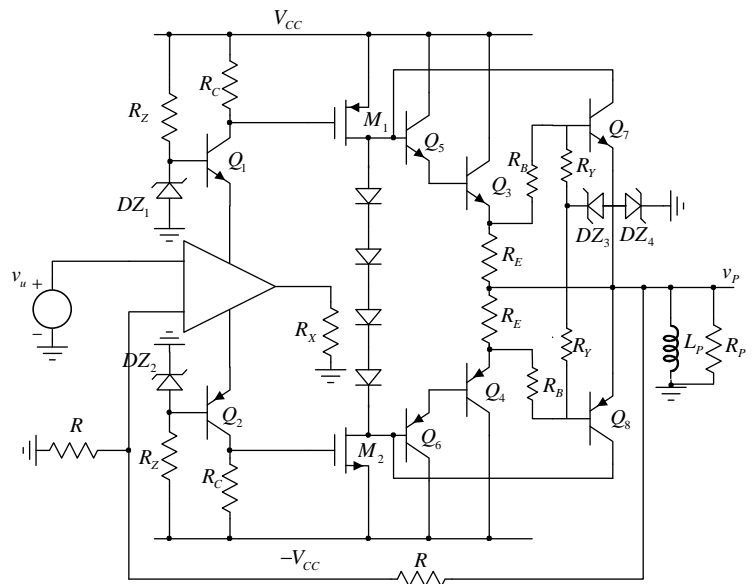


**Zadatak.** Struja potrošnje operacionog pojačavača u kolu sa slike je zanemarljiva. Parametri bipolarnih tranzistora su  $\beta_F = 30$ ,  $|V_{BE}| = V_D = |V_\gamma| = 0.7V$ ,  $V_{CES} = 0.2V$ , a parametri MOSFET tranzistora  $V_T = 0.7V$ ,  $B = 200\mu A/V^2$ . Vrednosti ostalih elemenata kola su  $V_{CC} = 24V$ ,  $V_{Z1} = V_{Z2} = 15V$ ,  $V_{Z3} = V_{Z4} = 5.3V$ ,  $R_Z = 15k\Omega$ ,  $L_P = 10mH$ ,  $R_P = 5\Omega$ ,  $R_X = 500\Omega$ ,  $R_C = 1k\Omega$ ,  $R_B = 1k\Omega$ ,  $R_E = 0.5\Omega$ ,  $R_Y = 1k\Omega$ . Napon na ulazu kola je  $v_U(t) = V_u \sin \omega t$ .



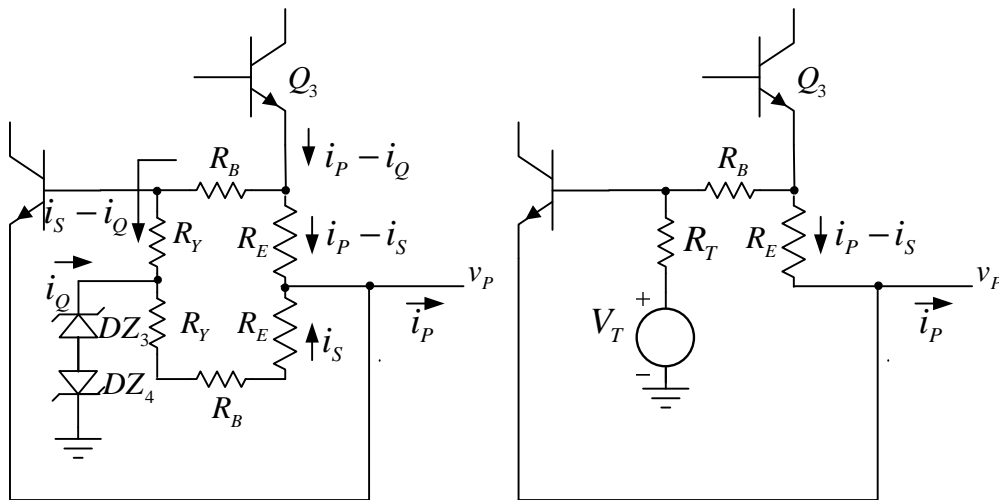
- Odrediti polaritet ulaznih priključaka operacionog pojačavača tako da je u kolu ostvarena negativna povratna sprega
- U  $v_p - i_p$  ravni ucrtati granice oblasti mogućih vrednosti napona i struje potrošača.
- ako je  $\omega = 1\text{krad/s}$ ,  $V_u = 5V$ ,  $R_P \rightarrow \infty$ , odrediti, izračunati vršne vrednosti i skicirati vremenske dijagrame  $v_U$ ,  $v_P$ ,  $i_P$ ,  $i_{D1}$ ,  $i_{D2}$ ,  $v_{SG1}$ ,  $v_{GS2}$  i  $v_{IOP}$ .
- Ako je  $L_P \rightarrow \infty$ , odrediti maksimalno dozvoljenu amplitudu ulaznog napona tako da se na izlazu dobije simetričan neizobličen signal.
- Ako je  $L_P \rightarrow \infty$ , odrediti maksimalnu srednju snagu koja se disipira na tranzistoru  $Q_3$ .

