

## FREKVENCIJSKE KOMPENZACIJE OPERACIONIH POJAČAVAČA

**4.1 ZADATAK:** Operacioni pojačavač, čija je prenosna funkcija data izrazom:

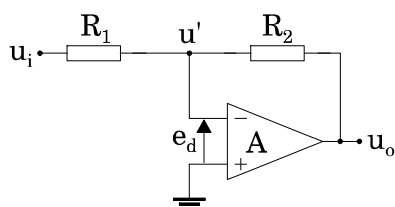
$$(4.1.1) \quad A(s) = \frac{10^5}{(1+10^{-1}s)(1+10^{-3}s)},$$

koristi se za realizaciju invertujućeg pojačavača (slika 4.1.1), odnosno neinvertujućeg pojačavača (slika 4.1.2) sa koeficijentom povratne sprege  $\beta_0=0,1$ .

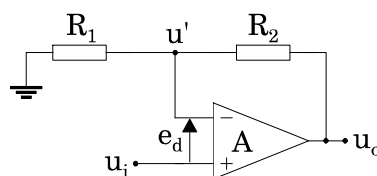
a) Odrediti marginu faze invertujućeg i neinvertujućeg pojačavača.

b) Izvršiti serijsku kompenzaciju smanjivanjem ulazne otpornosti operacionog pojačavača.

c) Odrediti vrednost otpornika za kompenzaciju tako da margina faze iznosi  $45^\circ$ , ukoliko je otpornik  $R_2=90\text{k}\Omega$ .



Slika 4.1.1



Slika 4.1.2

**REŠENJE:** Kolo povratne sprege u oba slučaja nezavisno je od frekvencije sa koeficijentom povratne sprege:

$$(4.1.2) \quad \beta(s) = \beta_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{1}{10},$$

odakle se dobija da je potreban odnos otpornika:

$$(4.1.3) \quad \frac{R_2}{R_1} = 9.$$

Funkcija kružnog pojačanja kako invertujućeg tako i neinvertujućeg pojačavača je:

$$(4.1.4) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta_0 = \frac{10^4}{(1+10^{-1}s)(1+10^{-3}s)}.$$

Moduo i faza kružnog pojačanja prikazani su na slici 4.1.3. Sa slike se može videti da je na frekvenciji na kojoj moduo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi  $-180^\circ$ , što znači da je margina faze jednaka nuli.

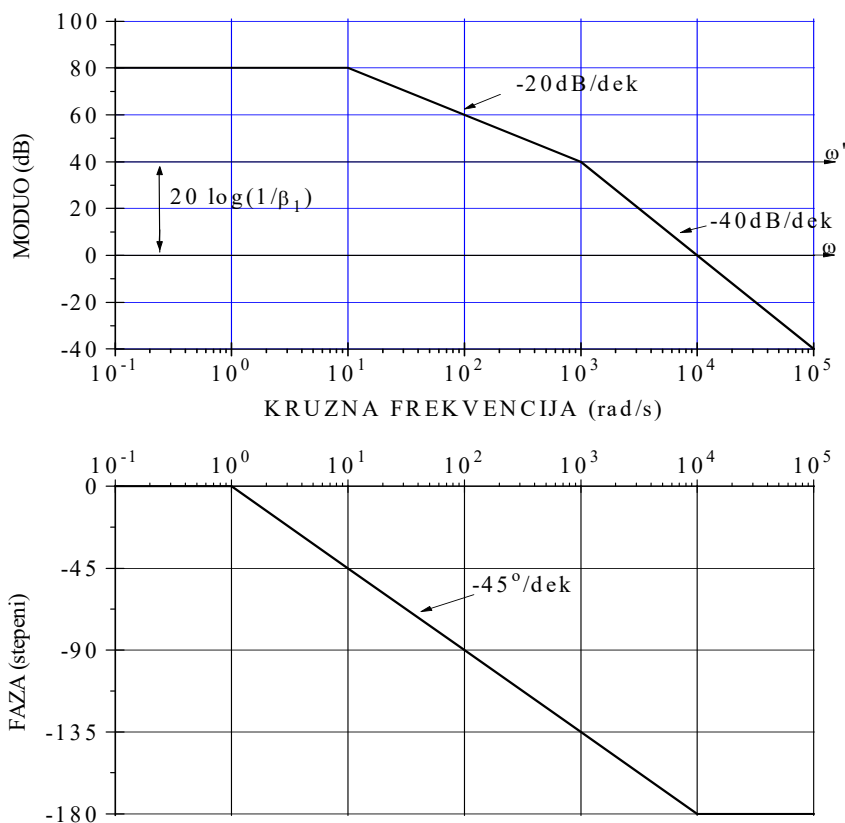
Frekventna kompenzacija smanjivanjem ulazne otpornosti izvodi se tako što se između ulaznih priključaka operacionog pojačavača veće otpornik za kompenzaciju  $R_k$ , prema slikama 4.1.4 i 4.1.5, za invertujuć i neinvertujuć pojačavač, respektivno.

