

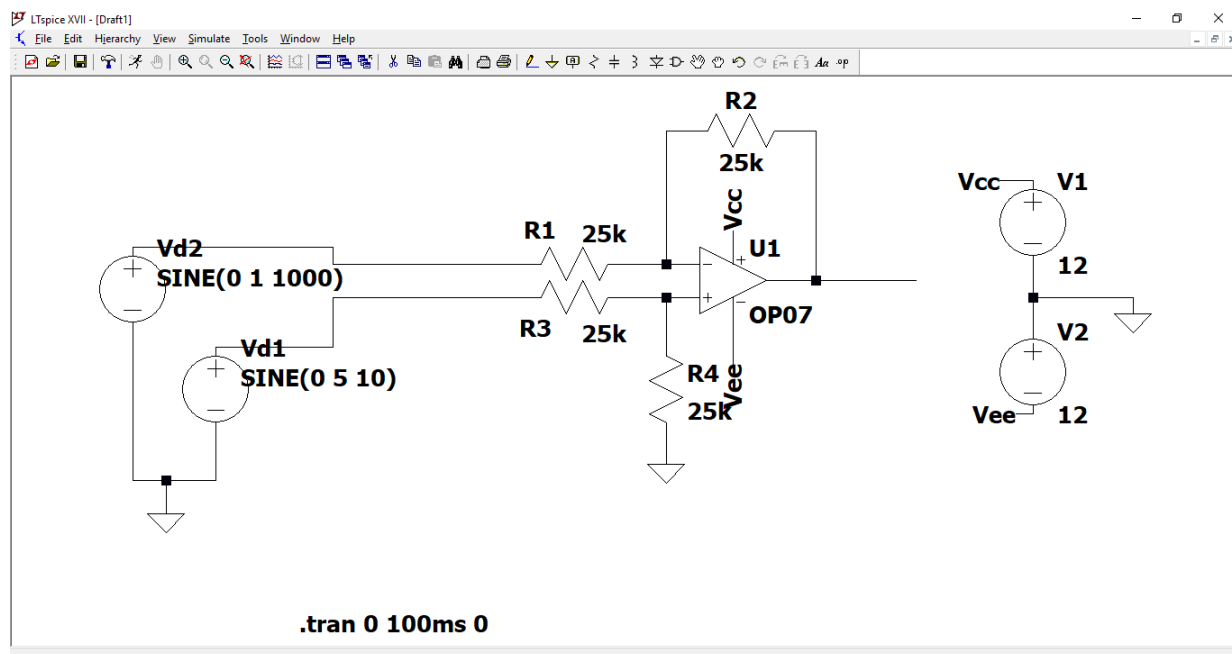
Cilj vežbi: Cilj vežbe je upoznavanje sa modelom instrumentacionog pojačavača pojačavača, kao i upoznavanje sa radom diferencijatora.

1 Razvoj instrumentacionog pojačavača

Kroz ovu vežbu data je retrospektiva nastanka instrumentacionog pojačavača. Prvenstveno će biti prikazan diferencijalni pojačavač, a nakon prikaza njegovih nedostataka biće uvođeni dodatni segmenti. Krajnji cilj će biti modelovanje instrumentacionog pojačavača.

1.1 Diferencijalni pojačavač

Diferencijalni pojačavač, predstavlja pojačavač razlike ulaznih napona. On je neophodna komponenta kako bi se biomedicinski signal referencirao u odnosu na određenu tačku. Npr. ako se želi meriti EEG signal referentna elektroda (elektroda tj. tačka u odnosu na koju se meri amplituda signala) postavlja se na mastoidnu kost. Referentna elektroda se dovodi na ”-“ ulaz diferencijalnog pojačavača. Diferencijalni pojačavač prikazan je na šemi sa slike 1.



Slika 1: Diferencijalni pojačavač

Diferencijalno pojačanje diferencijalnog pojačavača prikazano je jednačinom 1.

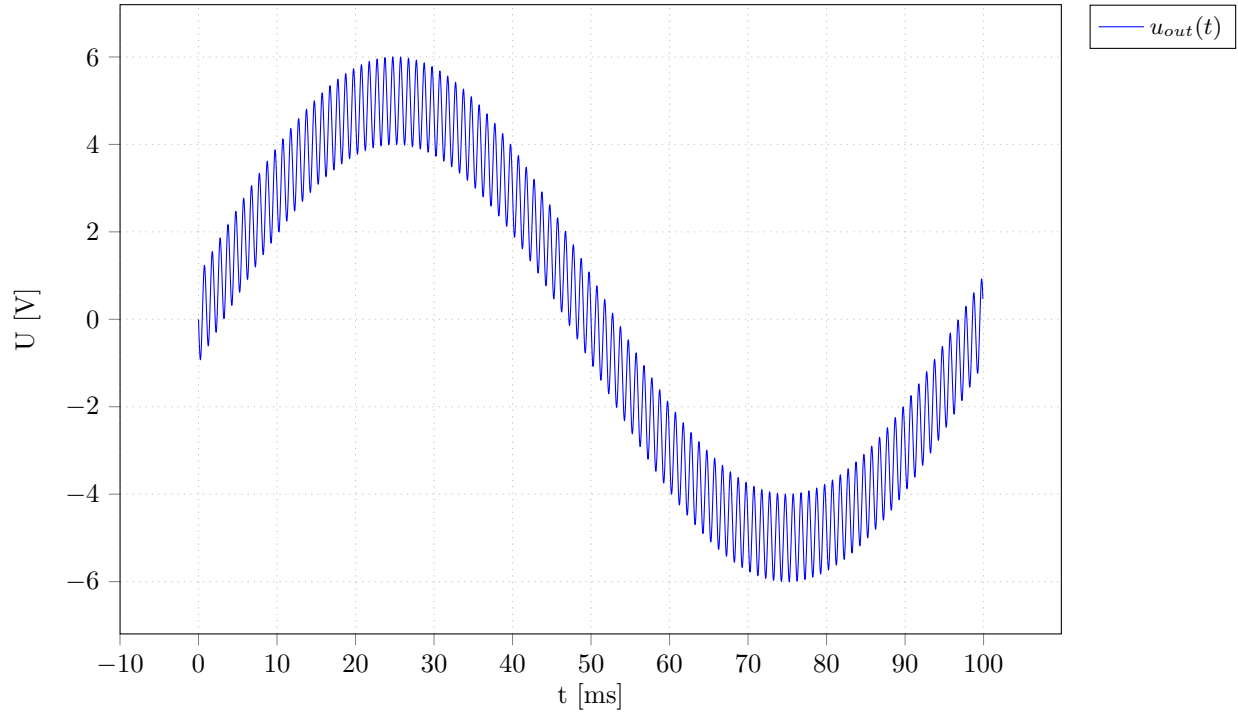
$$A_d = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (1)$$

