R_S} + 1} \approx -\frac{2R}{R_B} V_D = -120 \text{ V}$$

od kog trenutka više nema struje kroz tranzistor  $Q_1$ , i kolo se transformiše kako je prikazano na slici

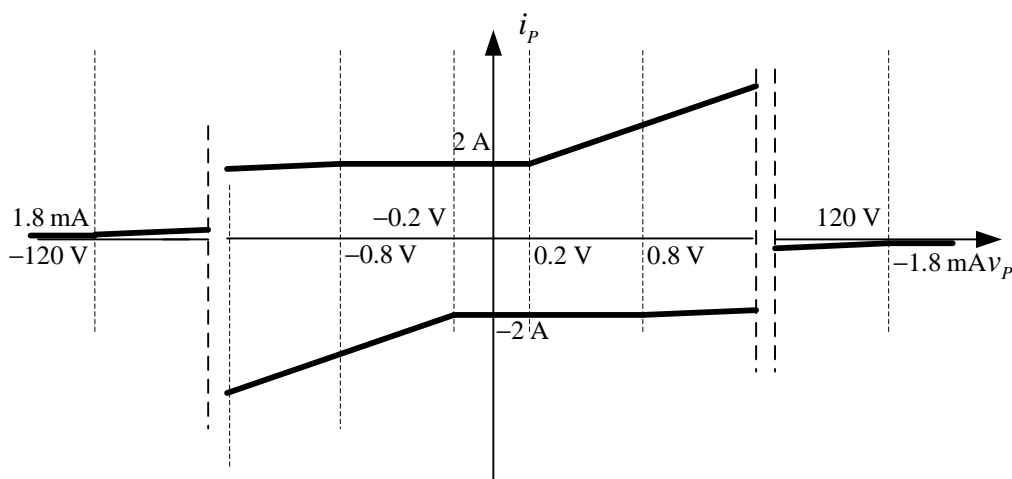


Kako se tranzistor  $Q_1$  ugasio, formalno se više ne može govoriti o strujnoj zaštiti. Tranzistor  $Q_5$  sada dobija ulogu “izlaznog” tranzistora, i uključuje se kada

$$(R_B + R_S) \frac{R + R_B + R_S}{3R + 2R_B + R_S} i_P = V_\gamma$$

$$i_P = \frac{V_\gamma}{R_B + R_S} \frac{3R + 2R_B + R_S}{R + R_B + R_S} \approx \frac{3V_\gamma}{R_B} = 1.8 \text{ mA}$$

Za  $i_P < 0$  razmatranje je analogno, a karakteristika simetrična u odnosu na koordinatni početak.



b)

$$v_{OP} = \text{sgn}(\sin \omega t) \frac{R_X}{R_C} \left( \frac{R_E}{R_P (1 + \beta)^2} V_u |\sin \omega t| + V_{BE} \right)$$

Povećavanjem ulaznog odnosno izlaznog napona postoji mogućnost nekoliko ograničenja (analogno važi za smanjenje, tako da je dovoljno posmatrati **samo povećavanje izlaznog napona**):

1. operacioni pojačavač može otići u naponsko zasićenje  $v_{OP} \leq V_Z - V_{BE}$
2. tranzistori  $Q_1$ ,  $Q_3$ ,  $Q_7$  i  $Q_9$  mogu otići u zasićenje ( $Q_1$  u stvari ne može, jer će se pre njega sigurno zasititi  $Q_3$ )
3. može proraditi strujna zaštita

Naponsko zasićenje operacionog pojačavača:

$$v_{OP}(t) = \text{sgn}(\sin \omega t) \frac{R_X}{R_C} \left( \frac{R_E}{R_P (1 + \beta)^2} V_u |\sin \omega t| + V_{BE} \right)$$

$$v_{OP\max} = \frac{R_X}{R_C} \left( \frac{R_E}{R_p(1+\beta)^2} V_u + V_{BE} \right) \leq V_Z - V_{BE}$$

$$V_u \leq \frac{R_p(1+\beta)^2}{R_E} \left( \frac{R_C}{R_X} (V_Z - V_{BE}) - V_{BE} \right) = 62.1 \text{ V}$$

Zasićenje  $Q_3$

$$v_{CE3} = V_{CC} - \left( V_u \sin \omega t + \frac{R_S}{R_p} V_u \sin \omega t + V_{BE} \right)$$

$$v_{CE3\min} = V_{CC} - V_{BE} - V_u \left( 1 + \frac{R_S}{R_p} \right) \geq V_{CES}$$

$$V_u \leq \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{CES}}{1 + \frac{R_S}{R_p}} = 21.9 \text{ V}$$

