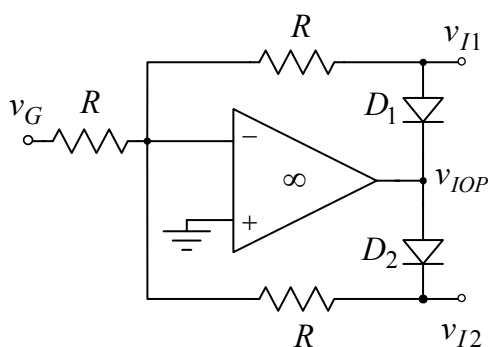


## **Glava 4**

# **PRIMENA OPERACIONIH POJAČAVAČA U NELINEARNIM KOLIMA**





Slika 4.1

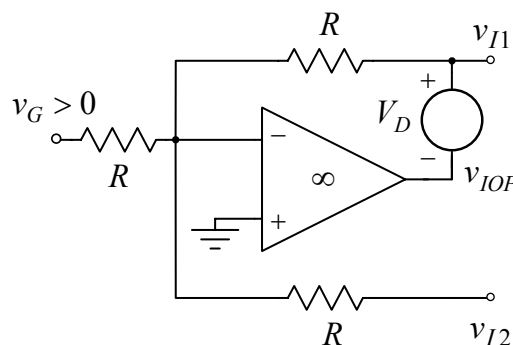
**4.1.** U kolu preciznog usmerača, slika 4.1, operacioni pojačavač se može smatrati idealnim i napaja se iz baterija  $V_{CC} = -V_{EE} = 12\text{V}$ , diode su idealnih karakteristika sa  $V_D = 0,6\text{V}$ , dok je  $R = 100\text{k}\Omega$ . Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_{I1} = f(v_G)$  i  $v_{I2} = g(v_G)$  i  $v_{IOP} = h(v_G)$ ,  $V_{EE}/2 \leq v_G \leq V_{CC}/2$ .

**Rešenje:**

Kada je  $0 < v_G \leq V_{CC}/2$  dioda  $D_1$  provodi struju, a dioda  $D_2$  je zakočena, slika 4.1a. Tada je

$$v_{I1} = -v_G, \quad v_{IOP} = v_{I1} - V_D = -v_G - V_D \quad \text{i}$$

$$v_{I2} = v^- = v^+ = 0.$$

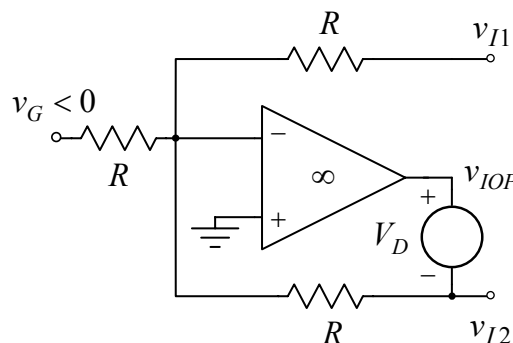


Slika 4.1a

Kada je  $V_{EE}/2 \leq v_G < 0$  dioda  $D_2$  provodi struju, dok je dioda  $D_1$  zakočena, slika 4.1b. Tada je

$$v_{I1} = v^- = v^+ = 0, \quad v_{I2} = -v_G \quad \text{i}$$

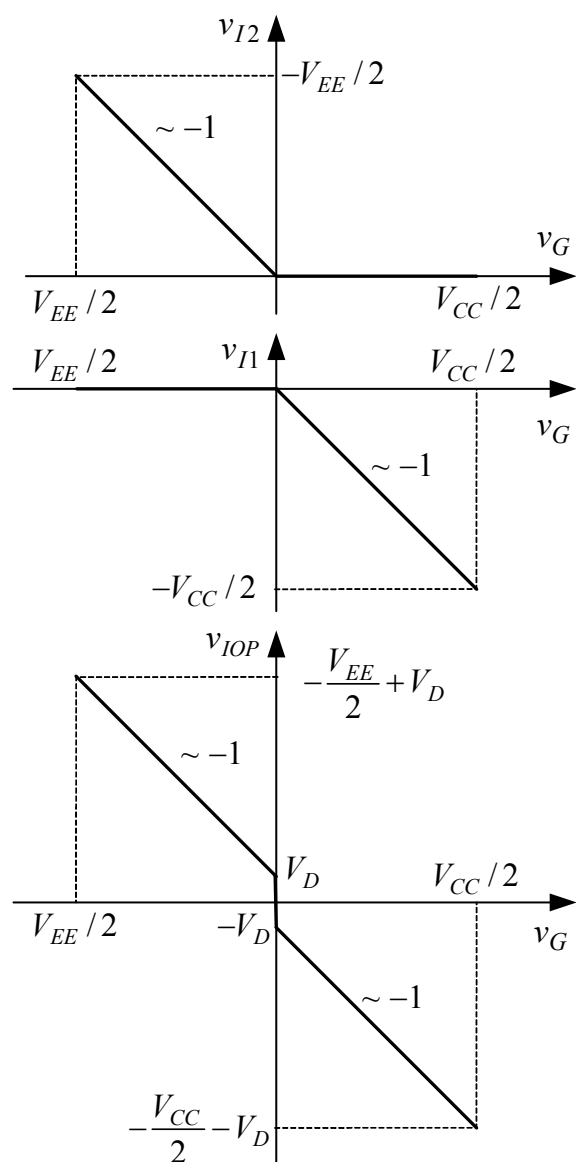
$$v_{IOP} = v_{I2} + V_D = -v_G + V_D.$$



Slika 4.1b

Pri prolasku ulaznog napona kroz nulu kratkotrajno se prekida kolo negativne povratne sprege, jedna dioda prestaje da provodi, a druga se uključuje.

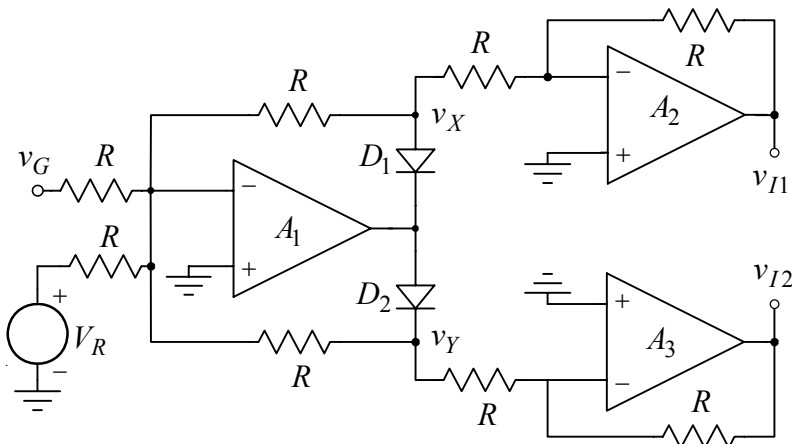
Na slici 4.1c prikazane su zavisnosti  $v_{I1} = f(v_G)$ ,



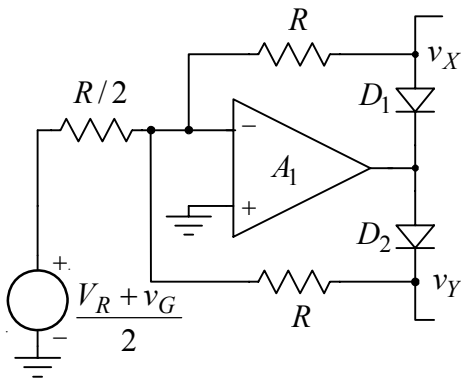
Slika 4.1c

$v_{I2} = g(v_G)$  i  $v_{IOP} = h(v_G)$ .

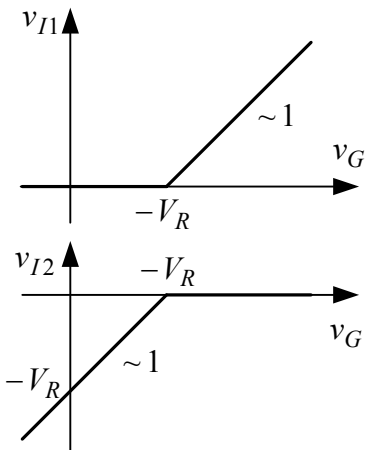
**4.2.** U kolu preciznog usmerača, slika 4.2, operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim, diode su idealnih karakteristika sa  $V_D = 0,6\text{V}$ , dok je  $R = 100\text{k}\Omega$ .



Slika 4.2



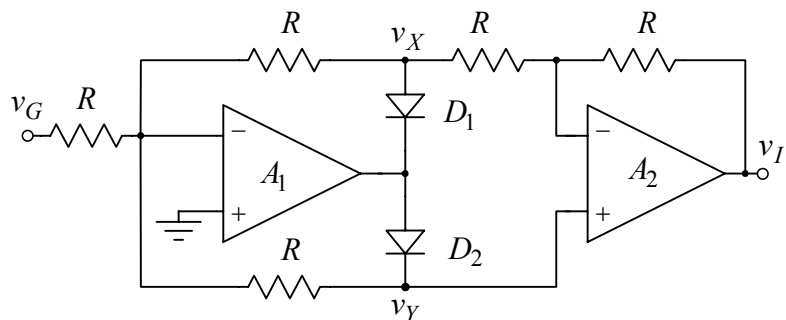
Slika 4.2a



Slika 4.2b

$$v_{I2} = g(v_G).$$

**4.3.** U kolu preciznog usmerača sa slike 4.3 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim, diode su idealnih karakteristika sa  $V_D = 0.6\text{V}$ , dok je  $R = 100\text{k}\Omega$ . Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ .



Slika 4.3

**Rešenje:**

Kada je  $v_G > 0$  dioda  $D_1$  je provodna, a dioda  $D_2$  ne provodi. U kolu pojačavača  $A_1$  je uspostavljena negativna reakcija, pa je

$$v_X = -v_G \text{ i } v_Y = 0.$$

Primenom I Kirhofovog zakona za minus priključak pojačavača  $A_2$  dobija se

Ako je  $V_R = 5\text{V}$ , odrediti i nacrtati zavisnost  $v_{I1} = f(v_G)$  i  $v_{I2} = g(v_G)$ .

**Rešenje:**

Primenom Tevenenove teoreme ulazno kolo sa slike 4.2 dobija oblik prikazan na slici 4.2a. Dioda  $D_1$  će provoditi kada je

$$\frac{V_R + v_G}{2} > 0 \Rightarrow v_G > -V_R.$$

Tada je dioda  $D_2$  zakočena, te je

$$v_X = -\frac{R}{R/2} \left( \frac{V_R + v_G}{2} \right) = -(V_R + v_G) \text{ i } v_Y = 0.$$

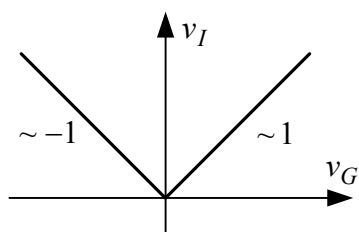
Operacioni pojačavač  $A_2$  čini kolo jediničnog invertora, pa je

$$v_{I1} = -v_X = V_R + v_G.$$

Kada je  $v_G < -V_R$  dioda  $D_2$  je provodna, dok je  $D_1$  zakočena. Tada je

$$v_{I2} = -v_Y = -(-(V_R + v_G)) = V_R + v_G \text{ i } v_{I1} = 0.$$

Na slici 4.2b prikazane su zavisnosti  $v_{I1} = f(v_G)$  i



Slika 4.3a

$$\frac{v_X - v_Y}{R} = \frac{v_Y - v_I}{R} \Rightarrow v_I = 2v_Y - v_X = v_G.$$

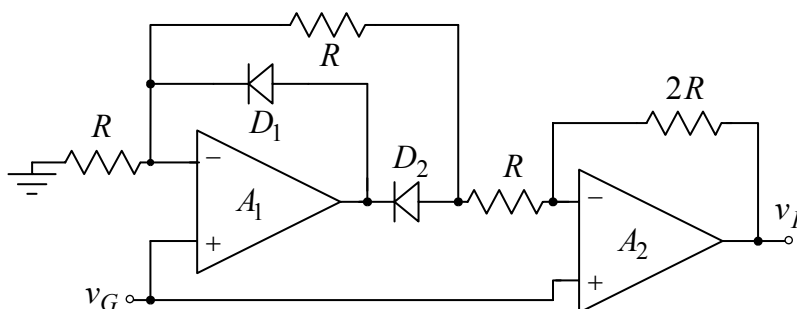
Kada je  $v_G < 0$  dioda  $D_2$  je provodna, dok je dioda  $D_1$  neprovodna. I ovde je u kolu pojačavača  $A_1$  uspostavljena negativna reakcija, te je

$$\frac{v_G - 0}{R} = \frac{0 - v_Y}{R} + \frac{0 - v_Y}{2R},$$

odakle se dobija

$$v_Y = -\frac{2}{3}v_G \text{ i } v_I = \left(1 + \frac{R}{2R}\right)v_Y = \frac{3}{2}\left(-\frac{2}{3}v_G\right) = -v_G.$$

Dakle, kolo radi kao precizni dvostrani usmerač, a prenosna karakteristika mu je prikazana na slici 4.3a.



Slika 4.4

**4.4.** U kolu preciznog usmerača sa slike 4.4 operacioni pojačavači su idealni, diode su idealnih karakteristika sa  $V_D = 0.6V$ , dok je  $R = 100k\Omega$ . Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ .

**Rešenje:**

Pretpostavimo da za  $v_G > 0$  nijedna dioda ne provodi. Tada je

$$v_{A1}^+ = v_G, v_{A2}^+ = v_{A2}^- = v_G \text{ i } v_{A1}^- = v_G/3 < v_{A1}^+,$$

što znači da će izlaz operacionog pojačavača  $A_1$  biti u pozitivnom zasićenju, odnosno da pretpostavka nije opravdana. Pretpostavimo da provodi samo dioda  $D_1$ , slika 4.4a. Zbog negativne povratne sprege u kolu oba pojačavača struja  $i$  jednaka je nuli, tako da je

$$v_I = v_G.$$

Pretpostavka je opravdana pošto je struja diode  $D_1$  veća od nule

$$i_{D1} = v_G / R > 0,$$

a dioda  $D_2$  je inverzno polarisana

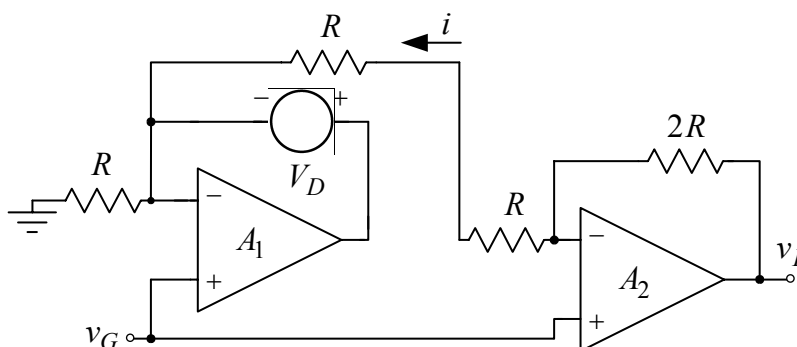
$$v_{D2} = v_G - (v_G + V_D) = -V_D < V_D.$$

Kada je  $v_G < 0$  dioda  $D_1$  je zakočena, a dioda  $D_2$  provodi, slika 4.4b. U kolu je ostvarena negativna reakcija, te je

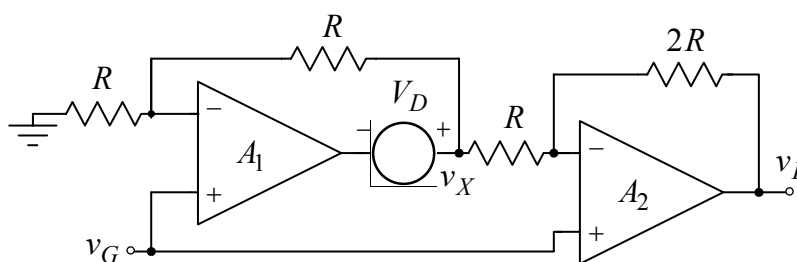
$$v_X = 2v_G \text{ i } v_I = -2v_X + 3v_G = -v_G.$$

Dakle, kolo obavlja funkciju punotalasnog usmerača, slika 4.4c,

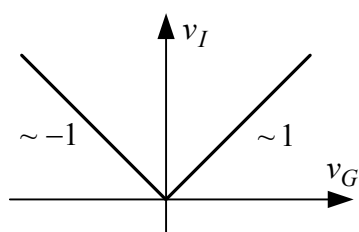
$$v_I = |v_G|.$$



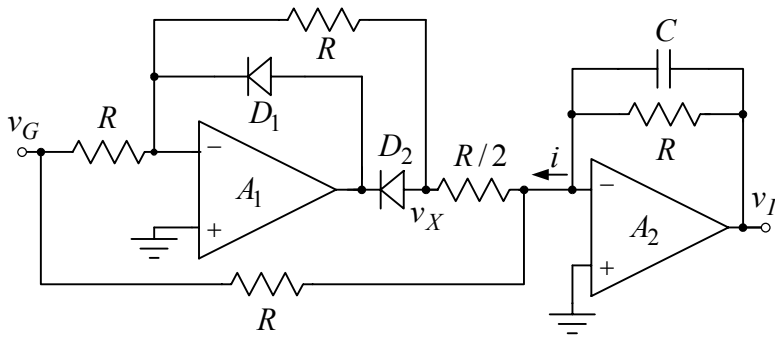
Slika 4.4a



Slika 4.4b



Slika 4.4c



Slika 4.5

**4.5.** U kolu sa slike 4.5 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim, diode su idealnih karakteristika sa  $V_D = 0.6\text{V}$ , dok je  $R = 100\text{k}\Omega$  i  $C \rightarrow \infty$ .

- a) Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = v_I(v_G)$ .
- b) Ako je  $v_G = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $f = 1\text{kHz}$ , odrediti vremenski oblik izlaznog napona  $v_I(t)$ .

