1. U kolu sa slike 1 operacioni pojačavač se može smatrati idealnim, sa maksimalnom strujom $i_{OP\max} = 4\text{mA}$. Parametri tranzistora u kolu su $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7\text{V}$, $V_{CES} = 0.2\text{V}$ dok je $V_{CC} = 12\text{V}$, $L_P = 500\mu\text{H}$, $R_x = 1\text{k}\Omega$, $R_{B1} = 1\text{k}\Omega$, $R_{B2} = 2\text{k}\Omega$, $V_D = 0.7\text{V}$. Napon na ulazu kola je pravougaonog talasnog oblika amplitude V_u i periode T .

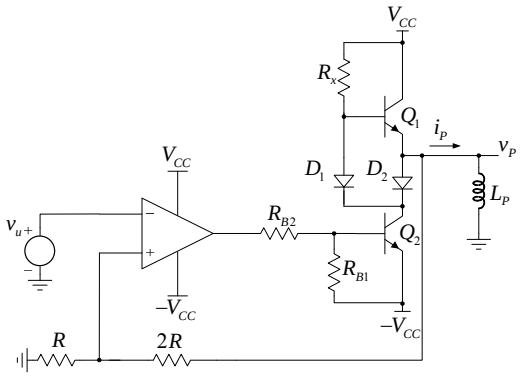
a) [3] Nacrtati i označiti dijagrame v_U , v_P , i_P , i_{C1} i_{C2} , v_{IOP} tokom jedne periode ulaznog napona, ako je $V_u = 3\text{V}$, $T = 10\mu\text{s}$.

b) [3] Pod uslovima iz tačke a) izračunati snagu koju troše baterije za napajanje i korisnu snagu koja se razvija na potrošaču.

c) [10] Odrediti graničnu vrednost induktivnosti L_P tako da maksimalno moguća amplituda neizobličenog simetričnog napona na izlazu ne zavisi od vrednosti ove induktivnosti.

d) [2] Pod uslovima iz prethodne tačke, i ako je $L_P = L_{Pgr}$ odrediti opseg mogućih vrednosti otpornosti R_{B2} tako da kolo i dalje ispravno radi.

e) [2] Ako je na ulazu kola sinusoidalni napon amplitude V_u , odrediti zavisnost srednje snage disipacije na tranzistorima Q_1 i Q_2 od V_u ako $L_P \to 0$.



Slika 1

Rešenje:

a)

$$v_U = V_u \begin{cases} 1, & kT \le t \le \dfrac{2k+1}{2}T \\ -1, & \dfrac{2k+1}{2}T \le t \le (k+1)T \end{cases} = 3\text{V} \begin{cases} 1, & kT \le t \le \dfrac{2k+1}{2}T \\ -1, & \dfrac{2k+1}{2}T \le t \le (k+1)T \end{cases}$$

$$v_P = 3v_U = 3V_u \begin{cases} 1, & kT \le t \le \dfrac{2k+1}{2}T \\ -1, & \dfrac{2k+1}{2}T \le t \le (k+1)T \end{cases} = 9\text{V} \begin{cases} 1, & kT \le t \le \dfrac{2k+1}{2}T \\ -1, & \dfrac{2k+1}{2}T \le t \le (k+1)T \end{cases}$$

$$i_P = \frac{1}{L_P}\int v_P dt = \frac{3V_u T}{4L_P} \begin{cases} -1+\dfrac{4}{T}(t-kT), & kT \le t \le \dfrac{2k+1}{2}T \\ 3-\dfrac{4}{T}(t-kT), & \dfrac{2k+1}{2}T \le t \le (k+1)T \end{cases}$$

