

VEŽBA 3

Realni parametri operacionog pojačavača

1. Uticaj pojačanja u otvorenoj sprezi na pojačanje u zatvorenoj sprezi

Zadatak 1: Izvesti funkciju zavisnosti pojačanja invertujućeg pojačavača od pojačanja operacionog pojačavača. Uporediti vrednost pojačanja invertujućeg pojačavača za slučaj kada pojačanje operacionog pojačavača ima realnu vrednost, ako ona iznosi $A_{op} = 10^5$, sa njegovim pojačanjem kada se operacioni pojačavač smatra idealnim, ukoliko:

- a) $R_1 = 100 \Omega, R_2 = 1 k\Omega$
- b) $R_1 = 100 \Omega, R_2 = 100 k\Omega$

Rešenje:

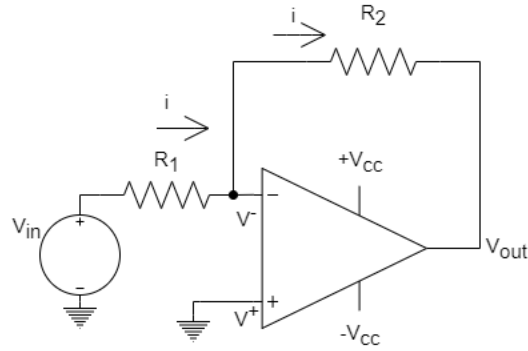
Potrebno je izvesti izraz za pojačanje zatvorene spege kada je pojačanje otvorene beskonačno veliko, i u slučaju kada pojačanje otvorene sprege ima realnu vrednost. Razliku između ove dve veličine analiziraćemo za slučaj kada je odnos otpornika jednak 10 (slučaj a) i kada je jednak 1000 (slučaj b).

Pojačanje idealnog operacionog pojačavača teži beskonačnosti, $A_{op} \rightarrow \infty$. U slučaju kada je invertujući pojačavač (Slika 1) baziran na operacionom pojačavaču koji se smatra idealnim, može se koristiti činjenica da su naponi na njegovim ulaznim priključcima međusobno jednaki: $V^+ = V^-$. Na osnovu ovoga, izvodi se pojačanje invertujućeg pojačavača kao:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1},$$

Pošto ćemo nadalje analizirati zavisnost faktora pojačanja od pojačanja otvorene sprege, da bismo se rešili predznaka, izrazićemo i celo pojačanje kao apsolutnu vrednost količnika amplitude izlaznog i ulaznog signala.

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \left| -\frac{R_2}{R_1} \right|.$$



Slika 1 – Invertujući pojačavač.

Kada pojačanje operacionog pojačavača ima realne vrednosti, više se ne može smatrati da su naponi na njegovim ulaznim priključcima međusobno jednaki, odnosno, sada važi: $V^+ \neq V^-$. Izraz za pojačanje invertujućeg pojačavača se sada izvodi pod novim uslovima, i biće drugačiji od izraza koji važi za slučaj kada je upotrebljeni operacioni pojačavač idealan.

Kreće se od jednačine koja opisuje rad operacionog pojačavača, tj. zavisnost izlaznog od diferencijalnog ulaznog napona:

$$V_{out} = A_{op} V_{diff} = A_{op} (V^+ - V^-).$$

Neinvertujući ulaz je vezan na masu, pa je $V^+ = 0V$, dok, se napon na invertujućem ulazu može izraziti primenom principa superpozicije i upotrebom jednačine naponskog razdelnika na sledeći način:

$$V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}.$$

Na osnovu navedenog, napon na izlazu kola se može izraziti kao:

$$V_{out} = A_{op} (V^+ - V^-) = A_{op} \left(0V - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out} \right).$$

Odnosno, naponsko pojačanje se može izraziti kao:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{A_{op} R_2}{R_1 + R_2 + A_{op} R_1},$$

odnosno:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{A_{op}} + R_1}.$$

Na osnovu poslednjeg izraza može se dobiti i izraz za pojačanje invertujućeg pojačavača za slučaj kada $A_{op} \rightarrow \infty$:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1},$$

čime se potvrđuje ispravnost prethodnog postupka.

Za slučaj pod a), kada $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 1 k\Omega$:

- pojačanje invertujućeg pojačavača pod pretpostavkom da je operacioni idealan iznosi:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \left| -\frac{1 k\Omega}{100 \Omega} \right| = \mathbf{10} \frac{V}{V},$$

- dok pojačanje u nekom realnom slučaju kada da je $A_{op} = 10^5$, iznosi:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \left| -\frac{1 k\Omega}{\frac{100 \Omega + 1 k\Omega}{10^5} + 100 \Omega} \right| = \mathbf{9.99} \frac{V}{V}.$$

Pošto je prvo pojačanje izvedeno pod pretpostavkom da je operacioni idealan, a drugi pod pretpostavkom da ima realno pojačanje u otvorenoj sprezi, njihova razlika bi predstavljala grešku u proceni pojačanja u zatvorenoj sprezi koja je posledica pretpostavke da pojačanje operacionog u otvorenoj sprezi teži beskonačnosti. Greška može biti izražena kao apsolutna, i relativna, na sledeći način:

$$\Delta(A_{inv})_{A_{op} \rightarrow \infty} = \left| \left| \frac{V_{out}}{V_{in}}(R_1, R_2, A_{op}) \right| - \left| \frac{V_{out}}{V_{in}}(R_1, R_2) \right| \right| = \left| 9.99 \frac{V}{V} - 10 \frac{V}{V} \right| = 0.01 \frac{V}{V}$$

$$\rho(A_{inv})_{A_{op} \rightarrow \infty} = \frac{\Delta(A)_{A_{op} \rightarrow \infty}}{A(R_1, R_2, A_{op})} \cdot 100\% = \frac{0.01}{9.99} \cdot 100\% = 0.1\%$$

Za slučaj pod b), kada $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 100 k\Omega$:

- pojačanje invertujućeg pojačavača pod pretpostavkom da je operacioni idealan iznosi:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \left| -\frac{100 k\Omega}{100 \Omega} \right| = \mathbf{1000} \frac{V}{V},$$

- dok pojačanje u nekom realnom slučaju kada je $A_{op} = 10^5$, iznosi:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \left| -\frac{100 k\Omega}{\frac{100 \Omega + 100 k\Omega}{10^5} + 100 \Omega} \right| = \mathbf{990.09} \frac{V}{V}.$$

Apsolutna i relativna greška su:

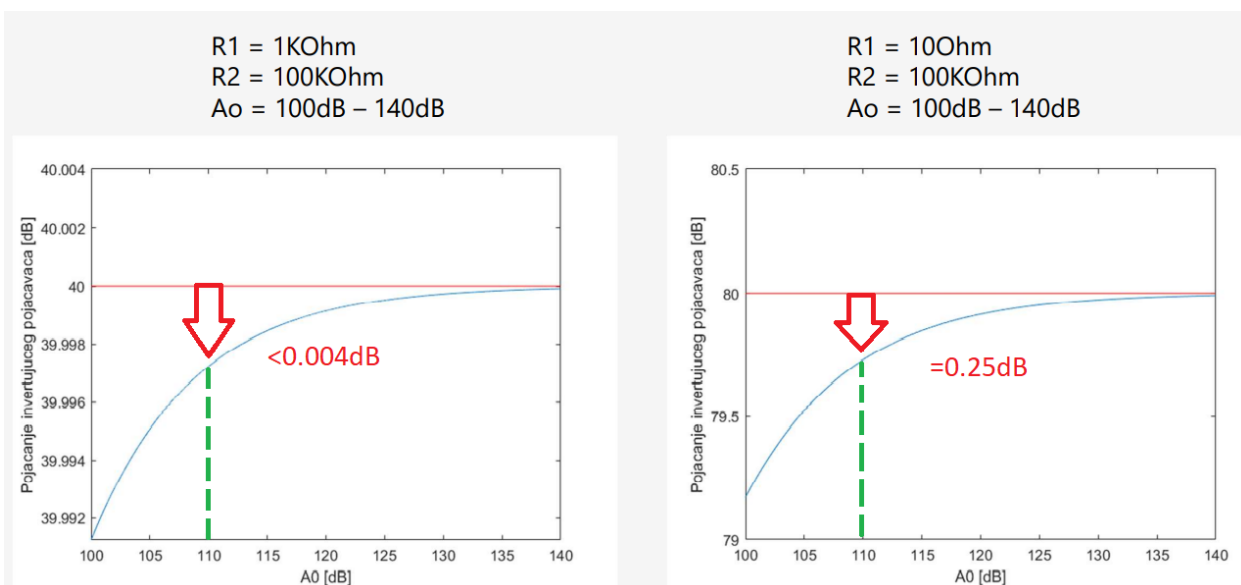
$$\Delta(A_{inv})_{A_{op} \rightarrow \infty} = \left| \left| \frac{V_{out}}{V_{in}}(R_1, R_2, A_{op}) \right| - \left| \frac{V_{out}}{V_{in}}(R_1, R_2) \right| \right| = \left| 990.09 \frac{V}{V} - 1000 \frac{V}{V} \right| = 9.91 \frac{V}{V}$$

$$\rho(A_{inv})_{A_{op} \rightarrow \infty} = \frac{\Delta(A)_{A_{op} \rightarrow \infty}}{A(R_1, R_2, A_{op})} \cdot 100\% = \frac{9.91}{990.09} \cdot 100\% = 1\%$$

Možemo da zaključimo da i apsolutna i relativna greška u proceni pojačanja kao idealnog rastu sa povećanjem odnosa otpornosti R_2 i R_1 .

Ovo donekle potvrđuju i grafici sa Slike 2 – poređenjem apsolutne greške za istu vrednost pojačanja u otvorenoj sprezi može zaključiti da ona raste sa porastom odnosa otpornosti R_2 i R_1 .

Sa Slike 2 je takođe očigledno da će apsolutna greška (razlika između realnog i idealnog pojačanja u zatvorenoj sprezi) opadati sa porastom pojačanja u otvorenoj sprezi (jer u slučaju kada bi $A_{op} \rightarrow \infty$, razlika bi bila jednaka nuli).



Slika 2 – Analiza razlike između idealnog i realnog pojačanja invertujućeg pojačavača od pojačanja u otvorenoj sprezi i upotrebljenih otpornosti u kolu.

Na osnovu navedene analize, može se zaključiti sledeće: u slučaju kada su potrebna precizna izračunavanja, a predviđena pojačanja u zatvorenoj sprezi su velika (**u slučaju pod b, odnos otpornosti R_2 i R_1 je sto puta veći nego u slučaju pod a**)), ukoliko pojačanje u otvorenoj sprezi nema maksimalne moguće vrednosti (već npr. neke sa početka intervala mogućih vrednosti, kao što je 100dB), preporučljivo je koristiti izraz za realno pojačanje kola u zatvorenoj sprezi.

Zadatak 2: Na osnovu grafika sa Slike 2, za slučaj $A_{op} = 100dB$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$ odrediti apsolutnu grešku u proceni amplitude signala na izlazu kola u slučaju da se pretpostavi da je pojačanje operacionog beskonačno veliko. Na ulazu kola je signal amplitude 1mV.

Rešenje:

- a) Kada je $A_{op} = 100dB$, sa grafika se očitava da je približna vrednost pojačanja u zatvorenoj sprezi jednaka 79.2 dB. Pošto su ova pojačanja dobijena prema izrazu:

$$A_{dB} = 20 \log_{10}(A),$$

pojačanje u otvorenoj sprezi izraženo u $\frac{V}{V}$ je, prema tome jednako:

$$A_{op} = 10^5 \frac{V}{V},$$

dok je pojačanje u zatvorenoj jednako:

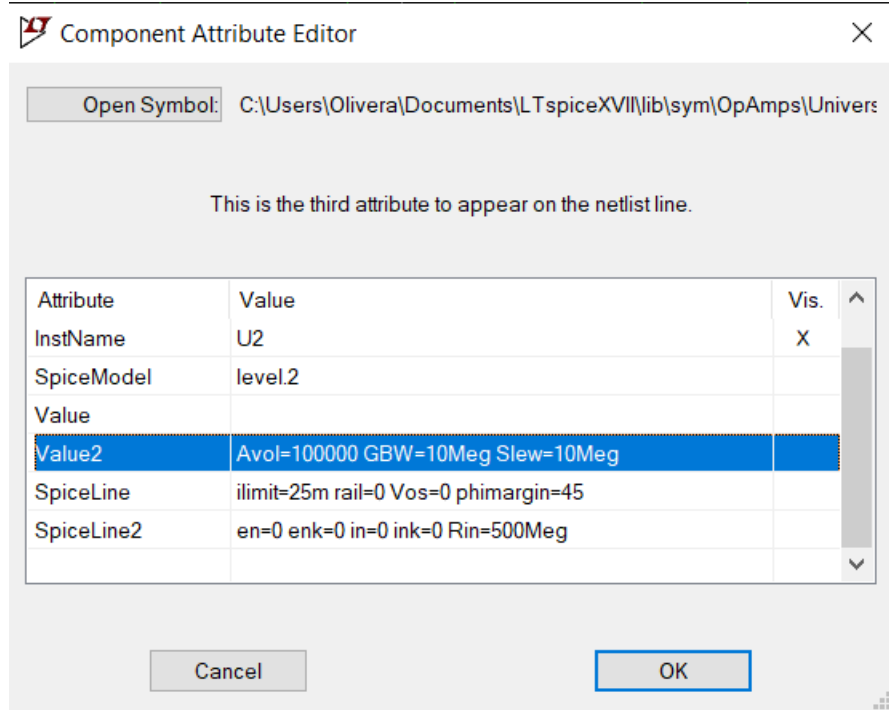
$$|A_{inv re}| = 10^{\frac{79.2}{20}} = 10^{3.96} \frac{V}{V} = 9120 \frac{V}{V}.$$

Isto tako, „idealno“ pojačanje (dobijeno pod pretpostavkom da $A_{op} \rightarrow \infty$), čitamo sa grafika u vrednosti od 80dB:

$$|A_{inv id}| = 10^{\frac{80}{20}} = 10k \frac{V}{V},$$

a možemo ga izraziti i pomoću odnosa otpornosti R_2 i R_1 .