### Rešenje:

- a)
- Fazni stav od izlaza operacionog pojačavača do pozitivnog napajanja je  $\pi$ , zato jer povećavanje napona na izlazu operacionog pojačavača smanjuje napajanje, tako da da bi se dobio fazni stav  $\pi$  u krugu povratne sprege potrebno je da je donji ulazni priključak operacionog pojačavača invertujući. Ukupan fazni stav:
- |   |       |
|---|-------|
| Invertujući priključak operacionog pojačavača – izlaz operacionog pojačavača: | $\pi$ |
| Izlaz operacionog pojačavača – pozitivno napajanje operacionog pojačavača     | $\pi$ |
| Tranzistor $Q_1$ u spoju sa zajedničkom bazom                                 | 0     |
| Tranzistor $M_1$ u spoju sa zajedničkim sorsom                                | $\pi$ |
| Tranzistori $Q_5$ i $Q_3$ u spoju sa zajedničkim kolektorom                   | 0     |
| Ukupan fazni stav:  | $\pi$ |

b)

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



$$v_{B7} = v_P + V_\gamma = \frac{R_B}{R_B + R_T} V_T + \frac{R_T}{R_B + R_T} (v_P + R_E (i_P - i_S))$$

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

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

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

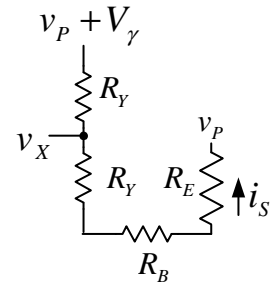
Ako su  $DZ_3$  i  $DZ_4$  isključene:

$$R_T = 2R_Y + R_B + R_E, \quad V_T = v_P$$

$$i_S = \frac{V_\gamma}{2R_Y + R_B + R_E}$$

$$i_P = \left( 1 + \frac{2R_Y + 2R_B + R_E}{R_E} \right) \frac{V_\gamma}{2R_Y + R_B + R_E} = 1.87A$$

$$i_Q = 0$$



Opseg važnosti:

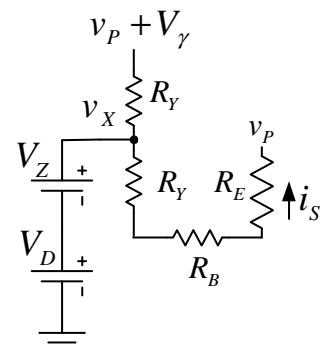
$$-(V_Z + V_\gamma) < v_X < V_Z + V_\gamma$$

$$v_X = \frac{R_Y}{2R_Y + R_B + R_E} v_P + \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} (v_P + V_\gamma) = v_P + \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma$$

$$-(V_Z + V_\gamma) < v_P + \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma < V_Z + V_\gamma$$

$$v_P < V_Z + V_\gamma - \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma = V_Z + \frac{R_Y}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma = 5.53V$$

$$v_P > -(V_Z + V_\gamma) - \frac{R_B + R_Y + R_E}{R_B + 2R_Y + R_E} V_\gamma = -V_Z - \frac{2R_B + 3R_Y + 2R_E}{R_B + 2R_Y + R_E} V_\gamma = -6.47V$$