Ako se pretpostavi da je $R_1 = R_3$ i $R_2 = R_4$ jednačina 1 se može pojednostaviti 2.

$$A_d = \frac{R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2)$$

Iz jednačine 2 prikazuje, kako se na jednostavan način može izvršiti pojačanje razlike potencijala. Simulirati šemu sa slike 1. Na ”+“ ulaz dovesti sinusoidalni signal frekvencije 10 Hz i amplitude 5 V, a na ”-“

ulaz dovesti sinusoidalan signal frekvencije 1000 Hz i amplitude 1 V. Snimiti signal na izlazu operacionog pojačavača. Potrebno je dobiti signal kao na slici 2.



Slika 2: Izlaz diferencijalnog pojačavača

Svaki signal koji se dovodi sa čoveka na kolo za akviziciju signala sa sobom nosi i šum. Šum je može biti posledica raznih uticaja iz okoline (kapacitivnog sprežanja, induktivnog sprežanja i sl.). Ako pretpostavimo da imamo sistem koji se sastoji iz dve elektrode, koje dovodimo na ulaze diferencijalnog pojačavača, na obe ove elektrode će se usred interferencije sa magnetnim odn. električnim poljem javljati i određeni artefakt signali (šum). Sam pacijent predstavlja antenu za šum pa će se i na izvoru signala desiti pojava šuma, a zatim vođenjem signala pomoću žica na ulaze kola za akviziciju dovodi do pojave dodatnog šuma usled elektromagnetne indukcije.

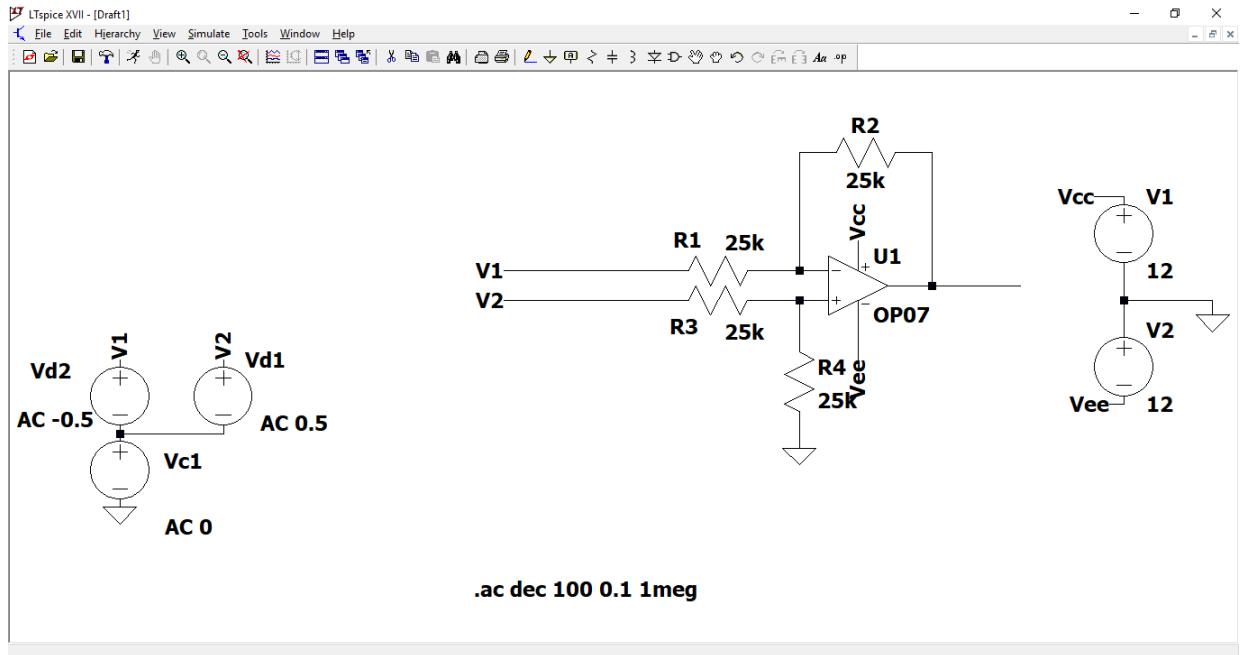
Ono što karakteriše opisane signale je da su oni po svojim osobinama isti (frekvencija, faza itd.), jer im je isti i izvor. Iz ovog razloga ovakvi signali se nazivaju zajednički signali tj. u slučaju napona zajednički napon. Očekivani izlaz iz diferencijalnog pojačavača je da će nakon oduzimanja, ovaj signal biti u potpunosti odstranjen. Ali to nije slučaj. Pa se jednačina za izlazni napon operacionog pojačavača bez povratne sprege usložnjava 3.