U tom slučaju koeficijent povratne sprege iznosi:

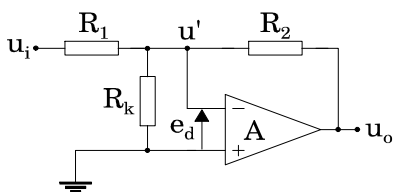
$$(4.1.5) \quad \beta = \frac{\frac{R_1 R_k}{R_1 + R_k}}{R_2 + \frac{R_1 R_k}{R_1 + R_k}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_k}{R_k + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \beta_0 \cdot \beta_1,$$

gde je:

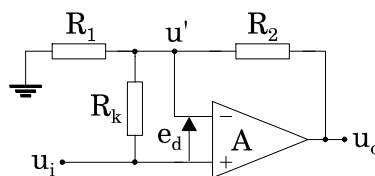
$$(4.1.6) \quad \beta_1 = \frac{R_k}{R_k + \beta_0 \cdot R_2}.$$



Slika 4.1.3



Slika 4.1.4



Slika 4.1.5

Da bi margina faze bila  $45^\circ$  frekvencijsku osu treba podići za 40dB tako da moduo funkcije kružnog pojačanja seče novu frekvencijsku osu  $\omega'$  upravo na frekvenciji na kojoj faza ima vrednost  $-135^\circ$ . To znači da je:

$$(4.1.7) \quad 20 \log\left(\frac{1}{\beta_1}\right) = 40\text{dB},$$

odakle se dobija  $\beta_1=0,01$ , a iz izraza (4.1.6) se dobija potrebna vrednost  $R_k=90,9\Omega$ .

**4.2 ZADATAK:** Operacioni pojačavač, čija je prenosna funkcija data izrazom:

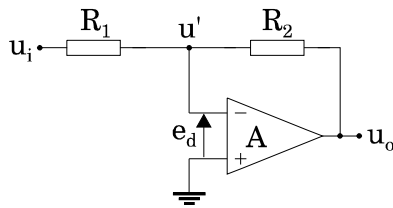
$$(4.2.1) \quad A(s) = \frac{10^5}{(1+10^{-1}s)(1+10^{-3}s)},$$

koristi se za realizaciju invertujućeg pojačavača (slika 4.2.1), odnosno neinvertujućeg pojačavača (slika 4.2.2) sa koeficijentom povratne sprege  $\beta_0=0,1$ .

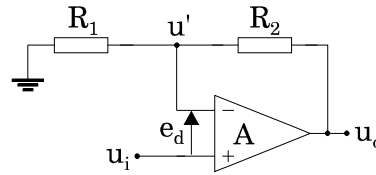
a) Odrediti marginu faze invertujućeg, odnosno neinvertujućeg pojačavača.

b) Izršiti diferencijalnu (LEAD) kompenzaciju vezivanjem kompenzacionog kondenzatora  $C_2$  paralelno otporniku  $R_2$ .

c) Odrediti vrednost kompenzacionog kondenzatora tako da margina faze iznosi  $45^\circ$ , ukoliko je otpornik  $R_2=90\text{k}\Omega$ .



Slika 4.2.1



Slika 4.2.2

**REŠENJE:** Kolo povratne sprege u oba slučaja nezavisno je od frekvencije sa koeficijentom povratne sprege:

$$(4.2.2) \quad \beta(s) = \beta_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{1}{10},$$

odakle se dobija da je potreban odnos otpornika:

$$(4.2.3) \quad \frac{R_2}{R_1} = 9.$$

Funkcija kružnog pojačanja invertujućeg kao, i neinvertujućeg pojačavača je:

$$(4.2.4) \quad (T(s) = A(s) \cdot \beta_0 = \frac{10^4}{(1 + 10^{-1}s)(1 + 10^{-3}s)}).$$

Moduo i faza kružnog pojačanja prikazani su punom linijom (označeni su oznakom B) na slici 4.2.3. Sa slike se može videti da je na frekvenciji na kojoj moduo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi  $-180^\circ$ , što znači da je margina faze jednaka nuli.

Diferencijalna (LEAD) kompenzacija izvodi se tako što se između izlaznog i invertujućeg ulaznog priključka operacionog pojačavača paralelno otporniku  $R_2$  veže kondenzator za kompenzaciju  $C_2$ , prema slikama 4.2.4 i 4.2.5, za invertujući i neinvertujući pojačavač, respektivno.