Kada je

$$v_P > 5.53V$$

$$R_T = R_Y, V_T = V_Z + V_D = 6 \text{ V}$$

$$i_S = \frac{V_Z + V_D - v_P}{R_Y + R_B + R_E}$$

$$i_P = \frac{V_Z + V_D - v_P}{R_Y + R_B + R_E} + \frac{R_B}{R_E R_Y} v_P + \frac{R_B + R_Y}{R_E R_Y} V_\gamma - \frac{R_B}{R_E R_Y} (V_Z + V_{BE}) = 2v_P - 9.2 [\text{A}]$$

$$i_Q = (V_Z + V_D - v_P) \frac{R_B + 2R_Y + R_E}{R_Y (R_B + R_Y + R_E)} - \frac{V_\gamma}{R_Y}$$

Kada je

$$v_P < -6.47 \text{ V}$$

$$R_T = R_Y, V_T = -(V_Z + V_{BE}) = -6 \text{ V}$$

$$i_S = \frac{-(V_Z + V_D) - v_P}{R_Y + R_B + R_E}$$

$$i_P = \frac{R_B (R_B + R_Y + R_E) - R_E R_Y}{R_E R_Y (R_B + R_Y + R_E)} v_P + \frac{R_B (R_B + R_Y + R_E) - R_E R_Y}{R_E R_Y (R_B + R_Y + R_E)} (V_Z + V_D) + \frac{R_B + R_Y}{R_E R_Y} V_\gamma$$

$$i_P = 2v_P + 14.8 [\text{A}]$$

$$i_Q = -(V_Z + V_D + v_P) \frac{R_B + 2R_Y + R_E}{R_Y (R_B + R_Y + R_E)} - \frac{V_\gamma}{R_Y}$$

Ova zavisnost prestaje da važi kada postane  $i_P = i_Q$ ,

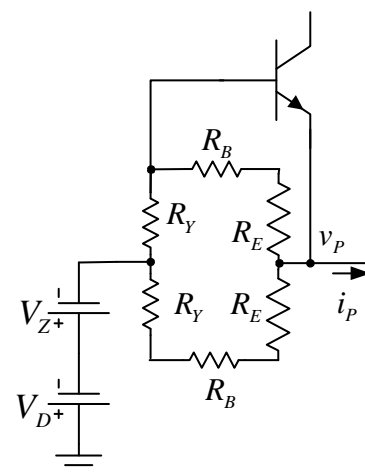
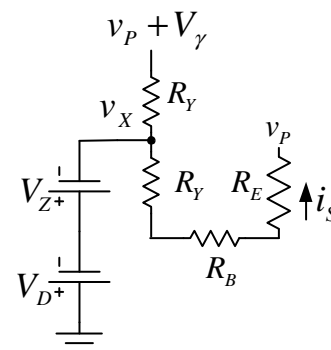
$$i_P = i_Q \Rightarrow v_P = -\frac{R_B + R_E + R_Y}{R_B + R_E} V_\gamma - (V_Z + V_D) = -7.4 \text{ V}$$

od kog trenutka više nema struje kroz tranzistor  $Q_3$ , i kolo se transformiše kako je prikazano na slici

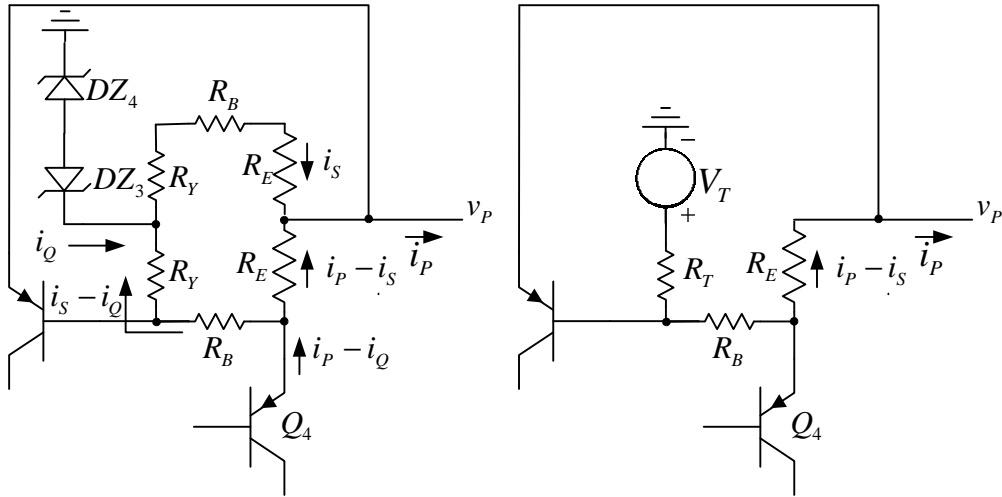
Kako se tranzistor  $Q_3$  ugasio, formalno se više ne može govoriti o strujnoj zaštiti. Tranzistor  $Q_7$  sada dobija ulogu "izlaznog" tranzistora, i uključuje se kada

