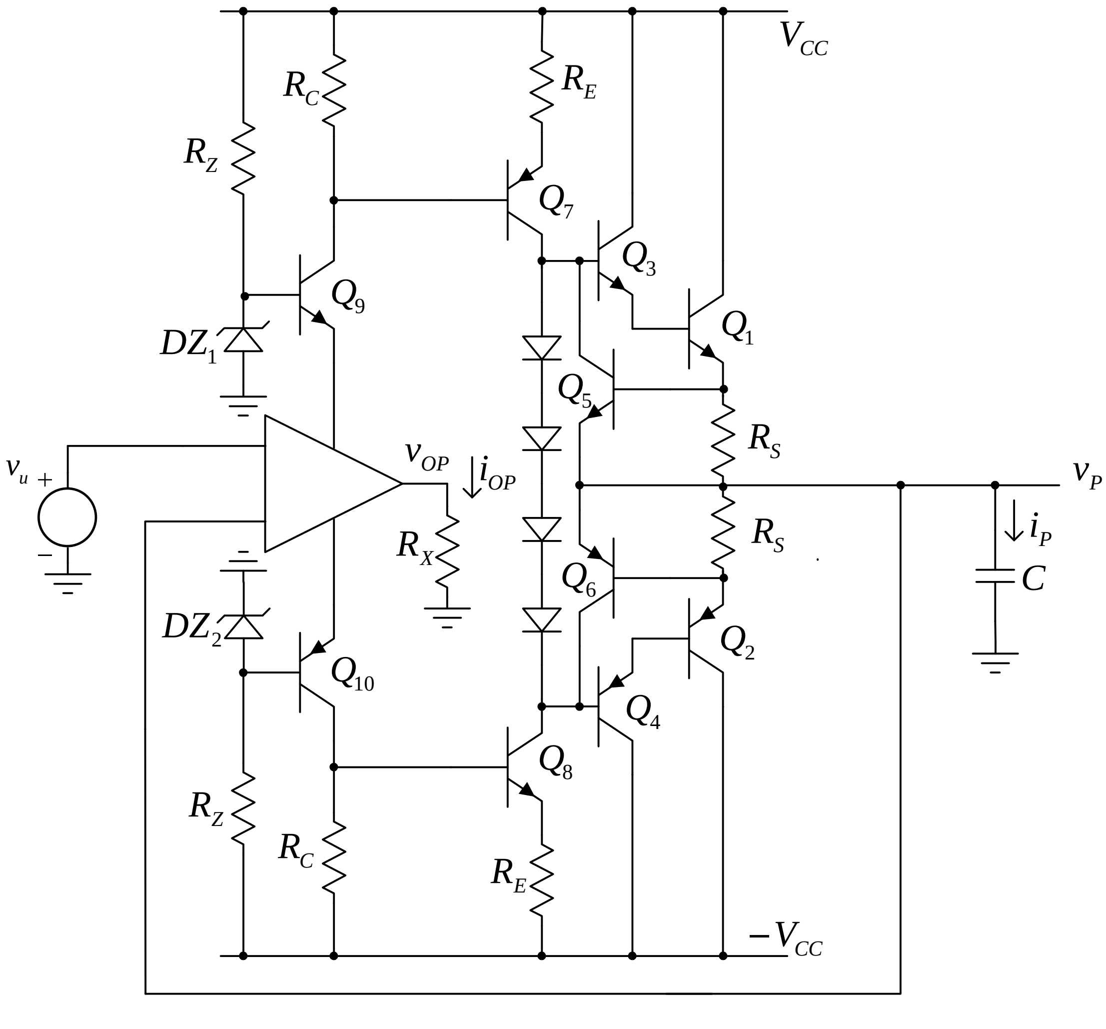
1. Struja potrošnje operacionog pojačavača u kolu sa slike 1 može se zanemariti. Parametri poluprovodničkih komponenti su: $\beta(Q_1 - Q_4) = 29$, $\beta(Q_5 - Q_{10}) \to \infty$, $|V_{BE}| = V_D = |V_\gamma| = 0.7\ \text{V}$, $V_{CES} = 0.2\ \text{V}$, $V_Z = 15\ \text{V}$. Vrednosti ostalih elemenata u kolu su $V_{CC} = 24\ \text{V}$, $R_Z = 15\ \text{k}\Omega$, $R_X = R_C = R_E = 1\ \text{k}\Omega$, $R_S = 0.5\ \Omega$, $C = 1\ \mu\text{F}$. Na ulazu kola prisutan je napon trougaonog talasnog oblika amplitude V_u i periode T.