U oba slučaja koeficijent povratne sprege iznosi:

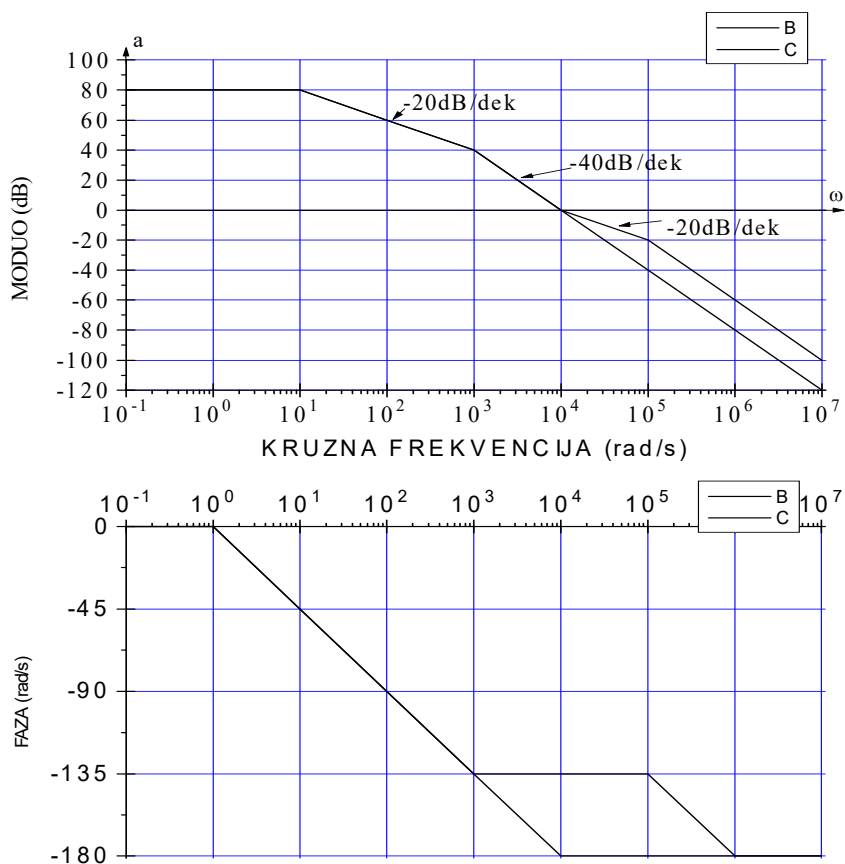
$$(4.2.5) \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + \frac{R_2}{1 + sC_2R_2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + sC_2R_2}{1 + sC_2\beta_0R_2}, \text{ odnosno}$$

$$(4.2.6) \quad \beta_0 = \beta_0 \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}},$$

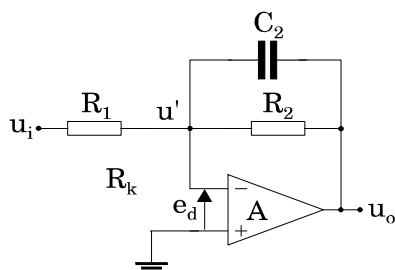
gde su sa  $\omega_z$  i  $\omega_p$  označene nula i pol koje unosi kolo povratne sprege i oni su dati sledećim izrazima:

$$(4.2.7) \quad \omega_z = \frac{1}{C_2R_2}$$

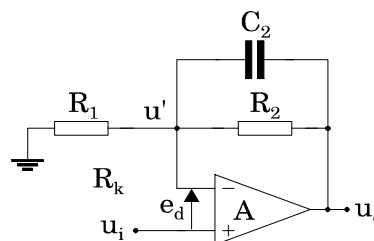
$$(4.2.8) \quad \omega_p = \frac{\omega_z}{\beta_0}.$$



Slika 4.2.3



Slika 4.2.4



Slika 4.2.5

Kako je koeficijent povratne sprege  $\beta_0$  manji od jedinice to je nula manja od pola, tj.  $\omega_z < \omega_p$  što znači da najpre deluje nula kola povratne sprege pa zatim pol ovog kola. Najbolji rezultati dobijaju se ako se nula kola povratne sprege postavi u okolini kritične frekvencije, tj. u okolini frekvencije na kojoj moduo kružnog pojačanja opadne na jedinicu (0 dB). Prema tome, ako nulu kola povratne sprege postavimo na  $\omega_z = 10^4 \text{ rad/s}$ , prema jednačini (4.2.8) pol će biti na  $\omega_p = 10^5 \text{ rad/s}$ .

Za ovako odabran položaj nule i pola kola povratne sprege funkcija kružnog pojačanja ima oblik:

$$(4.2.9) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta_0 = \frac{10^4 (1 + 10^{-4} s)}{(1 + 10^{-1} s)(1 + 10^{-3} s)(1 + 10^{-5} s)}$$

Na slici 4.2.3 prikazani su moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena diferencijalna kompenzacija označeni su sa C. Sa ove slike može se zaključiti da je

marginu faze ovakvog kola  $45^\circ$ . Međutim, ukoliko se ne dobije željena margina faze položaj nule kola povratne sprege treba iterativno pomerati do dobijanja željene margine.

