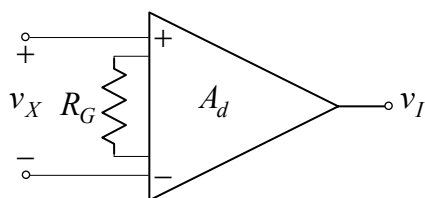


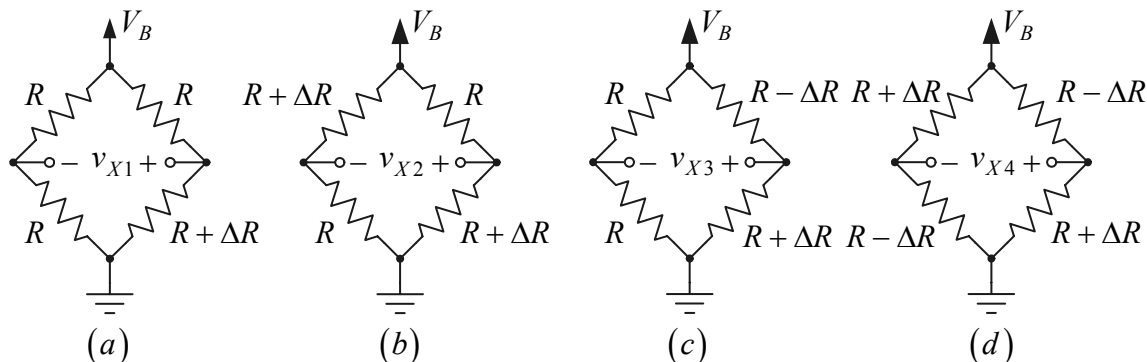
Glava 3

INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČI



Slika 3.1

3.1. Na ulaz instrumentacionog pojačavača sa slike 3.1 dovodi se jedan od otpornih mostova prikazanih na slici 3.1a-3.1d. Usled delovanja spoljašnjeg uticaja (pritiska, sile, temperature i sl.) dolazi do promene otpornosti ΔR . Diferencijalno pojačanje instrumentacionog pojačavača je $A_d = 100$, dok je $V_B = 5\text{ V}$ i $R = 3\text{ k}\Omega$. Odrediti promenu otpornosti ΔR u sva četiri slučaja tako da promena izlaznog napona bude $\Delta v_I = 5\text{ V}$.



Slika 3.1

Rešenje:

(a) Prema slici 3.1a je

$$v_{X1} = V_B \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{R}{2R} \right) = \frac{V_B}{4} \frac{\Delta R}{R + \Delta R/2} \Rightarrow v_I = A_d v_{X1}, v_I(\Delta R = 0) = 0 \Rightarrow$$

$$\Delta v_I = A_d \frac{V_B}{4} \frac{\Delta R}{R + \Delta R/2} \Rightarrow \Delta R = 4R \frac{\frac{\Delta v_I}{A_d V_B}}{1 - \frac{\Delta v_I}{A_d V_B}} = 122,45 \Omega.$$

(b) Prema slici 3.1b je

$$v_{X2} = V_B \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{R}{2R + \Delta R} \right) = V_B \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} = \frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R + \Delta R/2} \Rightarrow v_I = A_d v_{X2} \Rightarrow$$

$$\Delta v_I = A_d \frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R + \Delta R/2} \Rightarrow \Delta R = 2R \frac{\frac{\Delta v_I}{A_d V_B}}{1 - \frac{\Delta v_I}{A_d V_B}} = 60,61 \Omega.$$

(c) Prema slici 3.1c je

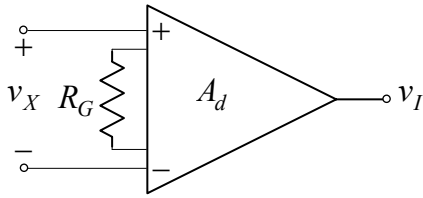
$$v_{X3} = V_B \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R}{2R} \right) = \frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow v_I = A_d v_{X3} \Rightarrow$$

$$\Delta v_I = A_d \frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = 2R \frac{\Delta v_I}{A_d V_B} = 60 \Omega.$$

(d) Prema slici 3.1d je

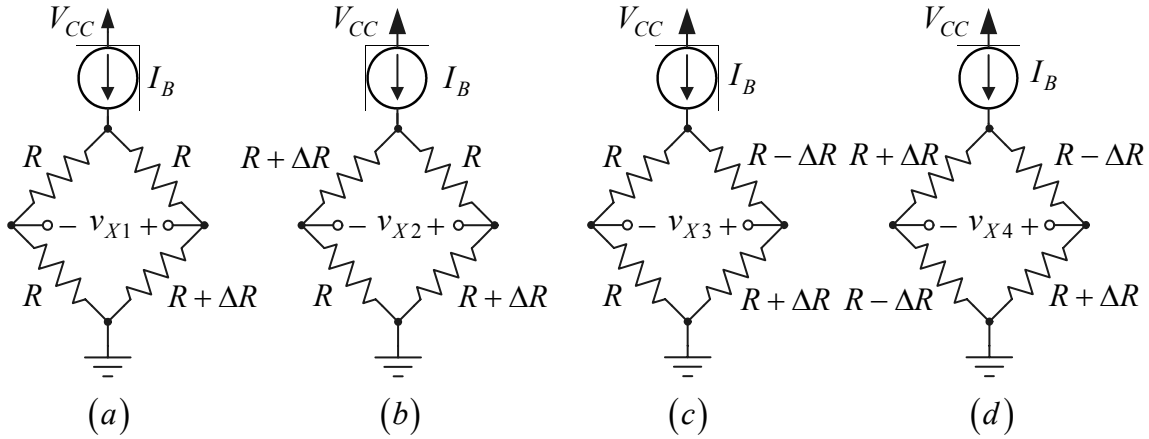
$$v_{X4} = V_B \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right) = V_B \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow v_I = A_d v_{X4} \Rightarrow$$

$$\Delta v_I = A_d V_B \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = R \frac{\Delta v_I}{A_d V_B} = 30 \Omega.$$



Slika 3.2

3.2. Na ulaz instrumentacionog pojačavača sa slike 3.2 dovodi se jedan od otpornih mostova prikazanih na slici 3.2a-3.2d. Usled delovanja spoljašnjeg uticaja (pritiska, sile, temperature i sl.) dolazi do promene otpornosti ΔR . Diferencijalno pojačanje instrumentacionog pojačavača je $A_d = 200$, dok je $I_B = 1 \text{ mA}$ i $R = 3 \text{ k}\Omega$. Odrediti promenu otpornosti ΔR u sva četiri slučaja tako da promena izlaznog napona bude $\Delta v_I = 5 \text{ V}$.