### Rešenje:

a) Za  $v_G > 0$  provodi dioda  $D_2$ , a dioda  $D_1$  je neprovodna. Tada je

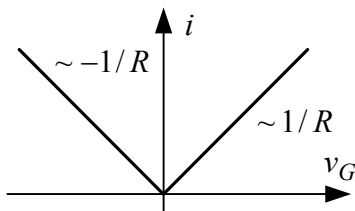
$$v_X = -v_G \text{ i } i = \frac{0 - v_X}{R/2} + \frac{0 - v_G}{R} = \frac{2v_G}{R} - \frac{v_G}{R} = \frac{v_G}{R}.$$

Za  $v_G < 0$  provodna je dioda  $D_1$ , dok je dioda  $D_2$  zakočena. U ovom slučaju struja kroz otpornost  $R/2$  ravna je nuli, pa je

$$i = -v_G / R.$$

Dakle, struja  $i$  je proporcionalna modulu ulaznog napona, slika 4.5a,

$$i = |v_G| / R.$$



Slika 4.5a

b) Kada je  $v_G = V_m \sin(2\pi ft)$  struja  $i(t)$  je

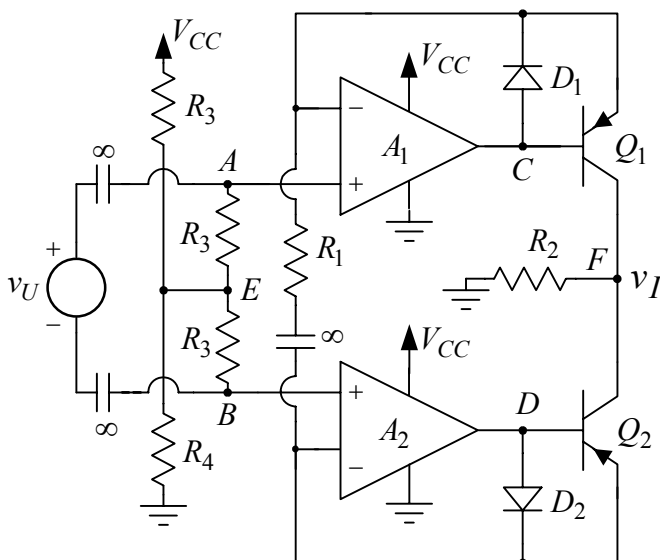
$$i = \frac{|v_G|}{R} = \frac{V_m}{R} |\sin(2\pi ft)|.$$

Kao što se vidi iz poslednjeg izraza, struja je periodična funkcija vremena sa periodom  $T_0 = 1/(2f)$ . Periodične funkcije se mogu razviti u Fourierov red

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega_0 t) + I_{2m} \sin(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots, \quad \omega_0 = 2\pi / T_0.$$

Srednja vrednost struje  $i$  je

$$\bar{i} = I_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} i(t) dt = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{V_m}{R} \sin(2\pi ft) dt = \frac{1}{T_0} \frac{V_m}{R} \frac{1}{2\pi f} (-\cos(2\pi ft)) \Big|_0^{T_0/2} = \frac{2}{\pi} \frac{V_m}{R}.$$



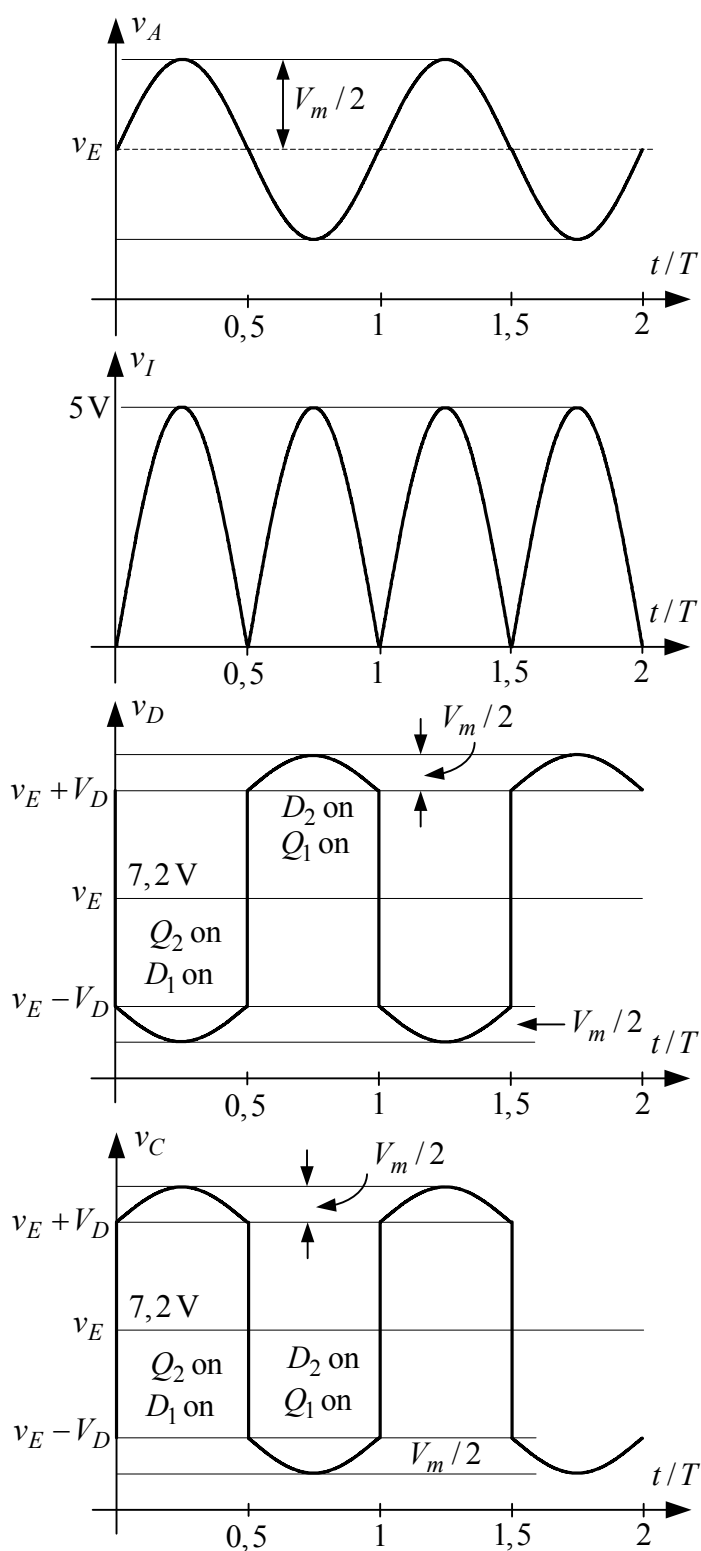
Slika 4.6

Pošto  $C \rightarrow \infty$ , sve promenljive komponente struje  $i$  prolaze kroz njega i završavaju se u izlazu pojačavača  $A_2$ . Kroz kondenzator ne protiče srednja vrednost struje  $i$ , ona prolazi samo kroz otpornost  $R$ . Pošto je u kolu izlaznog pojačavača ostvarena negativna reakcija, to je

$$v_I(t) = R i_R(t) = R I_0 = R \frac{2}{\pi} \frac{V_m}{R} = \frac{2}{\pi} V_m.$$

Dakle, na izlazu je prisutan samo jednosmerni napon, a on je proporcionalan amplitudi napona pobudnog generatora.

**4.6.** U kolu na slici 4.6 svi tranzistori su identičnih karakteristika sa  $\beta_F \gg 1$ ,



Slika 4.6a

negativnoj poluperiodi ulaznog napona ovu struju provode dioda  $D_2$  i tranzistor  $Q_1$ . Strujni krug se u oba slučaja zatvara preko otpornosti  $R_2$ . Napon na izlazu kola je

$$v_I = R_2 i_{C2} = R_2 \frac{v_U}{R_1}, \quad v_U > 0 \quad \text{i} \quad v_I = R_2 i_{C1} = -R_2 \frac{v_U}{R_1}, \quad v_U < 0,$$

odnosno

$V_{EB} = V_\gamma = 0,6 \text{ V}$ ,  $V_{CES} = 0,2 \text{ V}$ , diode su idealne sa pragom provođenja  $V_D = 0,6 \text{ V}$ , a operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim. Poznato je:  $V_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$  i  $R_4 = 1,5 \text{ M}\Omega$ .

- Ako je  $v_U = V_m \sin(2\pi ft)$ ,  $V_m = 100 \text{ mV}$  i  $f = 1 \text{ kHz}$  odrediti otpornost  $R_1$  tako da maksimalna vrednost izlaznog napona bude  $5 \text{ V}$ . Objasniti funkciju kola sa slike 4.6.
- Pod uslovima iz tačke a) nacrtati vremenske oblike napona u tačkama A, B, C, D, E i F sa naznačenim karakterističnim vrednostima na  $v$  i  $t$  osi. Odrediti režime rada aktivnih elemenata na pojedinim segmentima karakteristike prenosa.
- Odrediti maksimalnu amplitudu ulaznog napona  $V_{m \max}$  pri kome kolo još uvek obavlja funkciju iz tačke a).
- Odrediti maksimalne struje izlaza operacionih pojačavača  $A_1$  i  $A_2$ .

### Rešenje:

a) Zbog konfiguracije kola, uvek postoji negativna povratna sprega za promenljive signale u kolima oba pojačavača. Tranzistor  $Q_1$  i dioda  $D_1$  provode alternativno, isto kao i tranzistor  $Q_2$  i dioda  $D_2$ . Pošto postoji negativna povratna sprega, to je  $v^+ = v^-$ . Zbog beskonačno male impedanse kondenzatora na radnoj učestanosti, promenljivi napon na otporniku  $R_1$  jednak je ulaznom naponu

$$v_{R1} = v_U.$$

Kada je  $v_U > 0$  struju otpornika  $R_1$ ,

$$i_{R1} = v_{R1} / R_1 = v_U / R_1$$

provode dioda  $D_1$  i tranzistor  $Q_2$ . U

$$v_I = \frac{R_2}{R_1} |v_U|,$$

što znači da kolo radi kao dvostrani usmerač.

Iz uslova da maksimalnoj vrednosti ulaznog napona odgovara izlazni napon,  $v_{I\max} = 5\text{ V}$ , dobija se otpornost  $R_1$ ,

$$R_1 = R_2 \frac{v_{U\max}}{v_I} = R_2 \frac{V_m}{v_I} = 400\ \Omega.$$

b) Naponi u tačkama A, B i E imaju iste jednosmerne vrednosti

$$V_A = V_B = V_E = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_{CC} = 7,2\text{ V}.$$

Zbog simetrije kola promenljiva komponenta potencijala tačke E jednaka je nuli, dok se promenljive komponente napona  $v_A$  i  $v_B$  fazno razlikuju za  $\pi$ ,

$$v_A = v_U / 2 \text{ i } v_B = -v_U / 2.$$

S obzirom da je u kolu oba pojačavača ostvarena negativna reakcija, promenljive komponente napona  $v_C$  i  $v_D$  su jednake, isto kao i promenljive komponente napona u tačkama B i D. Pošto ista struja teče kroz diodu  $D_1$  i tranzistor  $Q_2$  u toku pozitivne poluperiode, odnosno kroz diodu  $D_2$  i tranzistor  $Q_1$  u toku negativne poluperiode. Pri prolasku kroz nulu ulaznog napona, naponi u tačkama C i D skokovito se menjaju jer kola pojačavača na trenutak gube negativnu povratnu spregu. Promena ovih napona je

$$\Delta v_C = \Delta v_D = \pm (V_D + V_{EB}).$$

Na osnovu prethodnog razmatranja, na slici 4.6a prikazani su vremenski dijagrami napona u karakterističnim tačkama.

c) Maksimalni ulazni napon pri kojem kolo obavlja funkciju usmerača je onaj napon pri kome tranzistori  $Q_1$  i  $Q_2$  rade u direktnom aktivnom režimu kada provode. Da bi ovo bilo ispunjeno potrebno je da bude

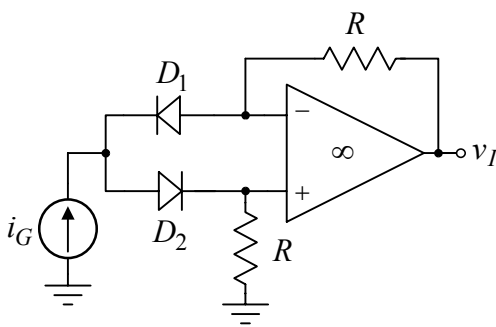
$$v_E - \frac{V_m}{2} - V_{ECS} \geq \frac{R_2}{R_1} V_m,$$

odnosno

$$V_{m\max} \approx \frac{R_1}{R_2} (v_E - V_{ECS}) = 140\text{ mV}.$$

d) Maksimalna struja izlaza operacionih pojačavača određena je maksimalnom strujom dioda kada provode

$$i_{op\max} = V_m / R_1 = 0,35\text{ mA}.$$



Slika 4.7

**4.7.** U kolu sa slike 4.7 operacioni pojačavač se može smatrati idealnim, diode su idealnih karakteristika sa  $V_D = 0,6\text{ V}$ , dok je  $R = 10\text{ k}\Omega$ . Odrediti zavisnost  $v_I = v_I(v_G)$  i funkciju kola.

**Rešenje:**

S obzirom da je u kolu uvek primenjena negativna reakcija, to je  $v^+ = v^-$ , što znači da nikada istovremeno ne mogu provoditi diode  $D_1$  i  $D_2$ . Kada je  $i_G > 0$  provodna je dioda  $D_2$ , te je



$$v^+ = Ri_G = v^- = v_I, \text{ ili } v_I = Ri_G.$$

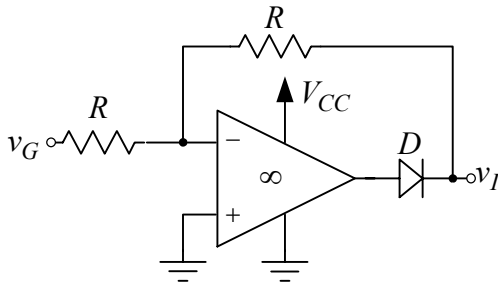
Kada je  $i_G < 0$  samo dioda  $D_1$  provodi, tako da je

$$v_I = v^- - Ri_G = v^+ - Ri_G = -Ri_G,$$

posle čega se dobija funkcija kola

$$v_I = R|i_G|.$$

Dakle, kolo radi kao punotalasni usmerač struje  $i_G$ . I pored padova napona na realnim diodama, izlazni napon proporcionalan je samo modulu ulazne struje. U praktičnim primenama otpornici  $R$  moraju imati uparene karakteristike.



Slika 4.8

**4.8.** U kolu sa slike 4.8 operacioni pojačavač se može smatrati idealnim i napaja se iz baterije  $V_{CC} = 5\text{V}$ , dioda ima  $V_D = 0,6\text{V}$ , dok je  $R = 10\text{k}\Omega$ .

a) Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ ,  $-5\text{V} \leq v_G \leq 5\text{V}$ .

b) Ako je  $v_G = 3\text{V} \sin(2\pi ft)$ ,  $f = 1\text{kHz}$ , odrediti vremenski oblik izlaznog napona  $v_I$ .

### Rešenje:

a) Dioda provodi kada je  $v_G < 0$ , te je

$$v_I = -v_G.$$

Ovo važi sve dok operacioni pojačavač ne uđe u pozitivno zasićenje, kada je

$$v_I = V_{CC} - V_D.$$

Kada je  $-5\text{V} \leq v_G \leq -(V_{CC} - V_D) = -4,4\text{V}$ , operacioni pojačavač je u zasićenju, te je

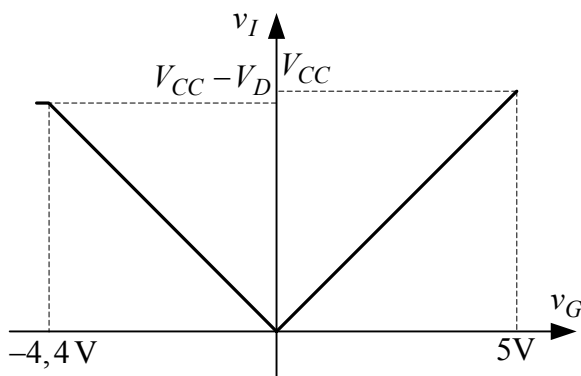
$$v_I = V_{CC} - V_D = 4,4\text{V}.$$

Za  $v_G > 0$  dioda je zakočena, a pošto kroz otpornike  $R$  ne protiče struja, to je

$$v_I = v_G.$$

Dakle, u opsegu ulaznih napona  $|v_G| \leq V_{CC} - V_D = 4,4\text{V}$ , kolo obavlja funkciju dvostranog usmerača

$$v_I = |v_G|.$$



Slika 4.8a

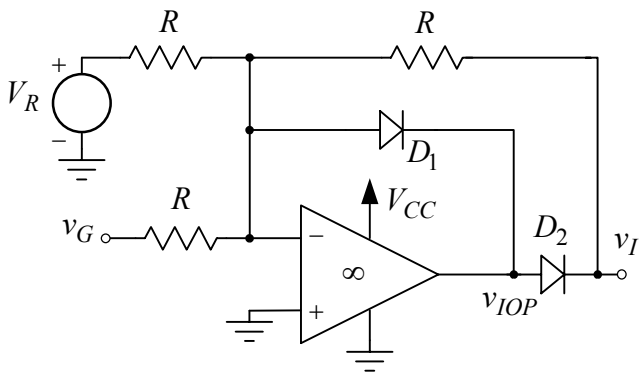
Na slici 4.8a prikazana je zavisnost  $v_I = f(v_G)$ . Uočiti da ova zavisnost važi samo ukoliko je na izlazu kola opterećenje sa nultom strujom ( $R_P \rightarrow \infty$ ). Takođe je potrebno da operacioni pojačavač ispravno radi (da je ulazna struja zanemarljiva) i pri razlici ulaznih napona od  $V_{CC}$ .

b) Prema prethodnoj tački napon na izlazu je

$$v_I = 3\text{V} \cdot |\sin(2\pi ft)|.$$

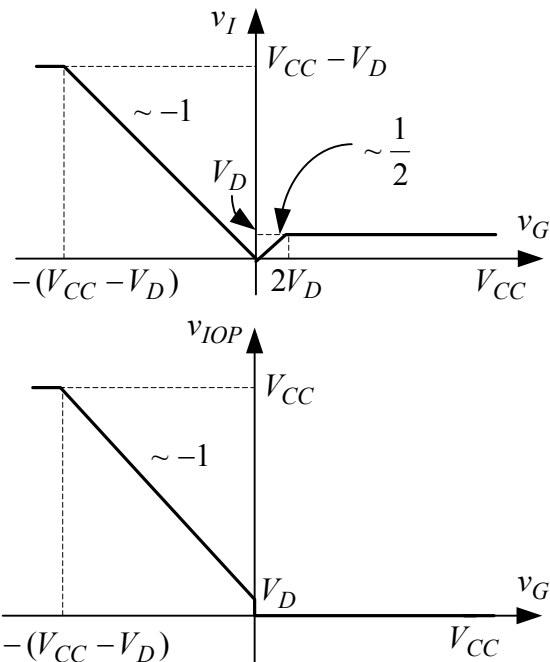
**4.9.** U kolu sa slike 4.9 operacioni pojačavač se može smatrati idealnim i napaja iz baterije  $V_{CC} = 5\text{V}$ , provodne diode imaju pad napona  $V_D = 0,7\text{V}$ , dok je  $R = 10\text{k}\Omega$ . Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$  i  $v_{IOP} = g(v_G)$ ,  $-V_{CC} \leq v_G \leq V_{CC}$ , kada je:

a)  $V_R = 0$  i b)  $V_R = 2,5\text{V}$ .