**4.3 ZADATAK:** Operacioni pojačavač, čija je prenosna funkcija data izrazom:

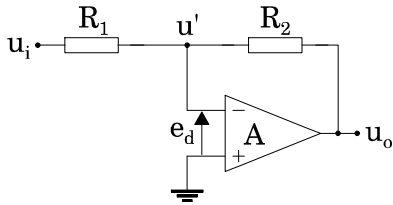
$$(4.3.1) \quad A(s) = \frac{10^4}{(1+10^{-1}s)(1+10^{-3}s)(1+10^{-4}s)},$$

koristi se za realizaciju invertujućeg pojačavača (slika 4.3.1), odnosno neinvertujućeg pojačavača (slika 4.3.2) sa koeficijentom povratne sprege  $\beta_0=0,1$  ( $R_2=90k\Omega$ ).

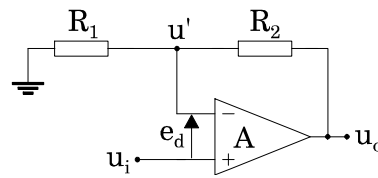
a) Odrediti marginu faze invertujućeg, odnosno neinvertujućeg pojačavača.

b) Izršiti integralnu (LAG) kompenzaciju ubacivanjem redne veze kompenzacionog kondenzatora  $C_k$  i otpornika  $R_k$  izmedju ulaznih priključaka operacionog pojačavača i izračunati elemente za kompenzaciju ukoliko se zahteva margina faze od  $45^\circ$  i kompenzacija dominantnim polom.

c) Odrediti vrednost kompenzacionog kondenzatora  $C_k$  i otpornika  $R_k$  ukoliko se zahteva ista margina faze uz uslov da je širina propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja maksimalna.



Slika 4.3.1



Slika 4.3.2

**REŠENJE:** I ovom prilikom, kolo povratne sprege je u oba slučaja nezavisno je od frekvencije i njegov koeficijent povratne sprege iznosi:

$$(4.3.2) \quad \beta(s) = \beta_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{1}{10},$$

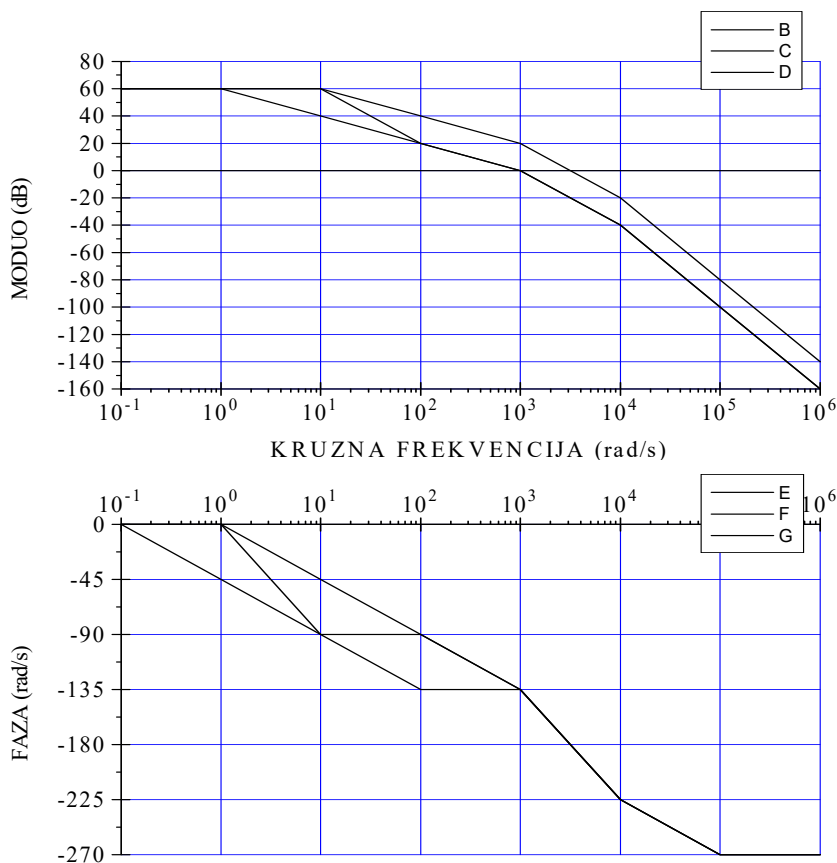
odakle se dobija da je potreban odnos otpornika:

$$(4.3.3) \quad \frac{R_2}{R_1} = 9.$$

Funkcija kružnog pojačanja invertujućeg pojačavača je kao i kod neinvertujućeg data izrazom:

$$(4.3.4) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta_0 = \frac{10^3}{(1+10^{-1}s)(1+10^{-3}s)(1+10^{-4}s)}.$$

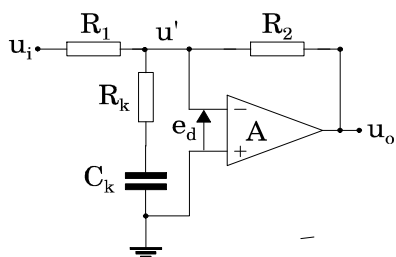
Moduo i faza kružnog pojačanja prikazani su na slici 4.3.3 označene sa B i E, respektivno.