Slika 3.2

(a) Koristeći osobinu strujnog razdelnika, prema slici 3.2a, može se pisati

$$\begin{aligned} v_{X1}^+ &= I_B (R + \Delta R) \frac{2R}{4R + \Delta R}, \quad v_{X1}^- = I_B R \frac{2R + \Delta R}{4R + \Delta R} \Rightarrow v_{X1} = v_{X1}^+ - v_{X1}^- = I_B \frac{2R(R + \Delta R) - R(2R + \Delta R)}{4R + \Delta R} \\ &\Rightarrow v_{X1} = I_B \frac{R\Delta R}{4R + \Delta R} = I_B \frac{\Delta R}{4 + \Delta R/R}, \quad v_I = A_d v_{X1}, \quad v_I(\Delta R = 0) = 0 \Rightarrow \\ \Delta v_I &= A_d v_{X1} = A_d I_B \frac{\Delta R}{4 + \Delta R/R} \Rightarrow \Delta R = 4R \frac{\Delta v_I}{A_d I_B R - \Delta v_I} = 100,84 \Omega. \end{aligned}$$

(b) Prema slici 3.2b je

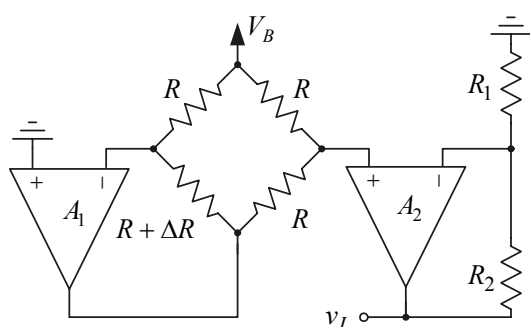
$$\begin{aligned} v_{X2}^+ &= I_B (R + \Delta R) \frac{2R + \Delta R}{4R + 2\Delta R}, \quad v_{X2}^- = I_B R \frac{2R + \Delta R}{4R + 2\Delta R} \Rightarrow \\ v_{X2} &= v_{X2}^+ - v_{X2}^- = I_B \frac{(R + \Delta R)(2R + \Delta R) - R(2R + \Delta R)}{4R + 2\Delta R} \Rightarrow v_{X2} = I_B \frac{\Delta R(2R + \Delta R)}{4R + 2\Delta R} = I_B \frac{\Delta R}{2}, \\ v_I &= A_d v_{X2} \Rightarrow \Delta v_I = A_d v_{X2} = A_d I_B \frac{\Delta R}{2} \Rightarrow \Delta R = 2 \frac{\Delta v_I}{A_d I_B} = 50 \Omega. \end{aligned}$$

(c) Prema slici 3.2c je

$$\begin{aligned} v_{X3}^+ &= I_B (R + \Delta R) \frac{2R}{4R}, \quad v_{X3}^- = I_B R \frac{2R}{4R} \Rightarrow v_{X3} = v_{X3}^+ - v_{X3}^- = I_B \frac{\Delta R}{2}, \quad v_I = A_d v_{X3} \Rightarrow \\ \Delta v_I &= A_d v_{X3} = A_d I_B \frac{\Delta R}{2} \Rightarrow \Delta R = 2 \frac{\Delta v_I}{A_d I_B} = 50 \Omega. \end{aligned}$$

(d) Prema slici 3.2d je

$$\begin{aligned} v_{X4}^+ &= I_B (R + \Delta R) \frac{2R}{4R}, \quad v_{X4}^- = I_B (R - \Delta R) \frac{2R}{4R} \Rightarrow v_{X4} = v_{X4}^+ - v_{X4}^- = I_B \Delta R, \quad v_I = A_d v_{X4} \Rightarrow \\ \Delta v_I &= A_d v_{X4} = A_d I_B \Delta R \Rightarrow \Delta R = \frac{\Delta v_I}{A_d I_B} = 25 \Omega. \end{aligned}$$



Slika 3.3

3.3. U kolu sa slike 3.3 može se smatrati da su operacioni pojačavači idealni, dok je $V_B = 2,5\text{ V}$, $R = 350\Omega$ i $R_2 = 9R_1$. Odrediti promenu otpornosti ΔR koja odgovara promeni izlaznog napona $\Delta v_I = 2,5\text{ V}$.

Rešenje:

Prema slici 3.3 je

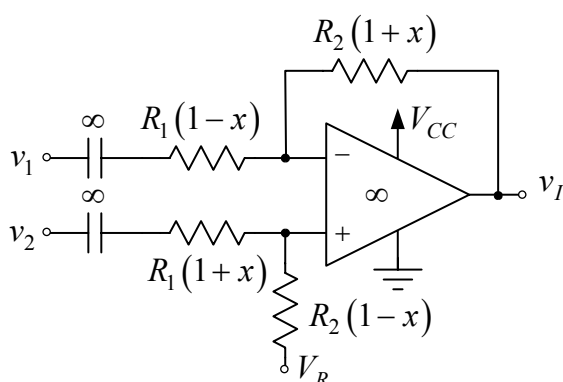
$$v_{I1} = -(R + \Delta R)V_B / R \Rightarrow$$

$$v_{A2}^+ = \frac{1}{2}(V_B + v_{I1}) = \frac{V_B}{2} \left(1 - \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right) \right) \Rightarrow$$

$$v_{A2}^+ = -\frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow v_I = v_{A2}^+ \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = -\frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Na osnovu prethodnog rezultata lako se dolazi do potrebne promene otpornosti mosta

$$\Delta v_I = \frac{V_B}{2} \frac{\Delta R}{R} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \Rightarrow \Delta R = 2R \frac{\Delta v_I}{V_B (1 + R_2 / R_1)} = 70\Omega.$$



Slika 3.4

3.4. U diferencijalnom pojačavaču sa slike upotrebljen je operacioni pojačavač koji se može smatrati idealnim i napaja se iz baterije $V_{CC} = 3\text{ V}$.

Poznato je: $V_R = V_{CC} / 2$, $R_2 = 10R_1$ i $x = 0,01$.

a) Odrediti vrednost izlaznog napona u odsustvu pobude.

b) Odrediti faktor potiskivanja napona srednje vrednosti ulaznih napona $CMRR = |a_d / a_s|$,

$$a_d = v_i / v_d, \quad v_d = v_2 - v_1, \quad a_s = v_i / v_s, \quad v_s = (v_1 + v_2) / 2.$$

Rešenje:

a) Izlazni napon u odsustvu pobude je

$$v_I = V_R = V_{CC} / 2 = 1,5\text{ V}.$$

b) Na slici 3.4a prikazana je šema pojačavača za male signale kada deluje samo diferencijalna pobuda. Prema ovoj slici je

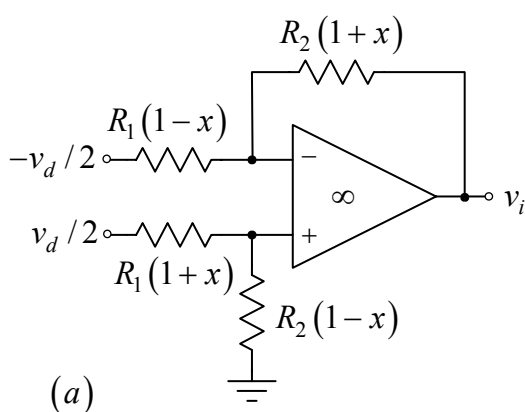
$$v_i = -\frac{v_d}{2} \left(-\frac{R_2(1+x)}{R_1(1-x)} \right) + \frac{v_d}{2} \frac{R_2(1-x)}{R_2(1-x) + R_1(1+x)} \times \frac{R_1(1-x) + R_2(1+x)}{R_1(1-x)},$$

odakle se dobija da je

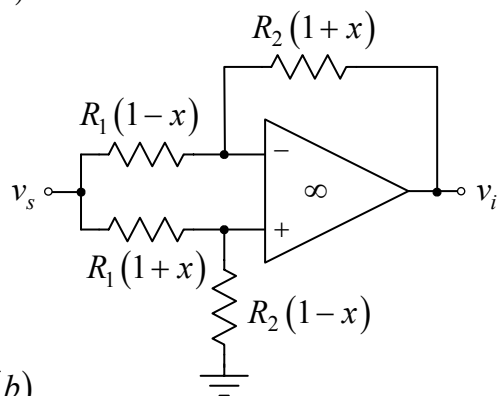
$$a_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{1}{2} \frac{2R_2^2(1-x^2) + 2R_1R_2(1+x^2)}{R_1R_2(1-x)^2 + R_1^2(1-x^2)} \Rightarrow$$

$$a_d \approx \frac{1}{2} \frac{2R_2^2 + 2R_1R_2}{R_1R_2 + R_1^2} = \frac{R_2}{R_1} = 10.$$