Da bismo podesili vrednost pojačanja operacionog pojačavača u LTSpice-u, treba da upotrebimo univerzalni operacioni pojačavač. Desnim klikom na komponentu otvara se prozor kojim pristupamo parametrima operacionog pojačavača (Slika 3).

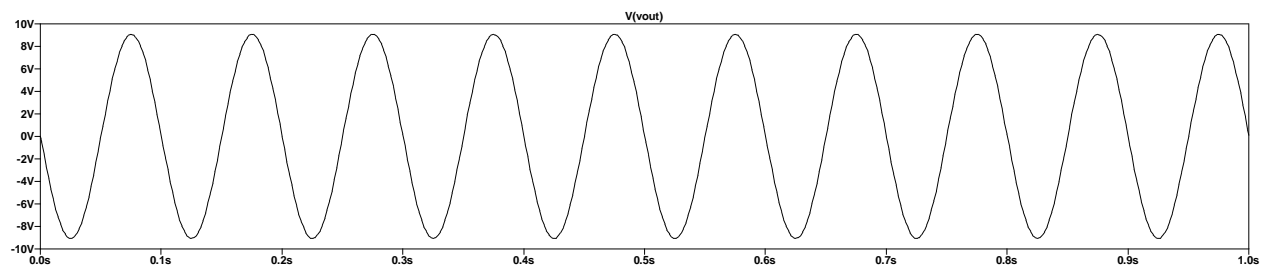


Slika 3 – Podešavanje vrednosti pojačanja operacionog u otvorenoj sprezi.

Pošto je na ulazu kola sastavljenog prema zahtevima u zadatku signal amplitude 1mV, a kolo ima faktor pojačanja u iznosu od (otprilike, jer je pročitano sa grafika) $9120 \frac{V}{V}$, na izlazu se očekuje signal amplitude:

$$V_{out} = V_{in} |A_{inv re}| = 9.1V.$$

Rezultati simulacije, na izlazu daju sinusoidu amplitude oko 9.07 V, kao što je prikazano na Slici 4, što ne odstupa mnogo od proračuna.



Slika 4 – Rezultati simulacije za $A_{op} = 100dB$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$, invertujući pojačavač.

Ukoliko bismo zanemarili karakteristike kola definisane zadatkom ($A_{op} = 10^5$), i pretpostavili da operacioni ima idealne karakteristike, dobili bismo da je faktor pojačanja kola jednak 10 000, i samim tim, amplituda signala na izlazu jednaka:

$$V_{out} = V_{in} |A_{inv id}| = 10V.$$

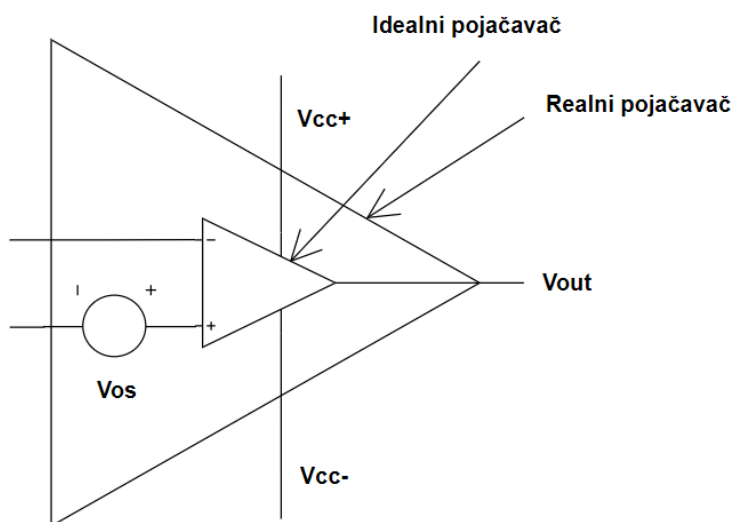
Tada bismo napravili grešku u proceni amplitude izlaznog napona u vrednosti od 0.9V:

$$\begin{aligned}\Delta(V_{out})_{A_{op} \rightarrow \infty} &= |V_{out}(A_{op} = 100dB, R_1 = 10\Omega, R_2 = 100k\Omega) - V_{out}(R_1 = 10\Omega, R_2 \\ &= 100k\Omega)| = 0.9V.\end{aligned}$$

2. Uticaj naponskog ofseta operacionog pojačavača na rad u zatvorenoj sprezi

Naponski ofset operacionog pojačavača je napon koji treba dovesti između njegovih ulaznih priključaka da bi napon na izlazu kola bio jednak nuli. Posledica je nesavršene simetrije elektronike u sklopu operacionog pojačavača, tj. posledica tehnološke nesavršenosti kola.

Naponski ofset se modelira **jednosmernim naponom** na invertujućem ili neinvertujućem ulazu kola (Slika 5). U zavisnosti od realizacije kola, naponski ofset može imati vrednost u opsegu od 10 nV do 10 mV.



Slika 5 – Modelovanje naponskog ofseta operacionog pojačavača

Postojanje naponskog ofseta na ulazu kola se detektuje kada se ulazi operacionog pojačavača kratko spoje. Iako se očekuje da će napon na izlazu da bude jednak nuli, na izlazu će se javiti napon koji je posledica naponske razdešenosti ulaza operacionog pojačavača:

$$v_{out} = A_{op} v_{id} \neq 0.$$

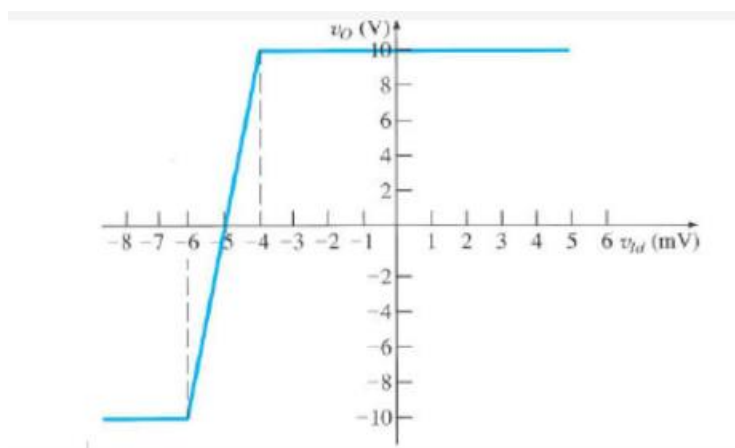
Pošto je pojačanje operacionog pojačavača veoma veliko, a napon na izlazu kola je ograničen naponima napajanja, usled prisustva naponskog ofseta na ulazu, na izlazu će se generisati napon V_{cc}^+ ili V_{cc}^- . Ukoliko se dobije napon V_{cc}^+ , možemo da smatramo da naponski generator sa

Slike 1 na sebi ima napon veći od 0V, a ukoliko se dobije V_{cc}^- , naponski generator sa Slike 5 na sebi ima napon manji od 0V (što se može predstaviti i naponskim generatorom koji daje pozitivan napon na invertujućem ulazu kola).