Zasićenje  $Q_7$

$$v_{EC7}(t) = V_{CC} - R_E \frac{V_u \sin \omega t}{R_p(1+\beta)^2} - \left( V_u \sin \omega t + \frac{R_S}{R_p} V_u \sin \omega t + 2V_{BE} \right)$$

$$v_{EC7\min} = V_{CC} - \frac{R_E}{R_p(1+\beta)^2} V_u - 2V_{BE} - V_u \left( 1 + \frac{R_S}{R_p} \right) \geq V_{CES}$$

$$V_u \leq \frac{V_{CC} - 2V_{BE} - V_{CES}}{1 + \frac{R_S}{R_p} + \frac{R_E}{R_p(1+\beta)^2}} = 17.6 \text{ V}$$

Zasićenje  $Q_9$

$$v_{CE9} = V_{CC} - R_E \frac{V_u \sin \omega t}{R_p(1+\beta)^2} - V_{BE} - (V_Z - V_{BE})$$

$$v_{CE9\min} = V_{CC} - \frac{R_E}{R_p(1+\beta)^2} V_u - V_{BE} - (V_Z - V_{BE}) \geq V_{CES}$$

$$V_u \leq \frac{R_p(1+\beta)^2}{R_E} (V_{CC} - V_{CES} - V_Z) = 39.6 \text{ V}$$

Strujno ograničenje

Ako  $v_p \in [0 \text{ V}, 0.2 \text{ V}]$

$$\frac{v_p}{R_p} = 2 \text{ A}, \Rightarrow v_p = 10 \text{ V},$$

to jest nema ograničenja u ovoj oblasti

Ako  $v_p > 0.2 \text{ V}$

$$\frac{v_p}{R_p} = v_p \frac{R_B}{RR_S} + \frac{V_D}{R_S}, \Rightarrow v_p = \frac{V_D}{\frac{R_S}{R_p} - \frac{R_B}{R}} = 12 \text{ V}, V_u = 12 \text{ V}$$

Najstrožiji uslov daje

$$V_{u\max} = 12 \text{ V}$$

c) Koriste se prethodno izvedene veze za ograničenja:

Naponsko zasićenje operacionog pojačavača:

$$v_{OP\max} = \frac{R_X}{R_C} \left( \frac{R_E}{R_P(1+\beta)^2} V_u + V_{BE} \right) \leq V_Z - V_{BE}$$

$$R_P \geq \frac{V_u}{\frac{R_C}{R_X} (V_Z - V_{BE}) - V_{BE}} \frac{R_E}{(1+\beta)^2} = 1.2 \Omega$$

Zasićenje  $Q_3$

$$v_{CE3\min} = V_{CC} - V_{BE} - V_u \left( 1 + \frac{R_S}{R_P} \right) \geq V_{CES}$$

$$R_P \geq \frac{R_S}{\frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{CES}}{V_u} - 1} = 0.5 \Omega$$

Zasićenje  $Q_7$

$$v_{EC7\min} = V_{CC} - \frac{R_E}{R_P(1+\beta)^2} V_u - 2V_{BE} - V_u \left( 1 + \frac{R_S}{R_P} \right) \geq V_{CES}$$

$$R_P \geq \frac{R_S + \frac{R_E}{(1+\beta)^2}}{\frac{V_{CC} - 2V_{BE} - V_{CES}}{V_u} - 1} = 3.4 \Omega$$

Zasićenje  $Q_9$

$$v_{CE9\min} = V_{CC} - \frac{R_E}{R_P(1+\beta)^2} V_u - V_{BE} - (V_Z - V_{BE}) \geq V_{CES}$$

$$R_P \geq \frac{V_u}{V_{CC} - V_{CES} - V_Z} \frac{R_E}{(1+\beta)^2} = 1.9 \Omega$$

Strujno ograničenje

Da ne bi bilo ograničenja, trebalo bi da u oblasti  $v_P > 0.2 \text{ V}$

$$v_P \frac{R_B}{RR_S} + \frac{V_D}{R_S} \geq \frac{v_P}{R_P}, \Rightarrow R_P \geq R_S \frac{v_P}{v_P \frac{R_B}{R} + V_D} = 6 \Omega$$

Najstrožiji uslov daje

$$R_{P\min} = 6 \Omega .$$