$$(R_B + R_E) \frac{i_P}{2} = V_\gamma$$

$$i_P = \frac{2V_\gamma}{R_B + R_E} = 1.4 \text{ mA}$$



U trenutku uključenja strujne zaštite kada je  $i_p < 0$ :



$$v_{B8} = v_P - V_\gamma = \frac{R_B}{R_B + R_T} V_T + \frac{R_T}{R_B + R_T} (v_P + R_E (i_P - i_S))$$

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

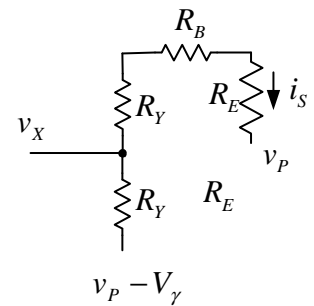
Ako su  $DZ_3$  i  $DZ_4$  isključene:

$$R_T = 2R_Y + R_B + R_E, V_T = v_P$$

$$i_S = -\frac{V_\gamma}{2R_Y + R_B + R_E}$$

$$i_P = -\left(1 + \frac{2R_Y + 2R_B + R_E}{R_E}\right) \frac{V_\gamma}{2R_Y + R_B + R_E} = -1.87A$$

$$i_Q = 0$$



Opseg važnosti:

$$-(V_Z + V_\gamma) < v_X < V_Z + V_\gamma$$

$$v_X = \frac{R_Y}{2R_Y + R_B + R_E} v_P + \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} (v_P - V_\gamma) = v_P - \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma$$

$$-(V_Z + V_\gamma) < v_P - \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma < V_Z + V_\gamma$$

$$v_P < V_Z + V_\gamma + \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma = V_Z + \frac{3R_Y + 2R_B + 2R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma = 6.47V$$

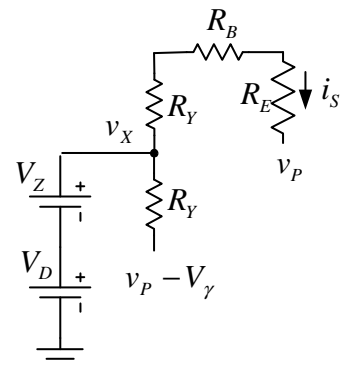
$$v_P > -(V_Z + V_\gamma) + \frac{R_Y + R_B + R_E}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma = -V_Z - \frac{R_Y}{2R_Y + R_B + R_E} V_\gamma = -5.53V$$

Kada je

$$v_P > 6.47V$$

$$R_T = R_Y, V_T = V_Z + V_D = 6V$$

$$i_S = \frac{V_Z + V_D - v_P}{R_B + R_Y + R_E}$$



$$i_p = \frac{R_B(R_B + R_Y + R_E) - R_E R_Y}{R_E R_Y (R_B + R_Y + R_E)} v_p - \frac{R_B(R_B + R_Y + R_E) - R_E R_Y}{R_E R_Y (R_B + R_Y + R_E)} (V_Z + V_D) - \frac{R_B + R_Y}{R_E R_Y} V_\gamma$$

$$i_p = 2v_p - 14.8 \text{ [A]}$$

$$i_Q = (V_Z + V_D - v_p) \frac{R_B + 2R_Y + R_E}{R_Y (R_B + R_Y + R_E)} + \frac{V_\gamma}{R_Y}$$