a) [1] Odrediti polaritet ulaznih priključaka operacionog pojačavača tako da je u kolu ostvarena negativna povratna sprega

b) [9] Ako je $V_u = 15\ \text{V}$, $T = 50\ \mu\text{s}$, izračunati i nacrtati vremenske dijagrame signala v_U, v_P, i_P, i_{C1}, i_{C2}, i_{OP} i v_{OP}.

c) [7] Odrediti zavisnost maksimalno dozvoljene amplitude ulaznog napona od periode T, tako da se na izlazu dobija simetričan neizobličen signal.

d) [3] Ako je $T = 50\ \mu\text{s}$, odrediti maksimalnu srednju snagu koja se disipira na tranzistoru Q_3, za vrednost amplitude ulaznog napona u opsegu u kome se na izlazu dobija simetričan neizobličen signal.



Slika 1

Rešenje:

a)

Fazni stav od izlaza operacionog pojačavača do pozitivnog napajanja je π, zato jer povećavanje napona na izlazu operacionog pojačavača smanjuje napajanje, tako da da bi se dobio fazni stav π u krugu povratne sprege potrebno je da je donji ulazni priključak operacionog pojačavača invertujući.

Ukupan fazni stav:

Invertujući priključak operacionog pojačavača – izlaz operacionog pojačavača: π

Izlaz operacionog pojačavača – pozitivno napajanje operacionog pojačavača π

Tranzistor Q_9 u spoju sa zajedničkom bazom 0

Tranzistor Q_7 u spoju sa zajedničkim emitorom π

Tranzistori Q_3 i Q_1 u spoju sa zajedničkim kolektorom 0

Ukupan fazni stav: π

b)