Na slici 3.4b prikazana je šema za male signale kada u kolu deluje zajednički signal v_s . Prema ovoj slici je



(a)



(b)

Slika 3.4

$$v_i = v_s \left(-\frac{R_2(1+x)}{R_1(1-x)} \right) + v_s \frac{R_2(1-x)}{R_2(1-x) + R_1(1+x)} \times \frac{R_1(1-x) + R_2(1+x)}{R_1(1-x)},$$

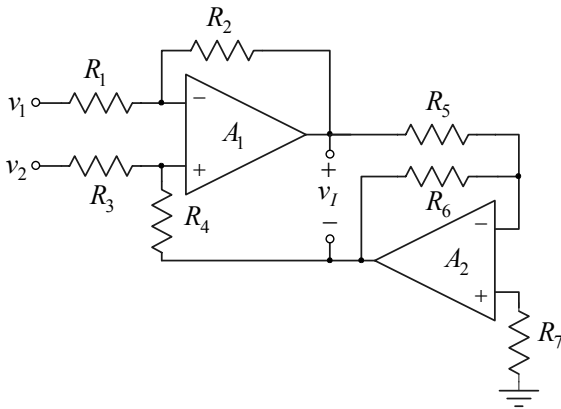
a posle svođenja postaje

$$a_s = \frac{v_i}{v_s} = \frac{R_1 R_2 \left[(1-x)^2 - (1+x)^2 \right]}{R_1 R_2 (1-x)^2 + R_1^2 (1-x^2)} \Rightarrow a_s = -\frac{4x R_1 R_2}{R_1 R_2 (1-x)^2 + R_1^2 (1-x^2)} \approx -4x \frac{R_2 / R_1}{1 + R_2 / R_1}.$$

Faktor potiskivanja zajedničkog signala na ulazu diferencijalnog pojačavača je

$$CMRR = \left| \frac{a_d}{a_s} \right| = \frac{1 + R_2 / R_1}{4x} = 275 [49 \text{ dB}].$$

3.5. U diferencijalnom pojačavaču sa diferencijalnim izlazom, slika 3.5, upotrebljeni operacioni pojačavači se, ukoliko se drugačije ne naglasi, mogu smatrati idealnim. Poznato je: $R_{1-4} = 25 \text{ k}\Omega$, $R_{5,6} = 10 \text{ k}\Omega$ i $R_7 = R_5 \parallel R_6$.



Slika 3.4

a) Odrediti zavisnost diferencijalnog izlaznog napona v_I u funkciji razlike ulaznih napona

$$v_D = v_2 - v_1.$$

b) Ako su u operacionim pojačavačima ulazni diferencijalni pojačavači realizovani sa NPN tranzistorima čije su ulazne polarizacione struje $I_B^+ = I_B^- = 1 \mu\text{A}$, odrediti vrednost izlaznog napona V_I u odsustvu pobude. Smatrati da su sve ostale karakteristike operacionih pojačavača idealne.

Rešenje:

a) Kada na ulazu deluje samo diferencijalna pobuda, tada je

$$v_1 = -v_D / 2 \text{ i } v_2 = v_D / 2.$$

Primenom principa superpozicije dobija se

$$v_I^+ = \frac{R_2}{R_1} \frac{v_D}{2} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_4 \frac{v_D}{2} + R_3 v_I^-}{R_3 + R_4}, \quad v_I^- = -\frac{R_6}{R_5} v_I^+ = -v_I^+,$$

a posle svođenja postaje

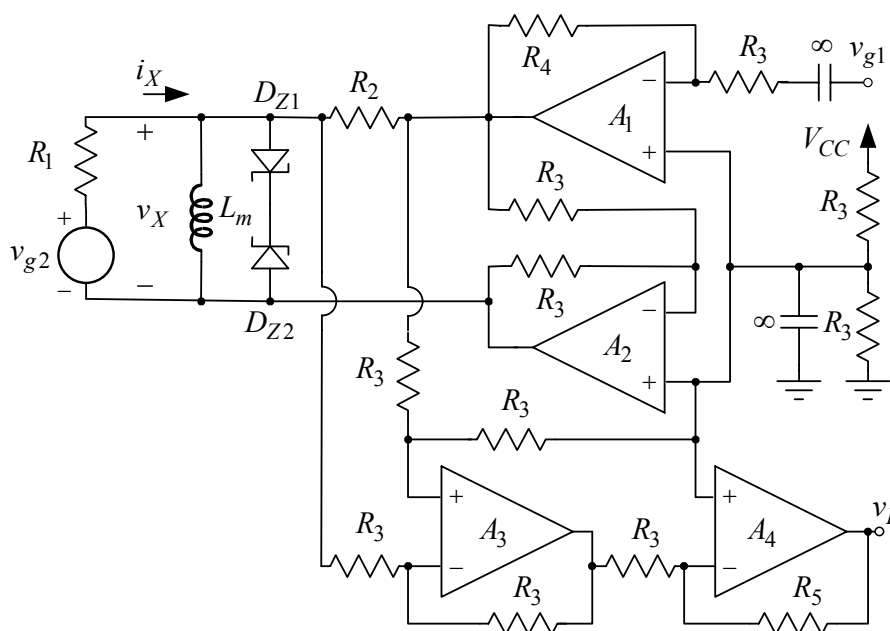
$$v_I^+ = \frac{R_2}{R_1} v_D + v_I^-, \quad R_3 = R_1, \quad R_4 = R_2 \Rightarrow v_I = v_I^+ - v_I^- = \frac{R_2}{R_1} v_D = v_D.$$

b) Primenom principa superpozicije dobija se da je izlazni napon u odsustvu pobude ($v_1 = v_2 = 0$)

$$V_I = R_2 (I_{B1}^- - I_{B1}^+) = 0.$$

3.6. Na slici 3.6 prikazana je uprošćena šema modemske veze prema telefonskoj liniji koja je modelovana induktivnošću $L_m \rightarrow \infty$ i karakterističnom impedansom $Z_1 = R_1 = 600 \Omega$. Diode D_{Z1} i D_{Z2} su idealne sa $V_Z = 6,2 \text{ V}$ i služe za zaštitu linije od prenapona. Operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz baterije $V_{CC} = 5 \text{ V}$. Poznato je: $R_2 = 360 \Omega$, $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$,

$R_3 \gg R_2$, $R_4 = 8 \text{ k}\Omega$, $R_5 = R_3$, $v_{g1} = V_{m1} \sin \omega t$, $v_{g2} = V_{m2} \sin \omega t$.



Slika 3.6

- Ako se šalju podaci na liniju, $v_{g2} = 0$, odrediti zavisnost $v_X = f(v_{g1})$ i $v_I = g(v_{g1})$.
- Ako se primaju podaci sa linije, $v_{g1} = 0$, odrediti zavisnost $v_I = h(v_X)$.
- Ako se istovremeno i šalju i primaju podaci odrediti zavisnost $v_I = i(v_{g1}, v_{g2})$.
- Ponoviti tačku a) ako je linija u prekidu, tj. kada $R_1 \rightarrow \infty$.

e) Odrediti maksimalnu amplitudu napona $V_{Im \max}$ koji se može poslati na liniju.

f) Koliko iznosi maksimalna struja kratkog spoja linije ($v_X = 0$) i_{XKS} ?