Kada sa v_{id} predstavimo diferencijalni signal koji se dovodi na ulaz operacionog pojačavača, navedeno možemo da zapišemo na sledeći način:

$$v_{id} = 0: \quad v_{out} = \begin{cases} V_{cc}^+, & V_{os} > 0 \\ V_{cc}^-, & V_{os} < 0 \end{cases}$$

Na Slici 6 prikazana je prenosna karakteristika realnog operacionog pojačavača čiji je naponski ofset na ulazu jednak 5 mV. Kada su ulazi kola povezani na isti napon, tj. kada je $v_{id} = 0$, na izlazu se generiše napon od 10V, tj. V_{cc}^+ . Da bi se na izlazu dobilo 0V, na ulaz mora da se dovede diferencijalni signal od -5 mV, pa je cela karakteristika pomerena u odnosu na koordinatni početak za vrednost napona V_{os} ulevo.



Slika 6 – *Prenosna karakteristika realnog operacionog pojačavača u otvorenoj sprezi čiji je naponski ofset na ulazu jednak 5 mV*

U daljem tekstu pokazaćemo da se u zatvorenoj sprezi uticaj naponskog ofseta operacionog pojačavača, manifestuje pojavom jednosmernog napona (opet ga nazivamo naponskim ofsetom) na izlazu kola. Ovaj napon smanjuje dinamički opseg rada pojačavača, pa ga je potrebno eliminisati.

Jedan od načina eliminacije uticaja naponskog ofseta na izlaz kola je spoljašnja kompenzacija koja uključuje dodavanje kompenzacionog napona kolu. Kompenzacioni napon se najčešće realizuje upotrebom napona napajanja kola.

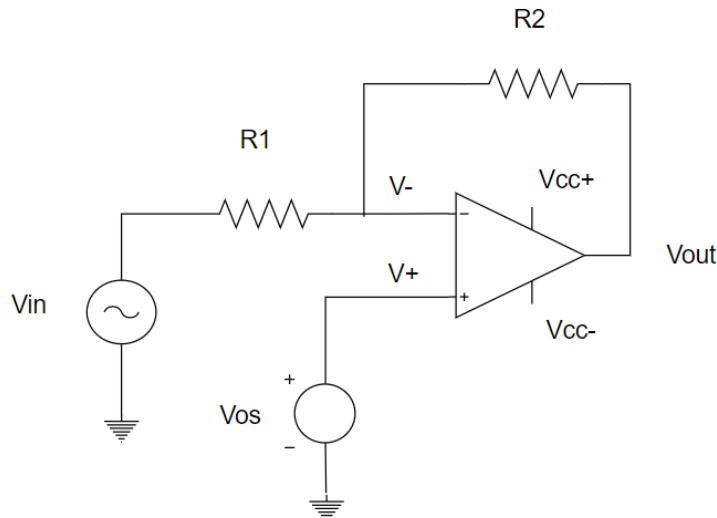
Pošto su rešenja za spoljašnju kompenzaciju naponskog ofseta nešto drugačija u zavisnosti od toga da li se radi o invertujućem ili neinvertujućem pojačavaču, analiziraćemo i jedan i drugi slučaj.

Zadatak 1: Izvesti izraz za napon na izlazu invertujućeg pojačavača, ukoliko se na neinvertujućem ulazu kola javlja jednosmeran napon V_{os} , kao posledica ulazne naponske razdešenosti operacionog pojačavača. Skicirati signal na izlazu kola ukoliko je $V_{os} = 2mV$, $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 1M\Omega$, a na ulaz se dovodi napon $V_{in} = 1mV \sin(10\pi t)$. Smatrati da je pojačanje operacionog pojačavača dovoljno veliko da se može smatrati beskonačno velikim.

Rešenje:

Pošto možemo smatrati da je pojačanje u otvorenoj sprezi beskonačno veliko, sa zatvaranjem povratne sprege, napon sa neinvertujućeg ulaza će se preslikati na invertujući ulaz ($V^- = V^+$). Pošto je ovde zadato da je naponski ofset modelovan jednosmernim naponom na neinvertujućem ulazu (Slika 7), možemo pisati:

$$V^- = V_{os}.$$



Slika 7 – Invertujući pojačavač sa prikazanim naponskim ofsetom na ulazu kola

Dalje, pošto smatramo da je struja na ulazima operacionog pojačavača jednaka nuli, možemo pisati:

$$\frac{V_{in} - V_{os}}{R_1} = \frac{V_{os} - V_{out}}{R_2}$$

Nakon čega se dolazi do izraza za izlazni napon invertujućeg pojačavača:

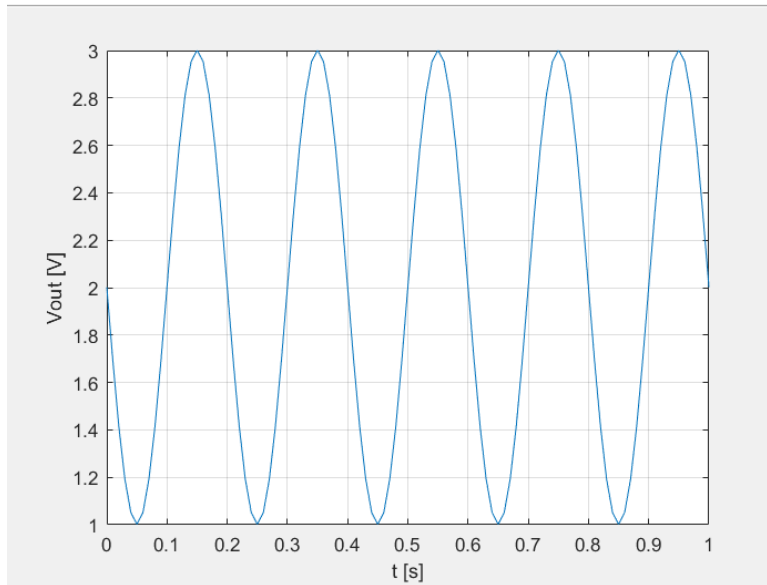
$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{os}$$

Zaključuje se da je naponski ofset na ulazu kola uzrokovao pojavu naponskog ofseta na izlazu kola, koji je jednak pojačanoj vrednosti naponskog ofseta na ulazu, pri čemu je faktor pojačanja jednak: $1 + \frac{R_2}{R_1}$.

Za vrednosti date u zadatku, na izlazu kola se može očekivati napon:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1}V_{in} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{os} = -1V\sin(10\pi t) + 2.002V.$$

Na Slici 8 prikazan je signal na izlazu kola. Srednja vrednost ovog signala jednaka je $2.002V$, dok su maksimalna i minimalna vrednost, redom, jednake: $3.002V$ i $1.002V$. Drugim rečima, bazna linija izlaznog u odnosu na ulazni signal je, s obzirom na polaritet naponskog ofseta na ulazu, pomerena ka pozitivnom naponu napajanja, čime je smanjen dinamički opseg rada kola.