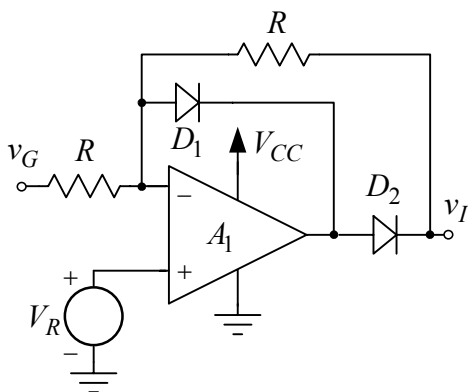


Slika 4.9

Stoga je



Slika 4.9a



Slika 4.10

Kada je  $v_G < V_R$  dioda  $D_2$  provodi dok je dioda  $D_1$  zakočena. I u ovom slučaju u kolu je ostvarena

### Rešenje:

a) Kada je  $V_G = 0$  nijedna dioda ne provodi, te je

$$v_I = 0.$$

Sa porastom pobudnog napona  $v_G$  izlazni napon ostaje nula sve dok ne provede dioda  $D_1$ . Tada je

$$v^- = v_G/2 = V_D.$$

Za  $v_G > 2V_D$  dioda  $D_1$  provodi, napon na izlazu operacionog pojačavača je nula, a u kolu ne postoji negativna povratna sprega

$$v^+ = 0, v^- = V_D.$$

$$v_I = V_D.$$

Kada je  $v_G < 0$  provodi dioda  $D_2$ , dioda  $D_1$  je zakočena, te je

$$v_I = -v_G.$$

Poslednja zavisnost važi sve dok operacioni pojačavač ne uđe u zasićenje, kada postaje

$$v_{IOP} = V_{CC}, v_I = v_{IOP} - V_D = V_{CC} - V_D.$$

Na slici 4.3.a prikazana je zavisnost  $v_I = v_I(v_G)$ .

b) Ako se primeni Tevenenova teorema na ulazno kolo dobija se da je na minus priključak prikačena redna veza naponskog generatora

$$V_T = \frac{v_G + V_R}{2}$$

i otpornosti

$$R_T = R/2.$$

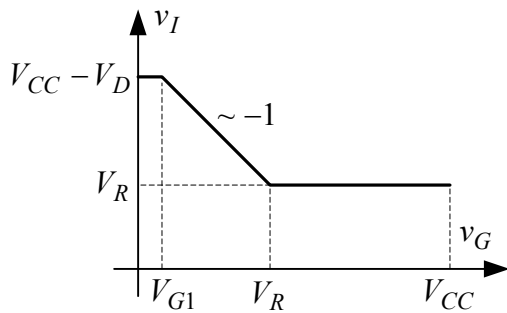
Na osnovu ovoga se zaključuje da se karakteristike sa slike 4.9a pomeraju u koordinatni sistem čiji je centar  $(-V_R, 0)$ , dok im nagibi na pojedinim segmentima ostaju nepromenjeni.

**4.10.** U kolu sa slike 4.10 operacioni pojačavač se može smatrati idealnim i napaja se iz baterije  $V_{CC} = 3\text{V}$ , provodna dioda ima pad napona  $V_D = 0,6\text{V}$ , dok je  $V_R = 1,25\text{V}$  i  $R = 10\text{k}\Omega$ . Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ ,  $0 \leq v_G \leq V_{CC}$ .

### Rešenje:

Kada je  $v_G > V_R$  dioda  $D_1$  provodi, a dioda  $D_2$  je zakočena. Provođenjem diode  $D_1$  uspostavlja se negativna povratna sprega u kolu, pa je

$$v_I = v^- = v^+ = V_R = 1,25\text{V}.$$

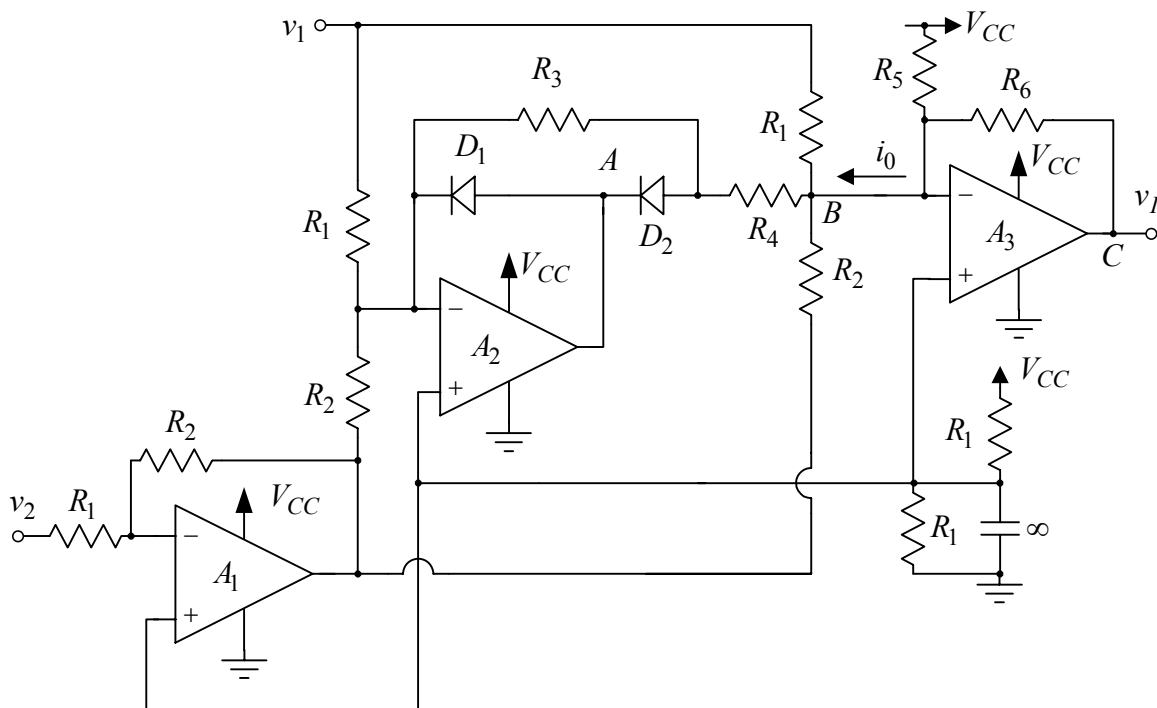


Slika 4.10a

Na slici 4.10a prikazana je prenosna karakteristika ovog preciznog usmerača.

**4.11.** U kolu sa slike 4.11 diode i operacioni pojačavači su idealnih karakteristika, dok je:  $V_{CC} = 5\text{V}$ ,  $R_1 = 82,5\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 59\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 16,9\text{k}\Omega$ ,  $R_4 = 8,45\text{k}\Omega$  i  $R_5 = R_6 = 412\text{k}\Omega$ .

- Odrediti zavisnost  $v_I = f(v_1, v_2)$ .
- Ako su ulazni naponi  $v_1 = V_m \sin(\omega t)$  i  $v_2 = -V_m \sin(\omega t)$ , odrediti maksimalnu amplitudu  $V_m$  pri kojoj još uvek važi zavisnost iz tačke a).
- Ako je  $V_m = 0,1\text{V}$ , nacrtati vremenske oblike napona (jedan ispod drugog) u tačkama A, B i C i struje  $i_0$ .



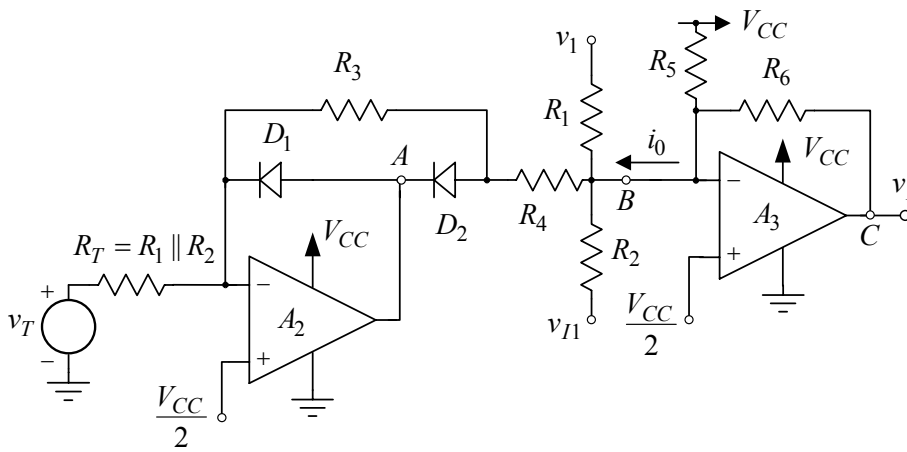
Slika 4.11

### Rešenje:

a) Nalaženjem parametara Tevenenovog generatora za ulaz pojačavača  $A_2$  dobija se kolo prikazano na slici 4.11a. Parametri ovog generatora su:

$$R_T = R_1 \parallel R_2 \text{ i } v_T = \frac{R_1 v_{T1} + R_2 v_{T2}}{R_1 + R_2},$$

$$v_{T2} = v_1, v_{T1} = v_{T3} + v_{T4}, v_{T3} = -\frac{R_2}{R_1} v_2, v_{T4} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{V_{CC}}{2}.$$



Slika 4.11a

zakočena.

Za  $v_T < V_{CC}/2$ , odnosno  $v_1 - v_2 < 0$ , provodna je dioda  $D_1$ , dok je dioda  $D_2$  zakočena.

Primenom Kirhofovih zakona, imajući u vidu da je primenjena negativna povratna sprega,  $v^+ = v^-$ , dobija se

$$i_0 = \frac{1}{R_2} \left( \frac{V_{CC}}{2} - v_{I1} \right) + \frac{1}{R_1} \left( \frac{V_{CC}}{2} - v_1 \right) + \frac{1}{R_4} \left[ \frac{V_{CC}}{2} - \left( -\frac{R_3}{R_T} v_T + \left( 1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \frac{V_{CC}}{2} \right) \right], \quad v_1 - v_2 > 0,$$

odakle je

$$i_0 = \left( \frac{R_3}{R_1 R_4} - \frac{1}{R_1} \right) (v_1 - v_2), \quad v_1 - v_2 > 0.$$

Za negativne vrednosti ulaznih napona,  $v_1 - v_2 < 0$ , se dobija

$$i_0 = \frac{1}{R_2} \left( \frac{V_{CC}}{2} - v_{I1} \right) + \frac{1}{R_1} \left( \frac{V_{CC}}{2} - v_1 \right), \quad v_1 - v_2 < 0 \Rightarrow$$

$$i_0 = \frac{v_2 - v_1}{R_1}, \quad v_1 - v_2 < 0.$$

Na osnovu struje  $i_0$  lako se određuje vrednost izlaznog napona

$$v_I = R_6 i_0 + \frac{V_{CC}}{2} - \frac{R_6}{R_5} \left( V_{CC} - \frac{V_{CC}}{2} \right) = R_6 i_0,$$

odakle se smenom dobija

$$v_I = \left( \frac{R_5 R_3}{R_1 R_4} - \frac{R_5}{R_1} \right) (v_1 - v_2), \quad v_1 - v_2 > 0 \text{ i}$$

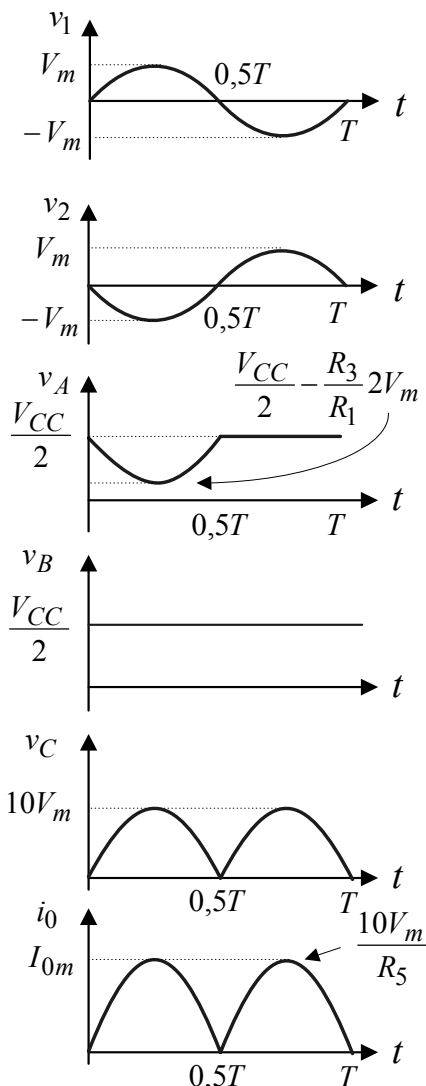
$$v_I = -\frac{R_5}{R_1} (v_1 - v_2), \quad v_1 - v_2 < 0.$$

Smenom brojnih vrednosti konačno se dobija zavisnost izlaznog napona od razlike ulaznih napona  $v_1$  i  $v_2$ .

$$v_I = 4,99 |v_1 - v_2|.$$

Kolo obavlja funkciju punotalasnog usmerača razlike ulaznih napona  $v_1$  i  $v_2$ .

b) Imajući u vidu razmatranja iz tačke a) maksimalna vrednost amplitude ulaznih napona  $V_{m \max}$  određena je ulaskom operacionog pojačavača  $A_3$  u zasićenje



Slika 4.11b

Operacioni pojačavač  $A_1$  je idealan, pa se prema ostatku kola može predstaviti kao idealni naponski generator čija je *ems*

$$v_{I1} = -\left( R_2 / R_1 \right) v_2 + \left( 1 + R_2 / R_1 \right) V_{CC} / 2.$$

Kada je  $v_T > V_{CC}/2$ , odnosno  $v_1 - v_2 > 0$ , provodna je dioda  $D_2$ , dok je dioda  $D_1$

$$V_{m \max} \approx V_{CC} / 10 = 1,2 \text{ V}.$$

c) Zato što je uvek prisutna negativna reakcija napon tačke B je konstantan

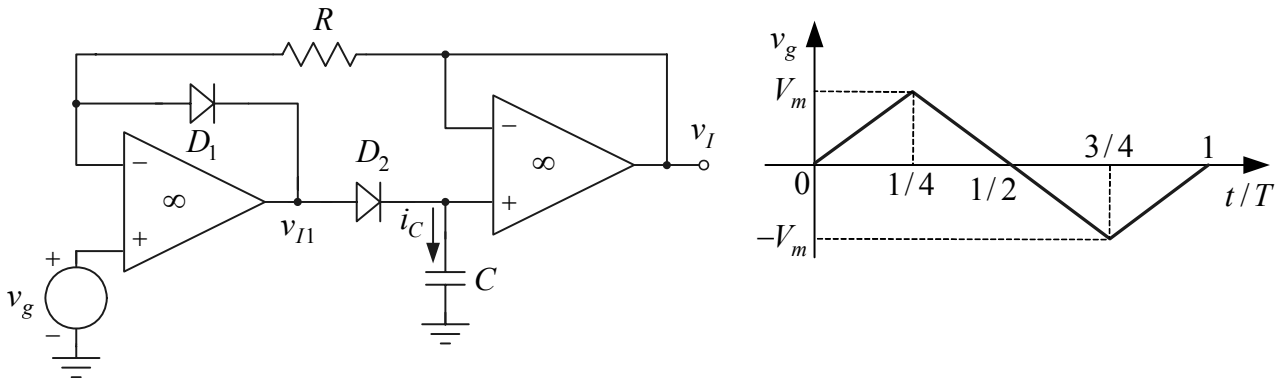
$$v_B = V_{CC} / 2.$$

Napon tačke A zavisi koja od dioda je provodna. Kada provodi dioda  $D_1$  napon ove tačke je  $V_{CC} / 2$ , u suprotnom je

$$v_{AD2} = \left( -\frac{R_3}{R_T} v_T + \left( 1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \frac{V_{CC}}{2} \right) - V_D.$$

Na osnovu ovoga i prethodnih razmatranja na slici 4.11b prikazani su karakteristični vremenski dijagrami.

**4.12.** U kolu sa slike 4.12 upotrebljeni su operacioni pojačavači koji se mogu smatrati idealnim. Dioda se, takođe, mogu smatrati idealnim, dok je:  $R = 10 \text{ k}\Omega$  i  $C = 10 \text{ nF}$ . Na istoj slici dat je i vremenski oblik pobudnog napona, gde je  $V_m = 5 \text{ V}$  i  $T = 1 \text{ ms}$ . Odrediti i nacrtati, u toku prve periode ulaznog napona, vremenske dijagrame napona  $v_I$  i  $v_{I1}$  i struje  $i_C$ . Smatrati da je u početnom trenutku posmatranja kondenzator bio prazan.