Rešenje:

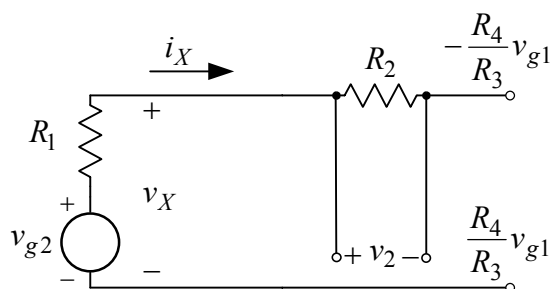
a) Operacioni pojačavač A_1 sa otpornicima R_3 i R_4 čini invertujući pojačavač, pa je

$$v_{i1} = -\frac{R_4}{R_3} v_{g1} = -1,25 v_{g1}.$$

Operacioni pojačavač A_2 nalazi se u konfiguraciji jediničnog invertora, tako da je

$$v_{i2} = -v_{i1} = \frac{R_4}{R_3} v_{g1} = 1,25 v_{g1},$$

Zener diode štite liniju od prenapona i normalno su zakočene, a beskonačna induktivnost je na učestanosti promenljivih signala otvorena veza. Pošto je $R_3 \gg R_2$ ekvivalentna šema kola za promenljive signale prema liniji pokazana je na slici 3.6a. Prema ovoj slici je



Slika 3.6a

$$v_X = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(-\frac{2R_4}{R_3} v_{g1} \right) \approx v_{g1}, \quad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{2R_4}{R_3} v_{g1}.$$

Operacioni pojačavač A_3 sa otpornicima R_3 čini jedinični diferencijalni pojačavač, pa je

$$v_{i3} = -v_2.$$

Operacioni pojačavač A_4 sa otpornicima R_3 i R_5 čini invertorski pojačavač, te je

$$v_i = v_{i4} = -\frac{R_5}{R_3} v_{i3} = -v_{i3} = v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{2R_4}{R_3} v_{g1} \approx 0,6 v_{g1}.$$

b) Kada je $v_{g1} = 0$ ili je nepromenljiv, promenljiva komponenta napona v_{I1} jednaka je nuli. Zbog ovoga je i napon na izlazu pojačavača A_2 takođe konstantan, odnosno

$$v_{i2} = v_{i1} = 0.$$

Napon na ulazu diferencijalnog pojačavača je

$$v_2 = v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{g2} = 0,375 v_{g2},$$

što je jednako i naponu na njegovom izlazu

$$v_{i2} = v_2 = v_x.$$

c) Superpozicijom se dobija da je

$$v_i = v_i(v_{g1}) \Big|_{v_{g2}=0} + v_i(v_{g2}) \Big|_{v_{g1}=0} = 0,6 v_{g1} - 0,375 v_{g2}.$$

d) Kada je linija u prekidu, $R_1 \rightarrow \infty$, tada je

$$v_x = -\frac{2R_4}{R_3} v_{g1} \approx -1,6 v_{g1}.$$

Pošto je struja kroz otpornost R_2 praktično nula, to je

$$v_i = v_2 \approx 0.$$

e) Pošto je u odsustvu promenljivih napona

$$V_{I1} = V_{I2} = V_{CC}/2 \text{ i } V_{I3} = V_{I4} = V_{CC}/2,$$

maksimalna amplituda napona koji se može poslati na liniju određena je ulaskom operacionog pojačavača A_1 u zasićenje

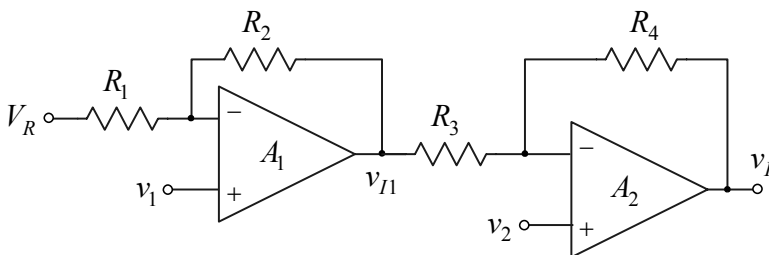
$$V_{i1m\max} = V_{CC}/2 \Rightarrow V_{xm\max} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} 2V_{i1m\max} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} = 3,125 \text{ V}.$$

f) Struja kratkospojene linije je

$$i_{XKS} = \frac{1}{R_2} 2 \frac{R_4}{R_3} v_{g1},$$

dok je njena maksimalna vrednost

$$i_{XKS} = \frac{2V_{i1m\max}}{R_2} = 13,9 \text{ mA}.$$



Slika 3.7

3.7. U kolu instrumentacionog pojačavača sa slike 3.7 operacioni pojačavači se napajaju iz jedne baterije $V_{CC} = 5 \text{ V}$ i može se smatrati da su idealni, dok je $V_R = V_{CC}/2$ i $R_2/R_1 = R_4/R_3$.

a) Odrediti zavisnost $v_I = f(V_R, v_D)$, $v_D = v_2 - v_1$.
Smatrati da su operacioni

pojačavači izvan zasićenja.

b) Ako je diferencijalno pojačanje pojačavača $a_d = v_i/v_d = 10$, a izlazi operacionih pojačavača se nalaze u opsegu $V_{OL} \leq v_{IOP} \leq V_{OH}$, $V_{OL} = 0,1 \text{ V}$ i $V_{OH} = V_{CC} - 0,1 \text{ V}$, odrediti opseg napona srednje vrednosti ulaznih napona $v_1 = v_2 = V$ u kome su operacioni pojačavači izvan zasićenja.

Rešenje:

a) Primenom principa superpozicije dobija se

$$v_I = V_R + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{-R_4}{R_3} v_1 + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_2 = V_R + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (v_2 - v_1), \quad v_D = v_2 - v_1.$$

b) Prema rezultatu iz prethodne tačke diferencijalno pojačanje je

$$a_d = 1 + R_2 / R_1 \Rightarrow R_2 / R_1 = a_d - 1.$$

Napon na izlazu operacionog pojačavača A_1 je

$$v_{I1} = -\frac{R_1}{R_2} V_R + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_1 = -\frac{V_R}{a_d - 1} + \frac{a_d}{a_d - 1} v_1.$$