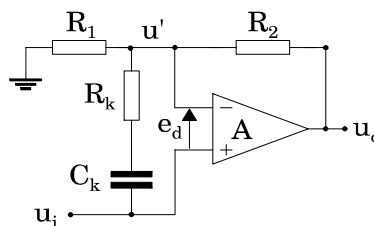
Slika 4.3.3

Sa slike 4.3.3 se može videti da je na frekvenciji na kojoj moduo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi  $-180^\circ$ , što znači da je margina faze jednaka nuli.

Integralna (LAG) kompenzacija izvodi se tako što se između ulaznih priključaka operacionog pojačavača priključi redna veza otpornika  $R_k$  i kondenzatora  $C_k$ , prema slikama 4.3.4 i 4.3.5, za invertujući i neinvertujući pojačavač, respektivno.



Slika 4.3.4



Slika 4.3.5

U oba slučaja koeficijent povratne sprege iznosi:

$$(4.3.5) \quad \beta = \frac{R_1(1+sC_kR_k)}{R_2 + \frac{R_1(1+sC_kR_k)}{1+sC_k(R_k+R_1)}} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \frac{1+sC_kR_k}{1+sC_k(R_k+\beta_0R_2)}, \text{ odnosno}$$

$$(4.3.6) \quad \beta_0 = \beta_0 \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}},$$

gde su sa  $\omega_z$  i  $\omega_p$  označene nula i pol koje unosi kolo povratne sprege i oni su dati sledećim izrazima:

$$(4.3.7) \quad \omega_z = \frac{1}{C_k R_k}$$

$$(4.3.8) \quad \omega_p = \frac{1}{C_k (R_k + \beta_0 R_2)}.$$

Kada je kolo sa pasivnom negativnom povratnom spregom koeficijent povratne sprege  $\beta_0$  veći je od nule a manji od jedinice pa je nula veća od pola, tj.  $\omega_z > \omega_p$  što znači da najpre deluje pol kola povratne sprege a zatim nula ovog kola.

Ukoliko se želi izvršiti integralna kompenzacija dominantnim polom nulom kola povratne sprege treba poništiti najmanji pol u prenosnoj funkciji operacionog pojačavača, tj. treba da je:

$$(4.3.9) \quad \omega_z = \frac{1}{C_k R_k} = 10 \text{ rad/s}.$$

Položaj pola koji unosi kolo povratne sprege treba odrediti iz uslova da njegovim delovanjem počinje nagib modula kružnog pojačanja od -20dB/dek sve dok moduo kružnog pojačanja ne padne na jedinicu (0dB), posle čega počinje delovanje drugog po veličini pola u prenosnoj funkciji operacionog pojačavača. Kako je moduo kružnog pojačanja pri niskim frekvencijama 60dB to je potrebno tri dekade da bi on opao na 0dB. Prema tome, pol kola povratne sprege treba postaviti na frekvenciju koja je 1000 puta niža od frekvencije drugog pola prenosne funkcije operacionog pojačavača:

$$(4.3.10) \quad \omega_p = \frac{1}{C_k (R_k + \beta_0 R_2)} = \frac{1000}{1000} = 1 \text{ rad/s}.$$

Iz izraza (4.3.9) i (4.3.10) mogu se odrediti potrebne vrednosti kompenzacionih elemenata i one iznose:

$$(4.3.11) \quad C_k = 100 \mu\text{F} \quad \text{i} \quad R_k = 1 \text{ k}\Omega.$$

Sa ovako odabranim položajima nule i pola kola povratne sprege ( $\omega_z = 10 \text{ rad/s}$  i  $\omega_p = 1 \text{ rad/s}$ ) funkcija kružnog pojačanja ima oblik:

$$(4.3.12) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta(s) = \frac{10^3}{(1+10^{-1}s)(1+10^{-3}s)(1+10^{-4}s)} \frac{(1+10^{-1}s)}{(1+s)}$$

$$= \frac{10^3}{(1+s)(1+10^{-3}s)(1+10^{-4}s)}.$$

Na slici 4.3.3 su prikazani i sa C i F označeni, respektivno moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena integralna kompenzacija dominantnim polom. Sa ove slike može se zaključiti da je margina faze ovakvog kola  $45^\circ$ .

Ukoliko se želi izvršiti integralna kompenzacija sa maksimalnom širinom propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja frekvencija pola kola povratne sprege mora biti jednaka najmanjem polu prenosne funkcije operacionog pojačavača, odnosno:

$$(4.3.13) \quad \omega_p = \frac{1}{C_k (R_k + \beta_0 R_2)} = 10 \text{ rad/s},$$

tako da nagib modula funkcije kružnog pojačanja posle ove frekvencije iznosi -40dB/dek.

