

Cilj vežbi: Cilj vežbe je upoznavanje sa modelom operacionog pojačavača. Takođe, izvršiće se upoznavanje sa mogućnostima AC analize sa LTspice alatom.

1 Operacioni pojačavači

Operacioni pojačavač je neizostavna komponenta u kolima za akviziciju bioelektričnih signala. Sastoji se iz dva ulaza + (neinvertujućeg) i - (invertujućeg) ulaza. Uloga pojačavača je da pojačava razliku potencijala na njihovom ulazu, kao što je dato jednačinom 1.

$$U_{izl} = A_d(U_+ - U_-) \quad (1)$$

Radi lakšeg modelovanja do sada se predstavljao kao idealna komponenta, ali LTspice omogućuje dodavanje realnih parametara. Kako bi se videli dostupni modeli operacionih pojačavača u LTspice-u neophodno je slediti sledeću putanju *Components* (Prečica F2) i u meniju odabrati *Opamps*. U ovim vežbama akcenat će se staviti na OP07 operacioni pojačavač, zbog njegove dostupnosti, kao i odnosa cena/kvalitet. U dodatnom materijalu, na dnu ovog dokumenta, može se pronaći specifikacija ovog operacionog pojačavača.

Radi poređenja u tabeli 1. dat je odnos između osnovnih karakteristika idealnog i OP07 operacionog pojačavača.

parametar	Idealni	OP07
Ulazna otpornost	∞	15 M Ω - 50 M Ω
Izlazna otpornost	0 Ω	60 Ω
Pojačanje otvorene petlje	∞	200 000 - 500 000
Širina propusnog opsega	∞	400 kHz - 600 kHz

Tabela 1: Poređenje idealnog i realnog operacionog pojačavača

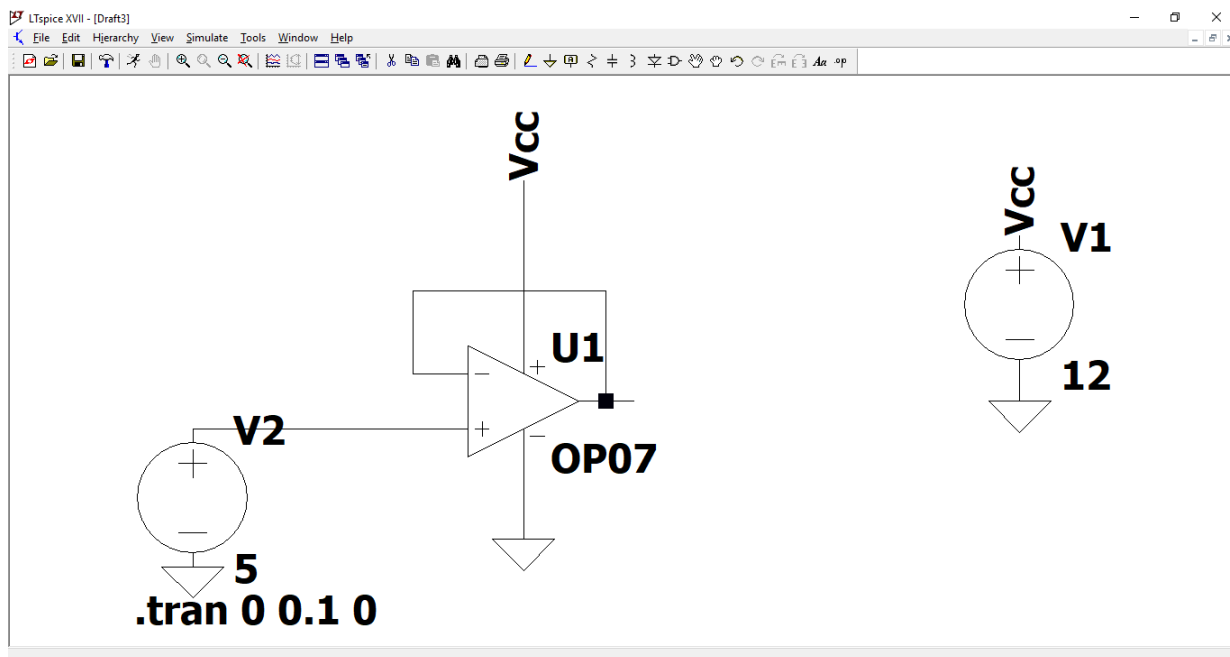
Svaki od ovih parametara biće dodatno pojašnjen kroz primere osnovnih kola sa operacionim pojačavačima.

1.1 Baferski pojačavač

Ključna razlika između idealnog i realnog operacionog pojačavača je u tome što realnom operacionom pojačavaču je neophodno dodati i napajanje. Napon napajanja praktično predstavlja maksimalni napon koji može dostići operacioni pojačavač na svom izlazu, čak je ta granica nekoliko volti viša od najmanje vrednosti i nekoliko volti niža od najviše. Takođe, ovakva ograničenja važe i za ulaz operacionog pojačavača.