Slika 4.12

**Rešenje:**

Kada je  $0 \leq t \leq T/4$  provodna je dioda  $D_2$ , dioda  $D_1$  je zakočena, te je

$$v_I = v_C = v_{I1}, \quad v_I = v_g, \quad v_g = \frac{V_m}{T/4} t \Rightarrow$$

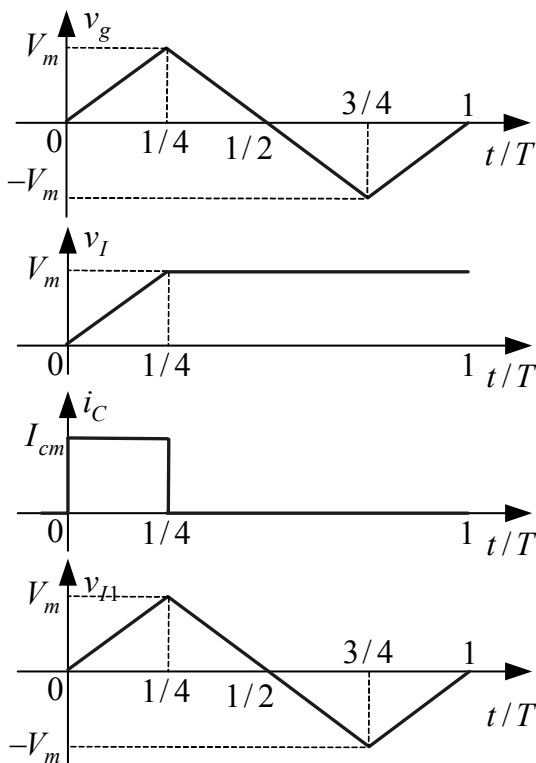
$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} = C \frac{4V_m}{T} = I_{cm} = 200 \mu\text{A}.$$

U trenutku  $t = T/4$  uključuje se dioda  $D_1$ , a dioda  $D_2$  prestaje da provodi struju. Tada postaje

$$v_{I1} = v_g, \quad v_I = v_C = V_m, \quad i_C = 0.$$

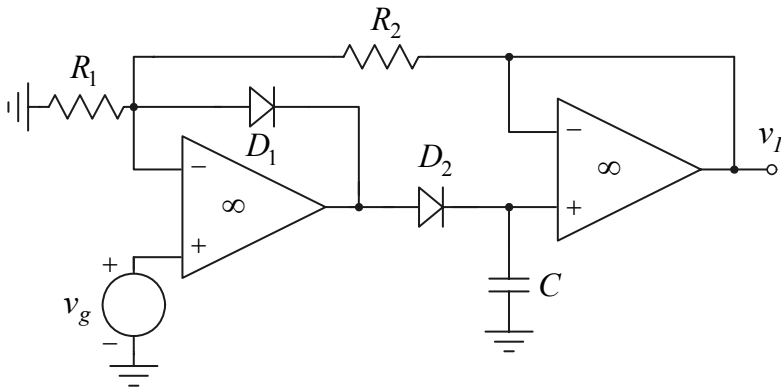
Ovakva zavisnost ostaje uvek na snazi, jer je na kondenzatoru zapamćena maksimalna vrednost (pik) ulaznog napona. Dakle, kolo obavlja funkciju detektora vršne vrednosti ulaznog napona. Na slici 4.12a prikazani su relevantni vremenski dijagrami.

**4.13.** U kolu sa slike 4.13 upotrebljeni su operacioni pojačavači koji se mogu smatrati idealnim. Dioda se, takođe, mogu smatrati idealnim, dok je:  $R_2 = 4R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  i  $C = 10 \text{ nF}$ . Na ulaz kola dovodi se



Slika 4.12a

pobudni napon  $v_g = V_{m1} \sin(2\pi f_1 t) + V_{m2} \sin(2\pi f_2 t)$ , gde je  $V_{m1} = 1\text{ V}$ ,  $V_{m2} = 2\text{ V}$ ,  $f_1 = 1\text{ kHz}$  i  $f_2 = 2\text{ kHz}$ . Odrediti vrednost izlaznog napona u ustaljenom stanju. Smatrati da je u početnom trenutku posmatranja kondenzator bio prazan.



Slika 4.13

dioda  $D_1$  je stalno uključena, a izlazni napon jednak je zapamćenom naponu na kondenzatoru

$$v_I = v_{c \max} = (1 + R_2 / R_1) v_{g \max} = 5 v_{g \max}.$$

S obzirom da je  $f_2 = 2f_1$  napon  $v_g$  je periodičan sa periodom  $f_1$ . Njegova maksimalna vrednost određuje se iz uslova

$$\frac{dv_g}{dt} = 0 \Rightarrow \omega_1 V_{m1} \cos(\omega_1 t) + \omega_2 V_{m2} \cos(\omega_2 t) = 0 \Rightarrow -\frac{\omega_1 V_{m1}}{\omega_2 V_{m2}} = \frac{\cos(\omega_2 t)}{\cos(\omega_1 t)} \Rightarrow$$

$$k_1 = \frac{2 \cos^2(\omega_1 t) - 1}{\cos(\omega_1 t)}, k_1 = -\frac{\omega_1 V_{m1}}{\omega_2 V_{m2}} = -\frac{1}{4} \Rightarrow 2x^2 - k_1 x - 1 = 0, x = \cos(\omega_1 t) \Rightarrow$$

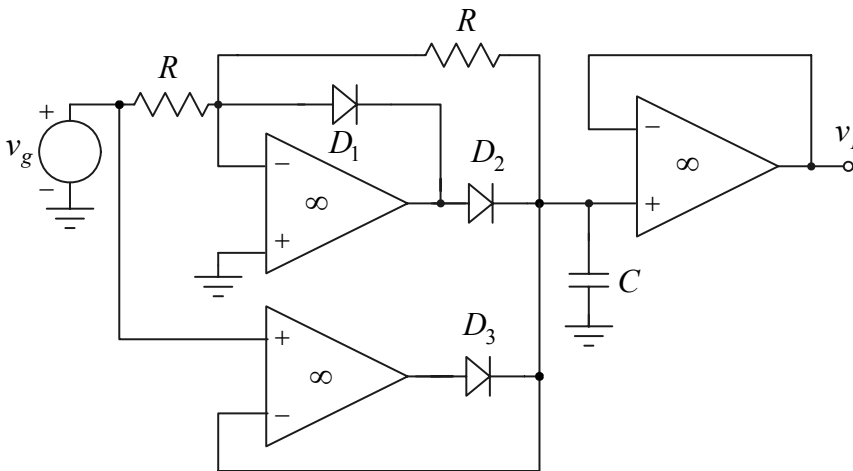
$$x_1 = 0,647 \text{ i } x_2 = -0,772 \Rightarrow \omega_{11} t = a \cos(x_1) = 0,867 \text{ i } \omega_{12} t = a \cos(x_2) = 2,453 \Rightarrow$$

$$t_{11} = \frac{0,867}{2000\pi} = 138 \mu\text{s} \text{ i } t_{12} = \frac{2,453}{2000\pi} = 390,4 \mu\text{s} \Rightarrow t_1 = t_{11} = \frac{0,867}{2000\pi} = 138 \mu\text{s} \Rightarrow$$

$$\theta_1 = \omega_1 t_1 = 0,867 \Rightarrow v_{g \max} = V_{m1} \sin \theta_1 + V_{m2} \sin(2\theta_1) = 2,736 \text{ V}.$$

Vrednost izlaznog napona u ustaljenom stanju jednaka je

$$v_I = 5 v_{g \max} = 13,68 \text{ V}.$$



Slika 4.14

$$V_0 = V_m = 1\text{ V}, f = 1\text{ kHz} \text{ i}$$

$$\text{b) } v_g = -V_0 + V_m \sin(2\pi f t), V_0 = V_m = 1\text{ V}, f = 1\text{ kHz}.$$

### Rešenje:

Kolo predstavlja detektor vršne vrednosti ulaznog napona. Dioda  $D_2$  provodi sve dok se napon na kondenzatoru ne napuni na vrednost

$$v_{C \max} = (1 + R_2 / R_1) v_{g \max}.$$

Posle toga se dioda  $D_2$  isključuje,

**4.14.** U kolu sa slike 4.14 upotrebljeni su operacioni pojačavači koji se mogu smatrati idealnim. Pad napona na provodnim diodama je  $V_D = 0,6\text{ V}$ , dok je:  $R = 1\text{ M}\Omega$  i  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ . Smatrati da je u početnom trenutku posmatranja kondenzator bio prazan. Odrediti vrednost izlaznog napona u ustaljenom stanju kada je:

$$\text{a) } v_g = V_0 + V_m \sin(2\pi f t),$$

c) Na osnovu rezultata iz prethodnih tačaka odrediti funkciju kola.

**Rešenje:**

a) Opseg ulaznog napona je  $0 \leq v_g \leq V_0 + V_m$ , što znači da dioda  $D_2$  nikada neće provoditi, a dioda  $D_1$  stalno provodi struju. Dioda  $D_3$  sa donjim operacionim pojačavačem čini preciznu diodu i ona će provoditi sve dok se kondenzator ne napuni na maksimalnu vrednost ulaznog napona

$$v_I = v_{C \max} = v_{g \max} = V_0 + V_m = 2 \text{ V}.$$

Posle toga se dioda  $D_3$  koči, a napon na izlazu se, u idealnom slučaju, ne menja. Realno se, zbog otpornosti  $R$ , kondenzator prazni. U intervalu u kome ne provodi dioda  $D_3$ , napon na kondenzatoru se menja po zakonu

$$v_C(t) = v_C(\infty) + (v_C(0^+) - v_C(\infty))e^{-t/\tau}, \quad v_C(\infty) = 0, \quad v_C(0^+) = V_0 + V_m = 2 \text{ V}, \quad \tau = RC = 1 \text{ s}.$$

Nakon isteka vremena u trajanju jedne periode ulaznog napona, napon na kondenzatoru imaće vrednost

$$v_C(t) = v_C(0^+)e^{-t/\tau} = 1,998 \text{ V}.$$

Dioda  $D_3$  će se kratkotrajno uključiti kada ulazni napon postane veći od napona na kondenzatoru i dopuniti ga do maksimalne vrednosti. S obzirom da je promena napona na kondenzatoru tokom pražnjenja zanemarljiva, može se smatrati da je

$$v_I = v_{C \max} \approx V_0 + V_m = 2 \text{ V}.$$

b) U ovom slučaju je opseg ulaznog napona  $-V_0 - V_m \leq v_g \leq 0$ , što znači da sada dioda  $D_3$  nikada neće provoditi. Dioda  $D_2$  će provoditi sve dok napon na kondenzatoru ne dostigne maksimalnu vrednost

$$v_{C \max} = -v_{g \min} = V_0 + V_m = 2 \text{ V} \Rightarrow v_I = v_{C \max}.$$

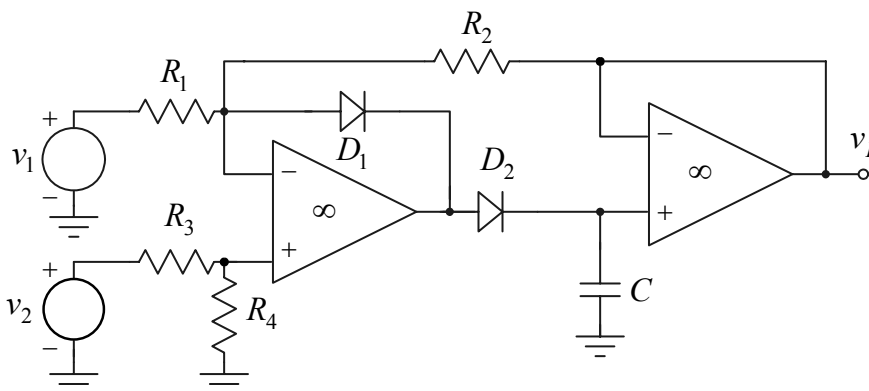
Posle toga će se dioda  $D_2$  zakočiti, a dioda  $D_1$  će biti provodna. Zbog otpornosti  $R$ , u ovom intervalu, kondenzator će se malo prazniti ( $\tau \gg T = 1/f$ ). Izlazni napon imaće praktično konstantnu vrednost

$$v_I = v_C \approx -v_{g \min} = V_0 + V_m = 2 \text{ V}.$$

c) Na osnovu rezultata iz prethodnih tačaka zaključuje se da je napon na izlazu jednak

$$v_I \approx |v_g|_{\max},$$

što znači da je funkcija kola detekcija modula maksimalne vrednosti ulaznog napona.



Slika 4.15

vrednost izlaznog napona u ustaljenom stanju.

**4.15.** U kolu sa slike 4.15 upotrebljeni su operacioni pojačavači koji se mogu smatrati idealnim. Pad napona na provodnim diodama je  $V_D = 0,6 \text{ V}$ , dok je:

$$R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega,$$

$$R_2 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega \text{ i } C = 1 \mu\text{F}.$$

Smatrati da je u početnom trenutku posmatranja kondenzator bio prazan. Odrediti funkciju kola i

**Rešenje:**

Dioda  $D_2$  provodiće, od  $t = 0$ , sve dok se kondenzator  $C$  ne napuni na vrednost

$$v_{C\max} = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)_{\max}, \quad R_1 = R_3, \quad R_2 = R_4.$$

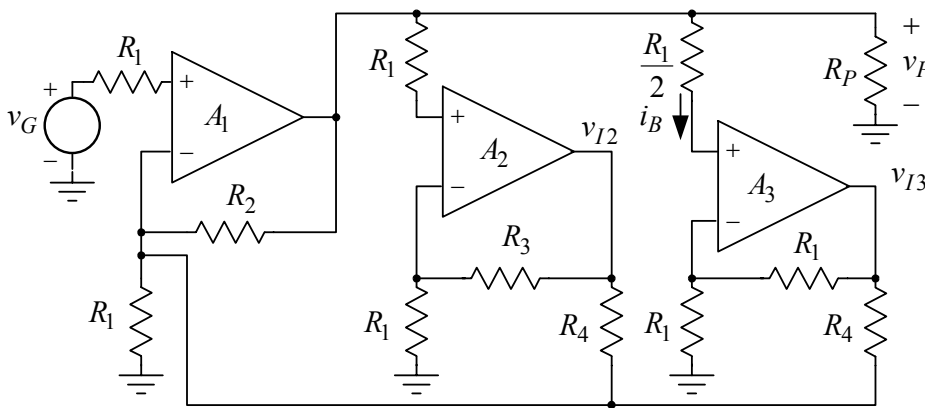
Posle toga će se zakočiti dioda  $D_2$ , dok će dioda  $D_1$  provoditi struju. Napon na izlazu imaće vrednost

$$v_I = v_{C\max} = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)_{\max} = 10(v_2 - v_1)_{\max}.$$

Dakle, kolo obavlja funkciju pik detektora razlike ulaznih napona  $v_2$  i  $v_1$ .

**4.16.** U kolu sa slike 4.16 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz baterija  $V_{CC} = -V_{EE} = 12\text{ V}$ , dok je:  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1\text{ M}\Omega$ ,  $R_3 = R_P = 10\text{ k}\Omega$  i  $R_4 = 475\text{ k}\Omega$ .

a) odrediti i nacrtati zavisnost  $v_P = f(v_G)$ ,  $v_{I2} = g(v_G)$  i  $v_{I3} = h(v_G)$ ,  $-0,1\text{ V} \leq v_G \leq 0,1\text{ V}$ .



b) Ponoviti tačku a) ako je  $V_{EE} = 0$ .

c) Ponoviti tačku a) ako su ulazne polarizacione struje operacionih pojačavača  $I_B^+ = 100\text{ nA}$  i  $I_B^+ = I_B^-$ .