Ova zavisnost prestaje da važi kada postane  $i_p = i_Q$ ,

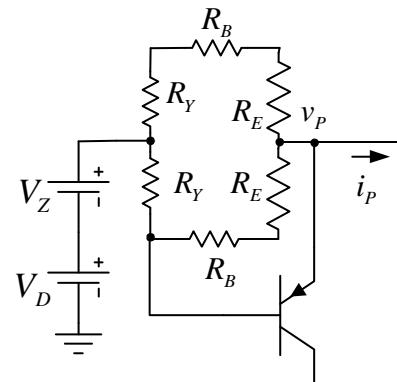
$$i_p = i_Q \Rightarrow v_p = \frac{R_B + R_E + R_Y}{R_B + R_E} V_\gamma + (V_Z + V_D) = 7.4 \text{ V}$$

od kog trenutka više nema struje kroz tranzistor  $Q_4$ , i kolo se transformiše kako je prikazano na slici

Kako se tranzistor  $Q_4$  ugasio, formalno se više ne može govoriti o strujnoj zaštiti. Tranzistor  $Q_8$  sada dobija ulogu "izlaznog" tranzistora, i uključuje se kada

$$(R_B + R_E) \frac{i_p}{2} = -V_\gamma$$

$$i_p = -\frac{2V_\gamma}{R_B + R_E} = -1.4 \text{ mA}$$



Kada je

$$v_p < -5.53 \text{ V}$$

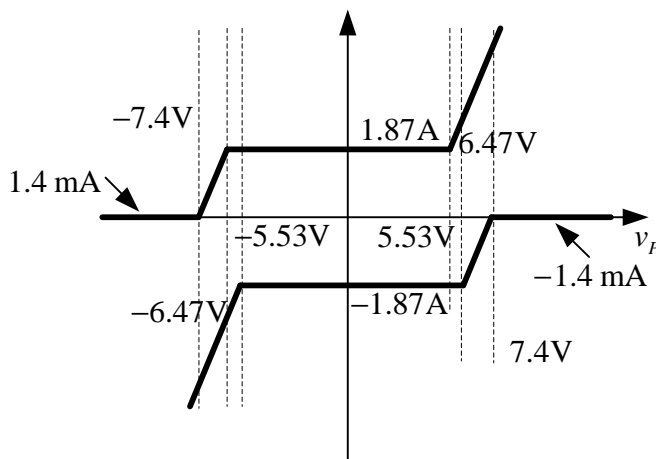
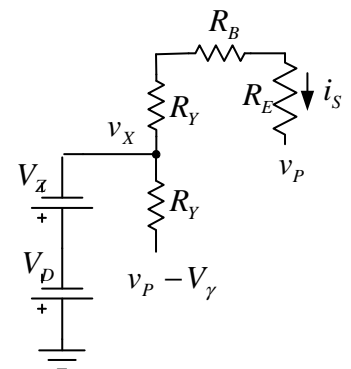
$$R_T = R_Y, V_T = -(V_Z + V_D) = -6 \text{ V}$$

$$i_s = \frac{-(V_Z + V_D) - v_p}{R_B + R_Y + R_E}$$

$$i_p = \frac{R_B(R_B + R_Y + R_E) - R_E R_Y}{R_E R_Y (R_B + R_Y + R_E)} v_p + \frac{R_B(R_B + R_Y + R_E) - R_E R_Y}{R_E R_Y (R_B + R_Y + R_E)} (V_Z + V_D) - \frac{R_B + R_Y}{R_E R_Y} V_\gamma$$

$$i_p = 2v_p + 9.2 \text{ [A]}$$

$$i_Q = -(V_Z + V_D + v_p) \frac{R_B + 2R_Y + R_E}{R_Y (R_B + R_Y + R_E)} + \frac{V_\gamma}{R_Y}$$



c)

$$v_p = V_p \sin \omega t$$

$$i_p = -\frac{V_p}{\omega L} \cos \omega t$$

$$i_{D1} = \begin{cases} -\frac{V_p}{\omega L(1+\beta)^2} \cos \omega t & \frac{4k+1}{4}T < t < \frac{4k+3}{4}T \\ 0 & kT < t < \frac{4k+1}{4}T \vee \frac{4k+3}{4}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$v_{SG1} = \begin{cases} V_T + \sqrt{-2\frac{V_p}{\omega BL(1+\beta)^2} \cos \omega t} & \frac{4k+1}{4}T < t < \frac{4k+3}{4}T \\ 0 & kT < t < \frac{4k+1}{4}T \vee \frac{4k+3}{4}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

