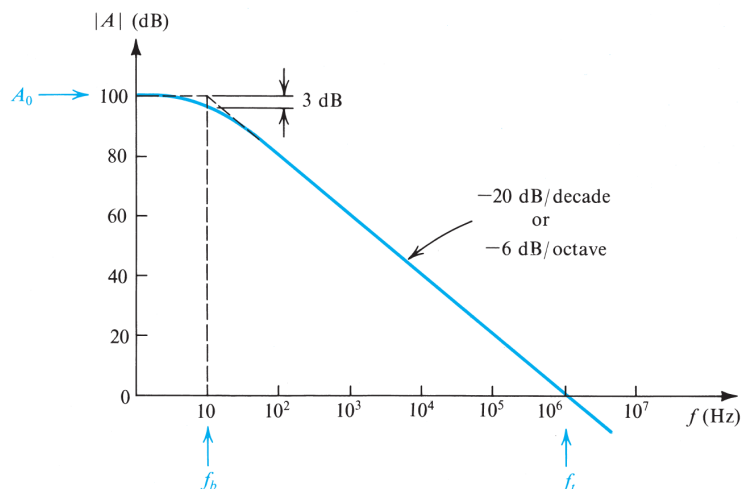


1 UTICAJ KONAČNOG *OPEN-LOOP* POJAČANJA I FREKVENTNOG OPSEGA OPERACIONOG POJAČAVAČA NA PERFORMANSE KOLA

1.1 Zavisnost *open-loop* pojačanja od frekvencije

Diferencijalno *open-loop* pojačanje operacionog pojačavača nije beskonačno. Štaviše, konačno je i opada sa frekvencijom. Na slici 1.1 je prikazana *open-loop* amplitudno-frekventna karakteristika operacionog pojačavača sa brojnim vrijednostima, koje odgovaraju široko dostupnim operacionim pojačavačima opšte namjene (kao što je 741 operacioni pojačavač, dostupan kod većine proizvođača poluprovodničkih komponenti).



slika 1.1 *Open-loop* amplitudno-frekventna karakteristika tipičnog operacionog pojačavača generalne namjene koji je interno kompenzovan.

Može se primijetiti da, iako je jednosmjerno pojačanje veoma visoko, ono počinje da opada na veoma niskoj učestanosti (10 Hz u datom primjeru). Nagib karakteristike tipičnog interno kompenzovanog operacionog pojačavača iznosi -20 dB/dec. Interna kompenzacija podrazumijeva integraciju najčešće jednog kondenzatora na istom čipu, čija uloga je da pojačanje operacionog pojačavača ima STC (*single-time-constant*) LP (*low-pass*) odziv, kako je prikazano na slici 1.1. Naravno, uloga kompenzacije je postizanje stabilnog sistema. *Open-loop* pojačanje interno kompenzovanog operacionog pojačavača se može zapisati kao:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_b}} \quad (1.1)$$

pri čemu je A_0 jednosmjerno pojačanje, dok je ω_b učestanost na kojoj se jednosmjerno pojačanje smanji za 3 dB (-3 dB učestanost, *corner* učestanost ili „*break*“ učestanost). Za primjer prikazan na slici 1.1, jednosmjerno pojačanje $A_0 = 10^5$ i -3 dB učestanost $\omega_b = 2\pi \times 10$ rad/s. Za frekvencije $\omega \gg \omega_b$ (10 ili više puta), *open-loop* amplitudno-frekventna karakteristika se može aproksimirati na sljedeći način:

$$|A(j\omega)| = \frac{A_0 \omega_b}{\omega} \quad (1.2)$$

odakle se može zaključiti da je učestanost ω_t na kojoj je pojačanje jednako jedinici (0 dB) dato izrazom:

$$\omega_t = A_0 \omega_b \quad (1.3)$$

Učestanost $f_t = \omega_t / 2\pi$ se obično navodi u specifikacijama komercijalno dostupnih operacionih pojačavača kao *unity-gain bandwidth*. Kako je frekvencija f_t jednaka proizvodu jednosmjernog pojačanja A_0 i -3 dB učestanosti $f_b = \omega_b / 2\pi$, navodi se i kao GB (*gain-bandwidth product*). Učestanost

f_t i proizvod pojačanja i frekventnog opsega imaju jednaku vrijednost samo kod operacionih pojačavača koji imaju STC LP odziv. Za učestanosti $\omega \gg \omega_b$ *open-loop* pojačanje, prema relaciji (1.1) postaje:

$$A(s) = \frac{\omega_t}{s} \quad (1.4)$$

dok se *open-loop* amplitudno-frekventna karakteristika može aproksimirati na sljedeći način:

$$|A(j\omega)| = \frac{\omega_t}{\omega} = \frac{f_t}{f} \quad (1.5)$$

Dakle, ukoliko je poznata učestanost f_t (10^6 Hz u primjeru prikazanom na slici 1.1), jednostavno se može zaključiti o vrijednosti pojačanja operacionog pojačavača za datu frekvenciju f . Takođe je jasno da se izraz (1.5) slaže sa karakteristikom prikazanom na slici 1.1. Naime, za učestanosti $f \gg f_b$ udvostručavanjem učestanosti (povećanjem za jednu oktavu), pojačanje se smanjuje dva puta (za 6 dB). Slično, povećanjem učestanosti 10 puta (jednu dekadu), pojačanje opada 10 puta (za 20 dB).

Opseg vrijednosti učestanosti f_t između operacionih pojačavača istog tipa je obično značajno manji nego opseg jednosmjernog pojačanja A_0 ili -3 dB učestanosti f_b . Iz ovog razloga, f_t je poželjniji parametar u specifikaciji proizvođača. I konačno, za operacioni pojačavač koji ima ustaljen pad od -6 dB/oct (ili -20 dB/dec) se kaže da ima *single-pole* model, odnosno model sa jednim dominantnim polom.

1.2 Frekventni odziv *closed-loop* pojačavača baziranih na operacionom pojačavaču

Slijedi razmatranje uticaja ograničenog pojačanja operacionog pojačavača i frekventnog opsega na *closed-loop* prenosnu funkciju u dvije osnovne konfiguracije: invertujuća, slika 1.2, i neinvertujuća, slika 1.3. *Closed-loop* pojačanje invertujućeg pojačavača, uz pretpostavku da operacioni pojačavač ima konačno pojačanje A , dato je izrazom:

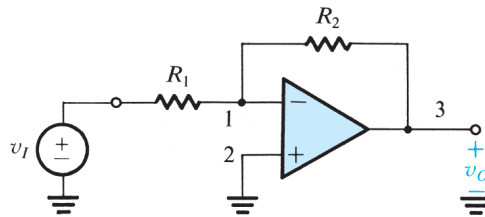
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A} \quad (1.6)$$

Na osnovu relacija (1.1) i (1.3) dobija se:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{-R_2/R_1}{1 + \frac{1}{A_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{s}{\omega_t(1 + R_2/R_1)}} \quad (1.7)$$

Za $A_0 \gg (1 + R_2/R_1)$, što je obično slučaj, dobija se da je *closed-loop* pojačanje invertujućeg pojačavača:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} \approx \frac{-R_2/R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t(1 + R_2/R_1)}} \quad (1.8)$$



slika 1.2 Invertujuća konfiguracija.