### Rešenje:

a) Kada je  $v_G = 0$  naponi na izlazima svih operacionih

Slika 4.16

pojačavača su nula

$$v_P = 0, \quad v_{I2} = 0 \quad \text{i} \quad v_{I3} = 0.$$

Za  $0 \leq v_G \leq V_{G1}$ , sve dok svi operacioni pojačavači rade izvan oblasti zasićenja, važi

$$\frac{v_P - v_G}{R_2} = \frac{v_G}{R_1} + \frac{v_G - v_{I2}}{R_4} + \frac{v_G - v_{I3}}{R_4}, \quad v_{I2} = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right)v_P = 11v_P, \quad v_{I3} = \left(1 + \frac{R_1}{R_1}\right)v_P = 2v_P \Rightarrow$$

$$v_P = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{13}{R_4}} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2}{R_4} \right) v_G = 35,4v_G, \quad v_{I2} = 11v_P = 390v_G \quad \text{i} \quad v_{I3} = 2v_P = 71v_G.$$

Prethodne zavisnosti važe sve dok u zasićenje ne uđe operacioni pojačavač  $A_2$ . Tada je

$$v_{I2} = V_{CC} = 390v_G \rightarrow v_G = V_{G1} = V_{CC}/390 \approx 31\text{ mV}, \quad V_{P1} = 1,1\text{ V} \quad \text{i} \quad V_{I31} = 2,2\text{ V}.$$

Kada je  $V_{G1} \leq v_G \leq V_{G2}$ , važi

$$v_{I2} = V_{CC}, \quad \frac{v_P - v_G}{R_2} = \frac{v_G}{R_1} + \frac{v_G - V_{CC}}{R_4} + \frac{v_G - v_{I3}}{R_4}, \quad v_{I3} = 2v_P,$$

ili eksplicitno

$$v_P = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{2}{R_4}} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2}{R_4} \right) v_G - \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{2}{R_4}} \frac{V_{CC}}{R_4},$$

$$v_P = 193v_G - 5\text{ V}, \quad v_{I2} = V_{CC} \quad \text{i} \quad v_{I3} = 2v_P = 386v_G - 10\text{ V}.$$



Pri  $v_G = V_{G2}$  operacioni pojačavač  $A_3$  ulazi u pozitivno zasićenje. Ovo se dešava kada je

$$v_{I3} = V_{CC} = 386v_G - 10V \Rightarrow$$

$$v_G = V_{G2} = (V_{CC} + 10V) / 386 = 57 \text{ mV} \text{ i } V_{P2} = 6V.$$

Kada je ulazni napon u opsegu  $V_{G2} \leq v_G \leq V_{G3}$ , tada je

$$v_{I3} = V_{CC}, v_{I2} = V_{CC} \text{ i}$$

$$v_P = \left( 1 + \frac{R_2}{R_2 \parallel (R_4/2)} \right) v_G - \frac{R_2}{R_4/2} V_{CC},$$

$$v_P = 1000v_G - 50V.$$

Kada i operacioni pojačavač  $A_1$  uđe u zasićenje, prekida se negativna povratna sprega, dok je

$$v_P = V_{CC}, v_{I2} = V_{CC}, v_{I3} = V_{CC} \text{ i}$$

$$v_G = V_{G3} = (V_{CC} + 50V) / 1000 = 62 \text{ mV}.$$

Kada je  $V_{G3} \leq v_G \leq 0,1V$ , svi operacioni pojačavači su zasićeni

$$v_P = V_{CC}, v_{I2} = V_{CC} \text{ i } v_{I3} = V_{CC}.$$

Zbog simetrije kola, za negativne vrednosti ulaznog napona je

$$v_P = 35,4v_G, v_{I2} = 390v_G, v_{I3} = 71v_G,$$

$$-V_{G1} \leq v_G \leq V_{G1};$$

$$v_P = 193v_G + 5V, v_{I2} = V_{EE}, v_{I3} = 386v_G + 10V,$$

$$-V_{G2} \leq v_G \leq -V_{G1};$$

$$v_P = 1000v_G + 50V, v_{I2} = V_{EE}, v_{I3} = V_{EE},$$

$$-V_{G3} \leq v_G \leq -V_{G2}.$$

Kada je  $-0,1V \leq v_G \leq V_{G3}$  svi operacioni pojačavači su zasićeni

$$v_P = V_{EE}, v_{I2} = V_{EE} \text{ i } v_{I3} = V_{EE}.$$

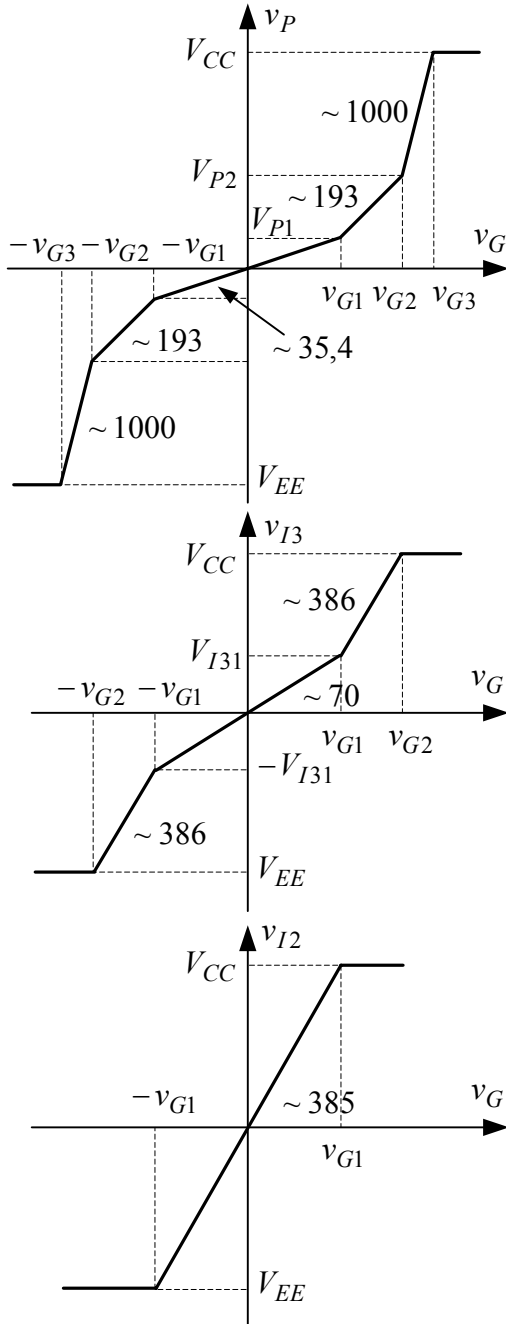
Na osnovu ovoga na slici 4.16a prikazane su prenosne karakteristike.

b) Kada se kolo napaja iz jedne baterije za napajanje,  $V_{EE} = 0$ , za  $v_G < 0$  izlazi svih operacionih pojačavača su nula

$$v_P = 0, v_{I2} = 0 \text{ i } v_{I3} = 0.$$

Za  $v_G > 0$  situacija je ista kao u slučaju pod a).

Slika 4.16a



c) Svi operacioni pojačavači imaju iste polarizacione struje  $I_B^+ = I_B^- = I_B$ , a pošto je

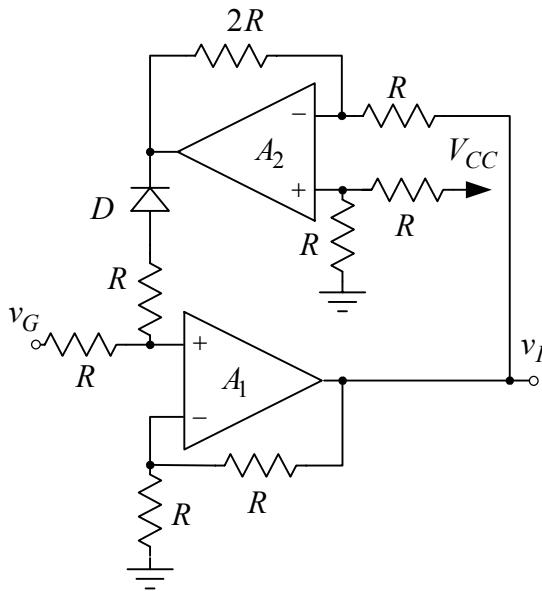
$$I_B^+ R^+ = I_B^- R^-, R_{A1,A2}^+ = R_1, R_{A3}^+ = R_1/2, R_{A1,A2}^- \approx R_1 \text{ i } R_{A3}^- = R_1/2,$$

prenosne karakteristike se ne menjaju u odnosu na karakteristike iz tačke a).

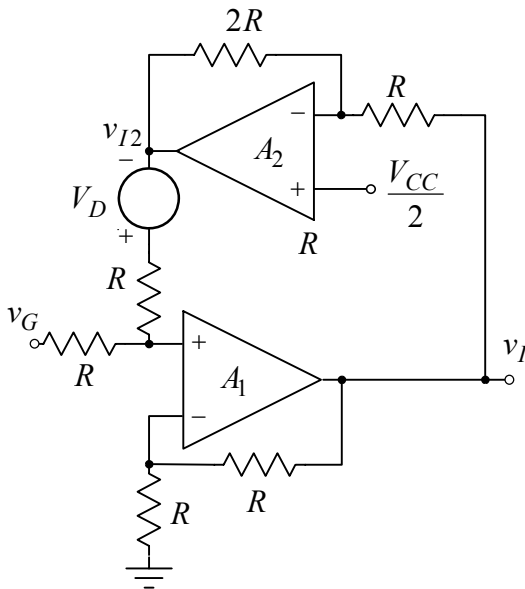
4.17. U kolu sa slike 4.17 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz baterije  $V_{CC} = 5V$ , dioda je idealna sa  $V_D = 0,7V$ , dok je  $R = 10k\Omega$ .

a) Odrediti i nacrtati karakteristiku prenosa  $v_I = f(v_G)$ ,  $-V_{CC} \leq v_G \leq V_{CC}$ .

b) Na svakom od segmenata karakteristike iz prethodne tačke odrediti ulaznu i izlaznu otpornost kola.

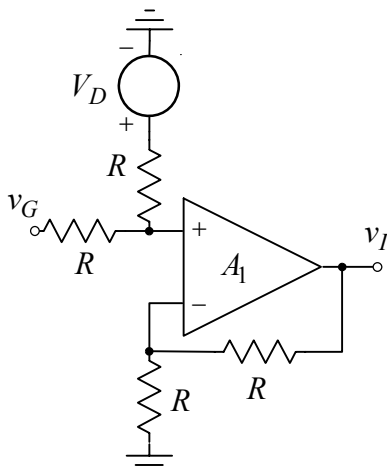


Slika 4.17



Slika 4.17a

odakle se dobija



Slika 4.17b

c) Ponoviti tačku a) ako anoda i katoda međusobno zamene mesta.

### Rešenje:

a) Kada je  $v_G = -V_{CC} = -5\text{V}$  dioda je zakočena, dok je

$$v_I = 0 \text{ i } v_{I2} = V_{CC}.$$

Sa promenom ulaznog napona ovo stanje se ne menja sve dok ulazni napon ne postane pozitivan. Kada je  $0 \leq v_G \leq V_{G1}$  u kolu pojačavača  $A_1$  postoji negativna povratna sprega, te je

$$v_I = (1 + R/R)v_G = 2v_G.$$

Operacioni pojačavač  $A_2$  izaći će iz zasićenja kada je

$$v_{I2} = \frac{3V_{CC}}{2} - 2v_I = \frac{3V_{CC}}{2} - 4v_G \leq V_{CC},$$

a u graničnom slučaju je

$$v_G = \frac{1}{4} \left( \frac{3V_{CC}}{2} - V_{CC} \right) = 0,625\text{V}.$$

Međutim zavisnost napona na izlazu u funkciji ulaznog napona pri ovome će ostati nepromenjena

$$v_I = 2v_G.$$

Dioda će provesti kada je

$$v_G - v_{I2} = V_D, \text{ ili } v_G - \left( \frac{3V_{CC}}{2} - 4v_G \right) = V_D,$$

odakle se dobija

$$v_G = V_{G1} = \frac{1}{5} \left( \frac{3V_{CC}}{2} + V_D \right) = 1,64\text{V}.$$

Kada je  $V_{G1} \leq v_G \leq V_{G2}$ , dioda je provodna, a ekvivalentna šema kola za ovaj slučaj je prikazana na slici 4.17a. Prema ovoj slici je

$$v_{I2} = \frac{3V_{CC}}{2} - 2v_I \text{ i } \frac{1}{R} \left( v_G - \frac{v_I}{2} \right) = \frac{1}{R} \left( \frac{v_I}{2} - V_D - v_{I2} \right),$$

$$v_I = \frac{v_G}{3} + \frac{1}{3} \left( \frac{3V_{CC}}{2} + V_D \right) \text{ i } v_{I2} = -\frac{2}{3}v_G + \frac{V_{CC}}{2} - \frac{2}{3}V_D.$$

Kada je  $v_{I2} = 0$ , tada postaje

$$v_{I2} = 0 = -\frac{2}{3}v_G + \frac{V_{CC}}{2} - \frac{2}{3}V_D,$$

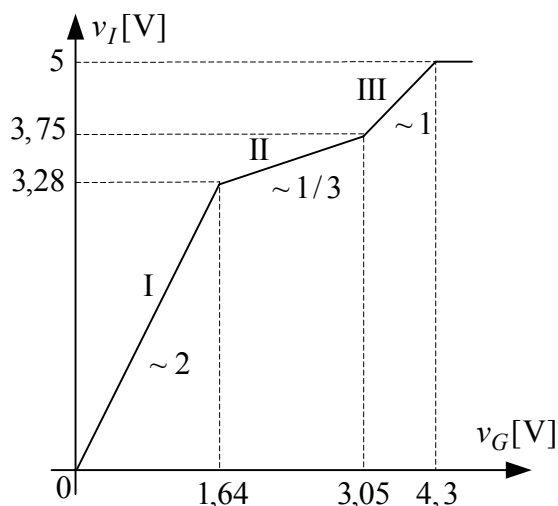
odakle se dobija

$$v_G = V_{G2} = \frac{3}{4}V_{CC} - V_D = 3,05\text{V}.$$

Za  $V_{G2} \leq v_G \leq V_{G3}$  ekvivalentna šema kola prikazana je na slici 4.17b. Na osnovu nje se dobija

$$v_I = 2 \frac{v_G + V_D}{2} = v_G + V_{G1} \leq v_G \leq v_G + V_D.$$

Ovakva zavisnost važi sve dok i donji operacioni pojačavača ne

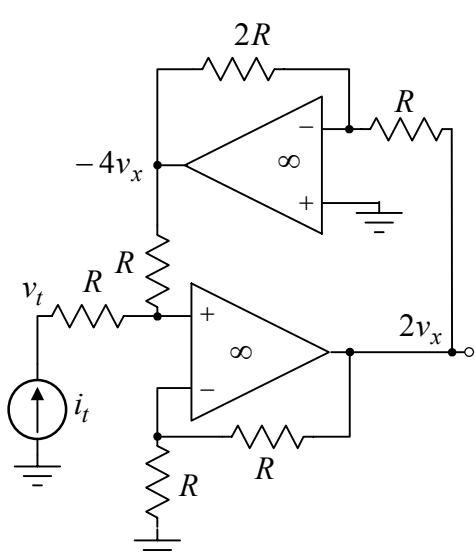


Slika 4.17c

Na segmentu I ulazna otpornost je

$$R_{uI} \rightarrow \infty.$$

Za određivanje ulazne otpornosti na segmentu II poslužiće nam slika 4.17d. Prema ovoj slici je



Slika 4.17d

će izaći iz zasićenja. Tada je

$$v_G = V_{G1} = -V_{CC} + V_D = -4,3 \text{ V}.$$

Kada je  $V_{G1} \leq v_G \leq V_{G2}$ , važi

$$v_I = 2v_{A1}^+ = v_G + (V_{CC} - V_D) = v_G + 4,3 \text{ V}.$$

Kada postane  $v_G = V_{G2}$ , pojačavač  $A_2$  će izaći iz zasićenja. Tada je

$$-2v_I + \frac{3}{2}V_{CC} = V_{CC} \text{ i } v_G = V_{G2} = -\frac{3}{4}V_{CC} + V_D = -3,05 \text{ V}.$$

Za  $V_{G2} \leq v_G \leq V_{G3}$  oba pojačavača su izvan zasićenja, pa je

$$\frac{v_G - (v_I/2)}{R} = \frac{(v_I/2) + V_D - v_{I2}}{R},$$

odakle se dobija

uđe u zasićenje,  $v_I = V_{CC}$ . Tada postaje

$$v_I = V_{CC} = v_G + V_D,$$

odakle se dobija

$$v_G = V_{G3} = V_{CC} - V_D = 4,3 \text{ V}.$$

Kada je  $V_{G3} \leq v_G \leq V_{CC}$  operacioni pojačavač  $A_1$  je zasićen

$$v_I = V_{CC} = 5 \text{ V}.$$

Na slici 4.17c prikazana je zavisnost  $v_I = f(v_G)$ .

b) Pošto je operacioni pojačavač  $A_1$  idealan, izlazna otpornost kola kada radi kao pojačavač uvek je jednaka nuli

$$R_i = 0.$$

Nulta izlazna otpornost ima se i kada je operacioni pojačavač u zasićenju.

$$\frac{v_t - v_x}{R} = \frac{v_x - (-4v_x)}{R} \text{ i } v_x = v_t - Ri_t.$$

Iz prve jednakosti se dobija

$$v_t = 6v_x,$$

a posle smene u drugu postaje

$$v_t = 6(v_t - Ri_t),$$

odakle se dobija ulazna otpornost pojačavača

$$R_{uII} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{6}{5}R = 12 \text{ k}\Omega.$$

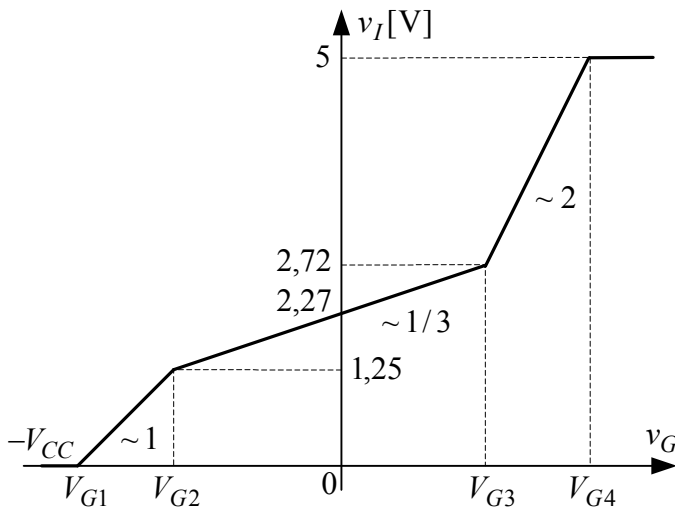
Na segmentu III ulazna otpornost je

$$R_{uIII} = 2R = 20 \text{ k}\Omega.$$

c) Za  $v_G = -V_{CC}$  dioda vodi jer je

$$v_I = 0, v_{I2} = V_{CC} \text{ i } v_{A1}^+ = \frac{1}{2}(v_{I2} - V_D + v_G).$$

Kada napon na ulazu pojačavača  $A_1$  postane veći od nule on



Slika 4.17e

zasićenje. Za  $V_{G4} \leq v_G \leq V_{CC}$  izlazni napon je  $v_I = V_{CC}$ .