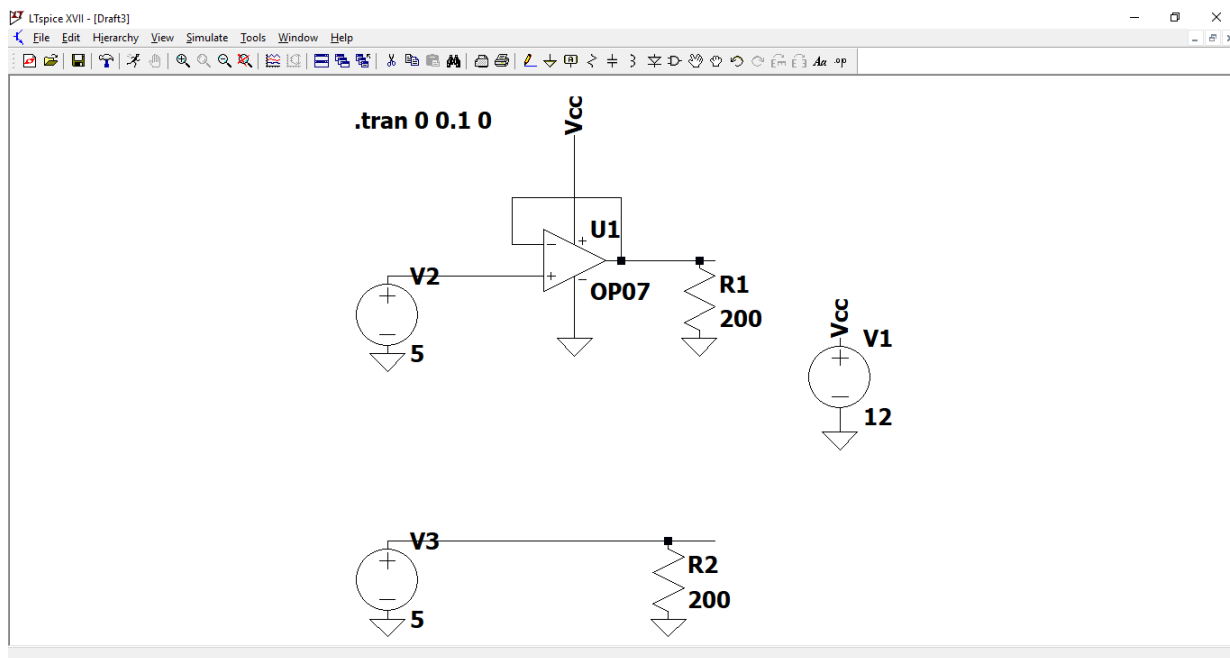
Kako je pojačanje operacionog pojačavača jako veliko, a prema jednačini 1, operacioni pojačavači bi i za male vrednosti napona (reda nekoliko mV) na ulazu ulazili u saturaciju (napon na izlazu bi zadržavao minimalnu odn. maksimalnu vrednost napajanja). S toga bi realnom operacionom pojačavaču sama pojava ofseta pravila velike probleme na izlazu. Iz tih razloga operacioni pojačavači u najvećem broju slučajeva rade sa povratnom spregom, najčešće negativnom povratnom spregom.

U LTspice nacrtati i povezati šemu kao na slici 1. Pronaći i postaviti na šemu operacioni pojačavač OP07 i obavezno dodati napajanje čipa. Kako bi se povećala preglednost šeme preporučljivo je koristiti labelle (element *Label Net* u meniju). Sve labelle koje nose isto ime predstavljaju identičan čvor. Napajanje podesiti da iznosi 12 V, a zatim dodati i naponski generator na ulazu čija je vrednost 5V. Kada je šema povezana izvršiti tranzijentnu analizu od 0 s do 0.1 s, dok maksimalni korak nije neophodno eksplicitno zadati.



Slika 1: Sleditelj napona - bafer

Proveriti napon na izlazu operacionog pojačavača. Da li je dobijen očekivani odziv? Posmatranjem dobijenih signala može se doći do pitanja, čemu služi baferski pojačavač jer ako ima jedinično pojačanje mogao bi se modelovati kao kratak spoj. Kako bi se došlo do odgovora na ovo pitanje dodati elemente na šemu i presložiti je kao na slici 2. Na izlaze operacionog pojačavača i generatora napona dodat je po jedan otpornik od $200\ \Omega$ kako bi se simuliralo potrošač.

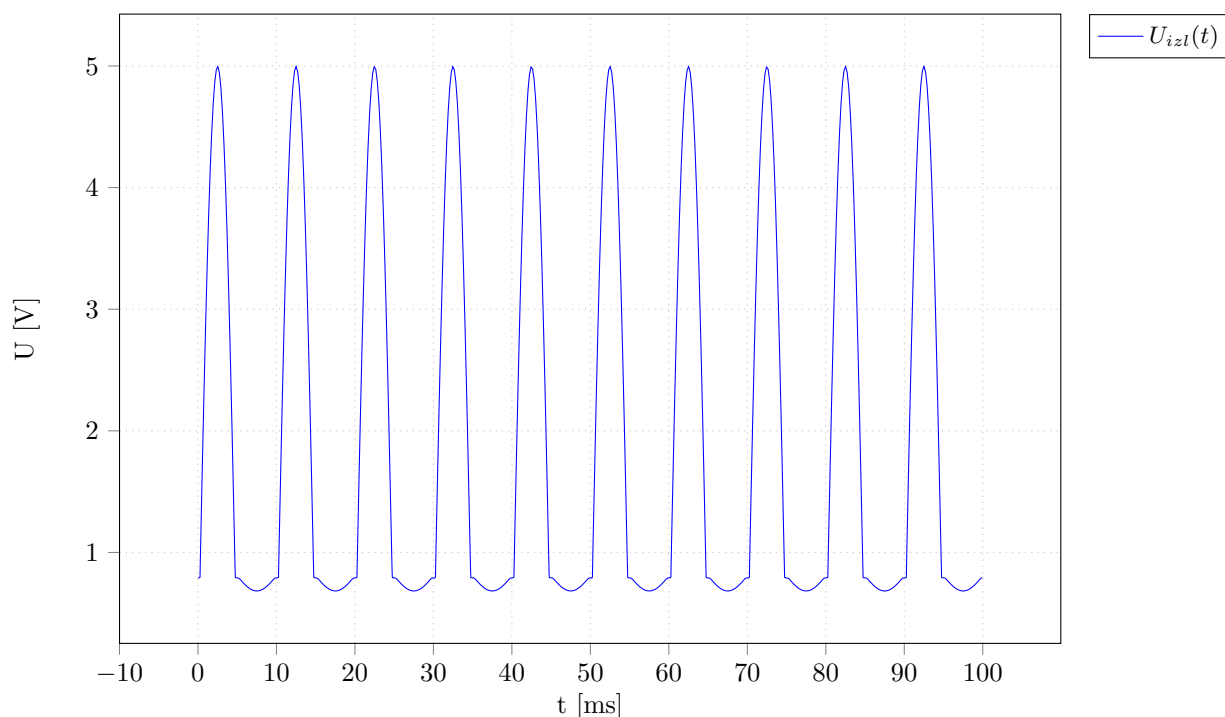


Slika 2: Bafer vs. kratak spoj

Rezultat simulacije pokazuje da su oba električna kola identična. Da bi se ovaj slučaj približio realnosti potrebno je modelovati komponente sistema što je bliže moguće realnosti. Iz tih razloga generatoru napona dodati serijsku otpornost. Desnim klikom na komponentu generatora moguće je dodati pored napona i unutrašnju otpornost generatora unošenjem željene vrednosti u polje *Series Resistance [Ω]*. Podesiti unutrašnje otpornosti generatora na 20 Ω, a zatim pokrenuti simulaciju.