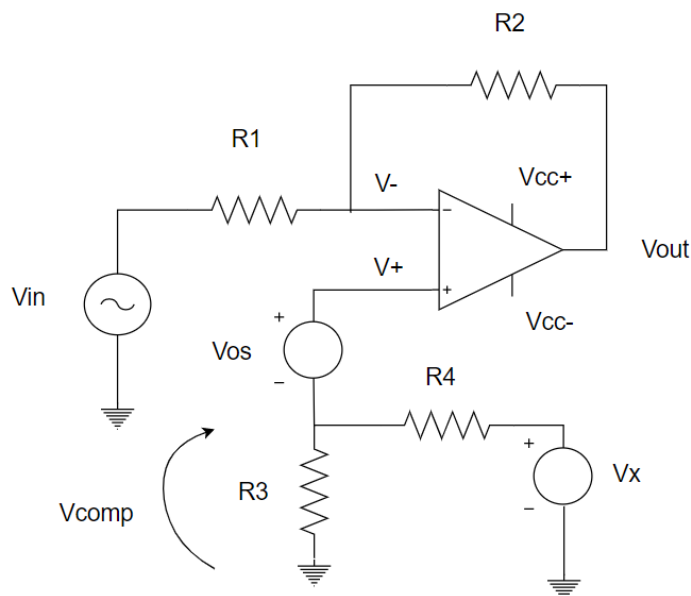
Slika 8 – Izlaz invertujućeg pojačavača čiji je naponski ofset na ulazu jednak $2mV$.

Zadatak 2: Projektovati kolo za kompenzaciju uticaja naponskog ofseta ulaza operacionog pojačavača na izlaz invertujućeg pojačavača, ukoliko je napon ofseta modelovan jednosmernim naponskim generatorom na neinvertujućem ulazu kola. U realizaciji kompenzacionog napona upotrebiti napone napajanje kola. $V_{os} = 2mV$, otpornosti u kolu su $R_1 = 1k\Omega$ i $R_2 = 1M\Omega$, a naponi napajanja kola su $\pm 5V$.

Dodatak: Ukoliko je umesto predviđene otpornosti otpornika R_4 , na raspolaganju otpornik standardne otpornosti od $30M\Omega$, koliki naponski ofset će se pojaviti na izlazu? Proveriti u LTSpice-u.

Rešenje:

Kolo za kompenzaciju uticaja naponskog ofseta na izlaz, prikazano je na Slici 9. Pošto je u zadatku zadato da se kompenzacioni napon realizuje upotrebom napona napajanja, kako bi se došlo do željene vrednosti kompenzacionog napona, upotrebljeno je kolo naponskog razdelnika. Kompenzacioni napon jednak je padu napona na otporniku R_3 .



Slika 9 – Kolo invertujućeg pojačavača za kompenzaciju uticaja naponskog ofseta na izlazni napon

Za početak, potrebno je odrediti koji će od napona napajanja biti razdeljen u cilju generisanja kompenzacionog napona (na šemi napon označen kao V_x). Da bi se uopšte postigla eliminacija uticaja naponskog ofseta na izlaz kola, potrebno je postići da je ukupan pad napona na neinvertujućem ulazu kola jednak nuli, $V^+ = 0$.

Pošto se sada ovaj napon može izraziti kao zbir napona V_{os} i V_{comp} , a na osnovu prethodno navedenog uslova, dolazimo i do vrednosti kompenzacionog napona:

$$V_{comp} = -V_{os} = -2mV.$$

Kako je potrebno generisati negativan napon, u njegovoj realizaciji biće upotrebljen napon V_{cc-} . Da bi se kolo isprojektovalo do kraja, potrebno je odrediti otpornosti R_3 i R_4 . S obzirom da one sačinjavaju naponski razdelnik, možemo pisati:

$$V_{comp} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{cc^-}.$$

Pošto su u pitanju dve nepoznate otpornosti, jednu otpornost je potrebno prozvoljno zadati, a drugu izračunati tako da svi uslovi predviđeni zadatkom budu zadovoljeni. Odnosno, ukoliko zadamo da je $R_3 = 10k\Omega$, R_4 možemo izračunati kao:

$$R_4 = \frac{R_3 V_{cc^-}}{V_{comp}} - R_3 = 24.990 M\Omega.$$

Da bismo izračunali napon koji se javlja na izlazu za slučaj da se na ulazu generiše kompenzacioni napon nešto drugačije vrednosti od predviđene, prvo treba izraziti izlaz kao:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (V_{os} + V_{comp}),$$

Na osnovu čega vidimo da se naponski ofset na izlazu računa kao:

$$V_{osout} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (V_{os} + V_{comp}).$$

Ukoliko otpornici R_3 i R_4 nisu upareni na odgovarajući način, napon na neinvertujućem ulazu $V_{os} + V_{comp}$ neće biti jednak nuli, pa samim tim, ni ofset na izlazu neće biti jednak nuli. Za konkretnu vrednost otpornika R_4 datu zadatkom, dobija se ofset:

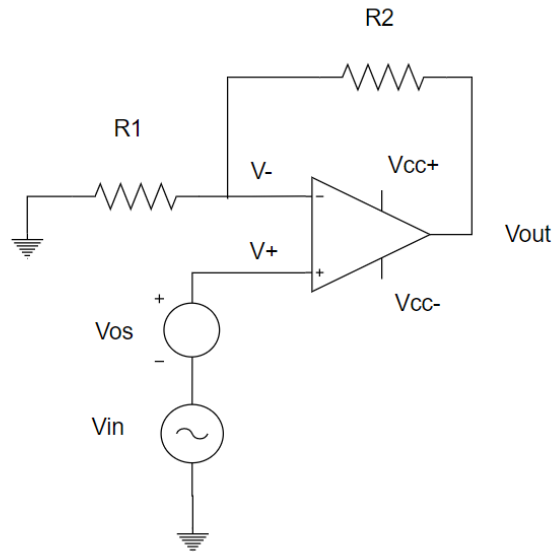
$$V_{osout} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (V_{os} + V_{comp}) = 1001(2mV - 1.66mV) = 334.22mV.$$

Zadatak 3: Izvesti izraz za napon na izlazu neinvertujućeg pojačavača, ukoliko se na neinvertujućem ulazu kola javlja jednosmeran napon V_{os} , kao posledica ulazne naponske razdešenosti operacionog pojačavača. Skicirati signal na izlazu kola ukoliko je $V_{os} = 2mV$, $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 1M\Omega$, a na ulaz se dovodi napon $V_{in} = 1mV \sin(10\pi t)$.

Rešenje:

Pošto se naponski ofset modeluje jednosmernim naponom na neinvertujućem ulazu kola (Slika 10), izlaz kola se može izračunati prema izrazu:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(V_{in} + V_{os}).$$



Slika 10 – *Neinvertujući pojačavač sa prikazanim naponskim ofsetom na ulazu kola*

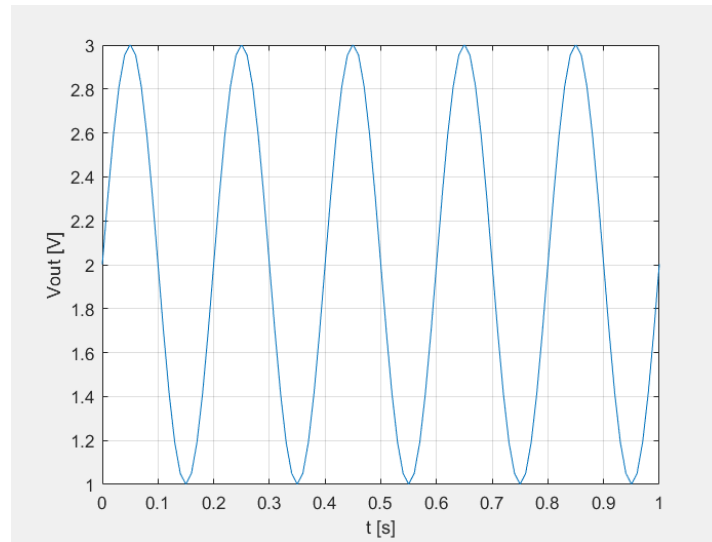
Na osnovu izraza, zaključuje se da je naponski ofset ulaza uzrokovao pojavu naponskog ofseta na izlazu kola, koji se može izračunati kao:

$$V_{osout} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{os}.$$

Za vrednosti date u zadatku, na izlazu kola se može očekivati napon:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(V_{in} + V_{os}) = 1.001V \sin(10\pi t) + 2.002V.$$

Na Slici 11 prikazan je signal na izlazu kola. I u ovom slučaju, bazna linija signala je u odnosu na ulazni signal, pomerena ka pozitivnom naponu napajanja.