Na slici 4.17e prikazana je karakteristika prenosa za ovaj slučaj.

$$v_I = \frac{v_G}{3} + \frac{V_{CC}}{2} - \frac{V_D}{3} = \frac{v_G}{3} + 2,27 \text{ V}.$$

S porastom ulaznog napona napon  $v_{I2}$  opada, što dovodi do zakočenja diode. Ovo se dešava kada je

$$v_I = 2v_G \text{ i } 2v_G = \frac{v_G}{3} + \frac{V_{CC}}{2} - \frac{V_D}{3},$$

odakle je

$$v_G = V_{G3} = \frac{3}{5} \left( \frac{V_{CC}}{2} - \frac{V_D}{3} \right) = 1,36 \text{ V}.$$

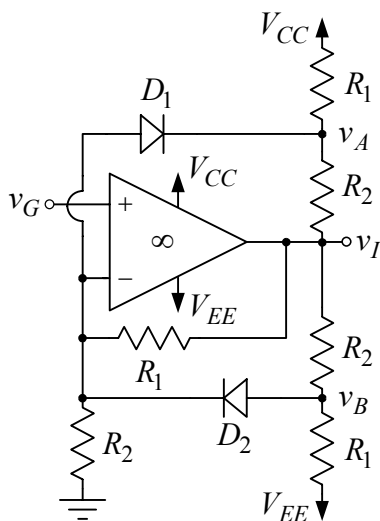
Za  $V_{G3} \leq v_G \leq V_{G4}$  izlazni napon je

$$v_I = 2v_G.$$

Pri

$$v_G = V_{G4} = V_{CC}/2 = 2,5 \text{ V}$$

donji operacioni pojačavač ulazi u



Slika 4.18

**4.18.** U kolu sa slike 4.18 operacioni pojačavač se može smatrati idealnim, dok je  $V_{CC} = -V_{EE} = 12 \text{ V}$ ,  $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$  i  $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ . Odrediti i nacrtati prenosnu karakteristiku  $v_I = f(v_G)$ ,  $V_{EE} \leq v_G \leq V_{CC}$ .

### Rešenje:

Pretpostavimo da za  $v_G = 0$  nijedna dioda ne provodi. S obzirom na negativnu reakciju, tada je

$$v_I = 0, \quad v_A = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{CC} = \frac{V_{CC}}{4} = 3 \text{ V} \text{ i}$$

$$v_B = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{EE} = \frac{V_{EE}}{4} = -3 \text{ V},$$

što znači da je pretpostavka opravdana.

Sa povećavanjem ulaznog napona,  $v_G > 0$ , napon na izlazu pojačavača se povećava jer je

$$v_I = (1 + R_1/R_2)v_G = 4v_G.$$

Ovim se povećavaju i naponi  $v_A$  i  $v_B$

$$v_A = \frac{R_2 V_{CC} + R_1 v_I}{R_2 + R_1} \text{ i } v_B = \frac{R_2 V_{EE} + R_1 v_I}{R_2 + R_1}.$$

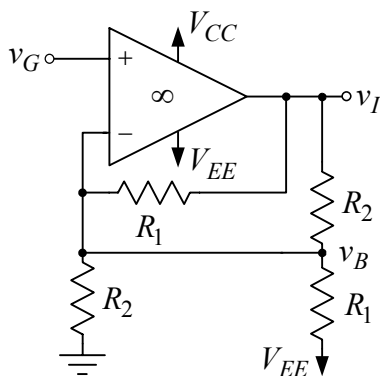
Pošto napon  $v_B$  brže raste od napona  $v_G$  inverzni napon na diodi  $D_2$  se smanjuje. Dioda  $D_2$  će se uključiti kada postane

$$v_{D2} = v_B - v_G = 0,$$

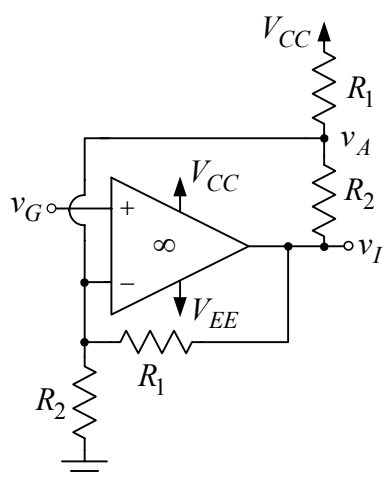
odakle se dobija

$$\frac{R_2 V_{EE}}{R_2 + R_1} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) v_G - v_G = \frac{R_2 V_{EE}}{R_2 + R_1} + \frac{R_1}{R_2} v_G - v_G = 0,$$

odnosno



Slika 4.18a



Slika 4.18b

$$v_G = V_{G1} = \frac{V_{EE}}{1 - (R_1/R_2)^2} = -\frac{V_{EE}}{8} = 1,5 \text{ V}.$$

Za  $V_{G1} \leq v_G \leq V_{G2}$  dioda  $D_2$  je provodna, a aktivni deo kola je prikazan na slici 4.18a. Primenom principa superpozicije dobija se

$$v_I = \left(1 + \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2}\right) v_G - \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1} V_{EE} = 2v_G - \frac{V_{EE}}{4} = 2v_G + 3 \text{ V}.$$

Ova zavisnost važi sve dok operacioni pojačavač ne uđe u pozitivno zasićenje

$$v_I = V_{CC} = 2v_G - V_{EE}/4,$$

odnosno

$$v_G = V_{G2} = (V_{CC} + (V_{EE}/4))/2 = 3V_{CC}/8 = 4,5 \text{ V}.$$

Kada je  $v_G > V_{G2}$  operacioni pojačavač je u zasićenju

$$v_I = V_{CC} = 12 \text{ V}.$$

Smanjivanjem napona na ulazu,  $v_G < 0$ , kada postane  $v_G - v_A = 0$  dolazi do uključenja diode  $D_1$ .

Prethodni uslov ekvivalentan je uslovu

$$v_G - \frac{R_2 V_{CC}}{R_2 + R_1} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) v_G = 0,$$

odakle se dobija vrednost ulaznog napona pri kome dolazi do uključenja diode  $D_1$

$$v_G = V_{G3} = \frac{V_{CC}}{1 - (R_1/R_2)^2} = -\frac{V_{CC}}{8} = -1,5 \text{ V} = -V_{G1}.$$

Za  $V_{G4} \leq v_G \leq V_{G3}$  dioda  $D_1$  je provodna, a aktivni deo kola je prikazan na slici 4.18b. Prema ovoj slici je

$$v_I = \left(1 + \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2}\right) v_G - \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1} V_{CC} \Rightarrow$$

$$v_I = 2v_G - \frac{V_{CC}}{4} = 2v_G - 3 \text{ V}.$$

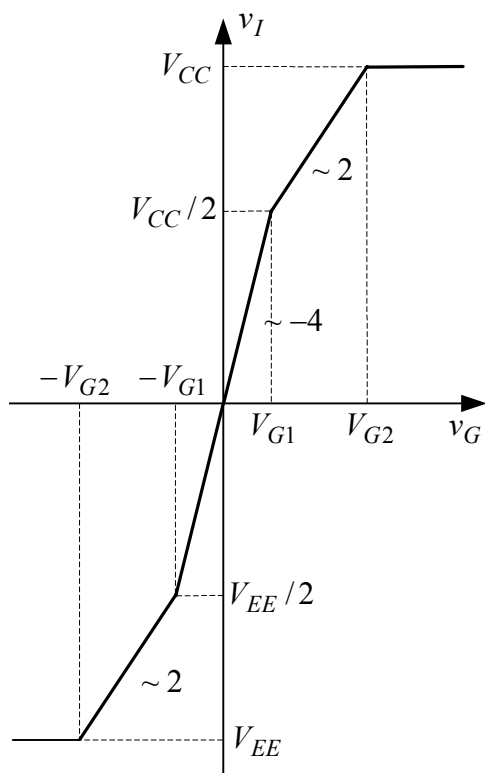
Kada postane  $v_I = V_{EE}$ , operacioni pojačavač ulazi u zasićenje, a tada je

$$v_G = V_{G4} = (V_{EE} + (V_{CC}/4))/2 = 3V_{EE}/8 = -4,5 \text{ V}.$$

Za  $v_G < V_{G4}$  izlazni napon se ne menja

$$v_I = V_{EE} = -12 \text{ V}.$$

Na slici 4.18c prikazana je karakteristika prenosa.



Slika 4.18c

**4.19.** U kolu sa slika 4.19a i 4.19b operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz baterija  $V_{CC} = -V_{EE} = 12 \text{ V}$ , diode su idealne, dok je  $R = 10 \text{ k}\Omega$ .

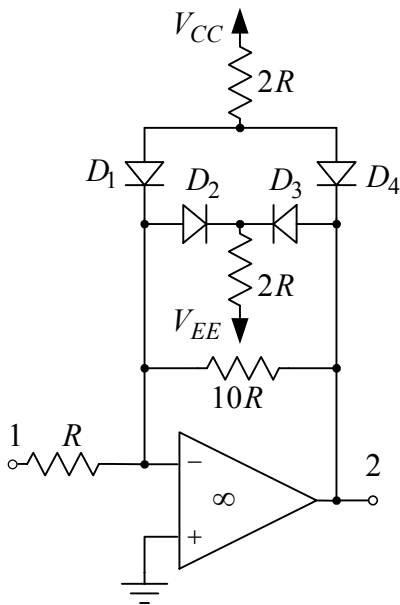
a) Odrediti i nacrtati karakteristiku prenosa  $v_2 = f(v_1)$ ,  $V_{EE} \leq v_1 \leq V_{CC}$ .

b) Nacrtati vremenski oblik napona  $v_2(t)$  ako je:

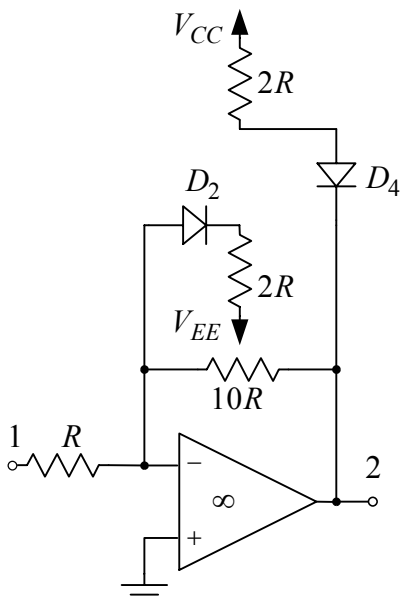
b1)  $v_1 = 1 \text{ V} \sin(2\pi ft)$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$  i

b2)  $v_1 = 6 \text{ V} + 0,3 \text{ V} \cdot \sin(2\pi ft)$ .

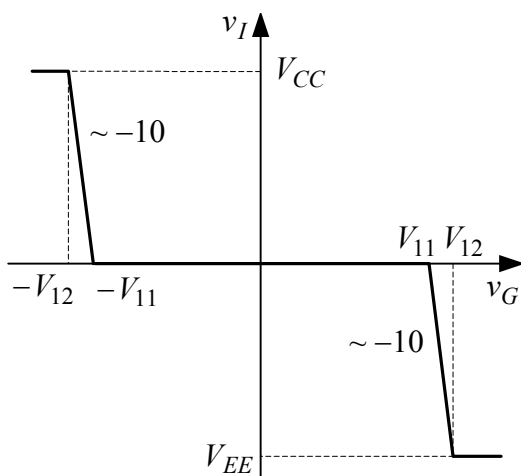
c) Za kolo sa slike 4.19b odrediti i nacrtati karakteristiku prenosa  $v_I = g(v_G)$ ,  $V_{EE} < v_G < V_{CC}$ .



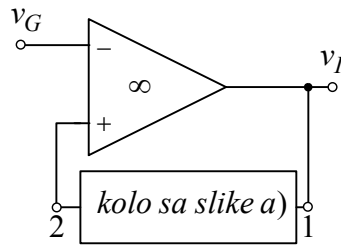
Slika 4.19a



Slika 4.19c



Slika 4.19d



Slika 4.19b

izazvaće zakočenje dioda  $D_1$  i  $D_3$ . Ovo se dešava kada je

$$\frac{v_1}{R} = \frac{0 - V_{EE}}{2R} \Rightarrow v_1 = V_{11} = -V_{EE} / 2 = 6 \text{ V}.$$

Na slici 4.19c prikazano je ekvivalentno kolo za slučaj kada provode samo diode  $D_2$  i  $D_4$ . Primenom principa superpozicije dobija se

$$v_2 = -\frac{10R}{R}v_1 - V_{EE} \frac{10R}{2R} = -10v_1 - 5V_{EE} = -10v_1 + 60 \text{ V}.$$

Poslednja zavisnost važi sve dok operacioni pojačavač ne uđe u zasićenje. Tada je

$$v_I = V_{EE} = -10v_1 - 5V_{EE} \Rightarrow v_1 = V_{12} = -\frac{6}{10}V_{EE} = 7,2 \text{ V}.$$

Zbog simetrije kola za negativne vrednosti ulaznog napona lako se dolazi do sledećih zaključaka:

- za  $-V_{11} \leq v_G \leq 0$  napon na izlazu je nula jer provode sve četiri diode;
- za  $-V_{12} \leq v_G \leq -V_{11}$  provodne su samo diode  $D_2$  i  $D_3$ , dok je

$$v_2 = -\frac{10R}{R}v_1 - \frac{10R}{2R}V_{CC} \Rightarrow v_2 = -10v_1 - 5V_{CC} = -10v_1 - 60 \text{ V};$$

- za  $v_G \leq -V_{12}$  operacioni pojačavač je u pozitivnom zasićenju,  $v_I = V_{CC}$ .

Na osnovu prethodnih zaključaka na slici 4.19d prikazana je prenosna karakteristika  $v_2 = f(v_1)$ .

b1) Kada je  $v_1(t) = 1 \text{ V} \sin(2\pi ft)$ , prema prenosnoj karakteristici se zaključuje da je

$$v_2(t) = 0.$$

b2) Pošto je srednja vrednost ulaznog napona jednaka graničnoj vrednosti pri kojoj prestaju da provode diode  $D_2$  i  $D_3$ , kada je  $v_1(t) > V_{11} = 6 \text{ V}$  izlazni napon će biti

$$v_2(t) = -10v_1(t) + 60 \text{ V},$$

odnosno

$$v_2(t) = -3 \text{ V} \sin(2\pi ft).$$

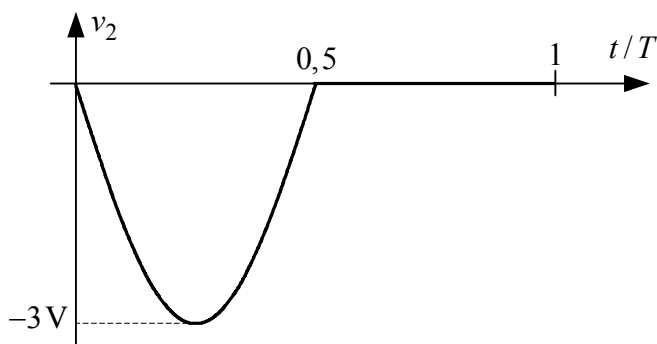
Za ulazni napon u opsegu  $V_{11} - V_m \leq v_1(t) \leq V_{11}$ , izlazni napon jednak je nuli.

Na slici 4.19e prikazan je vremenski oblik napona  $v_2(t)$ .

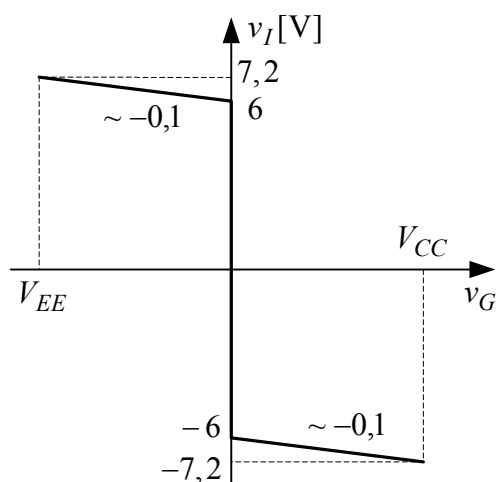
### Rešenje:

a) U okolini  $v_1 = 0$  sve četiri diode provode, tako da je  $v_I = 0$ .

Sa povećanjem ulaznog napona povećava se struja dioda  $D_2$  i  $D_4$ , dok se struja preostale dve diode smanjuje. Porast ulaznog napona izazvaće zakočenje dioda  $D_1$  i  $D_3$ . Ovo se dešava kada je



Slika 4.19e



Slika 4.19f

c) Zbog primenjene negativne povratne sprege, u kolu sa slike 4.19b je

$$v_I = v_1, v_2 = v_G.$$

Za  $v_G > 0$  provode samo diode  $D_1$  i  $D_3$ , pa je

$$v_2 = -10v_I - 5V_{CC} = v_G,$$

odakle se dobija

$$v_I = -\frac{v_G}{10} - \frac{V_{CC}}{2} = -0,1v_G - 6V.$$

Minimalna vrednost izlaznog napona je

$$v_I = -\frac{V_{CC}}{10} - \frac{V_{CC}}{2} = -\frac{6}{10}V_{CC} = -7,2V.$$

Za  $v_G < 0$  druge dve diode provode, pa je

$$v_2 = -10v_I - 5V_{EE} = v_G \Rightarrow$$

$$v_I = -\frac{v_G}{10} - \frac{V_{EE}}{2} = -0,1v_G + 6V.$$

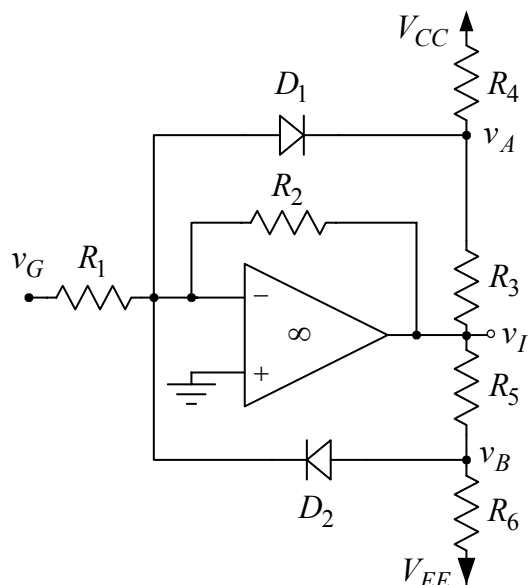
Maksimalna vrednost izlaznog napona je

$$v_I = -\frac{V_{EE}}{10} - \frac{V_{EE}}{2} = -\frac{6}{10}V_{EE} = 7,2V.$$

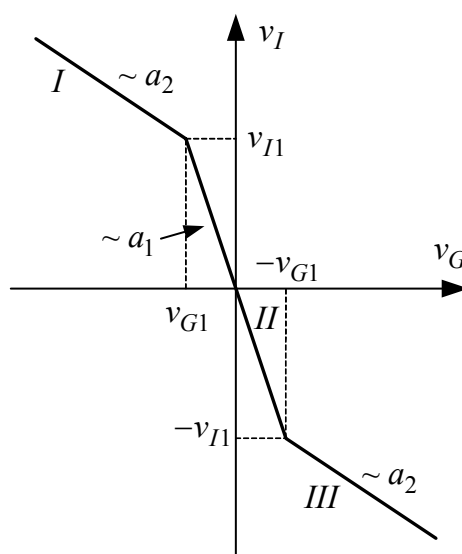
Pri prolasku ulaznog napona kroz nulu kratkotrajno se prekida kolo negativne reakcije. Usled toga postoji skokovita promena napona na izlazu od  $V_{EE}/2$  do  $V_{CC}/2$ , ili obrnuto, što zavisi sa koje strane prilazimo nultom naponu.