Da li je dobijen očekivani rezultat simulacije? Problem nasataje na drugoj, dodatnoj šemi jer napon generatora se sada deli na unutrašnju otpornost generatora i otpornost otpornika koji simulira opterećenje. Kod baferskog pojačavača stvar je obrnuta. Zbog jako velike ulazne otpornosti struja koja utiče u operacioni pojačavač je reda nA tj. zanemarivo je mala. Mala struja pravi zanemariv pad napona na unutrašnjoj otpornosti generatora. Pošto je operacioni pojačavač u linearnom režimu on na svojim ulazima održava identičan napon, pa se na taj način na izlazu dobija vrednost napona bliska naponu generatora.

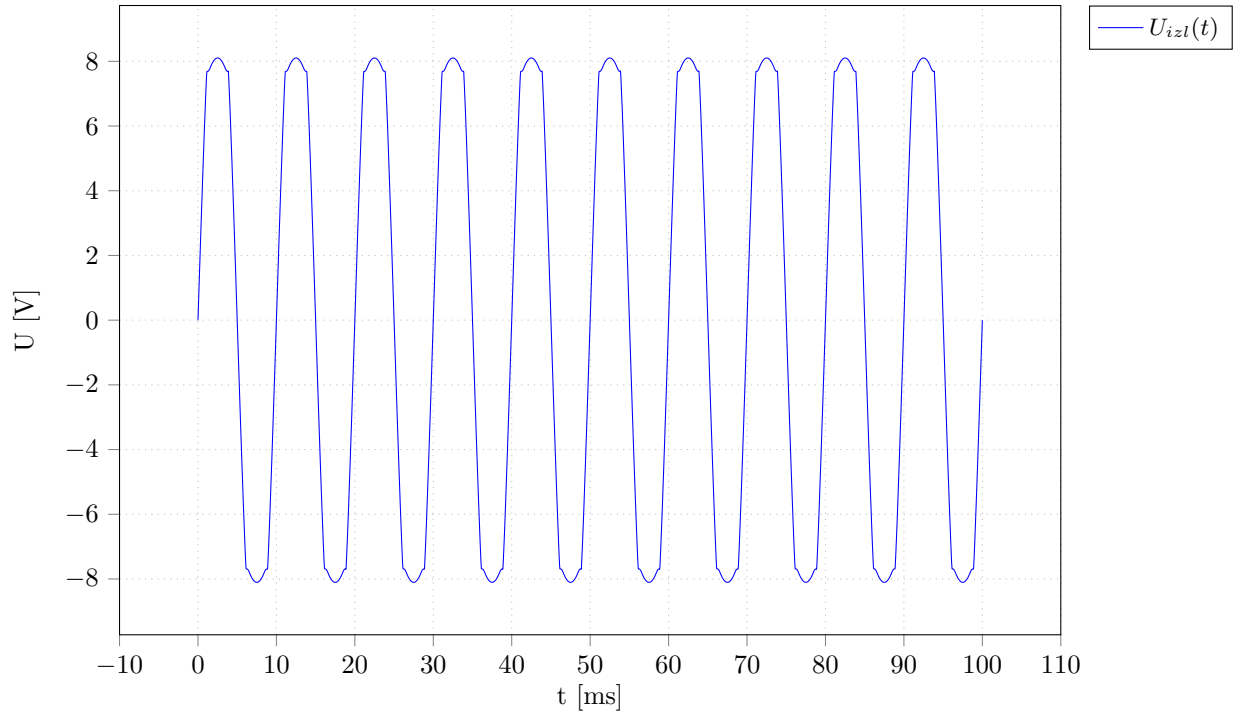
Možemo zaključiti **da se bafer koristi u kolima ako se žele razdvojiti uticaji impedanse jedne strane kola, na drugu stranu kola.** Sledeće pitanje koje se nameće je šta se dešava sa operacionim pojačavačima u AC režimu rada? Zato je bitno promeniti izvor u sinusoidalan napon amplitude 5 V i frekvencije 100 Hz. Nakon pokretanja simulacije dobijen je signal na izlazu kao na slici 3.



Slika 3: Grafik napona na izlazu bafera

Dobija se rezultat koji naizgled nema smisla. Problem je što ovakav sistem savršeno prati pozitivnu poluperiodu od 0,8 V, ali za amplitude napona manje od 0,8 V dolazi do odsecanja sinusoide. Odavde se može zaključiti da operacioni pojačavač ne radi kontinualno u linearnom režimu. Problem se ogleda u tome da je neophodno operacionom pojačavaču dovesti i negativno napajanje. Na postojećoj šemi dodati i jedan generator kako bi se generisalo -12 V. Da li se dobijaju očekivane vrednosti?

Dodatan problem može biti ako se želi proveriti šta se dešava na izlazu operacionog pojačavača kada se ulazni napon menja do napona napajanja. Iskorsiti postojeću šemu povećanjem amplitude napona sa 5 V na 12 V, sa sinusoidalnim oblikom napona. Dobijene vrednosti prikazane su na slici 4.



Slika 4: Grafik napona na izlazu bafera

Sa slike 4 je očigledno da izlaz ne može da isprati ulazni napon, što je posledica funkcionisanja interne elektronike operacionog pojačavača. Iz tih razloga razvijen je RRIO (*Rail-to-Rail Input Output*) operacioni pojačavač koji može da dosegne izlaz približno jednak naponu napajanja, takođe ovo važi i za ulazni napon. Npr. umesto OP07 dodati AD8505, a zatim ponoviti simulaciju. Da li se dobijaju očekivani rezultati?