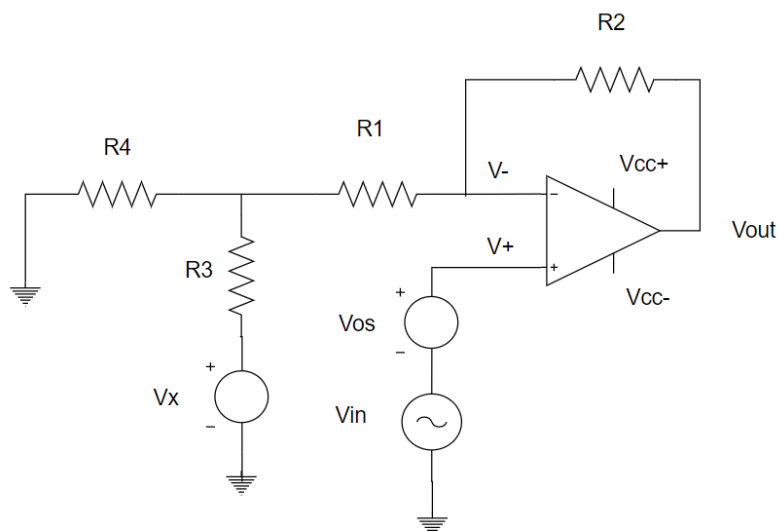


Slika 11 – Signal na izlazu neinvertujućeg pojačavača, čiji je napon ofseta na ulazu jednak 2 mV.

Zadatak 4: Projektovati kolo za kompenzaciju uticaja naponskog ofseta operacionog pojačavača na izlaz neinvertujućeg pojačavača, ukoliko je napon ofseta modelovan jednosmernim naponskim generatorom na neinvertujućem ulazu kola. U realizaciji kompenzacionog napona upotrebiti napone napajanje kola. $V_{os} = 3\text{mV}$, otpornosti u kolu su $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ i $R_2 = 1\text{ M}\Omega$, a naponi napajanja kola su $\pm 5\text{V}$. Koliko iznosi pojačanje kola posle izmena u cilju kompenzacije naponskog ofseta?

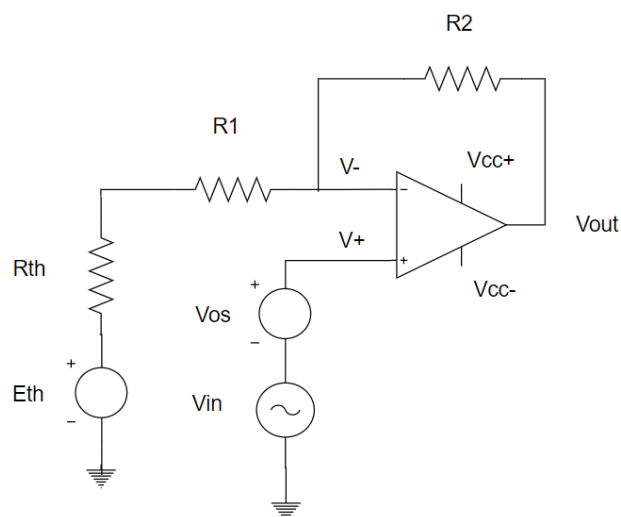
Rešenje:

S obzirom da se sada ulazni napon dovodi na neinvertujući ulaz kola, elemente koji bi obezbedili stvaranje kompenzacionog napona bi trebalo dovesti na invertujući ulaz. Pošto su u cilju generisanja kompenzacionog napona, na raspolaganju naponi napajanja, rešenje ponovo uključuje podelu napona V_{cc}^+ ili V_{cc}^- putem dodatih otpornosti R_3 i R_4 . Kada se predviđeno kolo naponskog razdelnika doda kolu neinvertujućeg pojačavača, rešenje izgleda kao na Slici 12. Kako bi se rešio problem kompenzacije uticaja naponskog ofseta, prvo je potrebno odrediti vrednost napona V_x , a zatim i otpornosti R_3 i R_4 .



Slika 12 – Kolo za kompenzaciju naponskog ofseta neinvertujućeg pojačavača.

Kako bi se rešilo kolo sa Slike 12, prvo ga treba uprostiti. Na invertujućem ulazu se nalazi kompenzacioni napon koji bi trebalo izraziti preko elemenata koji su dodati kolu u cilju njegovog generisanja. Pošto struje koje protiču kroz otpornike R_3 i R_4 nisu međusobno iste, na ovaj deo kola se ne može primeniti jednačina naponskog razdelnika. Međutim, kolo se može uprostiti primenom Tevenenove teoreme (Slika 13).



Slika 13 – Kolo neinvertujućeg pojačavača za kompenzaciju uticaja naponskog ofseta uprošćeno primenom Tevenenove teoreme

Sada se izlaz može dobiti primenom principa superpozicije, na osnovu čega pišemo:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1 + R_{th}} E_{th} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_{th}}\right) (V_{os} + V_{in}),$$

gde je:

$$E_{th} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_x$$

$$R_{th} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

Pošto naponski generator E_{th} služi eliminaciji naponskog ofseta, izraz treba formulisati na sledeći način:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_{th}}\right) V_{in} + \left(\left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_{th}}\right) V_{os} - \frac{R_2}{R_1 + R_{th}} E_{th}\right).$$

Iz navedenog izraza zaključuje se da se novo pojačanje kola računa prema izrazu:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_{th}},$$

dok, se sada naponski ofset na izlazu kola predstavlja izrazom:

$$V_{osout} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_{th}}\right) V_{os} - \frac{R_2}{R_1 + R_{th}} E_{th}.$$

Kako bi uticaj naponskog ofseta operacionog pojačavača bio eliminisan, vrednost napona V_{osout} treba svesti na 0. Pošto je V_{os} pozitivan i iznosi 3 mV, za generisanje kompenzacionog napona treba upotrebiti pozitivan napon napajanja, V_{cc}^+ . Sada možemo da pišemo:

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}}\right) V_{os} = \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{cc}^+.$$

Uprošćavanjem, dobijamo:

$$\left(R_1 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} + R_2\right) V_{os} = \frac{R_2 R_4}{R_3 + R_4} V_{cc}^+,$$

odnosno:

$$((R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_3 R_4) V_{os} = R_2 R_4 V_{cc}^+,$$

Na osnovu ovog izraza, R_4 možemo izraziti kao:

$$R_4 = \frac{(R_1 + R_2) R_3 V_{os}}{R_2 V_{cc}^+ - (R_1 + R_2 + R_3) V_{os}}$$

Ukoliko usvojimo da je otpornost otpornika R_3 jednaka $1\text{M}\Omega$, otpornost otpornika R_4 iznosi $0.6\text{k}\Omega$. Novo pojačanje kola je jednako:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_{th}} = 1 + \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} = 626.39.$$

3. Uticaj struje polarizacije operacionog pojačavača na rad u zatvorenoj sprezi

Struja polarizacije operacionog pojačavača je još jedan parametar koji svojim delovanjem smanjuje dinamički opseg rada kola. Ove struje javljaju se na bazama tranzistora ulaznog stepena kola. Njihove vrednosti su u opsegu od 1pA do $100\mu\text{A}$. Na rad operacionog pojačavača u zatvorenoj sprezi odražavaju se tako što uzrokuju pojavu naponskog offseta (jednosmernog napona) na izlazu kola. Njihov uticaj na izlazni napon je potrebno što više smanjiti, odnosno, eliminisati.