Na slici 4.19f prikazana je karakteristika prenosa  $v_I = g(v_G)$ .

**4.20** U kolu sa slike 4.20a operacioni pojačavač se može smatrati idealnim, provodne diode imaju pad napona  $V_D = 0,6V$ , dok je  $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$ ,  $R_3 = R_5$ ,  $R_4 = R_6$  i  $R_1 = 10k\Omega$ . Odrediti nepoznate otpornosti u kolu sa slike 4.20a, tako da prenosna karakteristika ovog kola bude kao na slici 4.20b. Poznato je:  $a_1 = -4$ ,  $a_2 = -2$  i  $v_{I1} = 5V$ .



Slika 4.20a



Slika 4.20b

**Rešenje:**

Na segmentu II prenosne karakteristike ne provodi nijedna dioda, pa je

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1} v_G = a_1 v_G \Rightarrow R_2 = -R_1 a_1 = 40 \text{ k}\Omega.$$

Na segmentu I prenosne karakteristike provodi dioda  $D_2$ , dioda  $D_1$  je zakočena, dok na segmentu III provodi dioda  $D_1$ , dok je dioda  $D_2$  zakočena. U tački čije su koordinate  $(V_{G1}, V_{I1})$  dolazi do provođenja diode  $D_2$ . Tada je

$$v_B = v^- + V_D = V_D, v_B = \frac{R_6 v_{I1} + R_5 V_{EE}}{R_5 + R_6} \Rightarrow \frac{R_6 v_{I1} + R_5 V_{EE}}{R_5 + R_6} = V_D \Rightarrow \frac{R_5}{R_6} = \frac{v_{I1} - V_D}{V_D - V_{EE}}.$$

Na segmentima I i III nagibi prenosne karakteristike su

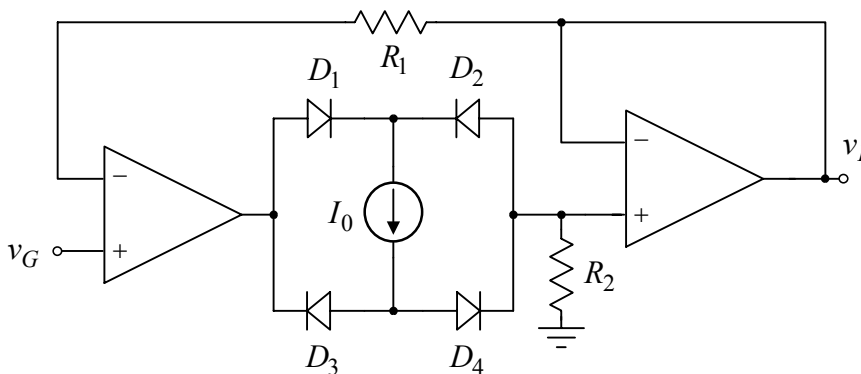
$$a_2 = -\frac{R_5 \parallel R_2}{R_1} \text{ i } a_2 = -\frac{R_3 \parallel R_2}{R_1},$$

odakle se dobija

$$-a_2 R_1 = \frac{R_5 R_2}{R_5 + R_2} \Rightarrow R_5 = -a_2 \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1 a_2} = 40 \text{ k}\Omega \Rightarrow$$

$$R_6 = R_5 \frac{V_D - V_{EE}}{v_{I1} - V_D} = 114,5 \text{ k}\Omega.$$

**4.21** U kolu sa slike 4.21 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz baterija  $V_{CC} = -V_{EE} = 12 \text{ V}$ , provodne diode imaju pad napona  $V_D = 0,6 \text{ V}$ , dok je:  $I_0 = 100 \mu\text{A}$ ,  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  i  $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ .



Slika 4.21

- a) Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ ,  $V_{EE} \leq v_G \leq V_{CC}$ .  
b) Ponoviti tačku a) kada je  $I_0 = 0$ .

**Rešenje:**

a) U kolu postoji negativna povratna sprega dok sve četiri diode provode struju. Tada je

$$v_I = v_G.$$

Sa povećanjem napona  $v_G$  povećava se i struja kroz otpornik  $R_2$

$$i_{R2} = v_G / R_2,$$

što znači da se struja diode  $D_2$  smanjuje.

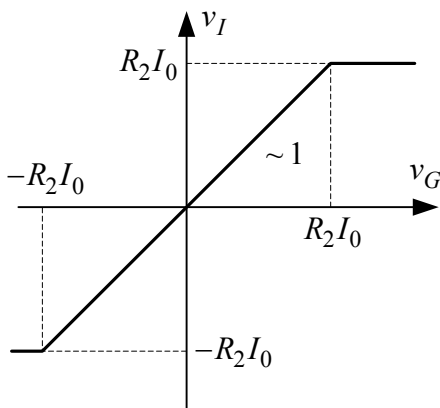
Kada postane

$$v_G / R_2 = I_0 \Rightarrow v_G = V_{G1} = R_2 I_0 = 5 \text{ V},$$

zakočiće se diode  $D_2$  i  $D_3$ , a u kolu će se raskinuti negativna povratna sprega. Sa daljim povećanjem ulaznog napona, napon na izlazu se ne menja

$$v_I = v^+ = R_2 I_0 = 5 \text{ V}.$$

Simetrično je pri smanjivanju ulaznog napona,  $v_G < 0$ .



Slika 4.21a



Kada postane

$$v_G = -V_{G1} = -R_2 I_0 = -5 \text{ V}$$

zakočiće se diode  $D_1$  i  $D_4$ .

Sa daljim smanjivanjem ulaznog napona, izlazni napon se ne menja

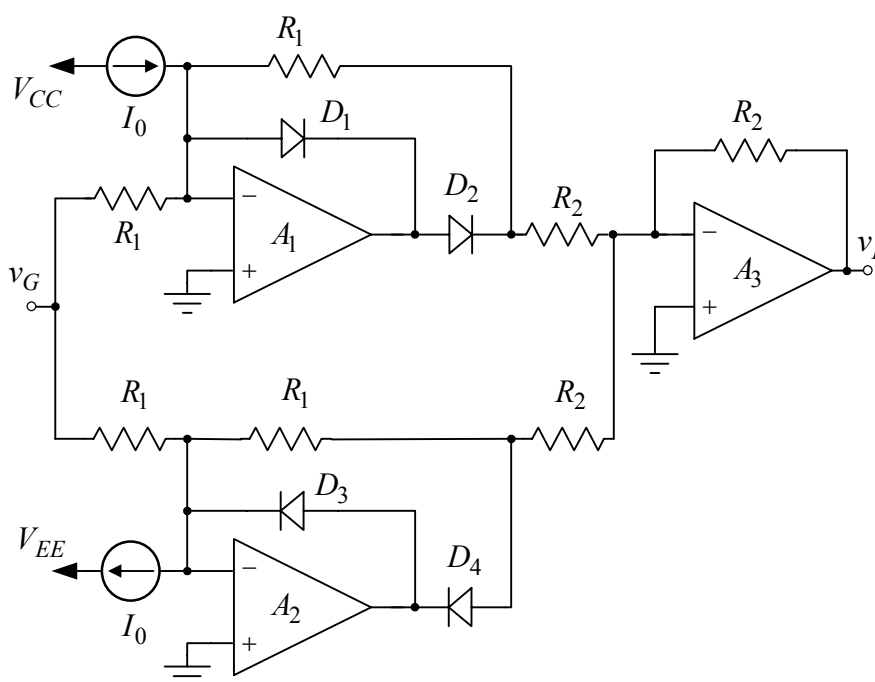
$$v_I = -R_2 I_0 = -5 \text{ V}.$$

Na slici 4.21a prikazana je prenosna karakteristika  $v_I = f(v_G)$ .

b) Kada je  $I_0 = 0$ , nijedna dioda neće provoditi, te je

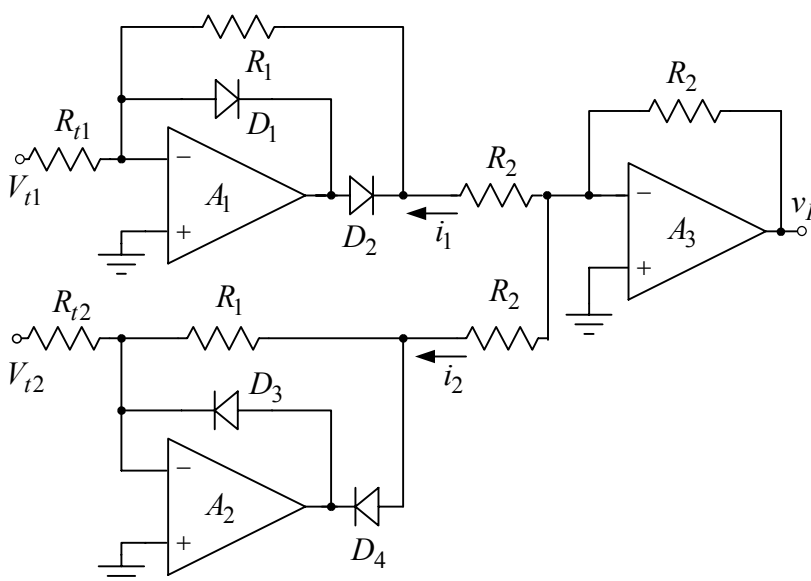
$$v_I = 0.$$

Realno će napon na izlazu imati malu konstantnu vrednost, što je posledica inverzne struje zasićenja dioda.



Slika 4.22

kola pojačavača, strujni izvor  $I_0$  i pobudni generator  $v_G$ , ekvivalentnim Tevenenovim generatorima dobija se kolo prikazano na slici 4.22a. Parametri Tevenenovih generatora su



Slika 4.22a

**4.22.** U kolu sa slike 4.22 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz baterija  $V_{CC} = 12 \text{ V}$  i  $V_{EE} = -12 \text{ V}$ , provodne diode imaju pad napona  $V_D = 0,6 \text{ V}$ , dok je:  $I_0 = 100 \mu\text{A}$ ,  $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$  i  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ .

- Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$ ,  $V_{EE} \leq v_G \leq V_{CC}$ .
- Ponoviti tačku a) kada je  $I_0 = 0$ .

**Rešenje:**

a) Predstavljajući ulazna

$$V_{t1} = v_G + R_1 I_0, \quad R_{t1} = R_1,$$

$$V_{t2} = v_G - R_1 I_0 \quad \text{i} \quad R_{t2} = R_1.$$

Dioda  $D_1$  će provoditi kada je

$$V_{t1} = v_G + R_1 I_0 > 0, \quad \text{ili}$$

$$v_G > -R_1 I_0 = -5 \text{ V}.$$

Pošto tada dioda  $D_2$  ne provodi, to je

$$i_1 = 0.$$

Kada je  $v_G < -R_1 I_0 = -5 \text{ V}$ , provodna je dioda  $D_2$ ,  $D_1$  je zakočena, dok je

$$i_1 = \frac{1}{R_2} \frac{R_1}{R_{t1}} V_{t1} = \frac{1}{R_2} (v_G + R_1 I_0).$$

S druge strane, kada je

$$V_{i2} = v_G - R_1 I_0 > 0 \Rightarrow v_G > R_1 I_0 = 5 \text{ V},$$

provodi dioda  $D_4$ , a  $D_3$  je zakočena. Tada je

$$i_2 = \frac{1}{R_2} \frac{R_1}{R_{i2}} V_{i2} = \frac{1}{R_2} (v_G - R_1 I_0).$$

Kada je  $v_G < R_1 I_0 = 5 \text{ V}$ , provodna je dioda  $D_3$ , dioda  $D_4$  ne provodi, dok je struja  $i_2$  jednaka nuli.

Pošto je izlazni napon

$$v_I = R_2 (i_1 + i_2) \Rightarrow$$

$$v_I = \begin{cases} v_G - R_1 I_0 = v_G - 5 \text{ V}, & v_G > R_1 I_0 = 5 \text{ V} \\ 0, & -R_1 I_0 = -5 \text{ V} \leq v_G \leq R_1 I_0 = 5 \text{ V} \\ v_G + R_1 I_0 = v_G + 5 \text{ V}, & v_G < -R_1 I_0 = -5 \text{ V} \end{cases}.$$

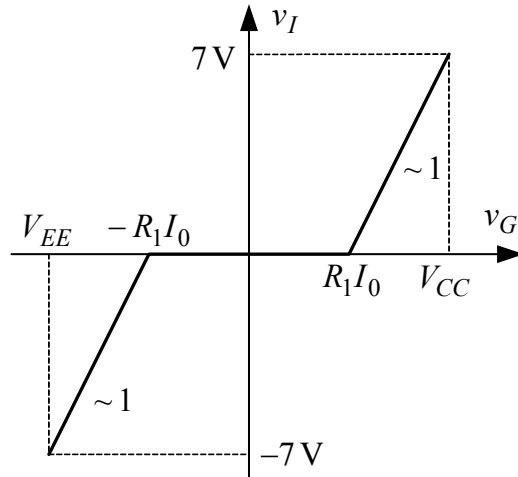
Ekstremne vrednosti izlaznog napona određene su minimalnom i maksimalnom vrednošću ulaznog napona

$$v_{I \min} = v_{G \min} + R_1 I_0 = -7 \text{ V} \text{ i}$$

$$v_{I \max} = v_{G \max} - R_1 I_0 = 7 \text{ V}.$$

Na slici 4.22b prikazana je prenosna karakteristika  $v_I = f(v_G)$ .

b) Kada je  $I_0 = 0$ , parametri ekvivalentnih Tevenenovih



Slika 4.22b

generatora postaju

$$V_{i1} = v_G, R_{i1} = R_1, V_{i2} = v_G \text{ i } R_{i2} = R_1.$$

Kada je  $v_G > 0$ , provodiće diode  $D_1$  i  $D_4$ , pa je

$$i_1 = 0, i_2 = v_G / R_2 \text{ i } v_I = R_2 (i_1 + i_2) = v_G.$$

Kada je  $v_G < 0$ , provodiće diode  $D_2$  i  $D_3$ , pa je

$$i_1 = v_G / R_2, i_2 = 0 \text{ i } v_I = R_2 (i_1 + i_2) = v_G.$$

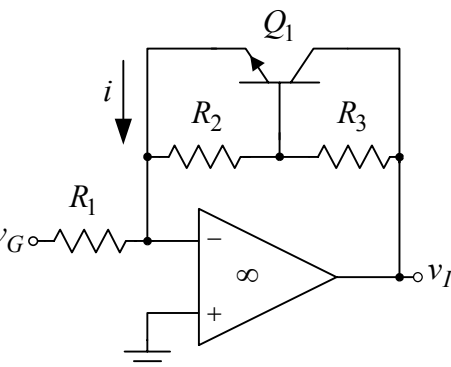
Prethodna zavisnost važi sve dok su izlazi operacionih pojačavača  $A_1$  i  $A_2$  izvan zasićenja, a ovo je zadovoljeno kada je ulazni napon u opsegu

$$V_{EE} + V_D = -11,4 \text{ V} \leq v_G \leq V_{CC} - V_D = 11,4 \text{ V}.$$

Kada je  $v_G > V_{CC} - V_D = 11,4 \text{ V}$ ,  $v_I = V_{CC} - V_D = 11,4 \text{ V}$ , dok je u drugom slučaju,  $v_G < V_{EE} + V_D = -11,4 \text{ V}$ , izlazni napon  $v_I = V_{EE} + V_D = -11,4 \text{ V}$ .

Slika 4.22c

Na slici 4.22c prikazana je prenosna karakteristika  $v_I = f(v_G)$  kada je  $I_0 = 0$ .

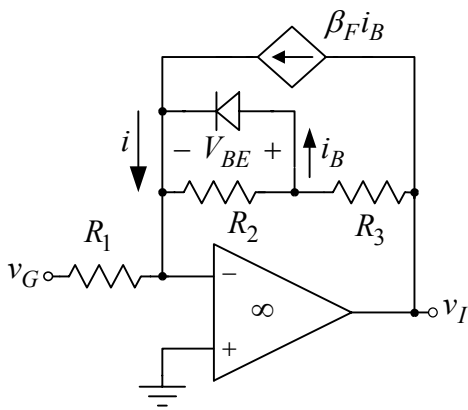


Slika 4.23

**4.23.** Parametri tranzistora u kolu sa slike 4.23 su:  $\beta_F = 100$ ,  $\beta_R = 0,5$ , napon na direktno polarisanom BE, odnosno BC spoju je  $V_D = 0,7 \text{ V}$ . Operacioni pojačavač je idealan, napaja se iz baterija  $V_{CC} = -V_{EE} = 12 \text{ V}$ , dok je:  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  i  $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ .

a) Odrediti i nacrtati zavisnost  $v_I = f(v_G)$  i  $i = g(v_G)$ ,  $-2 \text{ V} < v_G < 2 \text{ V}$ .

b) Ponoviti tačku a) kada je  $R_3 = 0$ .