Nula kola povratne sprege veća je od pola ovog kola pa je najpogodnije da se ona postavi na frekvenciji koja je za red veličine manja od kritične frekvencije kola sa izvršenom kompenzacijom. S obzirom da se kritična frekvencija unapred ne može pretpostaviti uzećemo proizvoljno da je:

$$(4.3.14) \quad \omega_z = \frac{1}{C_k R_k} = 100 \text{ rad/s.}$$

Iz izraza (4.3.13) i (4.3.14) mogu se odrediti potrebne vrednosti kompenzacionih elemenata i one iznose:

$$(4.3.15) \quad C_k = 10 \mu\text{F} \quad \text{i} \quad R_k = 1 \text{ k}\Omega.$$

Prema tome, ako nulu kola povratne sprege postavimo na  $\omega_z = 100 \text{ rad/s}$ , a pol na  $\omega_p = 10 \text{ rad/s}$  funkcija kružnog pojačanja ima oblik:

$$(4.3.16) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta(s) = \frac{10^3 (1 + 10^{-2} s)}{(1 + 10^{-1} s)^2 (1 + 10^{-3} s) (1 + 10^{-4} s)}.$$

Na slici 4.3.3 prikazani su moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena integralna kompenzacija sa maksimalnom širinom propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja i označeni sa D i G, respektivno. Sa ove slike može se zaključiti da je margina faze ovakvog kola  $45^\circ$ . Međutim, ukoliko se ne dobije željena margina faze položaj nule kola povratne sprege treba iterativno pomerati na odgovarajuću stranu do dobijanja željene margine.

**4.4 ZADATAK:** Operacioni pojačavač, čija je prenosna funkcija data izrazom:

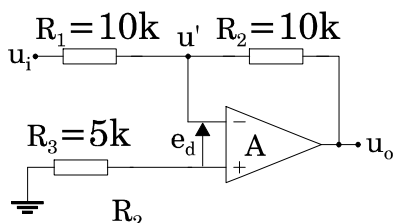
$$(4.4.1) \quad A(s) = \frac{2 \cdot 10^3}{(1 + 10^{-1} s) \cdot (1 + 10^{-3} s) \cdot (1 + 10^{-4} s)},$$

koristi se za realizaciju invertujućeg pojačavača (slika 4.4.1), odnosno neinvertujućeg pojačavača (slika 4.4.2), kod kojih je pomoću otpornika  $R_3$  izvršena kompenzacija uticaja ulaznih struja polarizacije.

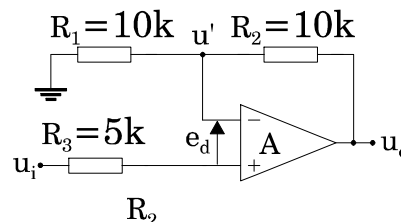
a) Odrediti marginu faze invertujućeg, odnosno neinvertujućeg pojačavača.

b) Izršiti integralnu (LAG) kompenzaciju ubacivanjem redne veze kompenzacionog kondenzatora  $C_k$  i otpornika  $R_k$  između ulaznih priključaka operacionog pojačavača i izračunati elemente za kompenzaciju ukoliko se zahteva margina faze od  $45^\circ$  a da se izvrši kompenzacija dominantnim polom.

c) Odrediti vrednost kompenzacionog kondenzatora  $C_k$  i otpornika  $R_k$  tako da margina faze iznosi  $45^\circ$ , ukoliko se zahteva ista margina faze uz uslov da je širina propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja maksimalna.



Slika 4.4.1



Slika 4.4.2

**REŠENJE:** Kako su ulazne struje polarizacije operacionog pojačavača jednake nuli otpornik za kompenzaciju njihovog uticaja  $R_3$  nema nikakvog uticaja na koeficijent povratne sprege, koji i u ovom slučaju ne zavisi od frekvencije i isti je za oba kola:

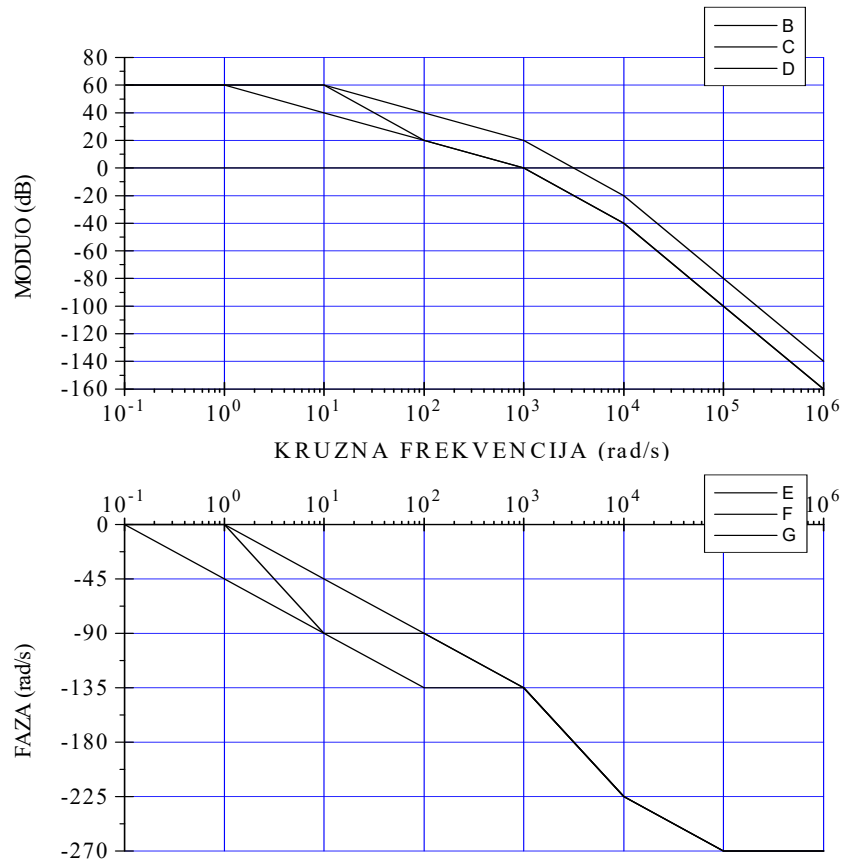
$$(4.4.2) \quad \beta(s) = \beta_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2}.$$