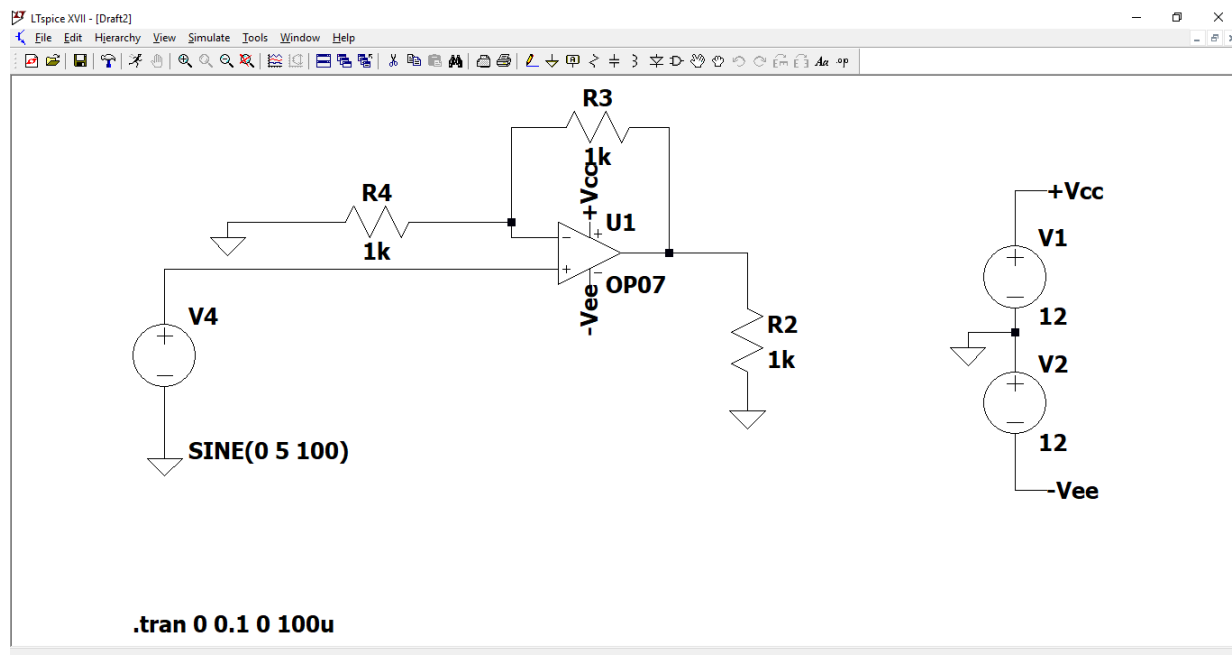
1.2 Neinvertujući pojačavač

Neinvertujući pojačavač predstavlja strukturu koja ima ulogu da, za razliku od bafera, pojača signal određen broj puta. Povezati šemu prema slici 5. Svaki operacioni pojačavač se “trudi” da na svom izlaz podesi takav napon da se održi u linearnom režimu rada. Ako šemu na slici 5., pogledamo sa stanovišta operacionog pojačavača možemo uočiti da će on u zavisnosti od napona generatora na U_+ ulazu morati postavljati izlazni napon tako da se na U_- ulazu dobije napon identičan ulaznom. To je praktično naponski razdelnik na otpornicima R_3 i R_4 , a kada je operacioni pojačavač u linearnom režimu rada može se izvesti jednačina 2.

$$U_{ul} = U_+ = U_- = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{izl} \quad (2)$$

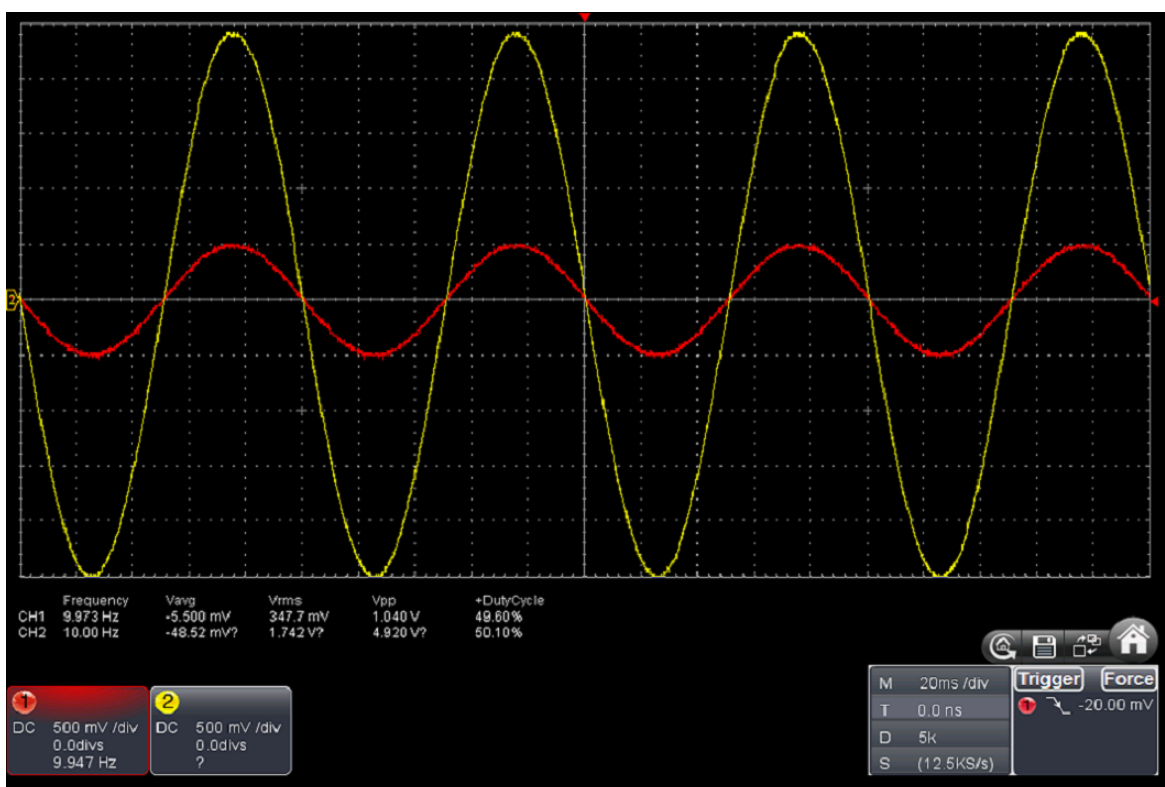
Sređivanjem jednačine 2, može se izraziti pojačanje ovog sklopa što je prikazano jednačinom 3.

$$A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \quad (3)$$



Slika 5: Neinvertujući pojačavač

Da li se dobija očekivani signal na izlazu? Promeniti otpornost i amplitudu izlaznog napona? Da li postoje ograničenja u pojačanju?