$$U_{out} = A_d(U_+ - U_-) + A_c \frac{U_+ + U_-}{2} \quad (3)$$

Naponi U_+ i U_- , predstavljaju napone na ulazima operacionog pojačavača, dok A_d predstavlja diferencijalno pojačanje, a A_c predstavlja pojačanje zajedničke komponente signala. Očekivano je da $A_d \gg A_c$, pa je iz tih razloga uveden parametar CMRR (Common Mode Rejection Ratio) odn. faktor potiskivanja zajedničke komponente. Ovaj faktor se najčešće iskazuje u dB i prikazan je jednačinom 4.

$$CMRR(dB) = 20 \log \frac{A_d}{A_c} \quad (4)$$

Kako bi se odredio CMRR faktor neophodno je odrediti diferencijalno pojačanje, kao i faktor pojačanja zajedničke komponente. Nacrtati šemu sa slike 3.



Slika 3: Određivanje CMRR faktora diferencijalnog pojačavača

Uočiti generatore V_{d1} i V_{d2} kao i generator V_{c1} . Postaviti generator V_{d1} na vrednost 0,5 V *AC Amplitude* u polju *small signal AC analysis*, vrednost V_{d2} na -0,5 V, a generator V_{c1} isključiti tj. postaviti na 0 V. Na ovaj način je moguće snimiti diferencijalno pojačanje na izlazu pojačavača. Pokrenuti AC analizu, u polju *Type of sweep* odabrati *Decade*, sa 100 tačaka po dekadi, od frekvencije 0,1 Hz do 1 MHz. Odrediti vrednost signala u dB na nižim frekvencijama tj. gde je diferencijalno pojačanje je stabilno. Zabeležiti dobijeno pojačanje.

Ponoviti ovaj proces za određivanje pojačanja zajedničke komponente napona. Neophodno je postaviti generatore V_{d1} i V_{d2} na 0 V, dok se generator V_{c1} postavlja na 1 V. Ponovo pokrenuti simulaciju sa identičnim parametrima i odrediti pojačanje u dB.

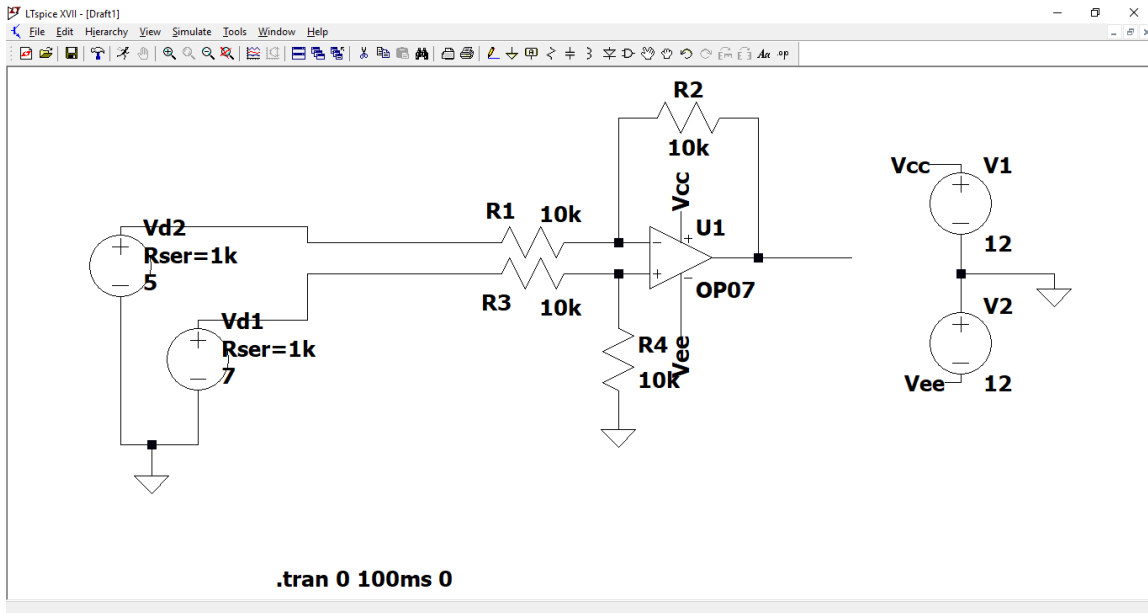
Iz dobijenih vrednosti za A_d i A_c moguće je odrediti $CMRR(dB)$, što je prikazano jednačinom 5.

$$CMRR(dB) = 20 \log \frac{A_d}{A_c} = 20 \log A_d - 20 \log A_c = A_d(dB) - A_c(dB) \quad (5)$$

Jednostavnim oduzimanjem vrednosti moguće je dobiti da je CMRR faktor u ovom slučaju oko 174,8 dB, što predstavlja izvrstan faktor CMRR. Ovo je moguće samo ako su otpornici jako dobro upareni. Kako bi se ovaj model približio realnosti otpornik R_4 promeniti vrednost ovog otpornika za 100 mΩ odn. na vrednost 25000,1 Ω. Ponoviti proces i odrediti CMRR, uočiti da se dešava velika razlika u CMRR faktoru ako otpornici nisu idealno upareni.

