

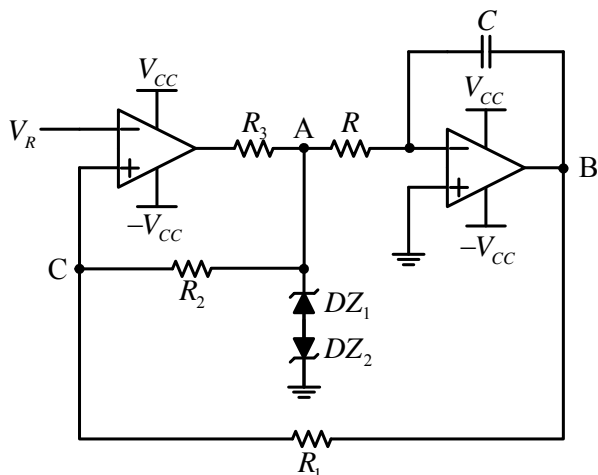
Zadatak

Za kolo sa slike:

a) Odrediti periodu oscilacija i odnos impuls/pauza. Izračunati i nacrtati jedan ispod drugog vremenske dijagrame napona u tačkama A, B, i C. Poznati su elementi kola: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $R = 10\text{k}\Omega$, $C = 10\text{nF}$, $V_Z = 9.3\text{V}$, $V_D = 0.7\text{V}$, $V_R = 0\text{V}$, $V_{CC} = 15\text{V}$.

b) Odrediti opseg napona V_R tako da kolo i dalje radi na isti način kao u tački a).

c) Odrediti opseg vrednosti otpornosti R_3 tako da kolo i dalje ispravno radi, ako je maksimalna izlazna struja operacionog pojačavača $I_{OP\text{max}} = 10\text{mA}$, i minimalna struja za koju zener dioda radi u proboju $I_{Z\text{min}} = 0$.



Rešenje:

Kolo se može predstaviti ekvivalentnom šemom sa slike 1. Pre nego se krene u dalje rešavanje zadatka, potrebno je odrediti karakteristiku prenosa komparatora.

Zbog postojanja pozitivne povratne sprege u kolu, operacioni pojačavač će uvek biti u zasićenju, odnosno na njegovom izlazu moguće su samo dve vrednosti napona: pozitivno i negativno napajanje.

Neka je na izlazu operacionog pojačavača pozitivno napajanje

$$v_{IOP} = V_{CC}.$$

Da bi ovo bilo ispunjeno mora važiti da je $V_+ > V_-$. Istovremeno je na izlazu kola napon

$$v_I = V_Z + V_D,$$

jer je

$$v_{IOP} > V_Z + V_D$$

i diode imaju uslove da vode.

Iz uslova

$$v_+ > v_-$$

sledi

$$v_U \frac{R_2}{R_1 + R_2} + (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_1 + R_2} > V_R,$$

odnosno

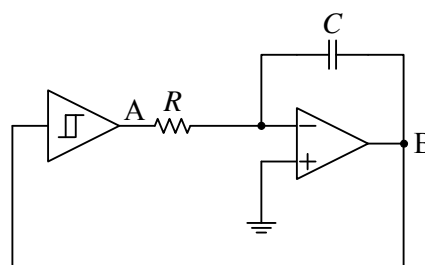
$$v_U > V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_2}.$$

Kada se u gornjoj nejednakosti „>“ zameni sa „=“ dobija se vrednost praga V_{TL}

$$V_{TL} = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_2}.$$

Neka je sada na izlazu operacionog pojačavača negativno napajanje

$$v_{IOP} = -V_{CC}$$



Slika 1.

Da bi ovo bilo ispunjeno mora važiti da je $v_+ < v_-$. Istovremeno je na izlazu kola napon

$$v_I = -(V_Z + V_D),$$

jer je

$$v_{IOP} < -(V_Z + V_D)$$

i diode imaju uslove da vode.