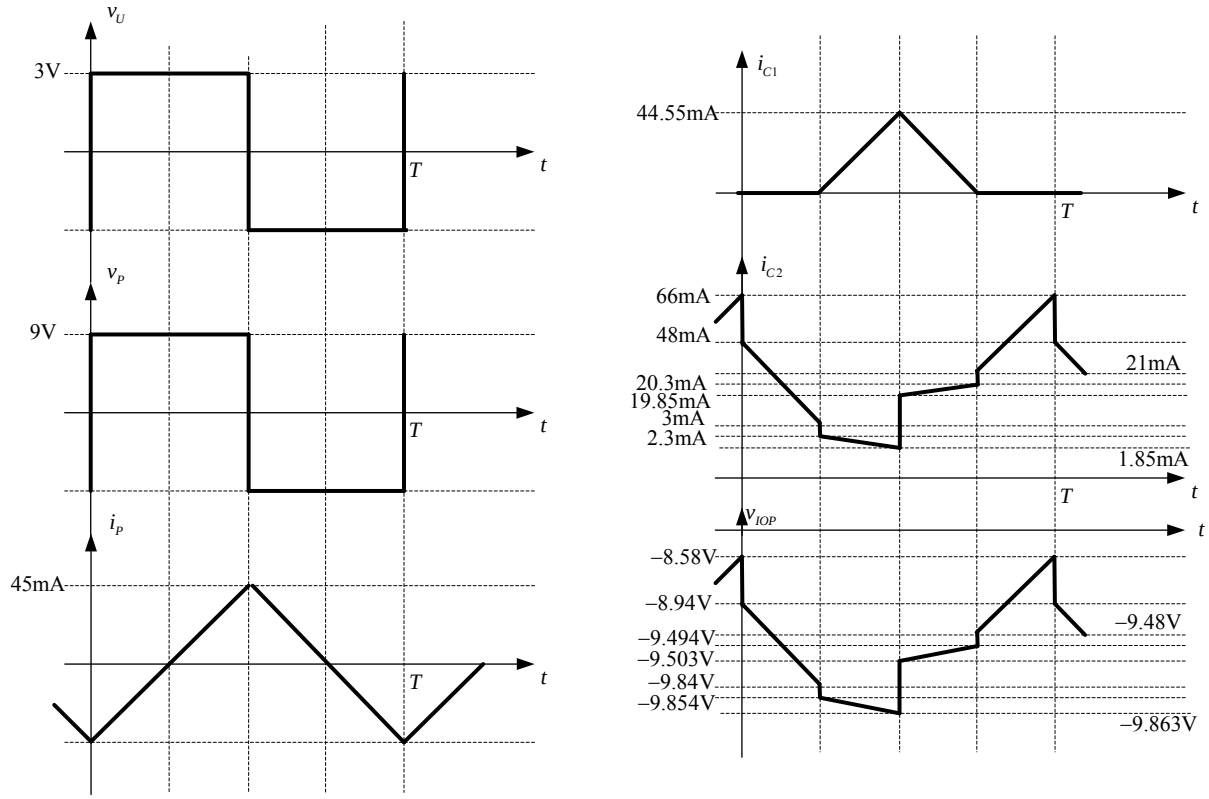
$$I_p = \frac{3V_u T}{4L_P} = 45\text{mA}$$

$$i_{C1} = \begin{cases} 0, & i_P < 0 \\ \dfrac{\beta}{1+\beta} i_P, & i_P > 0 \end{cases} = 44.55\text{mA} \begin{cases} 0, & kT \le t \le \dfrac{4k+1}{4}T \vee \dfrac{4k+3}{4}T \le t \le (k+1)T \\ -1+\dfrac{4}{T}(t-kT), & \dfrac{4k+1}{4}T \le t \le \dfrac{2k+1}{2}T \\ 3-\dfrac{4}{T}(t-kT), & \dfrac{2k+1}{2}T \le t \le \dfrac{4k+3}{4}T \end{cases}$$

$$i_{C2} = \begin{cases} \dfrac{V_{CC}-v_P}{R_x} - i_P, & i_P < 0 \\ \dfrac{V_{CC}-V_{BE}-v_P}{R_x} - \dfrac{i_P}{1+\beta}, & i_P > 0 \end{cases} = \begin{cases} \dfrac{V_{CC}-v_P}{R_x} - i_P, & kT \le t \le \dfrac{4k+1}{4}T \vee \dfrac{4k+3}{4}T \le t \le (k+1)T \\ \dfrac{V_{CC}-V_{BE}-v_P}{R_x} - \dfrac{i_P}{1+\beta}, & \dfrac{4k+1}{4}T \le t \le \dfrac{4k+3}{4}T \end{cases}$$