Maksimalna vrednost napona v_{I1} je $v_{I1\max} = V_{OH}$, odakle se dobija

$$v_{1\max} = \frac{V_{OH}(a_d - 1) + V_R}{a_d} = 4,66 \text{ V}.$$

Minimalna vrednost napona v_{I1} je $v_{I1\min} = V_{OL}$, odakle se dobija

$$v_{1\min} = \frac{V_{OL}(a_d - 1) + V_R}{a_d} = 0,34 \text{ V}.$$

Izlazni napon zavisi samo od razlike ulaznih napona

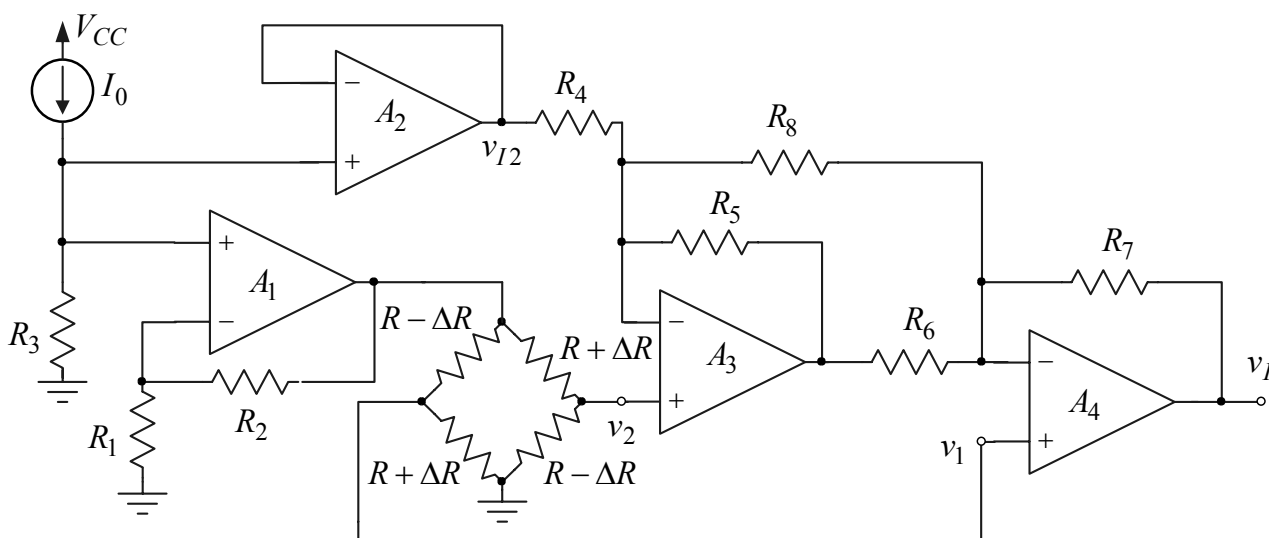
$$v_I = V_R = V_{CC} / 2,$$

odakle se zaključuje da je

$$0,34 \text{ V} \leq V \leq 4,66 \text{ V}, \quad V = v_1 = v_2.$$

3.8. Na slici 3.8 je prikazano kolo instrumentacionog pojačavača na čijem se ulazu nalazi otporni most. Operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim i napajaju se iz jedne baterije $V_{CC} = 5 \text{ V}$, dok je: $I_0 = 100 \mu\text{A}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5,8 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_{4-7} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 100 \Omega$ i $R = 4 \text{ k}\Omega$.

- Pokazati da se izlazni napon može predstaviti u obliku $v_I = k_1(v_1 - v_2) + k_2$ i odrediti konstante k_1 i k_2 .
- Odrediti promenu otpornosti ΔR koja izaziva promenu izlaznog napona od $\Delta v_I = 2,5 \text{ V}$.



Slika 3.8

Rešenje:

a) Primenom principa superpozicije dobija se

$$v_I = v_I(v_{I2})\Big|_{v_1=v_2=0} + v_I(v_1)\Big|_{v_2=v_{I2}=0} + v_I(v_2)\Big|_{v_1=v_{I2}=0}.$$

Pojačavač A_2 je jedinični pojačavač, pa je

$$v_{I2} = R_3 I_0 = 0,5 \text{ V}.$$

Kada deluje samo generator v_{I2} ($v_1 = v_2 = 0$), kroz R_T ne protiče struja, pa je

$$v_I (v_{I2}) \Big|_{v_1=v_2=0} = v_{I2}.$$

Kada je $v_2 = v_{I2} = 0$, tada važi

$$v_{I3} = -\frac{R_5}{R_8} v_1, \quad \frac{v_{I3} - v_1}{R_6} = \frac{v_1 - v_I}{R_7} + \frac{v_1}{R_8},$$

odakle se dobija

$$v_I = v_I (v_1) \Big|_{v_2=v_{I2}=0} = v_1 \left(1 + \frac{R_7}{R_6} + \frac{R_7}{R_8} + \frac{R_7 R_5}{R_6 R_8} \right) = 2v_1 \left(1 + \frac{R_7}{R_8} \right), \quad R_{4-6} = R_7.$$

Kada je $v_1 = v_{I2} = 0$, tada važi

$$v_{I3} = \left(1 + \frac{R_5}{R_8 \parallel R_4} \right) v_2, \quad \frac{v_{I3} + v_2}{R_6} = -\frac{v_I}{R_7},$$

a posle svodenja postaje

$$v_I = v_I (v_2) \Big|_{v_1=v_{I2}=0} = -v_2 \left(1 + \frac{R_7}{R_8} + \frac{R_5 (R_8 + R_4)}{R_8 R_4} \right) = -2v_2 \left(1 + \frac{R_7}{R_8} \right).$$

Sređujući prethodne izraze dobija se

$$v_I = v_{I2} + 2(v_1 - v_2) \left(1 + \frac{R_7}{R_8} \right),$$

odakle se dobijaju koeficijenti

$$k_1 = 2 \left(1 + \frac{R_7}{R_8} \right) = 202 \quad \text{i} \quad k_2 = v_{I2} = 0,5 \text{ V}.$$

Jednosmerni izlazni napon $V_I = v_{I2} = 0,5 \text{ V}$ se uvodi zbog jednostrukog napajanja operacionih pojačavača.

b) Usled promene otpornosti ΔR dolazi do promene razlike ulaznih napona

$$v_1 - v_2 = \frac{R + \Delta R}{2R} v_{I1} - \frac{R - \Delta R}{2R} v_{I1} = \frac{\Delta R}{R} v_{I1}.$$

Operacioni pojačavač A_1 sa strujnim izvorom I_0 i otpornostima R_{1-3} čini naponski izvor v_{I1} koji napaja otporni most. Njegov napon je

$$v_{I1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) R_3 I_0 = 3,4 \text{ V}.$$

Svođenjem se dobija vrednost izlaznog napona u funkciji promene otpornosti ΔR

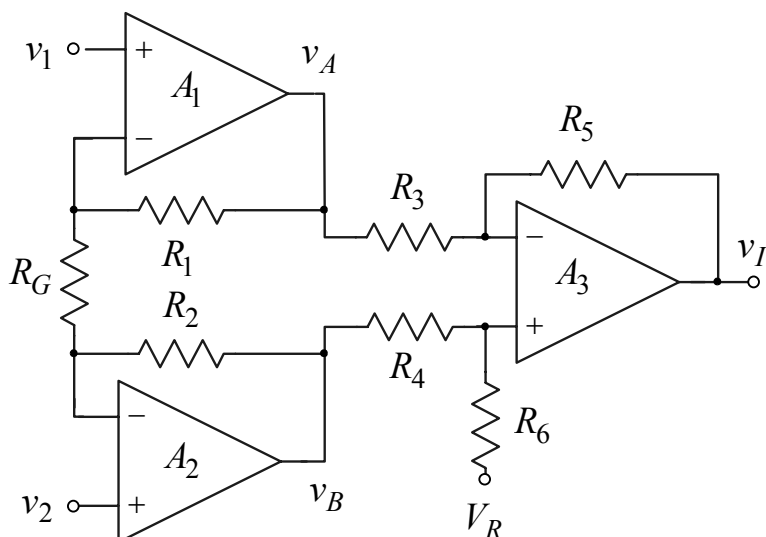
$$v_I = v_{I2} + \frac{\Delta R}{R} R_3 I_0 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) 2 \left(1 + \frac{R_7}{R_8} \right),$$

odakle je

$$\Delta R = R \frac{\Delta v_I - v_{I2}}{R_3 I_0 (1 + R_2 / R_1) 2 (1 + R_7 / R_8)} = 11,65 \Omega.$$

3.9. U kolu instrumentacionog pojačavača sva tri operaciona pojačavača se napajaju se iz jedne baterije za napajanje $V_{CC} = 5 \text{ V}$, imaju izlazni napon koji se može nalaziti u opsegu $V_{OL} \leq v_{IOP} \leq V_{OH}$, $V_{OL} = 0,1 \text{ V}$, $V_{OH} = V_{CC} - 0,1 \text{ V}$, dok im se sve ostale karakteristike mogu smatrati idealnim. Poznato je: $V_R = V_{CC} / 2$ i $R_{1-6} = 50 \text{ k}\Omega$.

a) Odrediti zavisnost $v_I = f(V_R, v_D)$, $v_D = v_2 - v_1$. Smatrati da su svi operacioni pojačavači u linearnom režimu rada.