Iz uslova

$$v_+ < v_-$$

sledi

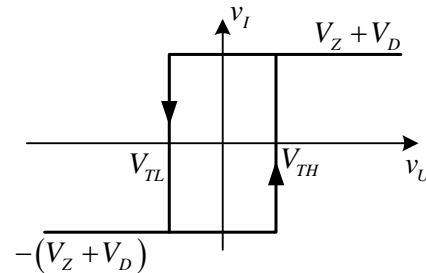
$$v_U \frac{R_2}{R_1 + R_2} - (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_1 + R_2} < V_R,$$

odnosno

$$v_U < V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_2}.$$

Kada se u gornjoj nejednakosti „ $<$ “ zameni sa „ $=$ “ dobija se vrednost praga V_{TH}

$$V_{TH} = V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_2}.$$



Slika 2.

Karakteristika prenosa komparatora prikazana je na slici 2.

a) Neka je u početnom trenutku napon tačke A $V_A = V_Z + V_D = 10V$. To znači da struja kroz otpornik R teče od izlaza komparatora (tačka A) prema minus priključku operacionog pojačavača, i puni kondenzator (napon na kondenzatoru je usmeren tako da mu je plus na minus priključku operacionog pojačavača). Napon tačke B je $V_B = -V_{CON}$, i opada pošto napon kondenzatora raste. Da bi na izlazu komparatora bio visok napon, sa karakteristike prenosa je očigledno da napon tačke B treba da je veći od V_{TL} . Kako napon tačke B opada, jasno je da će u jednom trenutku doći do promene izlaza komparatora.

U trenutku $t = 0^-$ napon tačke B pada na $V_B(0^-) = V_{TL}$, i napon tačke A postaje $V_A(0^+) = -(V_Z + V_D) = -10V$. Kako napon na kondenzatoru ne može da trenutno promeni vrednost, to ne može da se trenutno promeni ni napon tačke B ($V_B = -V_{CON}$).

Sada struja kroz otpornik R teče od minus priključka operacionog pojačavača prema izlazu komparatora, i prazni kondenzator, odnosno povećava vrednost napona tačke B:

$$V_B(t) = V_{TL} + \frac{I}{C}t = V_{TL} + \frac{V_Z + V_D}{RC}t = -5V + \frac{10V}{RC}t.$$

Sledeća promena u kolu dešava se kada napon tačke B (ulaz komparatora) dostigne vrednost gornjeg praga odlučivanja komparatora. To se dešava nakon protoka vremena T_1^- , i napon tačke A postaje $V_A(T_1^+) = V_Z + V_D = 10V$. Kako napon na kondenzatoru ne može da trenutno promeni vrednost, to ne može da se trenutno promeni ni napon tačke B ($V_B = -V_{CON}$).

Sada struja kroz otpornik R ponovo teče od izlaza komparatora prema minus priključku operacionog pojačavača, i puni kondenzator, odnosno smanjuje vrednost napona tačke B:

$$V_B(t) = V_{TH} - \frac{I}{C}t = V_{TH} - \frac{V_Z + V_D}{RC}t = 5V - \frac{10V}{RC}t$$

U trenutku T_2^- napon tačke B još jednom pada na $V_B(0^-) = V_{TL}$, i napon tačke A postaje $V_A(0^+) = -(V_Z + V_D) = -10V$. Situacija u kolu je sada ista kao za $t > 0$ i ciklus se ponavlja.

Perioda oscilovanja je $T = T_1 + T_2$, T_1 se određuje iz veze $V_B(T_1) = V_{TL} + \frac{I}{C}T_1 = V_{TH}$, a T_2 iz veze $V_B(T_2) = V_{TH} - \frac{I}{C}T_2 = V_{TL}$, odnosno

$$T_1 = \frac{C}{I}(V_{TH} - V_{TL}) = \frac{RC}{V_Z + V_D}(V_{TH} - V_{TL}) = 2 \frac{R_1}{R_2} RC = RC,$$

$$T_2 = \frac{C}{I}(V_{TH} - V_{TL}) = \frac{RC}{V_Z + V_D}(V_{TH} - V_{TL}) = 2 \frac{R_1}{R_2} RC = RC.$$

$$T = 4 \frac{R_1}{R_2} RC = 2RC = 200\mu s.$$

Odnos impuls/pauza signala u tački A je

$$\frac{T_2}{T_1} = 1$$

Napon tačke C određuje se preko naponskog razdelnika sa slike 3:

$$V_C = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_A + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_B = \frac{1}{3} V_A + \frac{2}{3} V_B$$

U intervalu $0 < t < T_1$ je $V_C(t) = -6.67V + \frac{6.67V}{RC}t$.