$$i_{C2}=\begin{cases}3\text{mA}-i_P, & kT\le t\le\dfrac{4k+1}{4}T\\ 2.3\text{mA}-\dfrac{i_P}{1+\beta}, & \dfrac{4k+1}{4}T\le t\le\dfrac{k+1}{2}T\\ 20.3\text{mA}-\dfrac{i_P}{1+\beta}, & \dfrac{k+1}{2}T\le t\le\dfrac{4k+3}{4}T\\ 21\text{mA}-i_P, & \dfrac{4k+3}{4}T\le t\le(k+1)T\end{cases}$$

$$v_{IOP}=-V_{CC}+V_{BE}+R_{B2}\left(\frac{V_{BE}}{R_{B1}}+\frac{i_{C2}}{\beta}\right)=-9.9\text{V}+\frac{R_{B2}}{\beta}i_{C2}$$



b)

$$P_{CC}=V_{CC}\left(\overline{i_{C1}}+\overline{i_{R_x}}+\overline{i_{R_{B2}}}\right)+V_{CC}\left(\overline{i_{E2}}+\overline{i_{R_{B1}}}\right)$$

$$\overline{i_{C1}}=11.25\text{mA}$$

$$\overline{i_{C2}}=22.7875\text{mA}\ ,\ \overline{i_{E2}}=\frac{1+\beta}{\beta}\overline{i_{C2}}=23.015375\text{mA}$$

$$i_{R_x}=\begin{cases}\dfrac{V_{CC}-v_P}{R_x}, & i_P<0\\ \dfrac{V_{CC}-V_{BE}-v_P}{R_x}, & i_P>0\end{cases}=\begin{cases}\dfrac{V_{CC}-v_P}{R_x}, & kT\le t\le\dfrac{4k+1}{4}T\vee\dfrac{4k+3}{4}T\le t\le(k+1)T\\ \dfrac{V_{CC}-V_{BE}-v_P}{R_x}, & \dfrac{4k+1}{4}T\le t\le\dfrac{4k+3}{4}T\end{cases}$$

$$i_{R_x}=\begin{cases}3\text{mA} & kT\le t\le\dfrac{4k+1}{4}T\\ 2.3\text{mA} & \dfrac{4k+1}{4}T\le t\le\dfrac{2k+1}{2}T\\ 20.3\text{mA} & \dfrac{2k+1}{2}T\le t\le\dfrac{4k+3}{4}T\\ 21\text{mA}, & \dfrac{4k+3}{4}T\le t\le(k+1)T\end{cases}$$

$$\overline{i_{R_x}} = 11.65\text{mA}$$

$$\overline{i_{R_{B1}}} = 0.7\text{mA}$$

$$\overline{i_{R_{B2}}} = \overline{i_{R_{B1}}} + \frac{1}{\beta}\overline{i_{C2}} = 0.7\text{mA}+0.227875\text{mA}=0.927875\text{mA}$$

$$P_{CC} = V_{CC}\left(\overline{i_{C1}} + \overline{i_{R_x}} + \overline{i_{R_{B2}}} + \overline{i_{C2}} + \overline{i_{R_{B1}}}\right) \approx 571\text{mW}$$

$$P_{OUT} = 0 \text{ (reaktivni potrošač)}$$

c)

Strujno ograničenje tranzistora Q_1:

$$V_{CC} = \frac{R_x I_p}{1+\beta} + V_{BE} + v_{P\max 1}$$

$$V_{CC} = \frac{R_x}{1+\beta}\frac{T}{4L_P}v_{P\max 1} + V_{BE} + v_{P\max 1}$$

$$v_{P\max 1} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{1 + \frac{R_x}{1+\beta}\frac{T}{4L_P}}$$