Na osnovu izraza (1.8) može se zaključiti da invertujući pojačavač ima STC LP odziv sa magnitudom DC pojačanja R_2/R_1 . *Closed-loop* pojačanje opada uniformno -20 dB/dec, dok je -3 dB učestanost data izrazom:

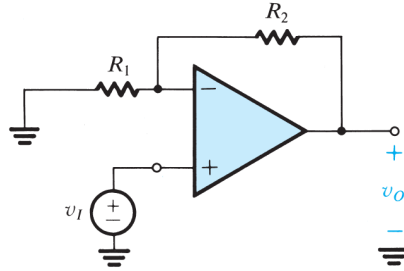
$$\omega_{-3dB} = \frac{\omega_t}{1 + R_2/R_1} \quad (1.9)$$

Slično, analizom neinvertujućeg pojačavača prikazanog na slici 1.3, uz pretpostavku da operacioni pojačavač ima konačno pojačanje A , dobija se *closed-loop* pojačanje:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A} \quad (1.10)$$

Na osnovu relacija (1.1) i (1.3), uz pretpostavku da je $A_0 \gg (1 + R_2 / R_1)$, dobija se da je *closed-loop* pojačanje neinvertujućeg pojačavača:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} \approx \frac{1 + R_2/R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t(1 + R_2/R_1)}} \quad (1.11)$$



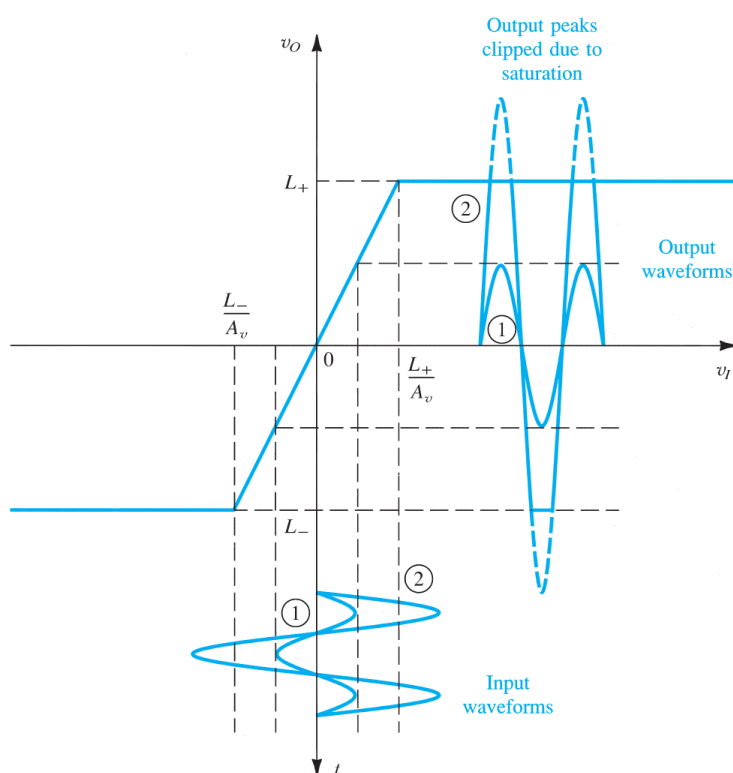
slika 1.3 Neinvertujuća konfiguracija.

Na osnovu izraza (1.11) može se zaključiti da neinvertujući pojačavač takođe ima STC LP odziv sa magnitudom DC pojačanja $(1 + R_2 / R_1)$. *Closed-loop* pojačanje opada uniformno -20 dB/dec, dok je - 3 dB učestanost data relacijom (1.9).

2 PONAŠANJE OPERACIONOG POJAČAVAČA ZA VELIKE VRIJEDNOSTI IZLAZNOG NAPONA I STRUJE

2.1 Zasićenje izlaznog napona

Slično svim ostalim pojačavačima, operacioni pojačavači imaju linearnu prenosnu karakteristiku za ograničen opseg izlaznog napona. Izlazni napon operacionog pojačavača se „zasiti“ na način prikazan na slici 2.1, gdje su L_+ i L_- u opsegu od oko 1 V u odnosu na pozitivan i negativan napon napajanja, respektivno. Na primjer, ukoliko je napon napajanja pojačavača ± 15 V, pojačavač će ući u zasićenje kada izlazni napon dostigne oko 13 V u pozitivnom smjeru, odnosno oko -13 V u negativnom smjeru. Za ovakav primjer, kaže se da mu je izlazni napon u opsegu ± 13 V. Kako bi se izbjeglo odsijecanje izlaznog napona, odnosno distorzija talasnog oblika, ulazni signal mora biti dovoljno mali.



slika 2.1 Prenosna karakteristika pojačavača.

2.2 Ograničenje izlazne struje

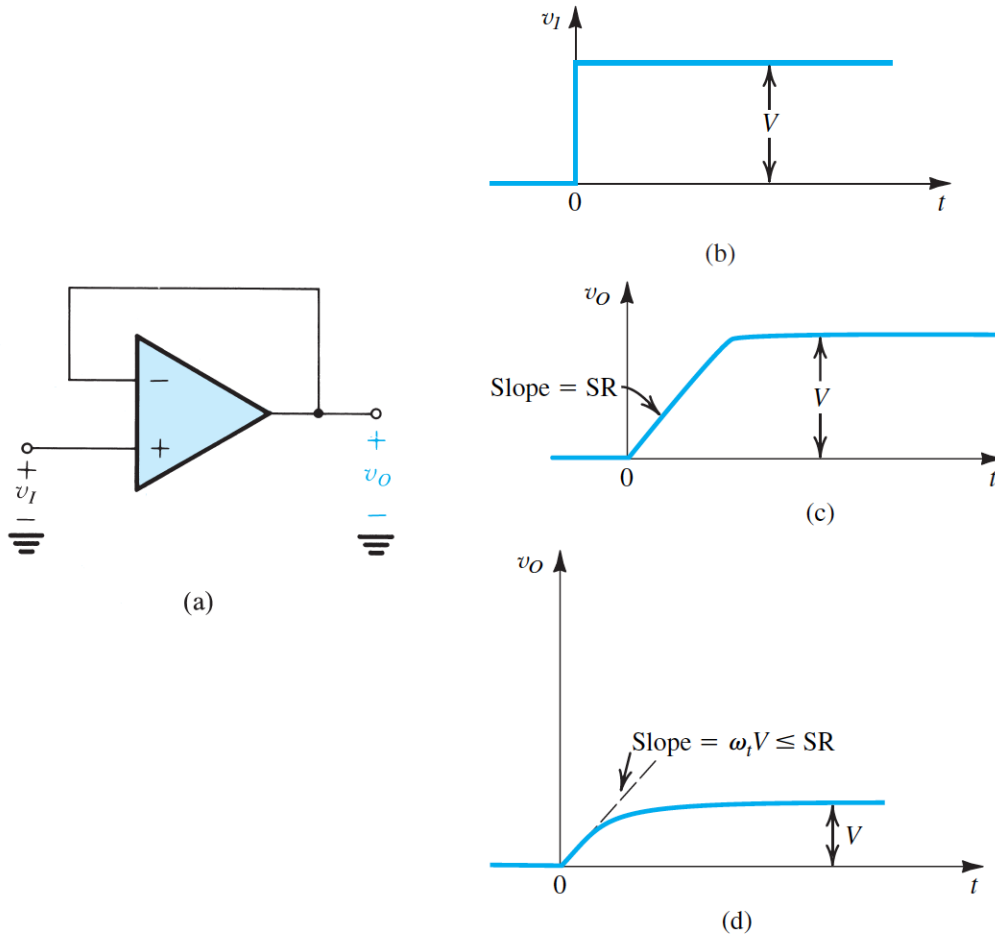
Još jedno ograničenje rada operacionog pojačavača odnosi se na ograničenu maksimalnu izlaznu struju. Na primjer, popularni 741 operacioni pojačavač prema specifikaciji ima maksimalnu izlaznu struju ± 20 mA. Dakle, prilikom dizajniranja *closed-loop* kola koja sadrže 741, neophodno je voditi računa da tražena struja na izlazu operacionog pojačavača ne bude veća od 20 mA u bilo kom smjeru. Ukoliko je tražena struja veća od granične vrijednosti, operacioni pojačavač će „otići“ u zasićenje na nivou maksimalne struje koju može dati/primiti.