U realnosti jako je teško pronaći idealno uparene otpornike, pa se zato obično kupuje diferencijalni pojačavač u jednom kućištu. Napretkom tehnologije moguće je napraviti otpornike koji su upareni i do 0,01 %. Postaviti otpornik R_4 na vrednost 25002,5 Ω. Odrediti sada CMRR faktor, trebao bi iznositi oko 86 dB.

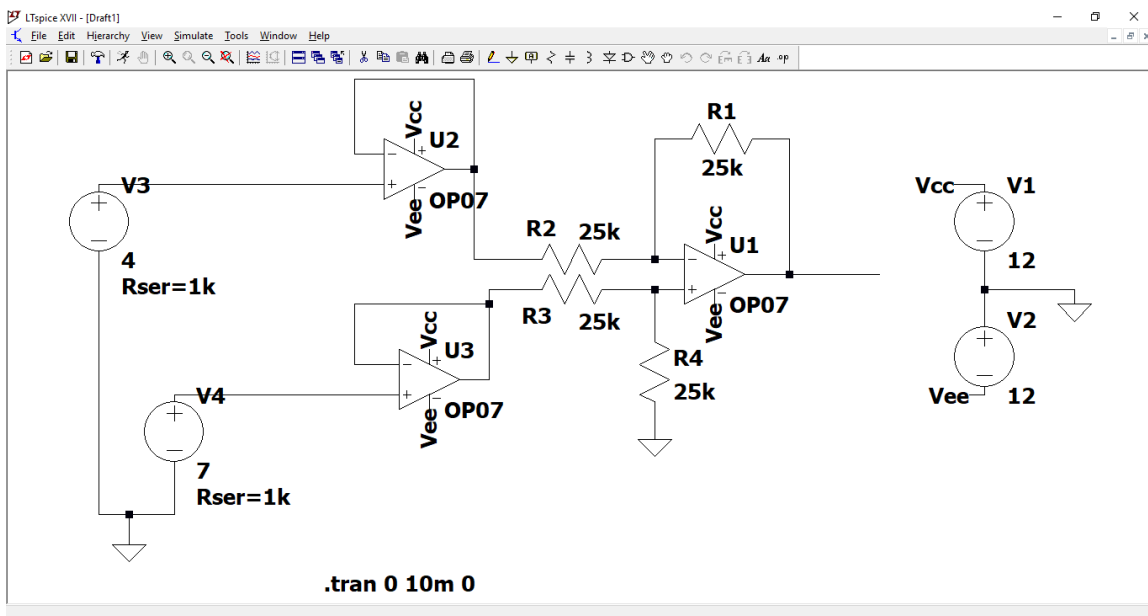
Kako bi se prikazala još jedna mana diferencijalnog pojačavača nacrtati šemu na slici 4.



Slika 4: Realan izvor i diferencijalni pojačavač

Potrebno je definisati da ulazni generatori imaju ulaznu otpornost, u ovom slučaju je podešeno da ona iznosi 1 k Ω . Takođe postaviti generatore na odgovarajuće DC vrednosti. Očekivana vrednost DC signala je 2 V, a dobijena vrednost je oko 1,82 V. Ovo je posledica razdešavanja otpornika R_1 i R_3 , usled uticaja unutrašnjih otpornosti izvora. Čovek sam po sebi nije idealan izvor signala pa se može aproksimirati kao izvor sa velikom unutrašnjom otpornošću. Zato se na ulazu diferencijalnog pojačavača dodaju dva bafera.

1.2 Diferencijalni pojačavač sa baferima na ulazu



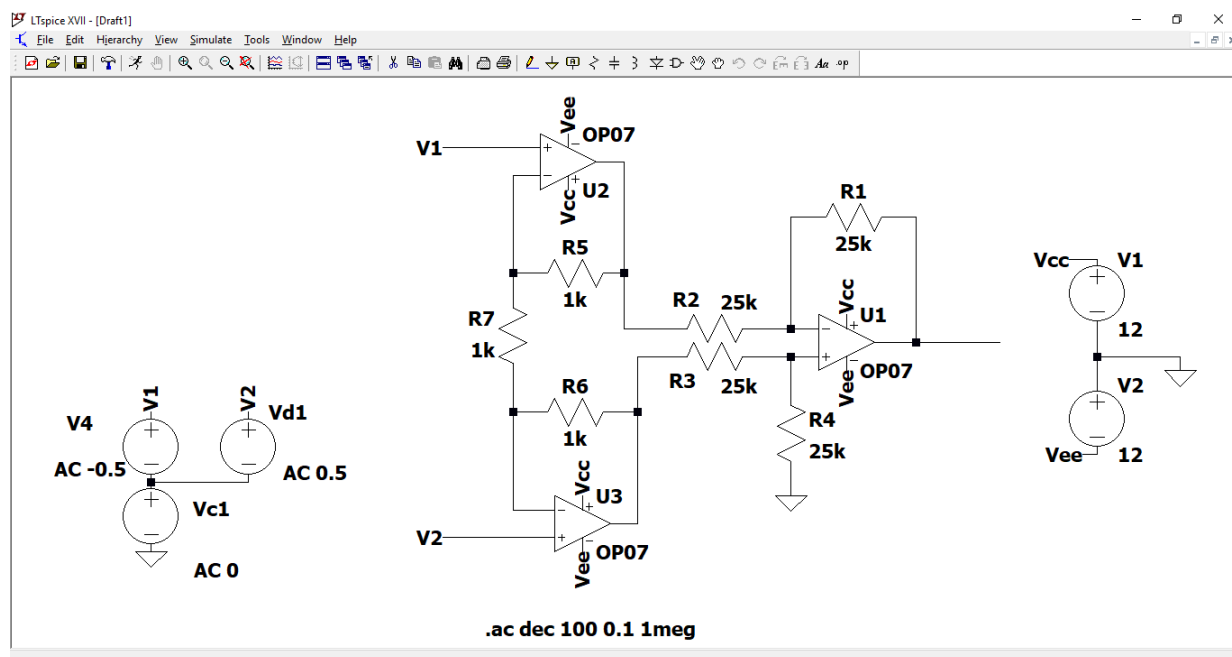
Slika 5: Diferencijalni pojačavač sa baferima