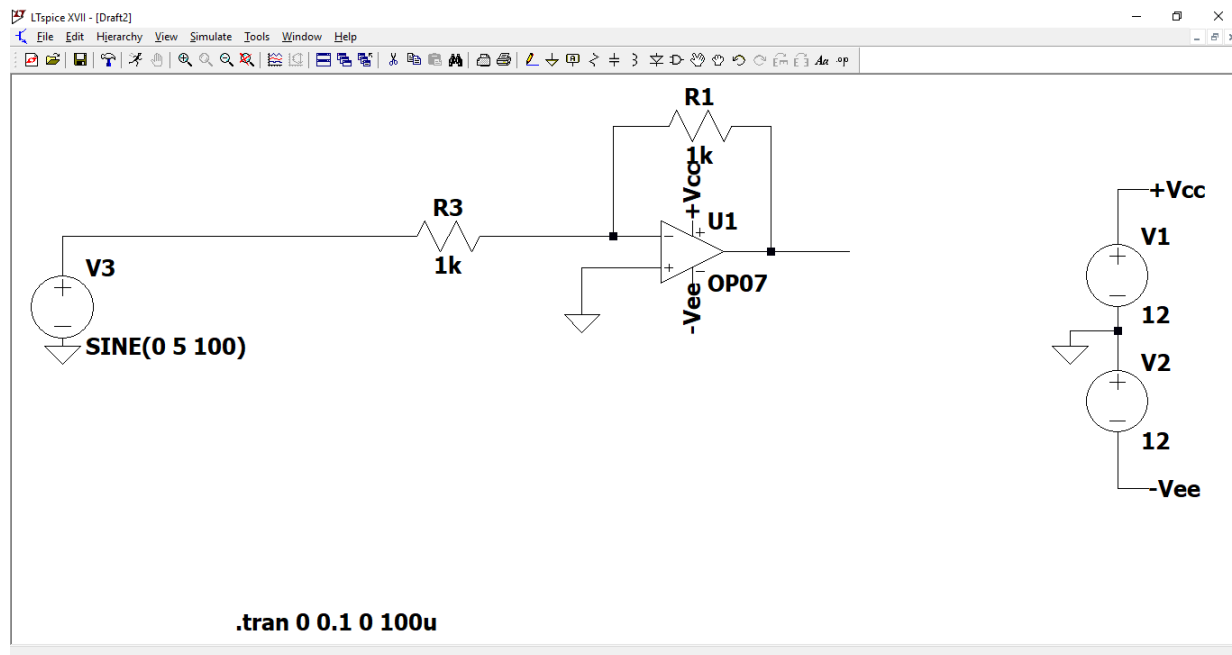


Slika 6: Neinvertujući pojačavač snimak sa osciloskopa

Izlaz neinvertujućeg pojačavača snimljen osciloskopom CH2 (označen žutom bojom) i ulazni signal CH1 (označen crvenom bojom) prikazani su na slici 6. Koliko je pojačanje signala? Prema uputstvu iz vežbe 2. odraditi dc analizu i prikazati prenosnu karakteristiku (zavisnost $U_{izl}(U_{ul})$), sa promenom napona generatora V_4 od -15 V do 15 V sa korakom 0,1 V. Kada se operacioni pojačavač nalazi u saturaciji? Da li je dobijena očekivana prenosna karakteristika?

1.3 Invertujući pojačavač

Invertujući pojačavač za razliku od neinvertujućeg pojačavača, vrši inverziju signala u odnosu na ulaz a usput ga i pojačava određeni broj puta. Nacrtati šemu sa slike 7 u LTspice-u.