2.3 Slew Rate

Fenomen koji može izazvati nelinearne distorzije, kada su u pitanju velike vrijednosti izlaznog signala, je *slew-rate* ograničenje. Naziv ukazuje da postoji specifična maksimalna brzina promjene signala na izlazu realnog operacionog pojačavača. Ovaj maksimum je poznat kao SR (*slew-rate*) operacionog pojačavača i definiše se kao:

$$SR = \left. \frac{dv_0}{dt} \right|_{max} \quad (2.1)$$

i obično se specificira u okviru dokumentacije operacionog pojačavača u [V/μs]. Slijedi da će se izlaz operacionog pojačavača mijenjati u skladu sa njegovim SR-om, ukoliko je signal koji se dovodi na ulaz kola baziranog na operacionom pojačavaču takav da zahtijeva brži odziv od specificirane SR vrijednosti. Kao primjer može se posmatrati operacioni pojačavač u konfiguraciji jediničnog operacionog pojačavača, slika 2.2(a). Na ulaz kola se dovodi odskočna pobuda, slika 2.2(b). Izlaz operacionog pojačavača neće biti u mogućnosti da isprati ulaz, već će imati nagib koji odgovara njegovom SR-u, slika 2.2(c). U ovoj situaciji izlaz operacionog pojačavača je ograničen SR-om.



slika 2.2 (a) Jedinični pojačavač (*unity-gain follower*) (b) Odskočna pobuda. (c) Izlaz operacionog pojačavača ograničen SR-om. (d) Rast izlaznog napona po eksponencijalnom zakonu dobijen kada je V dovoljno malo tako a je inicijalni nagib $\omega_t V$ manji ili jednak SR-u.

Slew-rate ograničenje se u osnovi razlikuje od konačnog frekventnog opsega operacionog pojačavača koji ograničava frekventni odziv *closed-loop* pojačavača. Naime, ograničen opseg je linearan fenomen i ne rezultira promjenom oblika ulazne sinusoide, odnosno, ne dovodi do nelinearnih distorzija. SR ograničenje, sa druge strane, može izazvati nelinearne distorzije ulazne sinusoide kada su njena frekvencija i amplituda takve da odgovarajući idealni izlaz zahtijeva da se v_o mijenja brzinom većom od SR-a. Upravo ovo je uzrok još jedne specifičnosti operacionog pojačavača – *full-power* opsega.

Treba napomenuti da je, ukoliko ulazna odskočna pobuda ima dovoljno malu vrijednost V , izlazni napon eksponencijalno rastuća funkcija, kako je prikazano na slici 2.2(d). Ukoliko bi jedino ograničenje dinamičkih performansi jediničnog pojačavača bio ograničen frekventni opseg operacionog pojačavača, onda bi se na izlazu očekivala funkcija prikazana na slici 2.2(d) (na pobudu odskočnog tipa). Prenosna funkcija jediničnog pojačavača se može dobiti zamjenom $R_1 = \infty$ i $R_2 = 0$ u relaciju (1.11):

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_t}} \quad (2.2)$$

što predstavlja prenosnu funkciju STC kola sa vremenskom konstantom $1 / \omega_t$. Odziv na pobudu odskočnog tipa ovakvog sistema je:

$$v_o(t) = V(1 - e^{-\omega_t t}) \quad (2.3)$$

Inicijalni nagib ove eksponencijalno rastuće funkcije je $\omega_t V$. Dakle, sve dok je napon V dovoljno mali tako da je $\omega_t V \leq SR$, izlaz će biti kao što je prikazano na slici 2.2(d).

2.4 Full-Power opseg

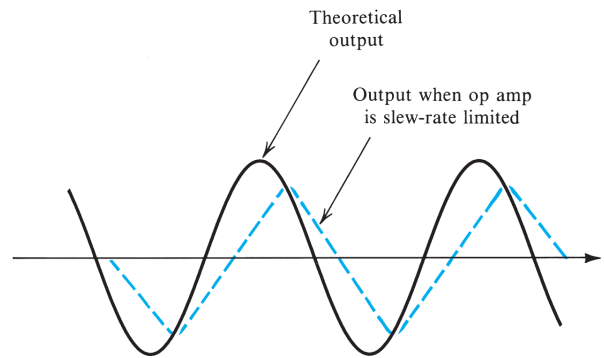
SR ograničenje operacionog pojačavača može izazvati nelinearne distorzije sinusoidalnog talasnog oblika. Razmotrimo još jednom jedinični pojačavač (*unity-gain follower*) na čijem ulazu je sinusoidalni talasni oblik:

$$v_i(t) = \hat{V}_i \sin \omega t \quad (2.4)$$

Brzina promjene ovog napona iznosi:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \omega \hat{V}_i \cos \omega t \quad (2.5)$$

čija maksimalna vrijednost iznosi $\omega \hat{V}_i$. Maksimum se javlja pri prolasku ulazne sinusoide kroz nulu.



slika 2.3 Uticaj SR-a na sinusoidu na izlazu operacionog pojačavača.

Ukoliko $\omega \hat{V}_i$ premaši SR operacionog pojačavača, izlazni talasni oblik će imati distorziju prikazanu na slici 2.3. Treba uočiti da izlaz ne može pratiti veliku brzinu promjene sinusoide dok prolazi kroz nulu. U okviru specifikacije operacionog pojačavača obično je data učestanost f_M , koja se označava kao *full-power bandwidth*. To je učestanost na kojoj izlazna sinusoida, čija je amplituda jednaka „određenom“ izlaznom naponu operacionog pojačavača, počinje da pokazuje distorziju kao posljedica SR ograničenja. Ukoliko se taj „određeni“ napon na izlazu operacionog pojačavača označi kao V_{omax} , tada važi:

$$\omega_M V_{omax} = SR \quad (2.6)$$

Odnosno:

$$f_M = \frac{SR}{2\pi V_{omax}} \quad (2.7)$$

Očigledno je da će izlazna sinusoida amplitude manje od V_{omax} pokazati nelinearne distorzije na učestanostima većim od ω_M . Odnosno, na učestanostima većim od ω_M , maksimalna amplituda izlazne sinusoide bez izobličenja je:

$$V_o = V_{omax} \frac{\omega_M}{\omega} = \frac{SR}{\omega} \quad (2.8)$$

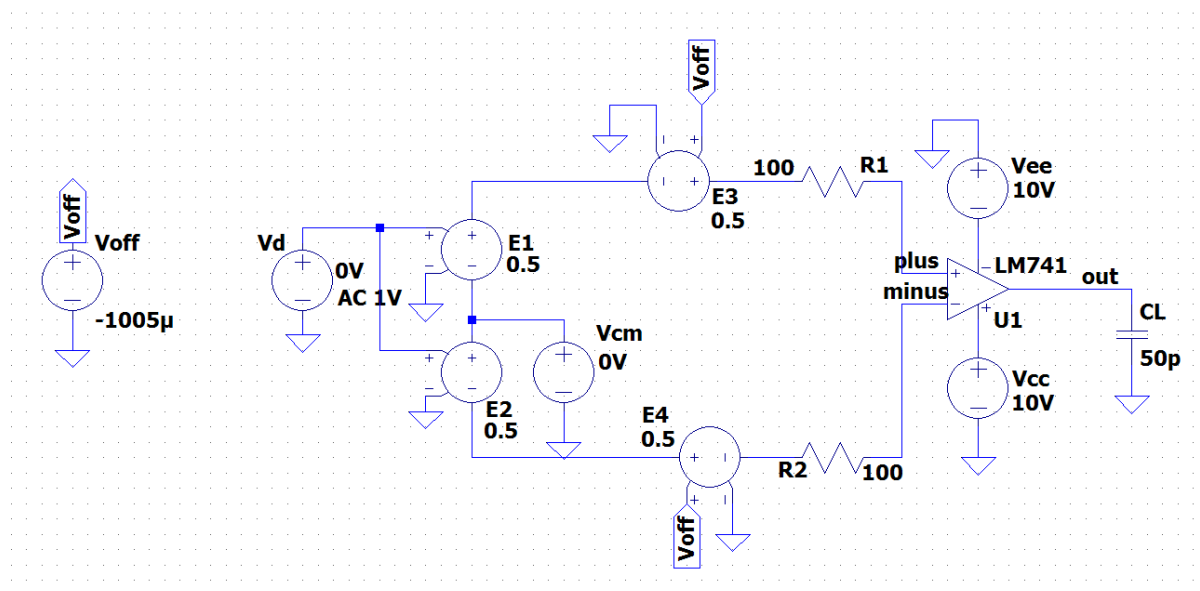
Literatura

- A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th edition, Oxford University Press, 2015.
B. Razavi, *Fundamentals of Microelectronics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2014

VJEŽBA

1 Pojačanje i frekventni opseg operacionog pojačavača

- Izvršiti AC analizu operacionog pojačavača uA741 u funkciji ulaznog diferencijalnog napona u *open-loop* konfiguraciji, za kapacitivno opterećenje na izlazu $C_L = 50$ pF. Napon napajanja kola iznosi ± 10 V. Voditi računa o kompenzaciji naponskog *offset*-a.
 - Kreirati kolo kako je prikazano na slici 1.1. Naponski izvor V_{off} eliminiše uticaj naponskog *offset*-a, odnosno, obezbjeđuje pravilno postavljenu radnu tačku u linearnom segmentu prenosne DC karakteristike.
 - Podesiti AC komponentu naponskog generatora V_d na 1 V. Odabirom 1 V AC komponente na ulazu, na izlazu se dobija prenosna karakteristika sistema.
 - Izabrati AC tip simulacije i izvršiti podešavanja kako je prikazano na slici 1.2. Podešeno je da se simulacija izvršava za opseg frekvencija od 0.1 Hz do 100 MHz, sa logaritamskom podjelom.

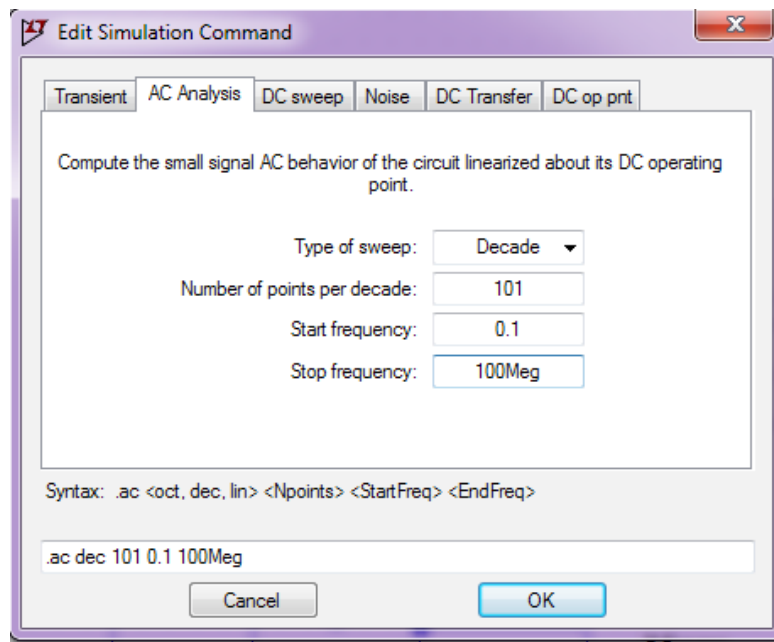


slika 1.1

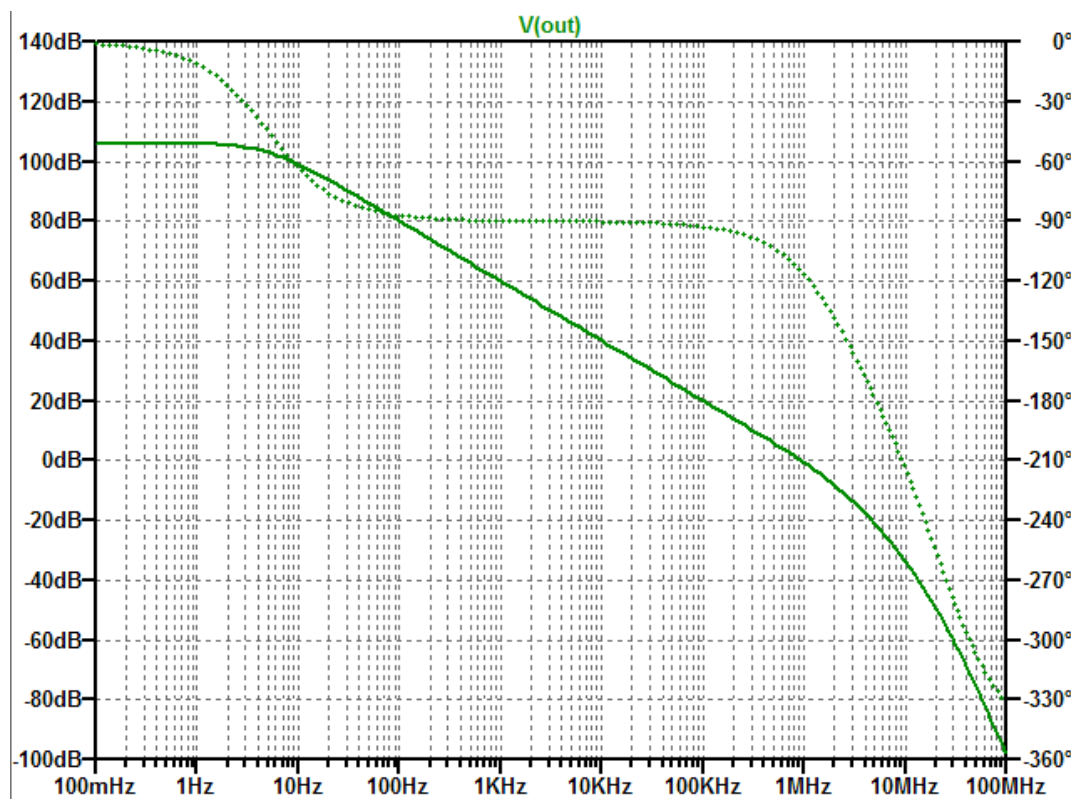
Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.3.