Na slici 5 prikazana je realizacija sa diferencijalnog pojačavača sa baferima na ulazu. Nacrtati šemu, a zatim pokrenuti tranzijentnu analizu. Prethodni problem unutrašnje otpornosti čoveka na ovaj način bi trebao biti rešen.

Na ovo kolo dovesti napajanje sa slike 3., kako bi se simulirao uticaj napona zajedničke komponente, kao i diferencijalnog napona. Podesiti AC analizu od 0.1 Hz do 1 MHz, sa po 100 tačaka po dekadi. Uočiti da je rezultujuća vrednost A_c pojačanja identična, a takođe je i A_d ostalo istovetno jer se nije menjala vrednost otpornika. Iz ovoga proizilazi da je CMRR ostao istovetan.

Kako bi se CMRR povećao neophodno je A_d povećavati ili A_c smanjivati. Pošto je A_c nemoguće dodatno smanjiti, jer je to ustanovljeno tehnologijom izrade čipa tj. uparenosti otpornika, potrebno je izvršiti povećanje A_d pojačanja. Ovo je rezultovalo dodavanjem neinvertujućih pojačavača na ulazu diferencijalnog pojačavača. U prilog tome ide i to da je ulazna otpornost neinvertujućeg pojačavača jako velika i neće imati nikakvog uticaja na signale na ulazu.

1.3 Diferencijalni pojačavač sa neinvertujućim pojačavačima na ulazu - Instrumentacioni pojačavač



Slika 6: Instrumentacioni pojačavač

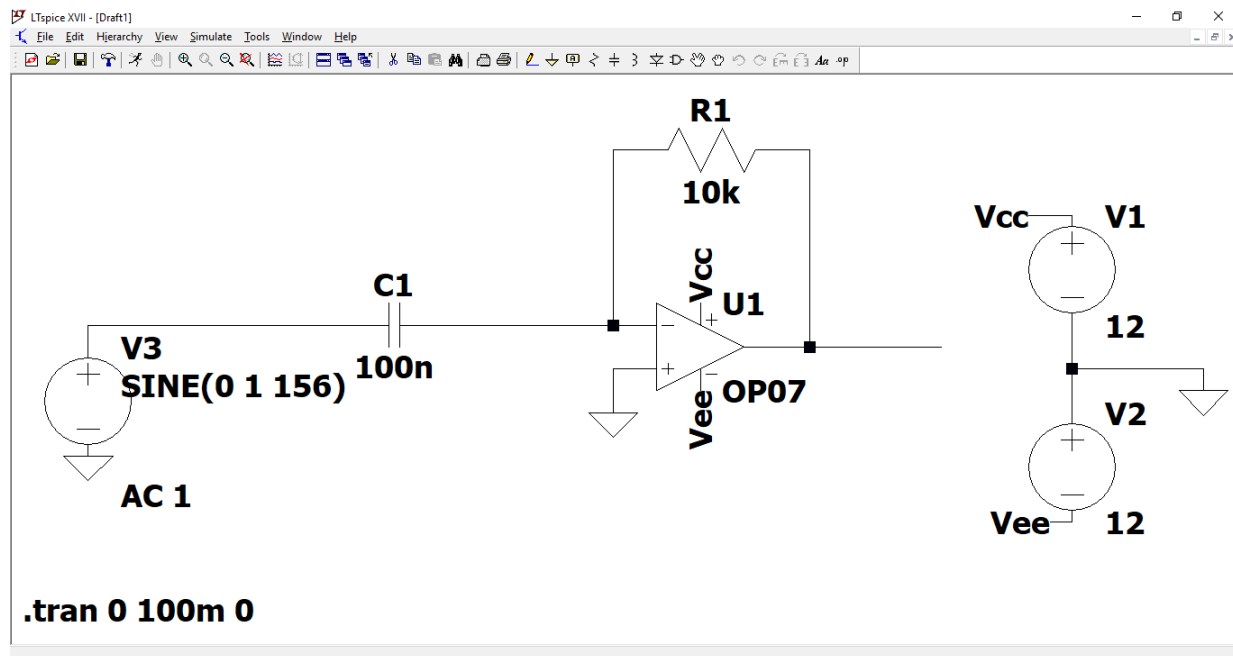
Na slici 6. prikazan je izgled kola sa dodatnim neinvertujućim pojačavičima. Ova šema predstavlja praktičnu izvedbu instrumentacionog pojačavača. Precrtati šemu i ustanoviti da pojačanje ovog kola zavisi od otpornika R_7 i otpornika u povratnoj sprezi R_5 i R_6 . Pomoću njih se može podesiti dodatno diferencijalno pojačanje. Tačnije, u realnim integrisanim kolima unutar čipa se postave svi otpornici, jedino se spolja ostavi mogućnost za vezivanje otpornika R_7 . Na taj način se izbegava mogućnost problema zbog neuparenosti otpornika jer se dodaje samo jedan otpornik koji definiše pojačanje celokupnog kola prema formuli 6.

$$A_d = 1 + \frac{R_5}{R_7} \quad (6)$$

Postaviti otpornik R_4 na vrednost 25002.5Ω . Definirati pojačanje 10 puta, a zatim pokrenuti ac analizu i odrediti vrednost CMRR faktora. U realnosti vrednost CMRR faktora kod instrumentacionog pojačavača je oko 100 dB odn. 120 dB.