$$v_P = V_u \Delta(t) = 15\ \text{V}\ \Delta(t)$$

$$i_P = C\frac{dv_P}{dt} = -\frac{4C}{T}V_u \Pi(t) = 1.2\ \text{A}\ \Pi(t)$$

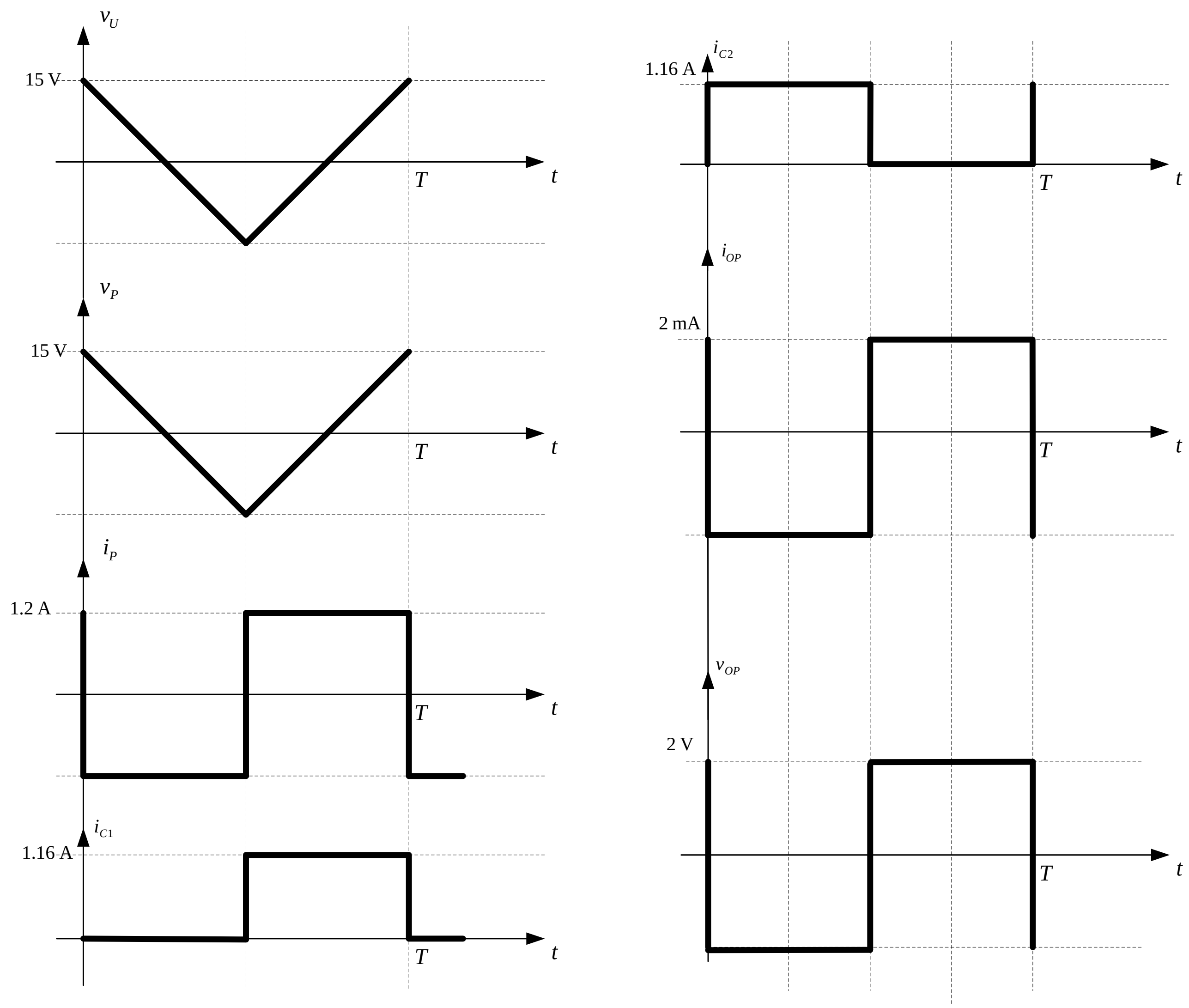
$$i_{C1} = \begin{cases} 0 & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ \frac{\beta}{1+\beta}i_P & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases} = \begin{cases} 0 & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ \frac{\beta}{1+\beta}\frac{4C}{T}V_u & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases} = \begin{cases} 0 & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ 1.16\ \text{A} & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$i_{C2} = \begin{cases} -\frac{\beta}{1+\beta}i_P & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ 0 & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases} = \begin{cases} \frac{\beta}{1+\beta}\frac{4C}{T}V_u & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ 0 & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases} = \begin{cases} 1.16\ \text{A} & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ 0 & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$i_{OP} = \begin{cases} -\dfrac{V_{BE} + R_E\dfrac{i_{C2}}{(1+\beta)^2}}{R_C} & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ \dfrac{V_{BE} + R_E\dfrac{i_{C1}}{(1+\beta)^2}}{R_C} & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases} = \begin{cases} -\dfrac{V_{BE} + \dfrac{\beta}{(1+\beta)^3}\dfrac{4R_EC}{T}V_u}{R_C} & kT < t < \frac{2k+1}{2}T \\ \dfrac{V_{BE} + \dfrac{\beta}{(1+\beta)^3}\dfrac{4R_EC}{T}V_u}{R_C} & \frac{2k+1}{2}T < t < (k+1)T \end{cases} =$$

$$= -\frac{V_{BE} + \dfrac{\beta}{(1+\beta)^3}\dfrac{4R_EC}{T}V_u}{R_C}\Pi(t) = -2\ \text{mA}\ \Pi(t)$$

$$v_{OP} = R_X i_{OP} = -\frac{R_X}{R_C}\left(V_{BE} + \frac{\beta}{(1+\beta)^3}\frac{4R_EC}{T}V_u\right)\Pi(t) = -2\,\text{V}\ \Pi(t)$$



c) 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 $v_{OP} \le V_Z - V_{BE}$
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:

$$v_{OP\max} = \frac{R_X}{R_C}\left(V_{BE} + \frac{\beta}{(1+\beta)^3}\frac{4R_E C}{T}V_u\right) \le V_Z - V_{BE}$$

$$V_u \le \frac{(1+\beta)^3}{\beta}\frac{T}{4R_E C}\left(\frac{R_C}{R_X}(V_Z - V_{BE}) - V_{BE}\right) = 3165517 \cdot T$$

Zasićenje Q_3

$$v_{CE3} = V_{CC} - (v_P + R_S i_P + V_{BE}) \ge V_{CES}$$

$$V_u \le \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{CES}}{1 + \dfrac{4R_S C}{T}} = \frac{23.1}{1 + \dfrac{2}{1000000 \cdot T}}$$