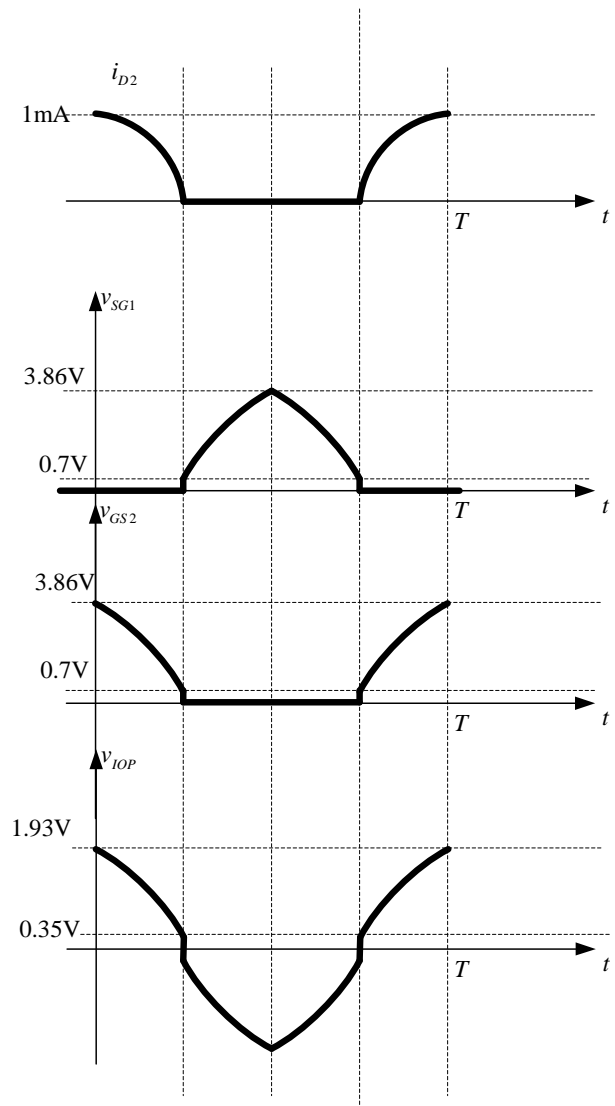
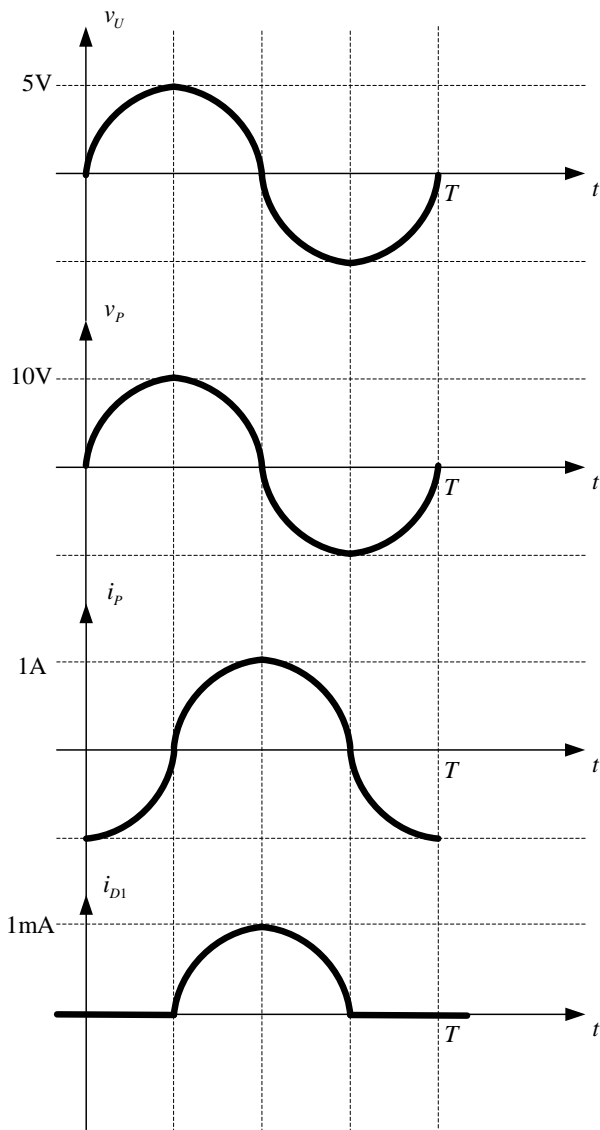
$$i_{C1} = \begin{cases} \frac{V_T + \sqrt{-2\frac{V_p}{\omega BL(1+\beta)^2} \cos \omega t}}{R_C}, & \frac{4k+1}{4}T < t < \frac{4k+3}{4}T \\ 0 & kT < t < \frac{4k+1}{4}T \vee \frac{4k+3}{4}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