2 Diferencijator

Šema diferencijatora prikazana je na slici 7.



Slika 7: Instrumentacioni pojačavač

Uloga diferencijatora je da vrši diferenciranje signala u vremenu što je prikazano jednačinom 7.

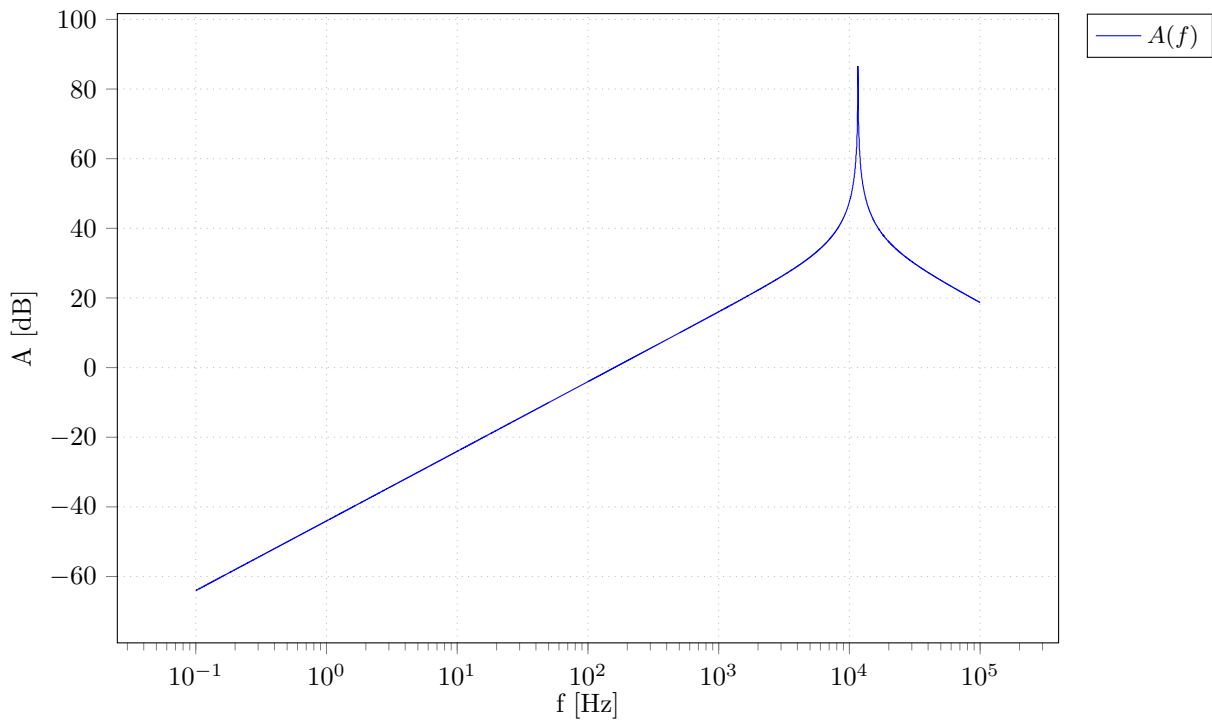
$$i_c = C \frac{\partial u_{in}}{\partial t}, i_r = \frac{u_{out}}{R} \quad i_c = -i_r \implies u_{out} = -RC \frac{\partial u_{in}}{\partial t} \quad (7)$$

Problem ovakve izvedbe integratora je u tome što je pojačanje ovog sistema jako zavisno od frekvencije pa će se signali jako visokih frekvencija pojačavati veliki broj puta. Jednačina pojačanja se može izvesti iz jednačine za invertujući pojačavač 8.

$$A = -\frac{R_1}{X_c} = -\frac{R_1}{\frac{1}{2\pi f C_1}} = -2\pi f R_1 C_1 \quad (8)$$