Funkcija kružnog pojačanja invertujućeg kao, i neinvertujućeg pojačavača je:



$$(4.4.3) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta(s) = \frac{10^3}{(1+10^{-1}s) \cdot (1+10^{-3}s) \cdot (1+10^{-4}s)},$$

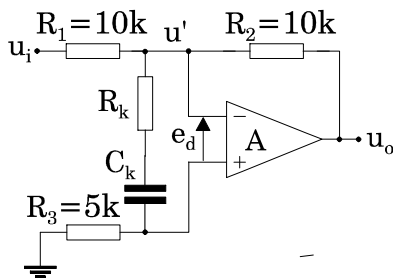
Moduo i faza kružnog pojačanja prikazani su na slici 4.4.3 označene sa B i E, respektivno.



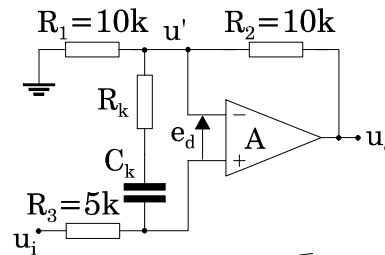
Slika 4.4.3

Sa slike 4.4.3 se može videti da je na frekvenciji na kojoj moduo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi  $-180^\circ$ , što znači da je margina faze jednaka nuli.

Integralna (LAG) kompenzacija izvodi se tako što se između ulazih priključaka operacionog pojačavača priključi redna veza otpornika  $R_k$  i kondenzatora  $C_k$ , prema slikama 4.4.4 i 4.4.5, za invertujuć i neinvertujuć pojačavač, respektivno.



Slika 4.3.4



Slika 4.3.5

Kolo povratne sprege je u oba slučaja identično. Koficijent povratne sprege može se odrediti iz jednačina napisanih za invertujuć i neinvertujuć ulaz operacionog pojačavača:

$$(4.4.4) \quad \frac{u'}{R_1} + \frac{e_d}{R_k + \frac{1}{sC_k}} + \frac{u' - u_0}{R_2} = 0$$

$$(4.4.5) \quad \frac{u' - e_d}{R_3} + \frac{-e_d}{R_k + \frac{1}{sC_k}} = 0.$$

Eliminacijom napona  $u'$  iz ovih jednačina dobija se:

$$(4.4.6) \quad \beta(s) = \frac{e_d}{u_o} \Big|_{u_i=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + sC_k R_k}{1 + sC_k \left( R_k + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)}, \quad \text{odnosno}$$

$$(4.4.7) \quad \beta_0 = \beta_0 \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}},$$

gde su sa  $\omega_z$  i  $\omega_p$  označene nula i pol koje unosi kolo povratne sprege i oni su dati sledećim izrazima:

$$(4.4.8) \quad \omega_z = \frac{1}{C_k R_k}$$

$$(4.4.9) \quad \omega_p = \frac{1}{C_k \left( R_k + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)}.$$

Kod integralne kompenzacije nula kola povratne sprege veća je od pola, tj.  $\omega_z > \omega_p$  što znači da najpre deluje pol kola povratne sprege a zatim nula ovog kola. S obzirom da je funkcija kružnog pojačanja identična sa funkcijom kružnog pojačanja iz predhodnog zadatka slede ista objašnjenja o načinu postavljanja nule i pola kola povratne sprege, samo će se razlikovati vrednosti elemenata za kompenzaciju zbog razlike u izrazima za pol kola povratne sprege.