Na osnovu amplitudsko-frekventne karakteristike, može se zaključiti da je jednosmjerno pojačanje oko 106 dB, kao i da je -3 dB učestanost oko 5 Hz. *Unity-gain frequency* iznosi oko 936 kHz, dok je margina faze oko 75 °. Margina faze se određuje tako što se za *unity-gain frequency* očita vrijednost faze i sabere sa 180 °. Preciznije vrijednosti navedenih parametara se mogu dobiti korišćenjem **.meas** direktive, kako je prikazano na slici 1.4.

U cilju izračunavanja ulazne diferencijalne otpornosti operacionog pojačavača, mogu se očitati *small-signal* ulazne struje, koje teku kroz naponom kontrolisane naponske izvore za eliminaciju *offset*-a, pri čemu je ulazni diferencijalni *small-signal* napon 1 V. Ove dvije struje iznose oko 3.5 μ A, što znači da je diferencijalna ulazna otpornost oko $(1 \text{ V} / 3.5 \text{ } \mu\text{A}) = 0.286 \text{ M}\Omega$.



slika 1.2



slika 1.3

```

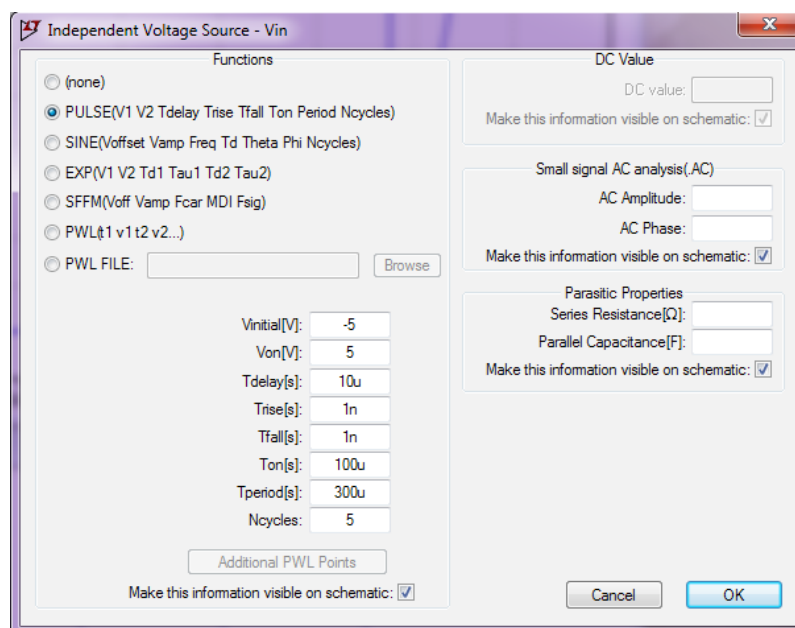
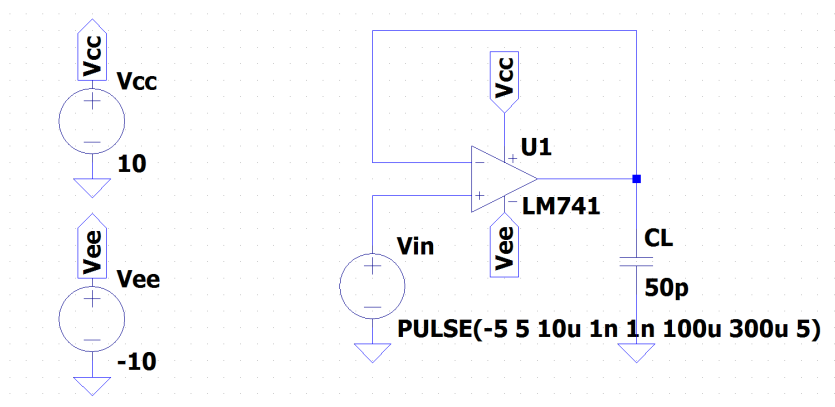
.meas AC GAIN MAX V(out) FROM 1 TO 10meg
.meas ac UGF when db(V(out))=0
.meas AC f3dB find V(out) when db(V(out))=102.847 cross=1
.meas ac PM find (V(out)) at=936712

```

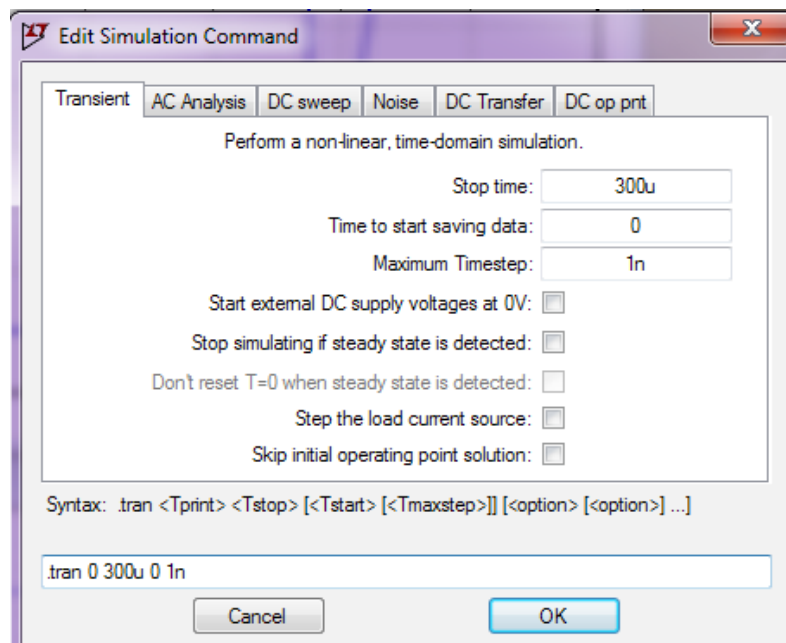
slika 1.4

2 Slew-Rate ograničenje operacionog pojačavača

- Odrediti SR u $[V/\mu s]$ operacionog pojačavača uA741 za kapacitivno opterećenje na izlazu $C_L = 50$ pF. Napon napajanja kola iznosi ± 10 V.
 - Kreirati kolo kako je prikazano na slici 2.1.
 - Za naponski izvor V_{in} izvršiti podešavanja kao na slici.
 - Izabrati *Transient* tip simulacije i izvršiti podešavanja kako je prikazano na slici 2.2. Podešeno je da se simulacija izvršava 300 μs , sa rezolucijom od 1 ns.
 - Na ulaz i izlaz kola postaviti naponski marker.

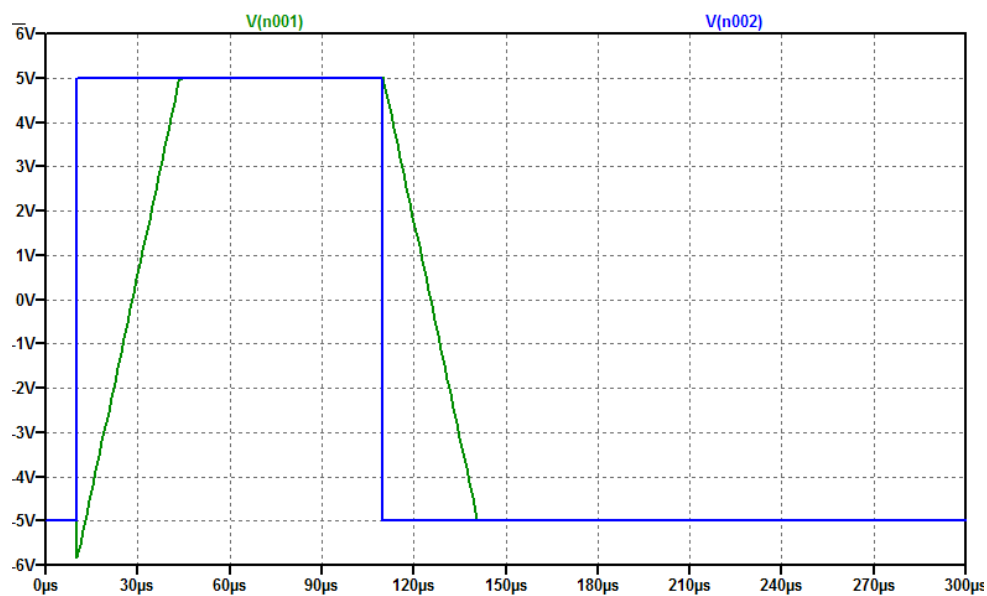


slika 2.1



slika 2.2

Rezultati simulacije prikazani su na slici 2.3.