Zasićenje Q_7

$$v_{EC7} = V_{CC} - R_E\frac{i_{C1}}{(1+\beta)^2} - (v_P + R_S i_P + 2V_{BE}) \ge V_{CES}$$

$$V_u \le \frac{V_{CC} - V_{CES} - 2V_{BE}}{1 + \frac{4C}{T}\left(R_S + \frac{\beta R_E}{(1+\beta)^3}\right)} = \frac{22.4}{1 + \frac{6.30}{1000000 \cdot T}}$$

Zasićenje Q_9

$$v_{CE9} = V_{CC} - R_E \frac{i_{C1}}{(1+\beta)^2} - V_{BE} - (V_Z - V_{BE}) \ge V_{CES}$$

$$V_u \le \frac{(1+\beta)^3}{\beta} \frac{V_{CC} - V_Z - V_{CES}}{4R_E C} T = 2048276 \cdot T$$

Strujno ograničenje

$$i_P \le \frac{V_\gamma}{R_S}$$

$$V_u \le \frac{V_\gamma}{R_S} \frac{T}{4C} = 350000 \cdot T$$

Od “linearnih” ograničenja najstrožije je strujno ograničenje, a od “hiperboličnih” zasićenje Q_7. Tačka u kojoj se ova dva ograničenja seku:

$$\frac{V_\gamma}{R_S} \frac{T}{4C} = \frac{V_{CC} - V_{CES} - 2V_{BE}}{1 + \frac{4C}{T}\left(R_S + \frac{\beta R_E}{(1+\beta)^3}\right)}$$

$$T_{gr} = \frac{4R_S C}{V_\gamma}\left((V_{CC} - V_{CES} - 2V_{BE}) - \frac{V_\gamma}{R_S}\left(R_S + \frac{\beta R_E}{(1+\beta)^3}\right)\right) = 57.7\ \mu s$$

Konačno, zavisnost ima oblik:

$$V_{u\max} = \begin{cases} \frac{V_\gamma}{R_S} \frac{T}{4C} & T \le T_{gr} \\ \frac{V_{CC} - V_{CES} - 2V_{BE}}{1 + \frac{4C}{T}\left(R_S + \frac{\beta R_E}{(1+\beta)^3}\right)} & T > T_{gr} \end{cases} = \begin{cases} 350000 \cdot T & T \le T_{gr} \\ \frac{22.4}{1 + \frac{6.30}{1000000 \cdot T}} & T > T_{gr} \end{cases}$$

d) Za datu vrednost periode je

$$V_{u\max} = 17.5\ \text{V}$$

$$p_{D1} = v_{CE1} i_{C1} = \begin{cases} 0 & kT < t < \frac{2kT+1}{2} \\ (V_{CC} - (v_P + R_S i_P)) \frac{\beta}{1+\beta} i_P & \frac{2kT+1}{2} < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$p_{D1} = \begin{cases} 0 & kT < t < \frac{2kT+1}{2} \\ \left(V_{CC} - \left(V_u \Delta(t) + \frac{4R_S C V_u}{T}\right)\right) \frac{\beta}{1+\beta} \frac{4CV_u}{T} & \frac{2kT+1}{2} < t < (k+1)T \end{cases}$$

$$P_{D1} = \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T}\left(V_{CC} - \left(V_u\Delta(t) + \frac{4R_S C V_u}{T}\right)\right)\frac{\beta}{1+\beta}\frac{4CV_u}{T}dt = \frac{1}{T}\frac{\beta}{1+\beta}\frac{4CV_u}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T}\left(V_{CC} - \left(V_u\Delta(t) + \frac{4R_S C V_u}{T}\right)\right)dt =$$

$$= \frac{\beta}{1+\beta}\frac{2CV_u}{T}\left(V_{CC} - \frac{4R_S C V_u}{T}\right)$$

$$\frac{dP_{D1}}{dV_u} = \frac{\beta}{1+\beta}\frac{2CV_{CC}}{T} - \frac{\beta}{1+\beta}\frac{16R_S C^2 V_u}{T^2} = 0$$

$$V_u = \frac{V_{CC}T}{8R_S C} = 300 \text{ V}$$

Zaključak: maksimalna disipacija je na kraju intervala, odnosno

$$P_{D1\max} = P_{D1}(V_{u\max}) = \frac{\beta}{1+\beta}\frac{2CV_u}{T}\left(V_{CC} - \frac{4R_S C V_u}{T}\right) = 16.19 \text{ W}$$