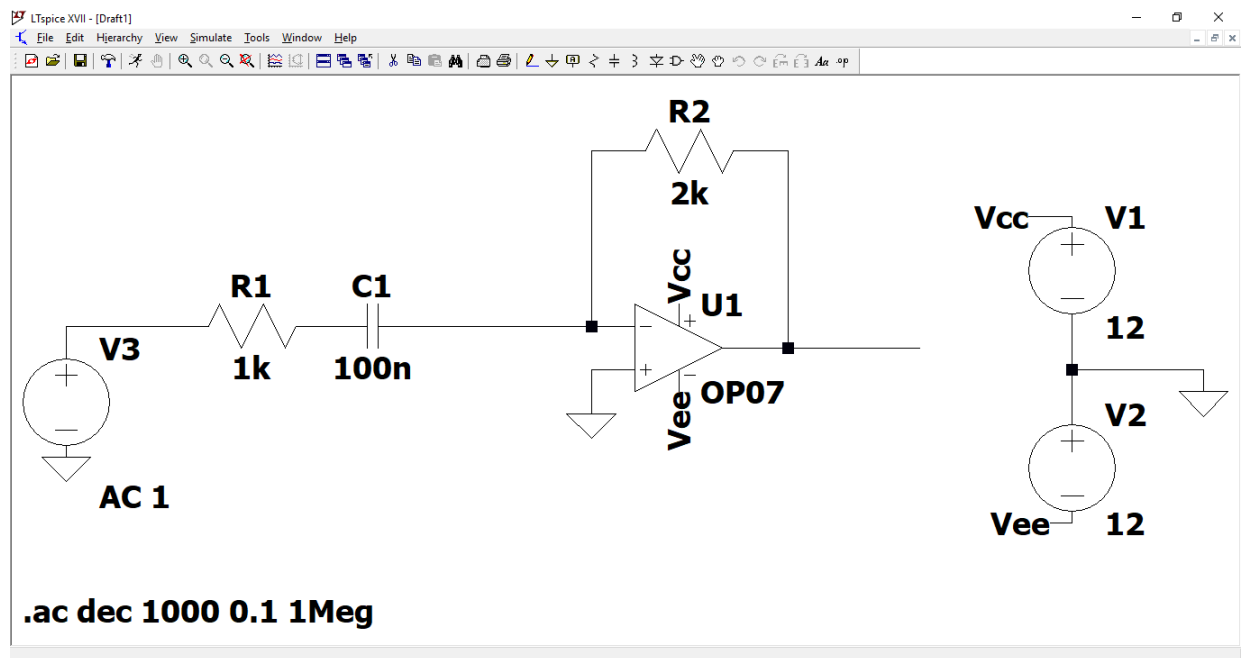
U praktičnoj primeni pojačanje na visokim frekvencijama je uslovljeno sa propusnim opsegom operacionog pojačavača. Naime, pojačavač do određene frekvencije može nesmetano da vrši pojačanje signala, ali ako se nastavi sa povećanjem frekvencije pojačanje počinje naglo opadati. Ovo je karakteristika gotovo svakog operacionog pojačavača. Iz tih razloga kriva pojačanja diferencijatora će biti limitirana sa frekvencijske strane. Što je prikazano na slici 8.

Pokrenuti simulaciju sa slike 7. Uočiti da se javlja problem na početku pokretanja simulacije. Ovo se događa jer kondenzator ne dozvoljava naglu promenu napona, iz tih razloga se i negativan ulaz operacionog pojačavača izvlači iz stanja 0 V. Samim tim operacioni pojačavač počinje da osciluje.



Slika 8: Zavisnost pojačanja od frekvencije diferencijator

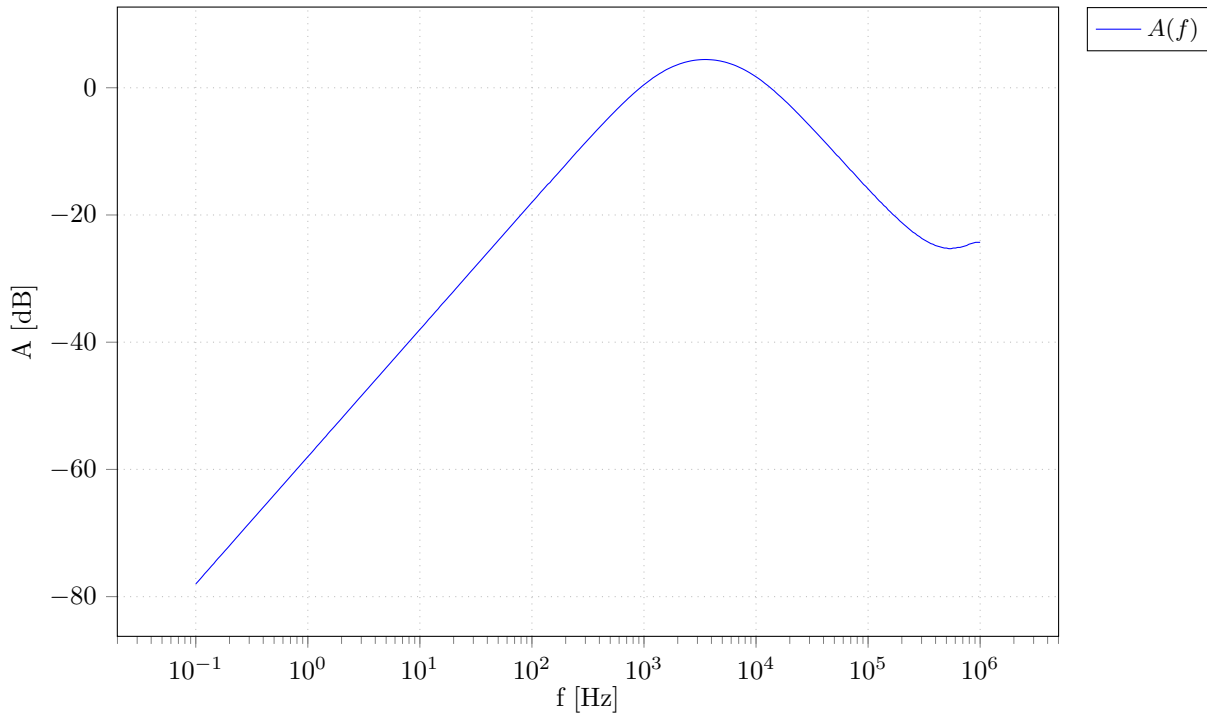
Kao što se može videti sa slike 8., problem nastaje na visokim frekvencijama gde je jasno izražen pik. Iz tih razloga dodaje se još jedan otpornik redno kondenzatoru kako bi se izvršilo ograničenje maksimalnog pojačanja, što ovo kolo čini stabilnijim. Primer povezivanja dat je na slici 9.