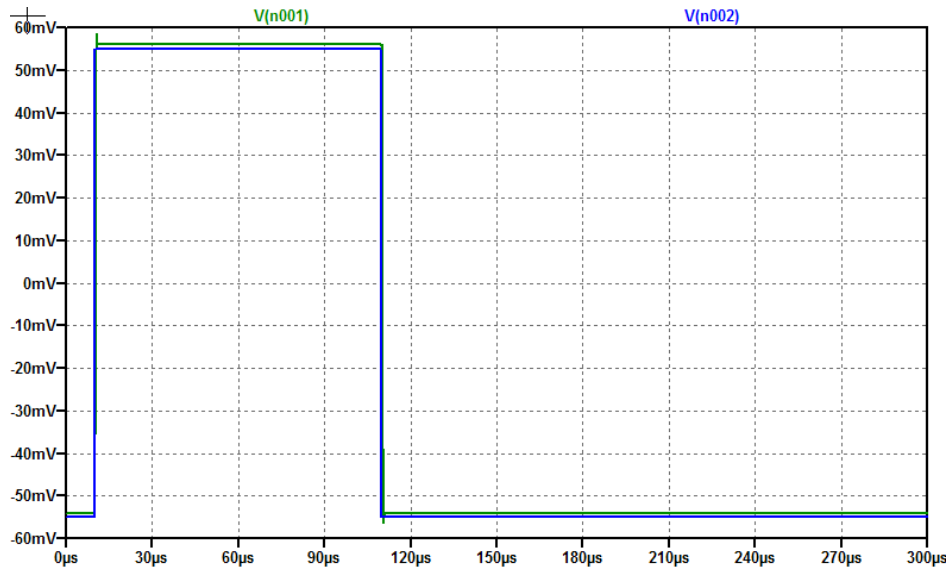


slika 2.3

Na osnovu rezultata simulacije, može se procijeniti da su pozitivni (*rise*) SR^+ i negativni (*fall*) SR^- približno jednaki i da iznose oko $\pm 0.325 \text{ V}/\mu\text{s}$.

- Za operacioni pojačavač uA741 u konfiguraciji jediničnog pojačavača odrediti maksimalnu vrijednost napona odskočnog tipa na ulazu za koji se izlaz ponaša u skladu sa relacijom (2.3).
 - $\omega_t V \leq SR \Rightarrow V \leq SR / \omega_t = 0.325 \text{ V}/\mu\text{s} / 2\pi / 936.7 \text{ kHz} = 0.055 \text{ V}$
- Ponoviti prethodnu simulaciju pri čemu je amplituda ulaznog napona 0.055 V. Koliko iznosi *rise-time*?

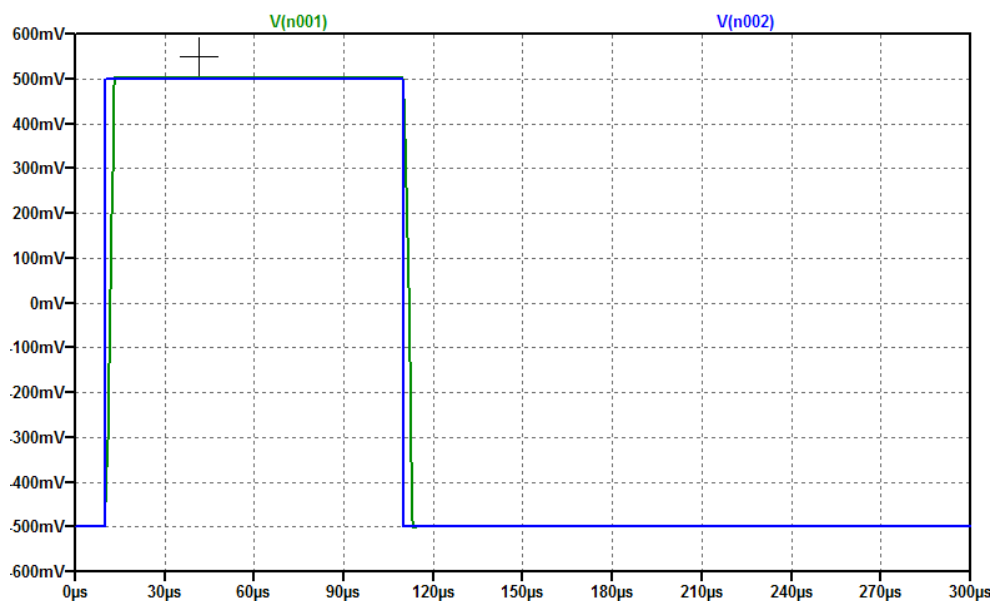
Na slici 2.4 je prikazan rezultat simulacije. Prema rezultatima simulacije, *rise-time* iznosi 350 ns. Na osnovu relacije (2.3) slijedi da je *rise-time* = $(1 / \omega_t) \ln 9 = 373 \text{ ns}$.



slika 2.4

- Ponoviti prethodnu simulaciju pri čemu je amplituda ulaznog napona 0.5 V. Koliko iznosi *rise-time*?