U intervalu $T_1 < t < T_1 + T_2$ je

$$V_C(t) = 6.67V - \frac{6.67V}{RC}t.$$

Traženi vremenski oblici napona prikazani su na slici 4.

b) opseg napona V_R određen je sledećim uslovima (na osnovu oblika napona u tački B, napon na izlazu integratora ne sme da pređe napon napajanja jer inače odlazi u zasićenje):

$$V_{B\max} = V_{TH} \leq V_{CC} \Rightarrow V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_2} \leq V_{CC} 5V$$

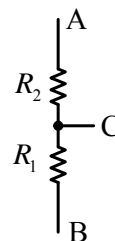
$$\Rightarrow V_R \leq 6.67V$$

$$V_{B\min} = V_{TL} \geq -V_{CC} \Rightarrow V_R \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - (V_Z + V_D) \frac{R_1}{R_2} \geq -V_{CC} -5V$$

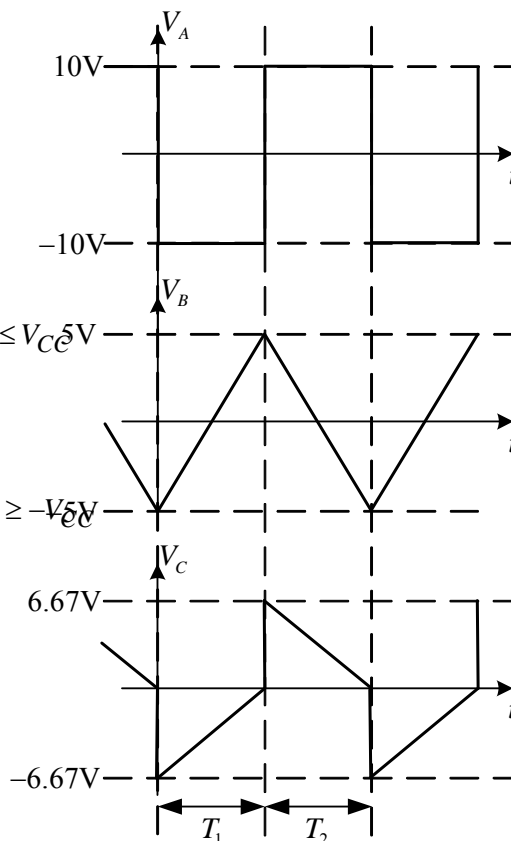
$$\Rightarrow V_R \geq -6.67V$$

$$-6.67V \leq V_R \leq 6.67V$$

c) Izlazna struja levog operacionog pojačavača je ista za oba stanja izlaza, samo se menja smer, tako da je dovoljno posmatrati samo situaciju kada je na izlazu ovog operacionog pojačavača visok napon:



Slika 3.



Slika 4.

$$I_{OP} = \frac{V_{CC} - (V_Z + V_D)}{R_3}.$$

Kako struja operacionog pojačavača mora biti manja od maksimalne dozvoljene, dobija se uslov

$$I_{OP} = \frac{V_{CC} - (V_Z + V_D)}{R_3} \leq I_{OP \max},$$

$$R_3 \geq \frac{V_{CC} - (V_Z + V_D)}{I_{OP \max}} = 500\Omega.$$

Prvi Kirhofov zakon za čvor A glasi

$$\frac{V_{CC} - (V_Z + V_D)}{R_3} = I_Z + \frac{V_Z + V_D}{R} + \frac{V_Z + V_D - V_B}{R_1 + R_2}$$

Granični slučaj je kada je $I_Z = I_{Z \min}$ i $V_B = V_{B \min} = V_{TL}$, odnosno

$$\frac{V_{CC} - (V_Z + V_D)}{R_3} \geq I_{Z \min} + \frac{V_Z + V_D}{R} + \frac{V_Z + V_D - V_{TL}}{R_1 + R_2}$$

$$R_3 \leq \frac{V_{CC} - (V_Z + V_D)}{I_{Z \min} + \frac{V_Z + V_D}{R} + \frac{V_Z + V_D - V_{TL}}{R_1 + R_2}}$$

$$R_3 \leq 3.33\text{k}\Omega$$

Opseg dozvoljenih vrednosti otpornika R_3 je

$$500\Omega \leq R_3 \leq 3.33\text{k}\Omega$$