Slika 3.9

b) Odrediti otpornost R_G tako da diferencijalno pojačanje bude $a_d = v_i / v_d = 100$.

c) Ako je $V = (v_1 + v_2) / 2 = 1V$, odrediti opseg diferencijalnog ulaznog napona $v_{D\min} \leq v_D \leq v_{D\max}$ u kome su svi operacioni pojačavači u linearnom režimu rada.

Rešenje:

a) Kolo je linearno, pa se može primeniti princip superpozicije

$$v_I = f(V_R) \Big|_{v_1=v_2=0} + g(v_1, v_2) \Big|_{V_R=0}.$$

Kada u kolu deluje samo V_R , tada je

$$v_I = V_R \frac{R_4}{R_4 + R_6} \frac{R_3 + R_5}{R_3} = V_R.$$

Funkciju $g(v_1, v_2) \Big|_{V_R=0}$ ćemo naći pomoću principa superpozicije napona srednje vrednosti

$v_S = (v_1 + v_2) / 2$ i diferencijalnog napona $v_D = v_2 - v_1$.

Kada deluje samo napon srednje tada je

$$v_1 = v_2 = v_S \Rightarrow v_{A2} = v_{A1} = v_S \Rightarrow i_{RG} = 0 \Rightarrow v_A = v_B = v_S \Rightarrow$$

$$v_I = v_S \left(-\frac{R_5}{R_3} + \frac{R_6}{R_6 + R_4} \frac{R_3 + R_5}{R_3} \right) = 0.$$

Pri diferencijalnoj pobudi je

$$v_1 = -\frac{v_D}{2}, v_2 = \frac{v_D}{2} \Rightarrow i_{RG} = \frac{v_{A1} - v_{A2}}{R_G} = -\frac{v_D}{R_G} \Rightarrow$$

$$v_A = v_1 + R_1 i_{RG} = -\frac{v_D}{2} - \frac{R_1}{R_G} v_D = -\frac{v_D}{2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) \text{ i}$$

$$v_B = v_2 - R_2 i_{RG} = \frac{v_D}{2} + \frac{R_2}{R_G} v_D = \frac{v_D}{2} \left(1 + \frac{2R_2}{R_G} \right) = -v_A \Rightarrow$$

$$v_I = -\frac{R_5}{R_3} v_A + \frac{R_6}{R_6 + R_4} \frac{R_3 + R_5}{R_3} v_B = \frac{v_D}{2} \left[\frac{R_5}{R_3} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) + \left(1 + \frac{2R_2}{R_G} \right) \frac{R_6}{R_6 + R_4} \frac{R_3 + R_5}{R_3} \right] \Rightarrow$$

$$v_I = \frac{v_D}{2} \frac{R_5}{R_3} \left[\left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) + \left(1 + \frac{2R_2}{R_G} \right) \right] \Rightarrow v_I = v_D \frac{R_5}{R_3} \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G} \right) \Rightarrow$$

$$v_I = v_D \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G} \right).$$

Svođenjem se dolazi do zavisnosti trenutne vrednosti izlaznog napona u funkciji pobude i referentnog napona

$$v_I = V_R + v_D \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G} \right).$$

b) Na osnovu rezultata iz prethodne tačke je

$$a_d = \frac{dv_I}{dv_D} = \frac{v_i}{v_d} = 1 + \frac{2R_1}{R_G},$$

odakle se dobija potrebna otpornost

$$R_G = \frac{2R_1}{a_d - 1} = 1,01 \text{ k}\Omega.$$

c) Izlazni napon ne zavisi od srednje vrednosti ulaznih napona, ali naponi na izlazima ulaznih operacionih pojačavača zavise

$$v_A = V - \frac{v_D}{2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) = V - \frac{a_d}{2} v_D \text{ i } v_B = V + \frac{v_D}{2} \left(1 + \frac{2R_2}{R_G} \right) = V + \frac{a_d}{2} v_D.$$

Minimalna vrednost napona v_B određuje minimalnu vrednost diferencijalnog napona

$$v_B = v_{B\min} = V_{OL} = V + \frac{a_d}{2} v_{D\min} \Rightarrow v_{D\min} = 2 \frac{V_{OL} - V}{a_d} = -18 \text{ mV},$$

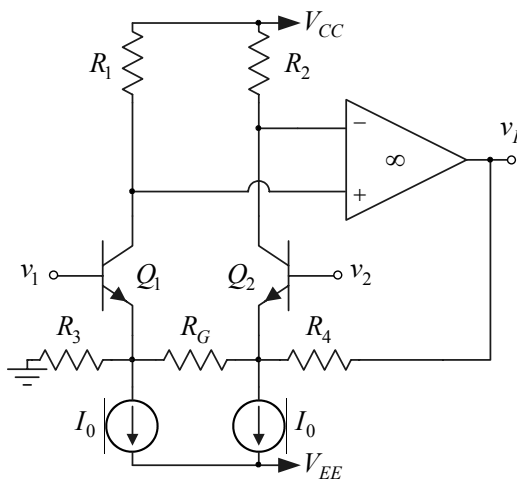
dok je maksimalna vrednost diferencijalnog napona određena minimalnom vrednošću napona v_A ,

$$v_A = v_{A\min} = V_{OL} = V - \frac{a_d}{2} v_{D\max} \Rightarrow v_{D\max} = 2 \frac{V - V_{OL}}{a_d} = 18 \text{ mV}.$$

Ekstremne vrednosti izlaznog napona su:

$$v_{I\max} = V_R + a_d v_{D\max} = 4,3 \text{ V} \text{ i } v_{I\min} = V_R + a_d v_{D\min} = 0,7 \text{ V},$$

što znači da je operacioni pojačavač A_3 izvan zasićenja.



Slika 3.10

3.10. U instrumentacionom pojačavaču sa slike 3.10 tranzistori su uparenih karakteristika, a operacioni pojačavač je idealan. Poznato je: $V_{BE} = 0,6 \text{ V}$, $\beta_F \rightarrow \infty$, $V_{CES} = 0,2 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_4 = 50 \text{ k}\Omega$, $I_0 = 1 \text{ mA}$, $V_{CC} = -V_{EE} = 5 \text{ V}$.

- Odrediti otpornost R_G tako da bude $v_I = kv_D$, $k = 100$, $v_D = v_2 - v_1$.
- Ako je $v_1 = v_2 = V$, odrediti opseg vrednosti napona $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$ u kojem su oba tranzistora u direktnom aktivnom režimu, a operacioni pojačavač izvan zasićenja. Smatrati da su strujni izvori I_0 realizovani kao prosta strujna ogledala.