Analogno:

$$i_{C2} = \begin{cases} 0, & \frac{4k+1}{4}T < t < \frac{4k+3}{4}T \\ \frac{V_T + \sqrt{2\frac{V_p}{\omega BL(1+\beta)^2} \cos \omega t}}{R_C} & kT < t < \frac{4k+1}{4}T \vee \frac{4k+3}{4}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$v_{IOP} = \begin{cases} \frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \sqrt{-2\frac{V_p}{\omega BL(1+\beta)^2} \cos \omega t} \right), & \frac{4k+1}{4}T < t < \frac{4k+3}{4}T \\ -\frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \sqrt{2\frac{V_p}{\omega BL(1+\beta)^2} \cos \omega t} \right) & kT < t < \frac{4k+1}{4}T \vee \frac{4k+3}{4}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$= -\operatorname{sgn}(\cos \omega t) \frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \sqrt{2\frac{V_p}{\omega BL(1+\beta)^2} \sqrt{|\cos \omega t|}} \right)$$



d) povećavanjem 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  $v_{IOP} \leq V_Z - V_{BE}$
2. operacioni pojačavač može otići u strujno zasićenje  $i_{OP} \leq i_{OPmax}$  (ovaj uslov nećemo razmatrati)
3. tranzistor  $Q_1$  može otići u zasićenje
4. ako tranzistor  $M_1$  pređe u triodnu oblast neće doći do izobličenja zbog prisustva NPS!
5. tranzistor  $Q_5$  može otići u zasićenje
6. može proraditi strujna zaštita

Jednačine koje važe pod pretpostavkom da je sve u redu:

$$v_p = V_p \sin \omega t$$

$$i_p = \frac{V_p}{R_p} \sin \omega t$$

$$i_{D1} = \begin{cases} \frac{V_p}{R_p} \sin \omega t & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ 0 & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$v_{SG1} = \begin{cases} V_T + \sqrt{2 \frac{V_p}{BR_p (1+\beta)^2} \sin \omega t} & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ 0 & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$v_{IOP} = \operatorname{sgn}(\sin \omega t) \frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \sqrt{2 \frac{V_p}{BR_p (1+\beta)^2} \sqrt{|\sin \omega t|}} \right)$$

Određivanje trenutka ulaska tranzistora  $M_1$  u triodnu oblast:

$$v_{SD1} \geq v_{SG1} - V_T$$

$$V_{CC} - (v_p + 2V_{BE}) \geq \sqrt{\frac{2v_p}{BR_p (1+\beta_F)^2}}$$

$$v_{PM1, zas \rightarrow triod} = 16.7V$$

I dalje važi NPS!

### **Provera da li pre ovoga nastupa neko ograničenje:**

Provera naponskog zasićenja operacionog pojačavača

$$v_{IOPmax} \leq V_Z - V_{BE}, \frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \sqrt{2 \frac{v_p}{BR_p (1+\beta)^2}} \right) \leq V_Z - V_{BE}$$

$$v_p \leq \frac{BR_p (1+\beta)^2}{2} \left( (V_Z - V_{BE}) \frac{\beta}{1+\beta} \frac{R_C}{R_X} - V_T \right)^2 = 349.7V \text{ Definitivno NE}$$

Zasićenje tranzistora  $Q_1$

$$V_{CC} - v_{SG1max} - (V_Z - V_{BE}) \geq V_{CES}$$

$$v_p \leq \frac{2}{BR_p (1+\beta)^2} (V_{CC} - (V_Z - V_{BE} + V_{CES}) - V_T)^2 = 37.21V \text{ Takođe NE}$$

Zasićenje tranzistora  $Q_5$

$$v_p \leq V_{CC} - V_{BE} - V_{CES} = 23.1V \text{ Isto NE}$$

**Strujna zaštita:**

Za  $v_p = 5.53V$  i manje struja potrošača je 1.1A i manje, tako da zaštita ne radi