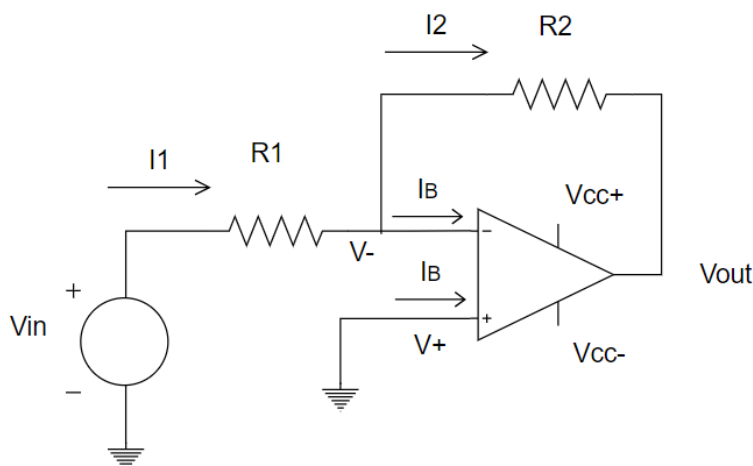
Jedan način eliminacije uticaja ovog parametra je dodavanje kompenzacionog otpornika na neinvertujući ulaz kola – rešenje je isto bilo da se radi o konfiguraciji invertujućeg ili neinvertujućeg pojačavača.

Zadatak 1: Izraziti i grafički prikazati zavisnost napona na izlazu invertujućeg pojačavača od vremena u trajanju od dve periode ulaznog signala, ukoliko se na ulazima javljaju struje polarizacije intenziteta $1\mu\text{A}$. Otpornosti u kolu su: $R_1 = 100\text{k}\Omega$ (na invertujućem ulazu) i $R_2 =$

$1M\Omega$ (u povratnoj sprezi), dok je na ulazu napon $V_{in} = 500mV\sin(10\pi t)$. Naponi napajanja su $\pm 5V$.

Rešenje:

Kolo je prikazano na Slici 14.



Slika 14 – Invertujući pojačavač sa prikazanim strujama polarizacije na ulazu kola

Pošto sada struje polarizacije nisu zanemarene, u kolu se javljaju tri struje u opštem slučaju različitih intenziteta. Njihov međusobni odnos možemo definisati upotrebom prvog Kirhofov zakon za čvor na invertujućem ulazu kola:

$$I_1 = I_2 + I_b$$

Nakon što primenimo Omov zakon za otpornike R_1 i R_2 :

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1},$$

$$I_2 = \frac{-V_{out}}{R_2},$$

i navedene izraze upotrebimo u prvoj navedenoj jednačini:

$$\frac{V_{in}}{R_1} = \frac{-V_{out}}{R_2} + I_b,$$

Možemo izraziti i napon na izlazu kola kao:

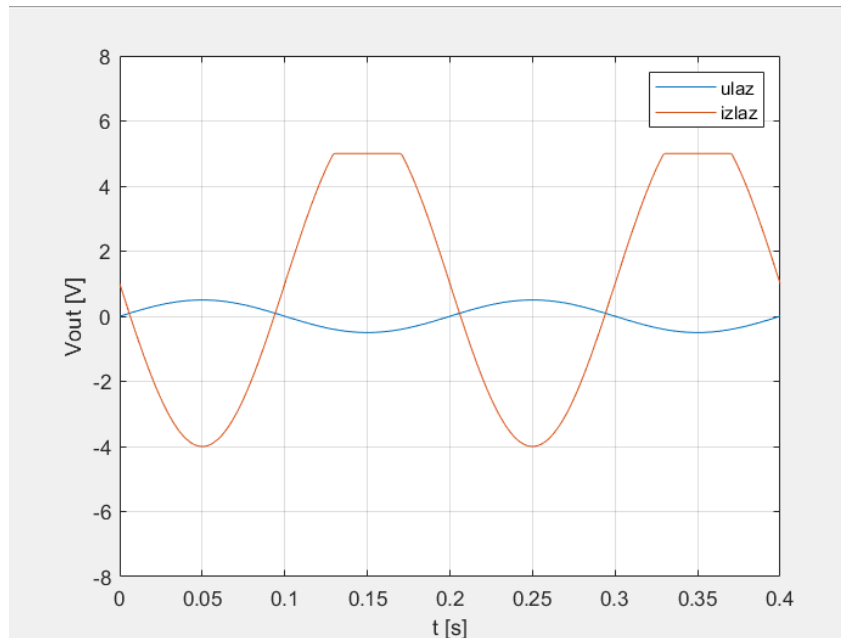
$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1}V_{in} + I_b R_2.$$

Na osnovu navedenog izraza zaključujemo da je naponsko pojačanje ulaznog signala ostalo isto kao i u slučaju analize kada smo zanemarivali postojanje struje polarizacije na ulazima kola, međutim u izrazu za izlazni napon pojavio se naponski ofset definisan proizvodom struje polarizacije I_b i otpornosti povratne sprege kola, R_2 .

Kada se u u izraz uvrste vrednosti date u zadatku, izlazni napon iznosi:

$$V_{out} = -5V \sin(10\pi t) + 1V.$$

I grafički se može predstaviti na sledeći način:



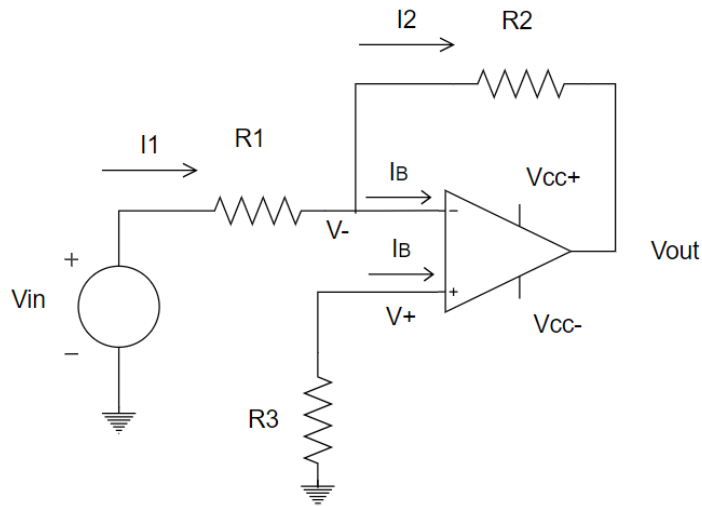
Slika 15 – Izlaz invertujućeg pojačavača čije su struje polarizacije na ulazu jednake $1\mu A$.