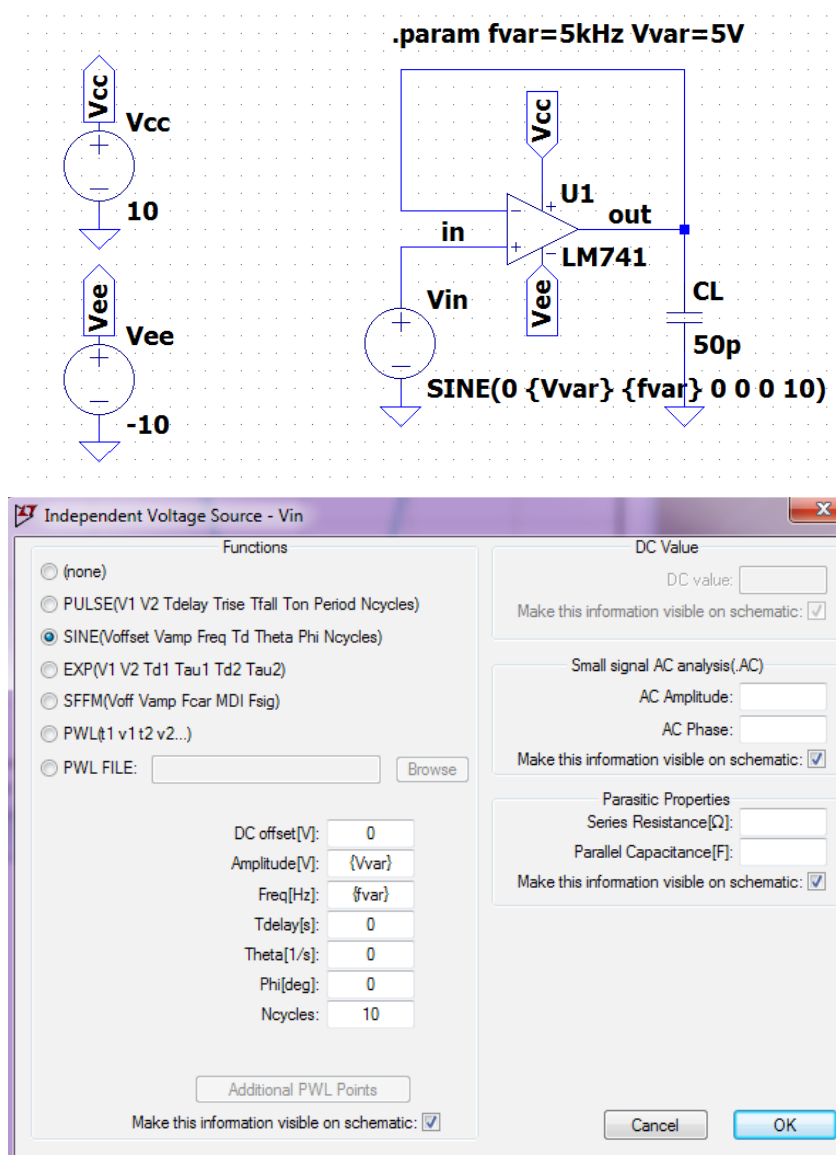
Na slici 2.5 je prikazan rezultat simulacije. Prema rezultatima simulacije, *rise-time* iznosi 2.46 μs. Kako je u ovom slučaju *rise-time* ograničen SR-om operacionog pojačavača, slijedi da je *rise-time* = $(0.9 * 1 \text{ V} - 0.1 * 1 \text{ V}) / SR = 0.8 * 1 \text{ V} / (0.325 \text{ V}/\mu\text{s}) = 2.46 \mu\text{s}$.



slika 2.5

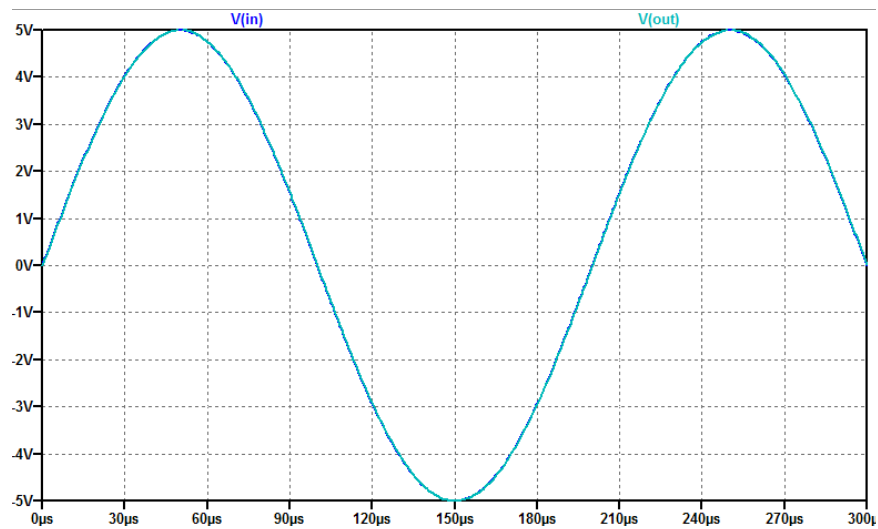
3 Full-Power opseg operacionog pojačavača

- Izvršiti simulaciju rada u vremenskom domenu jediničnog pojačavača koji je realizovan pomoću uA741, pri čemu se na ulaz kola dovodi sinusoida amplitude 5 V, dok frekvencija ima vrijednost: a) 5 kHz, b) 15 kHz i c) 25 kHz. Napon napajanja operacionog pojačavača iznosi ± 10 V.
- Kreirati kolo kako je prikazano na slici 3.1.
 - Za naponski izvor V_{in} izvršiti podešavanja kao na slici.
 - Izabrati *Transient* tip simulacije i izvršiti podešavanja kako je prikazano na slici 2.2.
 - Na ulazi i izlazu kola postaviti naponske markere.
 - Ponoviti analizu za ostale vrijednosti frekvencije ulaznog napona.

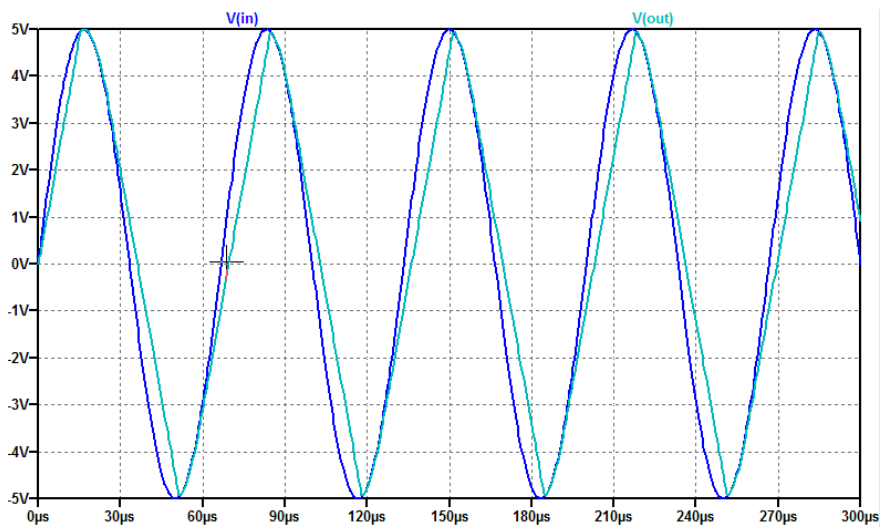


slika 3.1

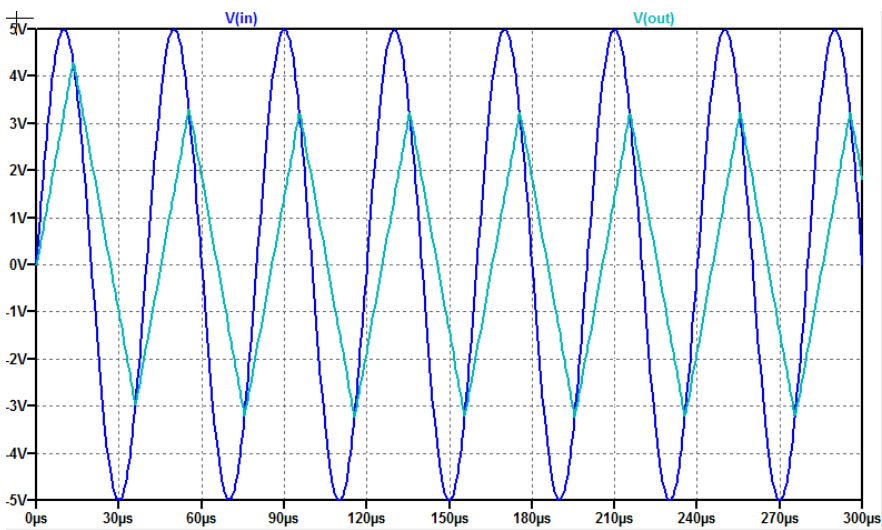
Na slici 3.2 su prikazani rezultati simulacije. Na osnovu rezultata simulacije može se zaključiti da je učestanost f_M , za amplitudu napona od 5 V, između 5 kHz i 15 kHz. Prema relaciji (2.7), dobija se da je učestanost $f_M = 10.34$ kHz.