Za  $v_p > 5.53V$  karakteristika zaštite je

$$i_{pmax} = 2v_p - 9.2, \frac{v_p}{R_p} \leq 2v_p - 9.2, v_p \geq 5.11V$$

$$i_{pmin} = 2v_p + 9.2, \frac{v_p}{R_p} \leq 2v_p + 9.2, v_p \leq -5.11V$$

strujna zaštita neće proraditi uopšte za ovu vrednost otpornosti potrošača

Zaključak: Ograničenja nastupaju kada je  $M_1$  već u triodnoj oblasti

Nova zavisnost:

$$v_{SG1} = \begin{cases} V_T + \sqrt{2 \frac{v_P}{BR_p (1+\beta)^2}}, & 0 \leq v_P \leq 16.7V \\ V_T + \frac{2 \frac{v_P}{BR_p (1+\beta)^2} + (V_{CC} - 2V_{BE} - v_P)^2}{2(V_{CC} - 2V_{BE} - v_P)}, & v_P \geq 16.7V \\ 0 & v_P < 0 \end{cases}$$

$$v_{IOP} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(v_P) \frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \sqrt{2 \frac{|v_P|}{BR_p (1+\beta)^2}} \right), & |v_P| \leq 16.7V \\ \operatorname{sgn}(v_P) \frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \frac{2 \frac{|v_P|}{BR_p (1+\beta)^2} + (V_{CC} - 2V_{BE} - |v_P|)^2}{2(V_{CC} - 2V_{BE} - |v_P|)} \right), & |v_P| \geq 16.7V \end{cases}$$

### Provera koja ograničenja nastupaju:

Provera naponskog zasićenja operacionog pojačavača

$$\frac{1+\beta}{\beta} \frac{R_X}{R_C} \left( V_T + \frac{2 \frac{v_P}{BR_p (1+\beta)^2} + (V_{CC} - 2V_{BE} - v_P)^2}{2(V_{CC} - 2V_{BE} - v_P)} \right) \leq V_Z - V_{BE}$$

$v_P \leq 21.75V$  Ovo je moguć uslov!

Zasićenje tranzistora  $Q_1$

$$V_{CC} - \left( V_T + \frac{2 \frac{v_P}{BR_p (1+\beta)^2} + (V_{CC} - 2V_{BE} - v_P)^2}{2(V_{CC} - 2V_{BE} - v_P)} \right) - (V_Z - V_{BE}) \geq V_{CES}$$

$v_P \leq 19.82V$  Stroži uslov!!

Zasićenje tranzistora  $Q_5$

$$v_P \leq V_{CC} - V_{BE} - V_{CES} = 23.1V$$

Blaži uslov...

Strujna zaštita:

Utvrđeno ranije da se za datu otpornost potrošača neće uključivati.

Konačno:

$$V_{p\max} = 19.82\text{V}, V_{u\max} = 9.91\text{V}$$

e)

$$P_{D3} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \left( V_{CC} - \left( V_p \sin \omega t + R_E \frac{V_p}{R_p} \sin \omega t \right) \right) \frac{V_p}{R_p} \sin \omega t = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \left( V_{CC} - V_p \left( 1 + \frac{R_E}{R_p} \right) \sin \omega t \right) \frac{V_p}{R_p} \sin \omega t$$

$$P_{D3} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \left( V_{CC} - V_p \left( 1 + \frac{R_E}{R_p} \right) \sin \omega t \right) \frac{V_p}{R_p} \sin \omega t = V_{CC} \frac{V_p}{\pi R_p} - \left( 1 + \frac{R_E}{R_p} \right) \frac{V_p^2}{4R_p}$$

$$\frac{dP_{D3}}{dV_p} = V_{CC} \frac{1}{\pi R_p} - \left( 1 + \frac{R_E}{R_p} \right) \frac{V_{p1}}{2R_p} = 0$$

$$V_{p1} = \frac{2V_{CC}}{\pi \left( 1 + \frac{R_E}{R_p} \right)} = 13.89\text{V}$$

$$P_{D3\max} = V_{CC} \frac{V_{p1}}{\pi R_p} - \left( 1 + \frac{R_E}{R_p} \right) \frac{V_{p1}^2}{4R_p} = 10.61\text{W}$$