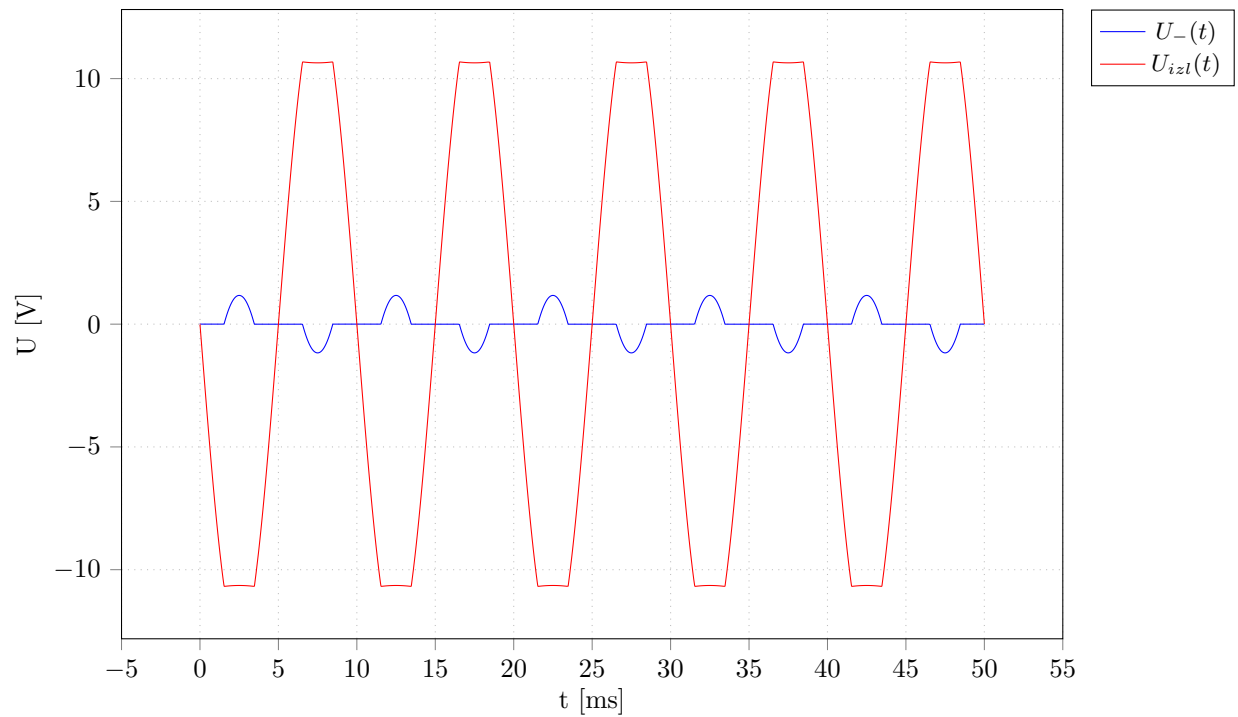
Slika 7: Invertujući pojačavač

Operacioni pojačavač na svom izlazu podešava napon tako da se na U_- ulazu održi vrednost 0 V. Ovo je moguće kada su struje kroz otpornike R_1 i R_3 jednake. Praktično gledano operacioni pojačavač postavlja izlaz tako da održi struje u ove dve grane jednakim. Pošto su ove dve struje suprotnog znaka pojavljuje se predznak -, pa se može izvesti jednačina 4.

$$\begin{aligned} \frac{U_{ul}}{R_3} &= -\frac{U_{izl}}{R_1} \\ A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} &= -\frac{R_1}{R_3} \end{aligned} \quad (4)$$

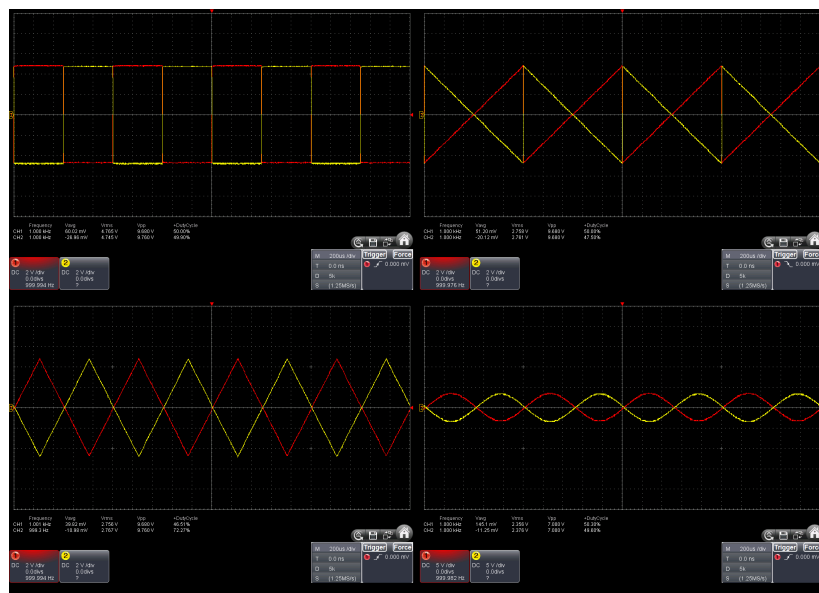
Minus predznak kod pojačanja ukazuje da će se vrednosti napona na izlazu invertovati i pojačati A puta. Pokrenuti simulaciju. Da li se dobija očekivana vrednost pojačanja? Menjati pojačanja i uočiti ograničenja. Odraditi dc karakteristiku sa promenom napona generatora V_3 od -15 V do 15 V sa korakom 0,1 V Da li je dobijena željena karakteristika?

Pošto se uočavaju problemi za napone ispod i iznad napona napajanja, postaviti amplitudu sinusoidalnog signala generatora V_3 na 13 V. Izvršiti tranzijentnu analizu u trajanju od 0,05 s i snimiti signal na izlazu generatora i signal na invertujućem ulazu operacionog pojačavača V_- . Dobijeni grafik prikazan je na slici 8.



Slika 8: Signal na ulazu i izlazu invertujućeg pojačavača

Možemo uočiti da kada signal na izlazu operacionog treba da bude veći od napona napajanja, zbog ograničenja interne elektronike, signal biva odsecan pri vrhu. Ovo se ogleda u tome da će tom prilikom operacioni pojačavač ulaziti u zasićenje i neće moći da održi 0 V na invertujućem ulazu operacionog pojačavača, pa se zato i menja potencijal te tačke čime operacioni pojačavač napušta linearan režim rada. Na slici 9 date su slike raznih talasnih oblika snimljenih osciloskopom.