slika 3.2 (a)



slika 3.2 (b)

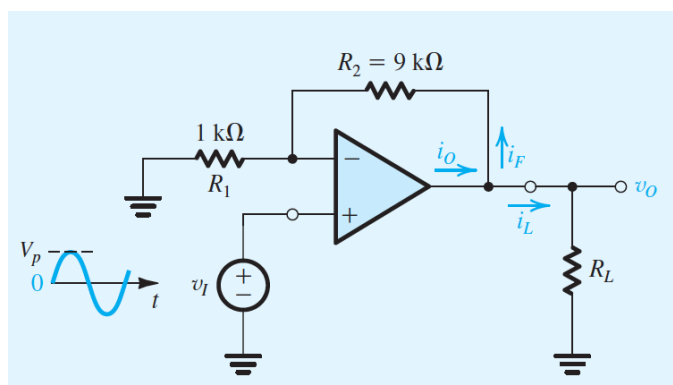


slika 3.2 (c)

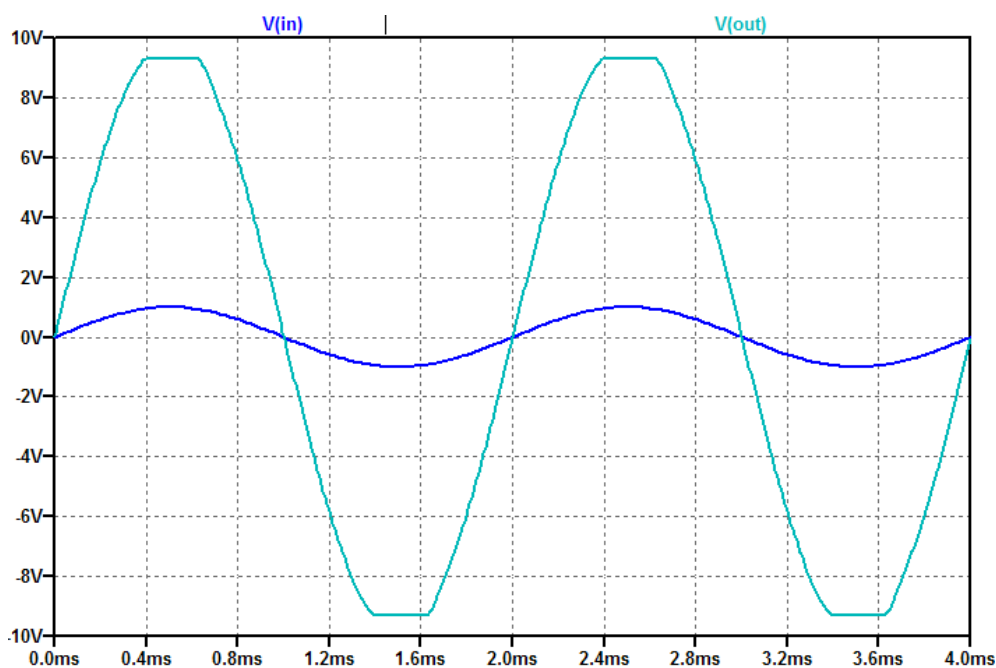
- Korigovati simulaciju, pri čemu je učestanost sinusoide 10.34 kHz, dok amplituda ima vrijednosti 3 V, 5 V, 7 V. Objasniti.

Zadatak

Izvršena je simulacija rada neinvertujućeg pojačavača prikazanog na slici 1. Pojačavač je realizovan pomoću operacionog pojačavača uA741, sa naponom napajanja ± 15 V. Na ulazu je sinusoida amplitude 1 V i učestanosti 0.5 kHz, dok je otpornost potrošača $R_L = 400 \Omega$. Na slici 2 je prikazan rezultat simulacije. Objasniti uzrok odsijecanja napona na izlazu.



slika 1



slika 2

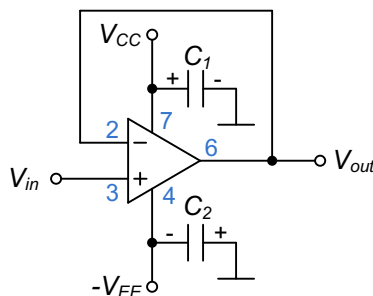
Literatura

A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th edition, Oxford University Press, 2015.
G. W. Roberts, A. S. Sedra, *Spice*, 2nd edition, Oxford University Press, 1997.

LABORATORIJSKA VJEŽBA

1 Slew Rate

Uz pomoć osciloskopa izmjeriti *SR* operacionog pojačavača LM741 u konfiguraciji jediničnog pojačavača, slika 1.1. Na ulaz kola dovesti povorku pravougaonih impulsa ± 5 V, učestanosti 10 kHz. $V_{CC}=10$ V, $V_{EE}=10$ V, $C_I=C_2=10$ μ F.



slika 1.1

Izmjerena vrijednost pozitivnog *SR*-a je: _____ .

Izmjerena vrijednost negativnog *SR*-a je: _____ .

2 Rise-time i fall-time

Uz pomoć osciloskopa izmjeriti *rise-time* i *fall-time* operacionog pojačavača LM741 u konfiguraciji jediničnog pojačavača, slika 1.1. Na ulaz kola dovesti povorku pravougaonih impulsa ± 50 mV, učestanosti 10 kHz. $V_{CC}=10$ V, $V_{EE}=10$ V, $C_I=C_2=10$ μ F.

Izmjerena vrijednost *rise-time*-a je: _____ .

Izmjerena vrijednost *fall-time*-a je: _____ .

3 Pojaćanje i frekventni opseg operacionog pojačavača u konfiguraciji neinvertujućeg pojačavača

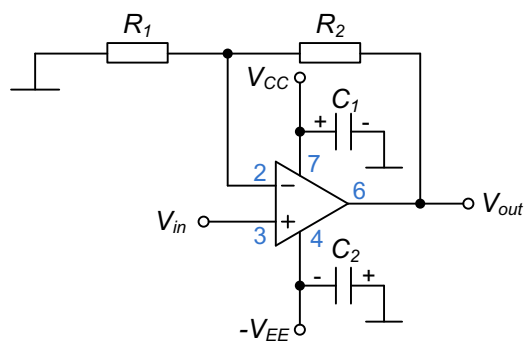
Uz pomoć osciloskopa izmjeriti f_{3dB} operacionog pojačavača LM741 u konfiguraciji neinvertujućeg pojačavača, slika 1.2. Na ulaz kola dovesti sinusoidu amplitude 200 mV, čija se učestanost postepeno mijenja od 100 Hz do 200 kHz. $V_{CC}=10$ V, $V_{EE}=10$ V, $C_I=C_2=10$ μ F, $R_I=1$ k Ω , $R_2=10$ k Ω .

DC pojaćanje pojačavača prikazanog na slici je $(1+R_2/R_1)$, dok je njegova ω_{3dB} učestanost:

$$\omega_{-3dB} = \frac{\omega_t}{1 + R_2/R_1}$$

Slijedi da je *unity-gain* učestanost operacionog pojačavača:

$$\omega_t = (1 + R_2/R_1)\omega_{-3dB}$$



slika 1.2

Izmjerena vrijednost f_{3dB} pojačavača prikazanog na slici 1.2 je: _____ .

Unity-gain učestanost f_t operacionog pojačavača je: _____ .