Eliminacija uticaja struja polarizacije na izlaz kola uključuje dodavanje otpornosti na neinvertujući ulaz kola.

Zadatak 2: Projektovati kolo invertujućeg pojačavača u kom je eliminisan uticaj struje polarizacije na izlazni napon.

Rešenje:

Kolo za kompenzaciju uticaja struja polarizacije na izlazni napon invertujućeg pojačavača prikazano je na Slici 16. Potrebno je odrediti otpornost otpornika R_3 .



Slika 16 – Kolo invertujućeg pojačavača za eliminaciju uticaja struja polarizacije na izlazni napon

U tom cilju, potrebno je rešiti sledeći sistem jednačina:

$$I_1 = I_2 + I_b \quad (1)$$

$$V_{in} - V_- = I_1 R_1 \quad (2)$$

$$V_- - V_{out} = I_2 R_2 \quad (3)$$

$$0 - V_+ = I_b R_3 \quad (4)$$

$$V_- = V_+ \quad (5)$$

Iz poslednje dve jednačine možemo da zaključimo da:

$$V_- = V_+ = -I_b R_3$$

Kada ovu jednačinu, i izraz za struju I_1 (jednačina br. 1) uvrstimo u drugu i treću jednačinu, dobijamo dve jednačine u kojima su nepoznate struje I_2 i I_b . Jednačine su:

$$V_{in} + I_b R_3 = (I_2 + I_b) R_1$$

$$-I_b R_3 - V_{out} = I_2 R_2$$

Nakon što iz druge jednačine izrazimo I_2 :

$$I_2 = \frac{-I_b R_3 - V_{out}}{R_2}$$

I uvrstimo u prvu:

$$V_{in} + I_b R_3 = \left(\frac{-I_b R_3 - V_{out}}{R_2} + I_b \right) R_1,$$

Dolazimo i do funkcije zavisnosti izlaznog napona od ulaznog i struje polarizacije:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} + I_b \left(R_2 - R_3 - \frac{R_2 R_3}{R_1} \right).$$

Da bi uticaj struje polarizacije na izlazni napon bio eliminisan, treba da važi:

$$I_b \left(R_2 - R_3 - \frac{R_2 R_3}{R_1} \right) = 0,$$

odnosno:

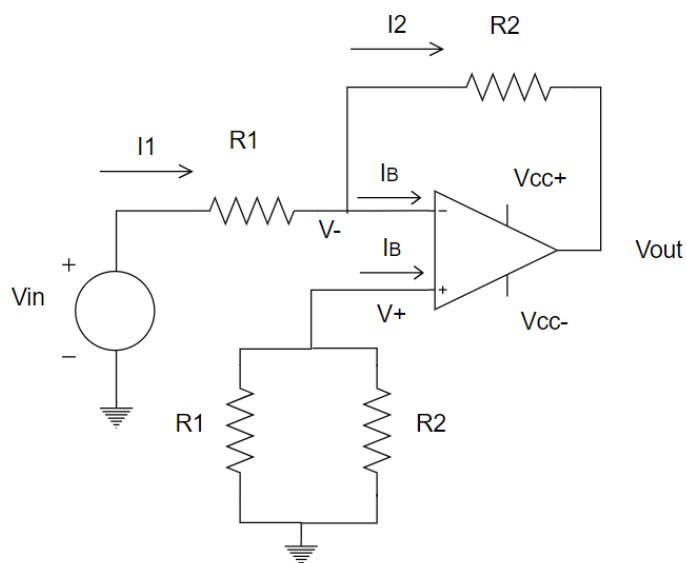
$$R_2 R_1 - R_3 R_1 - R_2 R_3 = 0,$$

$$R_2 R_1 = R_3 (R_1 + R_2)$$

Na osnovu čega dolazimo do izraza za otpornost otpornika R_3 . Ona treba da bude jednaka ekvivalentne otpornosti paralelne veze otpornika R_1 i R_2 :

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Rešenje je prikazano na Slici 17.



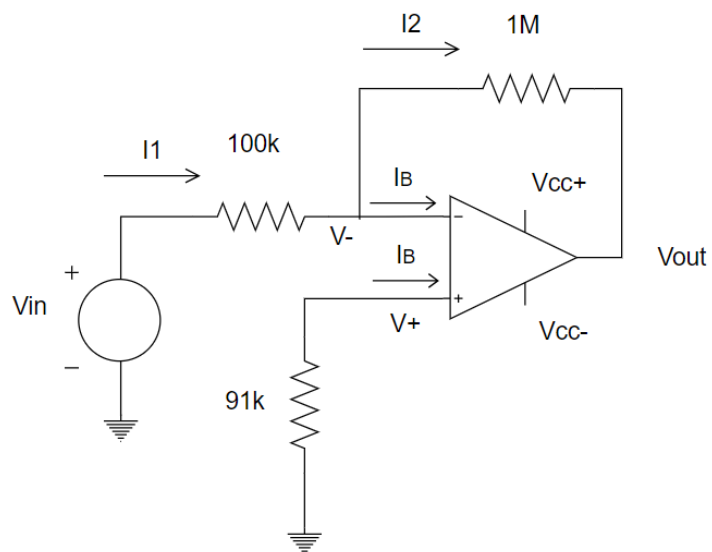
Slika 17 – Kolo invertujućeg pojačavača za eliminaciju uticaja struje polarizacije na izlazni napon

Zadatak 2 – dodatak: Ukoliko se kolu invertujućeg pojačavača na neinvertujući ulaz doda otpornik standardne otpornosti $91k\Omega$, da li će eliminacija uticaja struje polarizacije na izlazni napon biti uspešna? Ukoliko ne, izračunati naponski ofset koji će se pojaviti na izlazu. Intenzitet struja polarizacije jednak je $10\mu A$, a otpornosti su $R_1 = 100k\Omega$ i $R_2 = 1M\Omega$, pri čemu je veća otpornost u povratnoj sprezi.

Rešenje:

Kolo je prikazano na Slici 5. Na osnovu prethodnog izvođenja, dolazimo do otpornosti koju je potrebno dovesti na neinvertujući ulaz:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100k\Omega \cdot 1000k\Omega}{100k\Omega + 1000k\Omega} = 90.9k\Omega.$$



Slika 5 – Pokušaj eliminacije uticaja struje polarizacije na izlazni napon

Pošto dodata i izračunata otpornost nisu u potpunosti iste, zaključujemo da u kolu sa Slike 5 neće biti postignuta potpuna eliminacija uticaja struje polarizacije na izlazni napon, već će se na izlazu javiti naponski ofset intenziteta:

$$V_{out} = I_b \left(R_2 - R_3 - \frac{R_2 R_3}{R_1} \right) = 10 \mu\text{A} \left(1000 \text{ k}\Omega - 91 \text{ k}\Omega - \frac{1000 \text{ k}\Omega \cdot 91 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} \right) = -10 \text{ mV}.$$