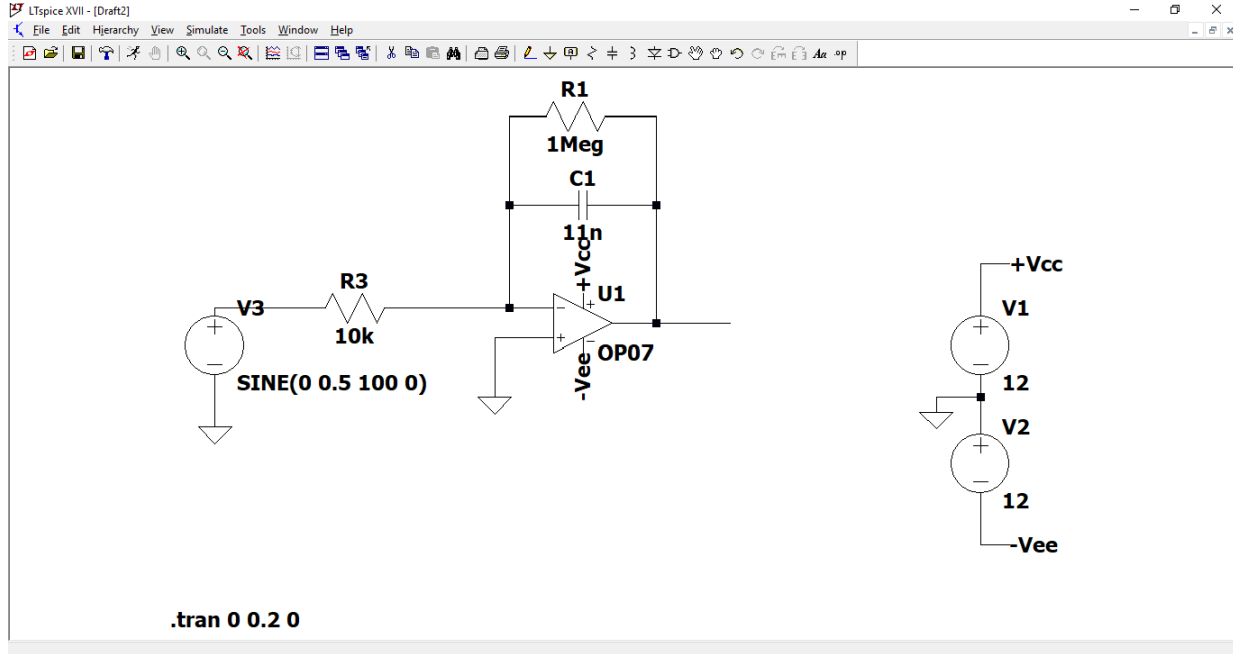


Slika 9: Invertujući pojačavač snimci osciloskopa

Ako se pogleda ulazna impedansa neinvertujućeg pojačavača u odnosu na impedansu invertujućeg pojačavača, zbog povratne sprege, ulazna impedansa je znatno manja kod invertujućeg pojačavača. Iz tih razloga za kondicioniranje signala uvek je bolje koristiti neinvertujući pojačavač. Instrumentacioni pojačavač na svom ulazu ima neinvertujuće pojačavače, pa se zato korsiti kao prvi stepen u većini biomedicinskih uređaja.

1.4 Integrator

Integrator je predstavljen šemom na slici 10.



Slika 10: Integrator

Teorijski, integrator ćemo posmatrati kao komponentu na slici 10, ali bez otpornika R_1 u povratnoj sprezi. Uloga ovog otpornika je da ograniči pojačanje što će biti pojašnjeno u daljoj analizi. Kao i kod invertujućeg pojačavača operacioni pojačavač teži da na izlazu održi napon takav da struja koja je generisana od ulaznog generatora V_3 bude kompenzovana strujom povratne sprege (u ovom slučaju struje kondenzatora). Jednačinom 5 prikazana je struja kondenzatora.

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \implies i_c(t) = C \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (5)$$

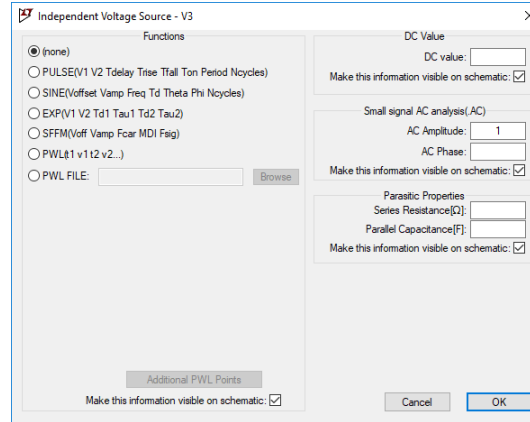
Pošto je napon na kondenzatoru u stvari U_{izl} , i ako se izjednače struje dobija se jednačina 6.

$$\begin{aligned} \frac{u_3}{R_3} &= -C_1 \frac{\partial u_{izl}}{\partial t} \\ u_{izl} &= -\frac{1}{R_3 C_1} \int u_3(t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

Ako je na ulazu generatora doveden napon $U_{ul} = \sin(\omega t)$, i ako ovo uvrstimo u jednačinu 6, dobijamo rezultat prikazan jednačinom 7.

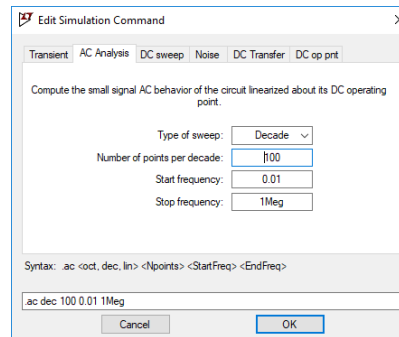
$$u_{izl} = \frac{1}{2\pi f R_3 C_1} \cos(\omega t) + const. \quad (7)$$

Kako bi ova jednačina postala jasnija neophodno je odraditi ac analizu. Prvo je potrebno desnim klikom na generator podesiti *Small signal AC analysis* na 1 V, kao što je prikazano na slici 11.



Slika 11: Podešavanje generatora ac analiza

Zatim je neophodno podesiti parametre simulacije u meniju *Simulate* → *Edit Simulation Cmd* ili ako se prvi put pokreće simulacija samo klikom na *Run*. Odabrati karticu *AC Analysis* i podesiti parametre kao na slici 12.