Strujno ograničenje operacionog pojačavača:

$$i_{P\min} = -\left(\beta\left(i_{OP\max} - \frac{V_{BE}}{R_{B1}}\right) - \frac{V_{CC} - v_{P\min 1}}{R_x}\right)$$

$$\frac{T}{4L_P}v_{p\min 1} = -\left(\beta\left(i_{OP\max} - \frac{V_{BE}}{R_{B1}}\right) - \frac{V_{CC} - v_{P\min 1}}{R_x}\right) = -\beta\left(i_{OP\max} - \frac{V_{BE}}{R_{B1}}\right) + \frac{V_{CC}}{R_x} - \frac{v_{P\min 1}}{R_x}$$

$$v_{P\min 1} = \frac{-\beta\left(i_{OP\max} - \frac{V_{BE}}{R_{B1}}\right) + \frac{V_{CC}}{R_x}}{\frac{T}{4L_P} + \frac{1}{R_x}}$$

Naponska ograničenja:

$$v_{P\max 2} = V_{CC} - V_{CES} = 11.8\text{V}$$

$$v_{P\min 2} = -V_{CC} + V_{CES} + V_D = -11.1\text{V}$$

Treba da strožiji od naponskih uslova bude strožiji od strožijeg strujnog uslova:

$$\left|v_{P\min 2}\right| \le v_{P\max 1}$$

$$L_P \ge \frac{\frac{R_x T}{4(1+\beta)}}{\frac{V_{CC} - V_{BE}}{\left|v_{P\min 2}\right|} - 1} = 1.37\text{mH}$$

$$\left|v_{P\min 2}\right| \le \left|v_{P\min 1}\right|$$

$$L_P \ge \frac{\frac{T}{4}}{\frac{\beta\left(i_{OP\max} - \frac{V_{BE}}{R_{B1}}\right) - \frac{V_{CC}}{R_x}}{\left|v_{P\min 2}\right|} - \frac{1}{R_x}} = 90.42\mu\text{H}$$

$$L_P \ge 1.37\text{mH}$$

d)

$$v_{IOP} = -V_{CC} + V_{BE} + R_{B2}\left(\frac{V_{BE}}{R_{B1}} + \frac{i_{C2}}{\beta}\right)$$

$$v_{IOP\max} = -V_{CC} + V_{BE} + R_{B2}\left(\frac{V_{BE}}{R_{B1}} + \frac{i_{C2\max}}{\beta}\right) \le V_{CC}$$

$$i_{C2\max} = \frac{V_{CC} - v_{P\min}}{R_x} - i_{P\min} = \frac{V_{CC} - v_{P\min}}{R_x} - \frac{v_{P\min} T}{4L_P} = \left\langle \begin{matrix} v_{P\min} = -11.1\text{V} \\ L_P = 1.37\text{mH} \end{matrix} \right\rangle = 43.36\text{mA}$$

$$R_{B2} \le \frac{2V_{CC} - V_{BE}}{\frac{V_{BE}}{R_{B1}} + \frac{i_{C2\max}}{\beta}} = 20.56\text{k}\Omega$$

e)

Kada je $v_U > 0$ operacioni pojačavač je u negativnom zasićenju i tranzistor Q_2 je isključen

$$p_{D2} = 0$$

$$\text{Važi } i_{C1} = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_x} = 1.13\text{A}$$

$$p_{D1} = V_{CC} i_{C1} = 13.56\text{W}$$

Kada je $v_U < 0$ operacioni pojačavač je u pozitivnom zasićenju i tranzistor Q_2 je uključen. Tranzistor Q_1 je isključen jer je $v_{BE1} = \left(v_P - V_D + V_D\right) - v_P = 0$.

$$i_{B2} = \frac{2V_{CC} - V_{BE}}{R_{B2}} - \frac{V_{BE}}{R_{B1}} = 10.95\text{mA}$$

$$i_{C2} = \beta i_{B2} = 1.095\text{A}$$

$$p_{D2} = \left(-V_D + V_{CC}\right) i_{C2} = 12.3735\text{W}$$

$$p_{D1} = 0$$

$$P_{D1} = \frac{13.56 + 0}{2} = 6.78\text{W}$$

$$P_{D2} = \frac{0+12.3735}{2} = 6.18675\text{W}$$