Slika 9: Dodatni otpornik diferencijatora

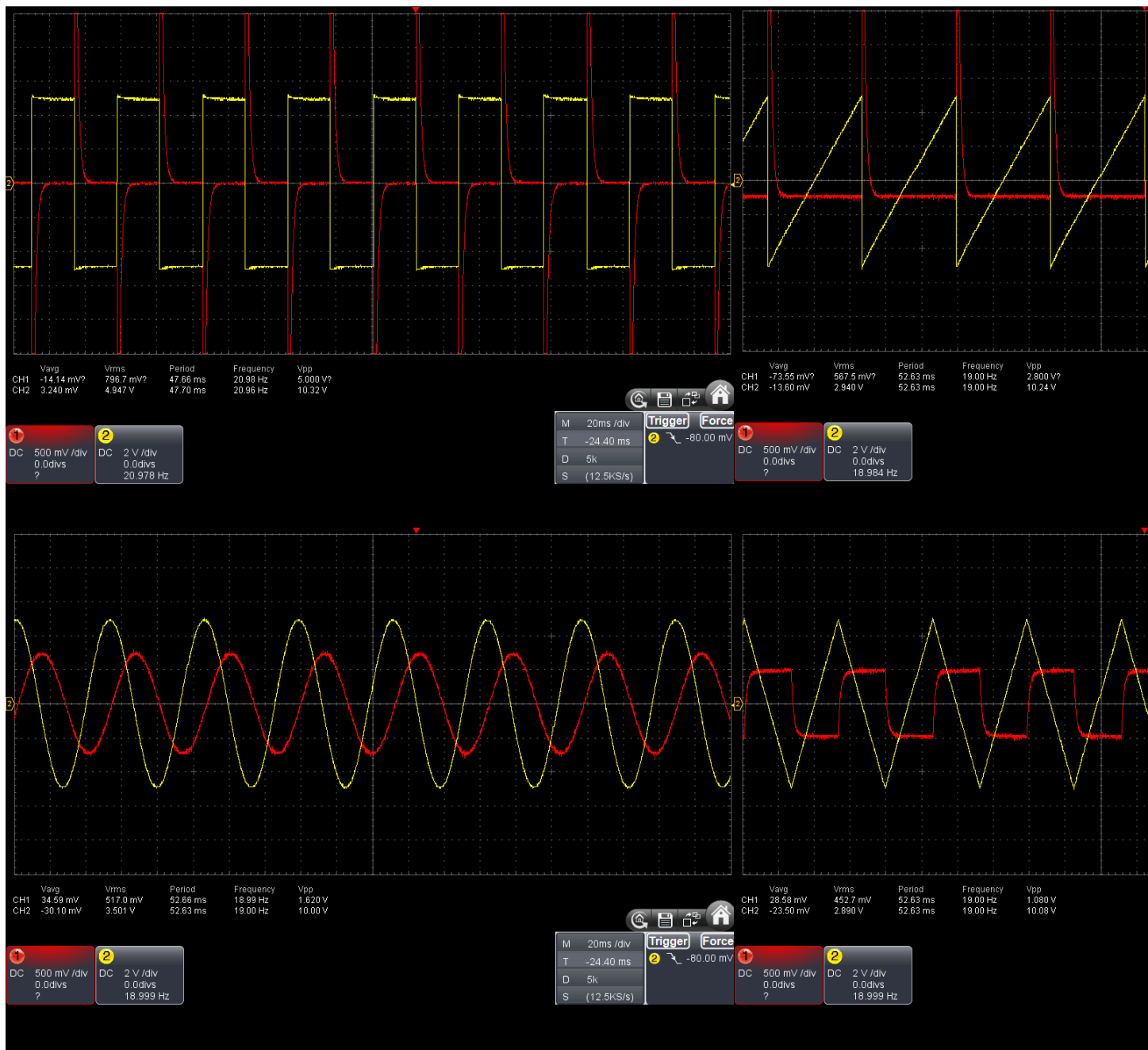
Izvršiti analizu kola sa slike 9. Uočiti da se javlja znatno stabilnije ponašanje sistema. Takođe, ako se odradi tranzijentna analiza moguće je uočiti da ne postoji više problem sa oscilovanjem, jer sada otpornik ograničava brzinu punjenja kondenzatora. Ovaj sistem u idealnom slučaju predstavlja VF filter, ali se zbog odsecanja na visokim frekvencijama ipak ponaša kao filter propusnik opsega. Iz tih razloga se paralelno otporniku dodaje kondenzator koji ima ulogu da upravlja filtriranjem viših frekvencija filtera propusnika opsega.

Dodati na šemu kondenzator od 10 nF paralelno otporniku R_2 . Rezultat ac analize prikazan je na slici 10.



Slika 10: Diferencijator kao filter propusnik opsega

Rezultati rada realnog diferencijatora dati su na slici 11.



Slika 11: Snimci sa osciloskopa realnog diferencijatora

Dodatne napomene:

- Zavisnost tolerancije otpornika od CMRR faktora: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-document/design-notes/dn1023f.pdf>.