Slika 4.23a

režimu, slika 4.23a. Pošto je

$$i + \frac{V_{BE}}{R_2} = \frac{-v_G}{R_1}, \quad \frac{v_I - V_{BE}}{R_3} = \frac{V_{BE}}{R_2} + i_B \quad \text{i} \quad (1 + \beta_F)i_B + \frac{V_{BE}}{R_2} = -\frac{v_G}{R_1} \Rightarrow$$

$$i = \frac{-v_G}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_2} = -1000[\mu\text{A/V}] \cdot v_G - 70\mu\text{A} \quad \text{i} \quad v_I \approx V_{BE} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{R_3}{R_1(1 + \beta_F)} v_G = 1,4\text{V} - 0,01v_G.$$

Za  $v_G = -2\text{V}$  izlazni napon je  $v_I \approx 1,4\text{V}$ , dok je struja

$$i(v_G = -2\text{V}) \approx 2\text{mA}.$$

Kada je ulazni napon pozitivan,  $v_G > 0$ , sve dok ne postane

$$v_G = V_{G2} = \frac{V_\gamma}{R_3} R_1 = -V_{G1} = 70\text{mV},$$

tranzistor je zakočen, dok je izlazni napon

$$v_I = -\frac{R_2 + R_3}{R_1} v_G = -20v_G.$$

Za  $V_{G2} \leq v_G \leq V_{G3}$ , tranzistor radi u inverznom aktivnom režimu (kolektor i emitor menjaju uloge), slika 4.23b. Pošto je

$$i = -\beta_R i_B, \quad i = \frac{-v_G}{R_1} + \frac{-(v_I + V_{BC})}{R_2} \quad \text{i} \quad i_B + \frac{V_{BC}}{R_3} = -\frac{v_I + V_{BC}}{R_2},$$

sređivanjem se dobija

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1(1 + \beta_R)} v_G - V_{BC} \left(1 + \frac{\beta_R R_2}{R_3(1 + \beta_R)}\right) = -6,66v_G - 0,93\text{V} \quad \text{i}$$

$$i = \frac{\beta_R}{1 + \beta_R} \left(\frac{-v_G}{R_1} + \frac{V_{BC}}{R_3}\right) = -333[\mu\text{A/V}]v_G + 23\mu\text{A}.$$

Kada napon pobudnog generatora postane  $v_G = V_{G3}$ , operacioni pojačavač ulazi u negativno zasićenje. Tada je

$$v_I = V_{EE} = -12\text{V}, \quad V_{G3} = \frac{12 - 0,93}{6,66} = 1,66\text{V} \quad \text{i} \quad i(V_{G3}) = -530\mu\text{A}.$$

Kada je  $V_{G3} \leq v_G \leq 2\text{V}$ , operacioni pojačavač je u negativnom zasićenju

$$v_I = V_{EE} = -12\text{V}.$$

Kada je operacioni pojačavač u zasićenju struja  $i$  se dobija na osnovu sledećih jednakosti

### Rešenje:

a) Uzmimo da je  $v_G < 0$ . Sve dok ne postane

$$-\frac{v_G}{R_1} R_2 = V_\gamma,$$

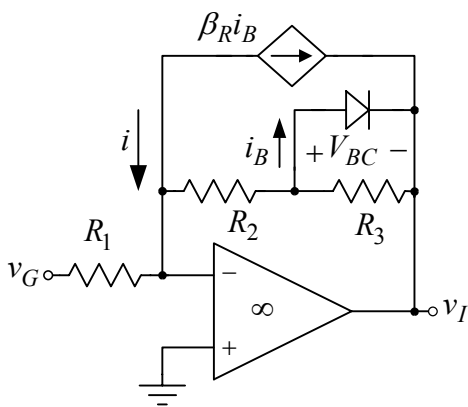
odnosno

$$v_G = V_{G1} = -\frac{V_\gamma}{R_2} R_1 = -70\text{mV},$$

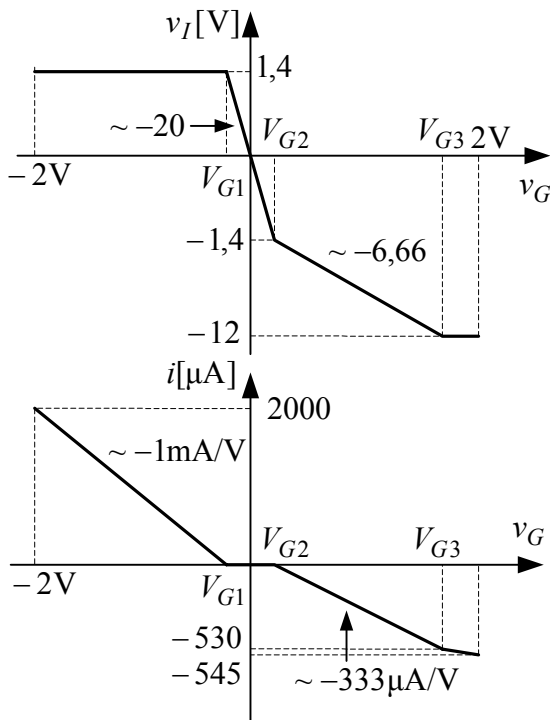
tranzistor Q1 je zakočen, dok je

$$v_I = -\frac{R_2 + R_3}{R_1} v_G = -20v_G.$$

Za  $V_{G2} \leq v_G \leq V_{G1}$  tranzistor radi u direktnom aktivnom

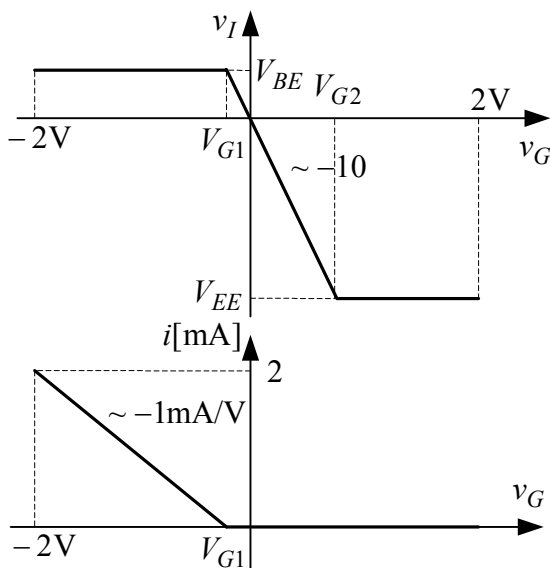


Slika 4.23b



Slika 4.23c

b) Za negativne vrednosti ulaznog napona,  $v_G < 0$ , tranzistor je zakočen sve dok ne postane



Slika 4.23d

Na slici 4.23d prikazane su tražene zavisnosti.

**4.24.** U pojačavaču sa slike 4.24 može se smatrati da je operacioni pojačavač idealan i napaja se iz baterija  $V_{CC} = -V_{EE} = 15\text{ V}$ . Svi bipolarni tranzistori su identičnih karakteristika sa  $V_{\gamma} = V_{EB} = V_D = 0,6\text{ V}$ ,  $V_{ECS} = 0,2\text{ V}$ , pad napona na provodnoj diodi je  $V_D = 0,6\text{ V}$ , dok je:  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_4 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 700\text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 187,5\text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 50\text{ k}\Omega$  i  $V_X = -15\text{ V}$ .

$$\frac{v_G - v_X}{R_1} = \frac{v_X - (V_{EE} + V_{BC})}{R_2} - i$$

$$\frac{v_X - (V_{EE} + V_{BC})}{R_2} = \frac{-i}{\beta_R} + \frac{V_{BC}}{R_3},$$

gde je  $v_X$  napon minus priključka operacionog pojačavača. Zbog prekinute negativne reakcije ovaj napon više nije nula. Sređivanjem prethodnih jednakosti dobija se

$$i = -\frac{\beta_R}{R_1(1 + \beta_R) + R_2} v_G + \frac{R_3(V_{EE} + V_{BC}) + V_{BC}(R_1 + R_2)}{R_3(R_1(1 + \beta_R) + R_2)} \Rightarrow$$

$$i = -(43,48 v_G - 457,8) \mu\text{A}.$$

Maksimalna vrednost ove struje je pri  $v_G = 2\text{ V}$ , a iznosi

$$i(v_G = 2\text{ V}) = -545 \mu\text{A}.$$

Na slici 4.23c su prikazane zavisnosti  $v_I = f(v_G)$  i  $i = g(v_G)$ .

$$v_G = V_{G1} = -\frac{V_{\gamma}}{R_2} R_1 = -70\text{ mV} \Rightarrow$$

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1} v_G = -10 v_G.$$

Kada je  $-2\text{ V} \leq v_G \leq V_{G1}$ , tada je

$$v_I = V_{BE} \text{ i } i = \frac{-v_G}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_2} = (-1000 v_G - 70) \mu\text{A}.$$

Kada je  $0 \leq v_G \leq V_{G2}$ , tranzistor je zakočen

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1} v_G = -10 v_G.$$

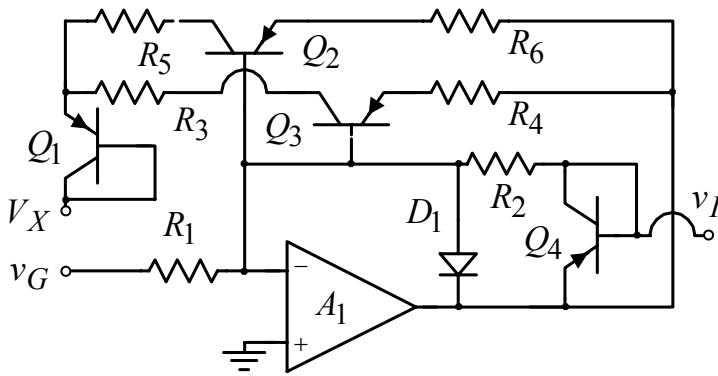
Kada postane

$$v_G = V_{G2} = \frac{-V_{EE}}{R_2} R_1 = 1,2\text{ V},$$

operacioni pojačavač ulazi u negativno zasićenje.

U opsegu  $1,2\text{ V} \leq v_G \leq 2\text{ V}$  operacioni pojačavač je u zasićenju

$$v_I = V_{EE} = -12\text{ V}.$$



Slika 4.24

- a) Odrediti i nacrtati karakteristiku prenosa pojačavača  $v_I = f(v_G)$ ,  $V_{EE} \leq v_G \leq V_{CC}$ .
- b) Odrediti temperaturnu zavisnost izlaznog napona pod uslovom iz tačke a). Smatrati da je  $dv_{EB}/dT = -2\text{mV}/^\circ\text{C}$  i da se karakteristike operacionog pojačavača ne menjaju sa temperaturom.

**Rešenje:**

a) Kada je  $v_G > 0$ , dioda  $D_1$  provodi, svi tranzistori su zakočeni, dok je

$$v_I = 0.$$

Za  $v_G^* < v_G < 0$ ,

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1}v_G = -10v_G, \beta_F \gg 1.$$

Ova zavisnost važi sve dok  $Q_3$  ne uđe u zasićenje, kada postaje

$$V_X + V_{EB1} + \frac{R_3}{R_4}(v_I + v_{EB4} - v_{EB3}) = v_{EB3} - V_{ECS}.$$

Iz prethodnog izraza se dobija

$$v_I^* \approx 2,11\text{V} \text{ i } v_G^* \approx -0,21\text{V}.$$

Za  $v_G^{**} < v_G < v_G^*$ ,  $Q_3$  je u zasićenju, pa je

$$\frac{v_G}{R_1} = -\frac{v_I}{R_2} - \left( \frac{v_I + v_{EB4} - v_{EB3}}{R_4} - \frac{v_{EB3} - V_{ECS} - v_{EB1} - V_X}{R_3} \right) \Rightarrow v_I \approx -5v_G + 1\text{V}.$$

Kada  $Q_2$  uđe u zasićenje, tada je

$$v_I^{**} = -\frac{R_6}{R_5}(V_X + V_{ECS}) \approx 3,95\text{V} \Rightarrow v_G^{**} = -0,59\text{V}.$$

Za  $v_G^{***} < v_G < v_G^{**}$ ,  $Q_2$  i  $Q_3$  su u zasićenju, pa je

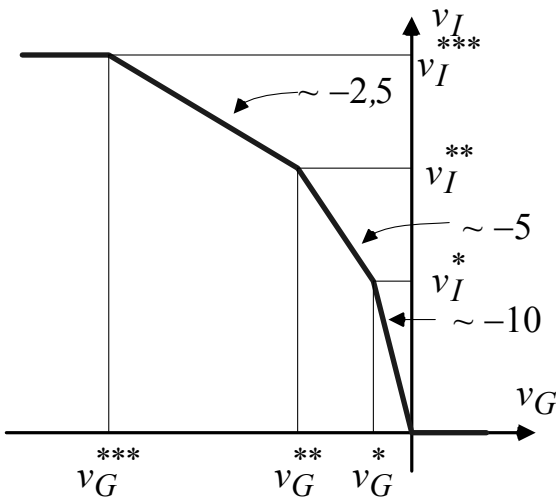
$$v_I = -\frac{R_2 \parallel R_4 \parallel R_6}{R_1}v_G + \frac{R_2 \parallel R_4 \parallel R_6}{R_3 \parallel R_5}(-V_X - V_{ECS}) \Rightarrow v_I \approx -2,5v_G + 2,5\text{V}$$

Poslednja zavisnost važi sve dok operacioni pojačavač ne uđe u pozitivno zasićenje. Tada je

$$v_I^{***} = V_{CC} - v_{EB4} = 14,6\text{V} \Rightarrow v_G^{***} \approx -4,76\text{V}.$$

Prenosna karakteristika prikazana je na slici 4.24a.

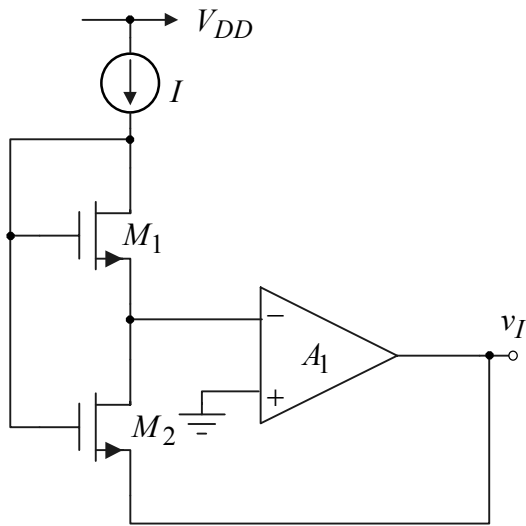
b) Pod navedenom pretpostavkom, izlazni napon ne zavisi od temperature, kao ni pragovi koji definišu različite vrednosti pojačanja nelinearnog pojačavača.



slika 4.24a

Kada je operacioni pojačavač  $A_1$  u zasićenju, tada je

$$v_I = V_{CC} - v_{EB} \Rightarrow \frac{\Delta v_I}{\Delta T} = -\frac{\Delta v_{EB}}{\Delta T} \approx -\frac{dv_{EB}}{dT} = 2 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}.$$



Slika 4.25

**4.25.** U kolu sa slike 4.25 parametri MOSFET-ova su:  $B = 1\text{mA/V}^2$ ,  $V_T = 2\text{V}$  i  $\lambda \rightarrow 0$ . Operacioni pojačavač se može smatrati idealnim, dok je  $V_{DD} = 12\text{V}$  i  $I > 0$ . Odrediti zavisnost  $v_I = f(I)$ .

**Rešenje:**

Pošto je

$$v_{DG1} = 0\text{V} > -V_T,$$

to će tranzistor  $M_1$  raditi u oblasti zasićenja.

Međutim, pošto je

$$v_{GS1} = V_T + \sqrt{2I/B} > V_T \text{ i } v_{GD2} = v_{GS1} > V_T,$$

zaključuje se da je tranzistor  $M_2$  u triodnoj oblasti.

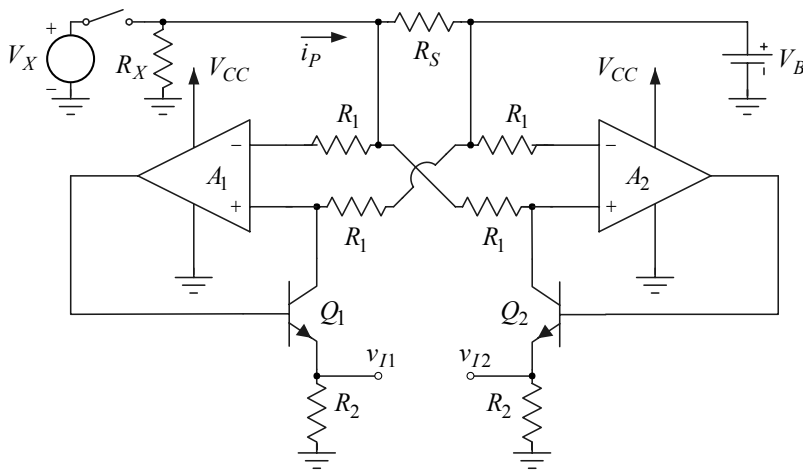
Na osnovu prethodnog, iz uslova o jednakosti struja, dobija se

$$i_{D1} = i_{D2}, \quad i_{D1} = \frac{B}{2}(v_{GS1} - V_T)^2, \quad i_{D2} = \frac{B}{2}(2(v_{GS2} - V_T)v_{DS2} - v_{DS2}^2),$$

$$v_I = v_{GS1} - v_{GS2} \Rightarrow v_I = -(2 - \sqrt{2})\sqrt{I/B} = (-0,59\sqrt{I})\text{mV}.$$

Dakle, izlazni napon proporcionalan je kvadratnom korenu ulazne struje.

**4.26. (za vežbanje)** U kolu sa slike 4.26 sve dok postoji mrežni napon (220V), uključen je prekidač, strujom  $i_P > 0$  puni se akumulator  $V_B = 5\text{V}$ . U odsustvu mrežnog napona isključi se prekidač, a akumulator napaja potrošač  $R_X$ ,  $i_P < 0$ . Operacioni pojačavači su idealni, parametri tranzistora su



Slika 4.26

$V_{BE} = V_\gamma = 0,6\text{V}$ ,  $V_{CES} = 0,2\text{V}$  i  $\beta_F = 100$ , dok je:  $V_{CC} = 5\text{V}$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{k}\Omega$  i  $R_S = 0,1\Omega$ .

a) Ako je  $i_P > 0$ , odrediti i nacrtati zavisnost  $v_{I1} = f(i_P)$  i  $v_{I2} = g(i_P)$ .

b) Ako je  $i_P < 0$ , odrediti i nacrtati zavisnost  $v_{I1} = h(i_P)$  i  $v_{I2} = i(i_P)$ .