Rešenje:

a) S obzirom da je u kolu ostvarena negativna reakcija, to je

$$v^+ = v^- \Rightarrow i_{C1} = i_{C2} \Rightarrow v_{BE1} = v_{BE2}.$$

Primenom I Kirhofovog zakona dobija se

$$\frac{v_1 - v_{BE1}}{R_3} + i_{RG} + I_0 - i_{C1} = 0 \text{ i } \frac{v_2 - v_{BE2} - v_I}{R_4} - i_{RG} + I_0 - i_{C2} = 0.$$

Budući da je

$$i_{RG} = \frac{v_1 - v_{BE1} - (v_2 - v_{BE2})}{R_G} = \frac{v_1 - v_2}{R_G},$$

oduzimanjem prethodne dve jednakosti dobija se

$$\frac{v_2 - v_1}{R_3} + \frac{2}{R_G}(v_2 - v_1) = \frac{v_I}{R_3}, \quad R_3 = R_4,$$

odakle se lako dobija eksplicitan oblik

$$v_I = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right)(v_2 - v_1) = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right)v_D.$$

Smenom brojnih vrednosti dobija se potrebna otpornost

$$R_G = \frac{2R_3}{k-1} = 1,01 \text{ k}\Omega.$$

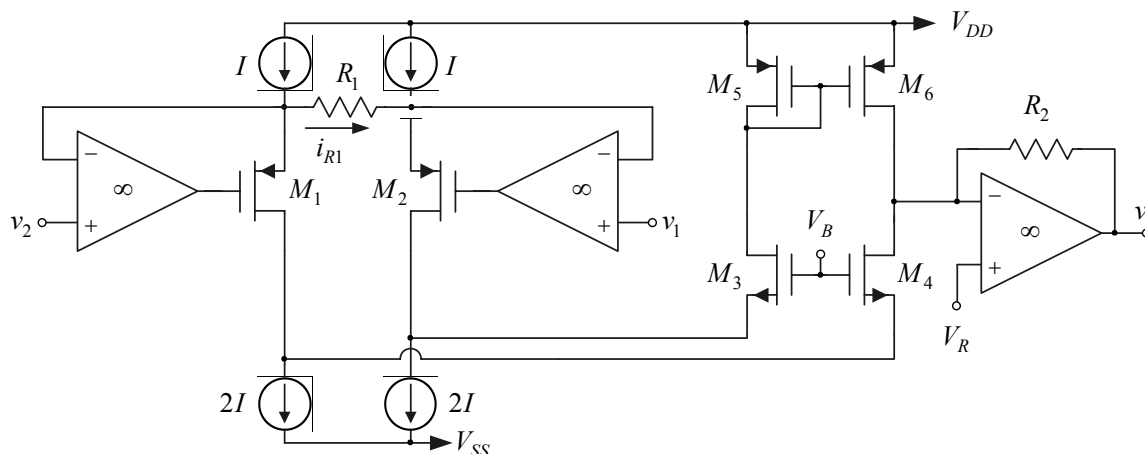
b) Maksimalna vrednost napona V određena je ulaskom bipolarnih tranzistora u zasićenje. Tada je

$$V_{\max} = V_{CC} - R_{1,2}I_0 - V_{CES} + V_{BE1,2} = 3,4 \text{ V}.$$

Minimalna vrednost napona V određena je ulaskom tranzistora u strujnom ogledalu I_0 u zasićenje

$$V_{\min} = V_{EE} + V_{CES} + V_{BE1,2} = -4,2 \text{ V}.$$

3.11. U kolu jednog CMOS instrumentacionog pojačavača, slika 3.11, svi tranzistori su u zasićenju, operacioni pojačavači su izvan zasićenja, dok je $(W/L)_1 = (W/L)_2$, $(W/L)_3 = (W/L)_4$, $(W/L)_5 = (W/L)_6$, $V_{TN} = -V_{TP}$ i $\lambda_p = \lambda_n \rightarrow 0$. Odrediti zavisnost $v_I = f(v_D)$, $v_D = v_2 - v_1$.



Slika 3.11

Rešenje:

Prema slici 3.11 je

$$v_I = V_R + R_2(i_{D4} - i_{D6}), \quad i_{D6} = i_{D5} = i_{D3} \Rightarrow v_I = V_R + R_2(i_{D4} - i_{D3}).$$

Primenom I Kirhofovog zakona dobija se

$$i_{D3} + i_{D2} = 2I, \quad i_{D4} + i_{D1} = 2I \Rightarrow i_{D4} - i_{D3} = i_{D2} - i_{D1},$$

a budući da je

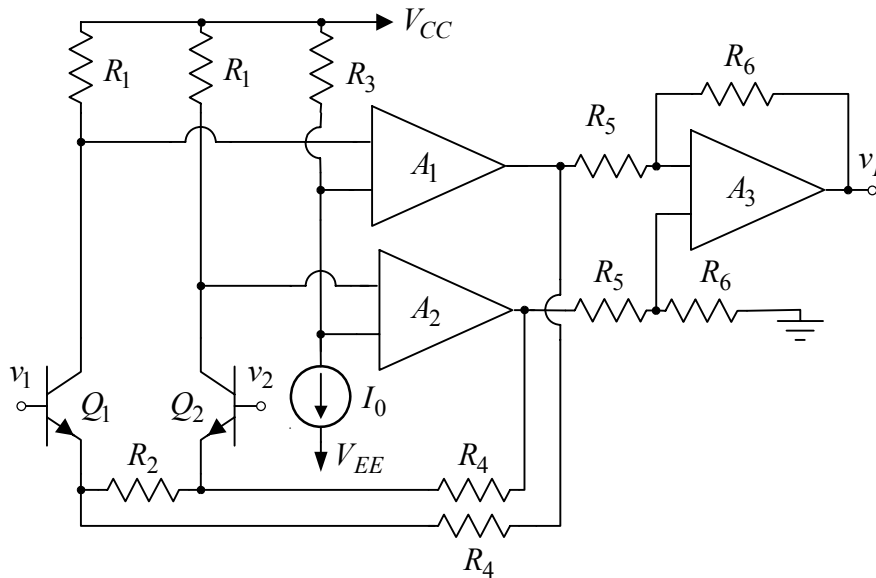
$$i_{D2} = I + i_{R1}, \quad i_{D1} = I - i_{R1}, \quad i_{R1} = \frac{v_2 - v_1}{R_1} \Rightarrow i_{D2} - i_{D1} = 2i_{R1} = 2 \frac{v_2 - v_1}{R_1},$$

odakle se konačno dobija da je

$$v_I = V_R + \frac{2R_2}{R_1}(v_2 - v_1) = v_I = V_R + \frac{2R_2}{R_1}v_D.$$

3.12. U kolu instrumentacionog pojačavača sa slike 3.12 operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim, a napajaju se iz baterija $V_{CC} = -V_{EE} = 12 \text{ V}$. Bipolarni tranzistori su identičnih karakteristika sa $\beta_F = \beta_0 = 200$, $V_{CES} \approx 0$ i $I_S = 10^{-16} \text{ A}$, a poznato je: $V_T = 25 \text{ mV}$, $I_0 = 100 \mu\text{A}$,

$R_1 = R_4 = 100\text{k}\Omega$, $R_2 = 10,525\text{k}\Omega$, $R_3 = R_5 = 20\text{k}\Omega$ i $R_6 = 100\text{k}\Omega$.