Slika 12: Podešavanje ac analize

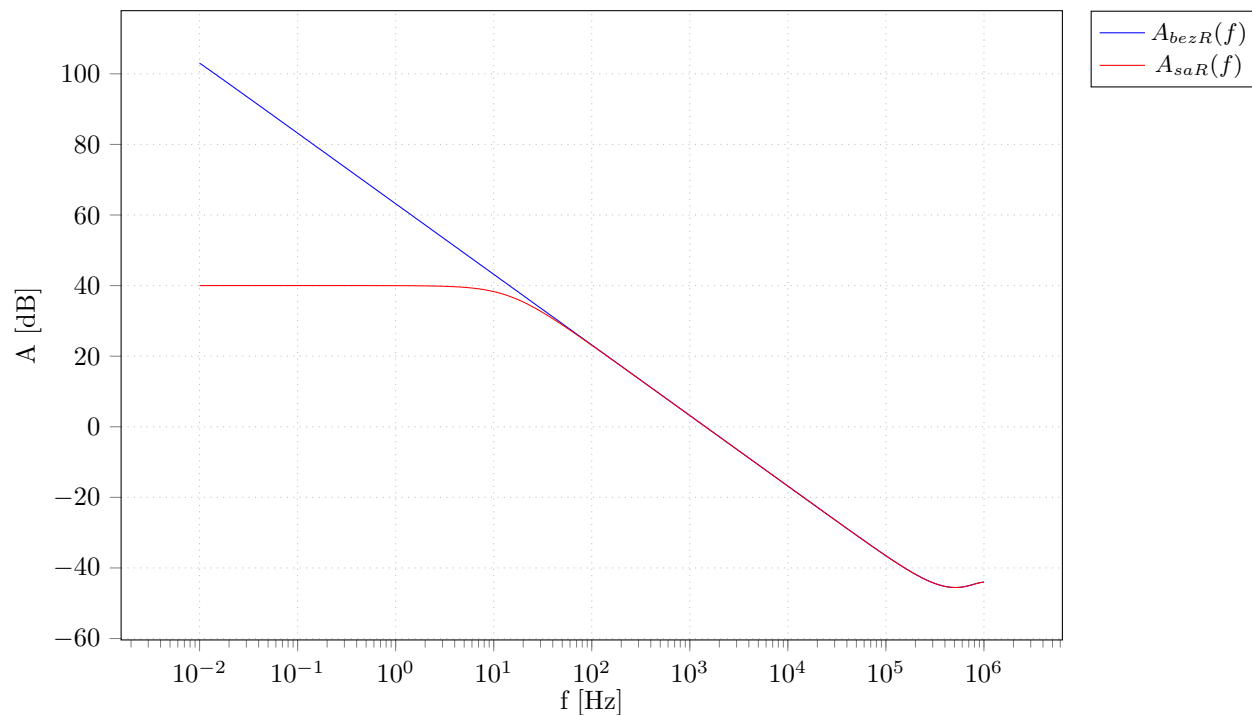
Prvo odraditi simulaciju bez otpornika R_1 u povratnoj sprezi, a zatim ga dodati. Snimiti izlaz generatora. Dobija se karakteristika gde je y osa u dB, a pošto se sve gleda u odnosu na signal V_3 tj. ulazni signal (a on iznosi 1 V), na y osi je u stvari prikazano pojačanje (jednačina 8).

$$A = 20 \log \frac{U_{out}}{U_{in}} \Big|_{U_{in}=1} \Rightarrow A = 20 \log U_{out} \quad (8)$$

Na grafiku prikazanom na slici 13 prikazan je frekvencijski odziv integratora, sa i bez otpornika od 1 MΩ u povratnoj sprezi.

Iz jednačine 7 se vidi da ispred integrala postoji konstanta koja strogo zavisi od frekvencije i to $\sim \frac{1}{f}$. Obratiti pažnju da je na grafiku logaritamska raspodela pa se iz tih razloga dobija linearna prava. Otpornik u povratnoj sprezi ima ulogu da ograniči pojačanje signala, pošto bi za frekvencije bliske 0 Hz dobijena vrednost pojačanja težila ∞ odn. u realnosti maksimalnom pojačanju operacionog pojačavača. Takođe, u idealnom slučaju konstanta iz jednačine 7 bi trebala da teži nuli, ali zbog uticaja parazitnih efekata (npr. pojave ofseta, struje curenja) ova konstanta postoji. Ofset se može aproksimirati kao DC napon reda nekoliko desetina μV do nekoliko mV, koji se ako ne postoji otpornik u povratnoj sprezi pojačava veliki broj puta pa će samim tim i njegov uticaj na izlazu kola postati veliki. Iz tih razloga se dodaje otpornik u povratnoj sprezi

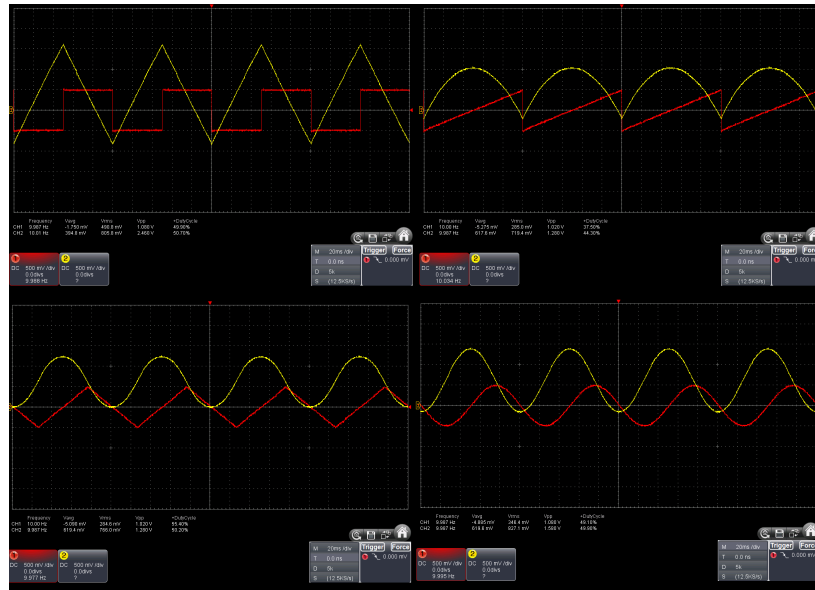
čime se ograničava maksimalno pojačanje, pa će do izražaja doći samo koristan signal. Za velike vrednosti ofseta moguće je videti da signal sadrži DC komponentu.



Slika 13: Zavisnost pojačanja od frekvencije integrator

Uočavamo da pojačanje ima zavisnu karakteristiku od pojačanja, pa se može zaključiti da integrator predstavlja NF filter sa graničnom frekvencijom $\frac{1}{2\pi R_1 C_1}$, dok će vrednost pojačanja biti 1 kada je frekvencija $\frac{1}{2\pi R_3 C_1}$.

Na slici 14 prikazani su snimci osciloskopom različitih talasnih oblika.



Slika 14: Snimci sa izlaza integratora

Dodatne napomene:

- LTspice aplikacija: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/OP07.pdf>.