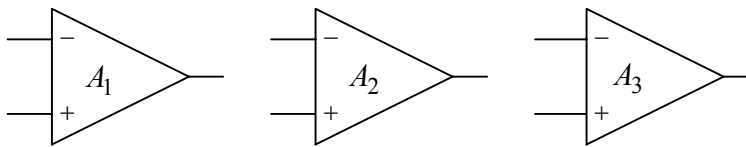
Slika 3.12

- Odrediti polaritet ulaznih priključaka operacionih pojačavača tako da u kolu bude ostvarena negativna povratna sprega.
- Pod uslovom iz tačke a), smatrajući da svi tranzistori rade u direktnom aktivnom režimu, odrediti zavisnost $v_I = f(v_D)$, $v_D = v_2 - v_1$.
- Ako je $v_2 = -v_1$, odrediti maksimalnu vrednost pobudnog

napona $v_{2\max}$ za koju važi zavisnost iz tačke a).

- Ako je $v_1 = v_2 = V$, odrediti opseg napona $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$ u kojem u kolu postoji negativna povratna sprega.
- Za $v_1 = v_2 = 0$, odrediti pojačanje napona smetnji ΔV_{CC} koje potiču od nestabilisanog izvora za napajanje $V_{CC} \gg \Delta V_{CC}$, $a_{ps} = v_i / \Delta V_{CC}$.

Rešenje:



Slika 3.12a

- Iz uslova da je po kružnom toku signala u kolu svakog operacionog pojačavača fazni stav $(2k+1)\pi, k \in Z$ dobija se da je polaritet ulaznih priključaka kao na slici 3.12a.
- Pošto je u kolu ostvarena

negativna reakcija, to je

$$v_{A2}^+ = v_{A1}^+ = v_{A2}^- = v_{A1}^- = V_{CC} - R_3 I_0 = 10\text{V}.$$

Na osnovu prethodnog zaključka je

$$R_1 i_{C1} = R_1 i_{C2} = R_3 I_0 \Rightarrow i_{C1} = i_{C2} = \frac{R_3}{R_1} I_0 \Rightarrow v_{BE1} = v_{BE2} = V_{BE} = V_T \ln \frac{i_{C1}}{I_S} \approx 0,65\text{V}.$$

Primenom Kirhofovih zakona dobija se

$$v_{IA1} = v_1 - V_{BE} - R_4 \left(\frac{R_3}{R_1} I_0 - \frac{v_1 - v_2}{R_2} \right) \text{ i } v_{IA2} = v_2 - V_{BE} - R_4 \left(\frac{R_3}{R_1} I_0 + \frac{v_1 - v_2}{R_2} \right),$$

a posle sređivanja postaje

$$v_{IA1} - v_{IA2} = (v_1 - v_2) \left(1 + \frac{2R_4}{R_2} \right).$$

Pošto operacioni pojačavač A_3 sa otpornicima R_5 i R_6 čini diferencijalni pojačavač čije je naponsko pojačanje

$$a_3 = \frac{v_I}{v_{IA2} - v_{IA1}} = \frac{R_6}{R_5},$$

smenom se dobija da je

$$v_I = \frac{R_6}{R_5} \left(1 + \frac{2R_4}{R_2} \right) (v_2 - v_1) = 100v_D.$$

c) Maksimalna vrednost pobudnog signala, s obzirom na veliko pojačanje od ulaza do izlaza, određena je ulaskom u zasićenje izlaznog operacionog pojačavača A_3 ,

$$v_{IA3\max} = V_{CC} = 2 \cdot v_{2\max} \cdot 100 \Rightarrow v_{2\max} = \frac{V_{CC}}{200} = 60\text{mV}.$$

d) Kada je na ulazu napon srednje vrednosti, $v_1 = v_2 = V$, sve dok u kolu postoji negativna povratna sprega, odnosno dok su svi tranzistori u direktnom aktivnom režimu, struje u kolu jednake su strujama u mirnoj radnoj tački. Ovo znači da je struja kroz otpornik R_2 nula.

Kada je na ulazu minimalna vrednost napona V operacioni pojačavači A_1 i A_2 nalaze se na granici negativnog zasićenja

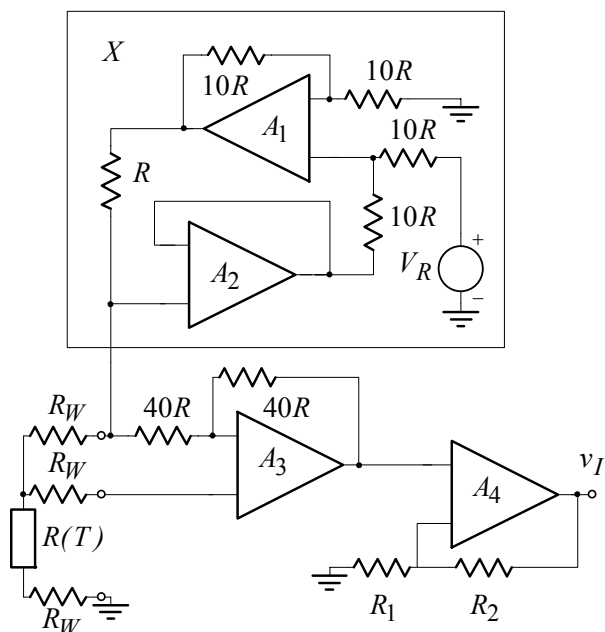
$$v_{IA1\min} = v_{IA2\min} = V_{EE} \Rightarrow V_{\min} = V_{EE} + R_4 \frac{R_3}{R_1} I_0 + V_{BE} = -9,35\text{V}.$$

Maksimalna vrednost napona V određena je ulaskom diferencijalnog para tranzistora Q_1, Q_2 u zasićenje

$$V_{\max} = V_{CC} - R_3 I_0 - V_{CES} + V_{BE} = 10,65\text{V}.$$

e) Kada je $v_1 = v_2 = 0$, a na mestu baterije za napajanje deluje generator smetnje ΔV_{CC} , ukupna vrednost napona na izlazu može se dobiti primenom principa superpozicije. Kada deluje promenljivi generator ΔV_{CC} , negativna povratna sprega u kolu pojačavača A_1 i A_2 učiniće da su struje kolektora u modelu za male signale nula (Earlyjev efekat je zanemaren)

$$i_{c1}(\Delta V_{CC}) = i_{c2}(\Delta V_{CC}) = 0 \Rightarrow a_{ps} = v_i / \Delta V_{CC} = 0.$$



3.13. (za vežbanje) U kolu sa slike 3.13 svi operacioni pojačavači se mogu smatrati idealnim. Poznato je: $R = 2,49\text{k}\Omega$, $R_1 = 909\Omega$, $R_2 = 10,2\text{k}\Omega$, a otpornost $R(T)$ je otpornost koja se menja sa temperaturom.

a) Odrediti polaritet ulaznih priključaka operacionih pojačavača A_{1-4} tako da u kolu bude ostvarena negativna reakcija.

b) Odrediti ulogu bloka X sa slike, a zatim i zavisnost izlaznog napona od parametara kola i senzorske otpornosti $R(T)$.

c) Ako je $R_W \ll 40R$ pokazati da izlazni napon ne zavisi od otpornosti žice R_W kojom je senzorska otpornost $R(T)$ priključena na ulaz kola.

d) Ako je poznato da je pri $T_1 = 73\text{K}$,

$R(T_1) = 18\Omega$, a pri $T_2 = 933\text{K}$, $R(T_2) = 333\Omega$, pod uslovom iz tačke c) odrediti promenu napona na izlazu ako se temperatura ambijenta u kome se nalazi senzorski otpornik promeni od $T = T_1$ do $T = T_2$.