Ukoliko se želi izvršiti integralna kompenzacija dominantnim polom nulom kola povratne sprege treba poništiti najmanji pol u prenosnoj funkciji operacionog pojačavača, tj. treba da je:

$$(4.4.10) \quad \omega_z = \frac{1}{C_k R_k} = 10 \text{ rad/s}.$$

Položaj pola koji unosi kolo povratne sprege treba odrediti iz uslova da njegovim delovanjem imamo nagib modula kružnog pojačanja od -20dB/dek sve dok moduo kružnog pojačanja ne padne na jedinicu (0dB), posle čega može nastupiti delovanje drugog po veličini pola u prenosnoj funkciji operacionog pojačavača. Kako moduo kružnog pojačanja pri niskim frekvencijama iznosi 60dB to je potrebno tri dekade da bi on opao na 0dB, pa stoga pol kola povratne sprege treba postaviti na frekvenciju koja je 1000 puta niža od frekvencije drugog pola prenosne funkcije operacionog pojačavača:

$$(4.4.11) \quad \omega_p = \frac{1}{C_k \left( R_k + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)} = 1 \text{ rad/s}.$$

Iz izraza (4.4.10) i (4.4.11) mogu se odrediti potrebne vrednosti kompenzacionih elemenata i one iznose:

$$(4.3.12) \quad C_k = 90 \mu\text{F} \quad \text{i} \quad R_k = 1.11 \text{ k}\Omega.$$

Prema tome, ako nulu kola povratne sprege postavimo na  $\omega_z = 10 \text{ rad/s}$ , a pol na  $\omega_p = 1 \text{ rad/s}$  funkcija kružnog pojačanja ima oblik:

$$(4.4.13) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta_0 = \frac{10^3}{(1+s)(1+10^{-3}s)(1+10^{-4}s)}.$$

Na slici 4.4.3 su prikazani moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena integralna kompenzacija dominantnim polom i označeni su sa C i F, respektivno. Sa ove slike može se zaključiti da je margina faze ovakvog kola  $45^\circ$ .

Ukoliko se želi izvršiti integralna kompenzacija sa maksimalnom širinom propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja frekvencija pola kola povratne sprege mora biti jednaka najmanjem polu prenosne funkcije operacionog pojačavača, odnosno:

$$(4.4.14) \quad \omega_p = \frac{1}{C_k \left( R_k + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)} = 10 \text{ rad/s} .$$

tako da nagib modula funkcije kružnog pojačanja posle ove frekvencije iznosi  $-40\text{dB/dek}$ . Nula kola povratne sprege veća od pola ovog kola pa je najpogodnije da se ona postavi na frekvenciji koja je za red veličine manja od kritične frekvencije kola sa izvršenom kompenzacijom. S obzirom da se kritična frekvencija unapred ne može pretpostaviti uzećemo proizvoljno da je:

$$(4.4.15) \quad \omega_z = \frac{1}{C_k R_k} = 100 \text{ rad/s} .$$

Iz izraza (4.3.14) i (4.3.15) mogu se odrediti potrebne vrednosti kompenzacionih elemenata i one iznose:

$$(4.4.16) \quad C_k = 99 \mu\text{F} \quad \text{i} \quad R_k = 101 \Omega .$$

Prema tome, ako nulu kola povratne sprege postavimo na  $\omega_z=100\text{rad/s}$ , a pol na  $\omega_p=10\text{rad/s}$  funkcija kružnog pojačanja ima oblik:

$$(4.4.17) \quad T(s) = A(s) \cdot \beta_0 = \frac{10^3 (1 + 10^{-2} s)}{(1 + 10^{-1} s)^2 (1 + 10^{-3} s) (1 + 10^{-4} s)} .$$

Na slici 4.4.3 su prikazani moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena integralna kompenzacija sa maksimalnom širinom propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja i označeni sa D i G, respektivno. Sa ove slike može se zaključiti da je margina faze ovakvog kola  $45^\circ$ . Naravno, i ovom prilikom ako se ne dobije željena margina faze položaj nule kola povratne sprege treba iterativno pomerati do dobijanja željene margine.

**4.5 ZADATAK:** Na slici 4.5.1 prikazano je kolo kod koga je primenjena kompenzacija premošćavanjem (FEED FORWARD). Naći prenosnu funkciju pojačavača

$$(4.5.1) \quad A(s) = \frac{U_i}{U_1 - U_2} ,$$

ukoliko prvi pojačavač ima prenosnu funkciju:

$$(4.5.2) \quad A_1(s) = \frac{10^3}{1 + s} ,$$

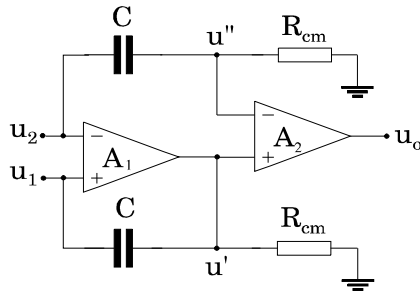
a drugi:

$$(4.5.3) \quad A_2(s) = \frac{10^2}{1 + 10^{-4} s} .$$

Ulazna otpornost za simetrični signal na svakom od ulaza drugog pojačavača je  $R_{cm}$ . Nacrtati amplitudsku i faznu karakteristiku pojačavača ako je ispunjen uslov:

$$(4.5.4) \quad C \cdot R_{cm} = 1 .$$

Ostale karakterisike pojačavača su idealne.

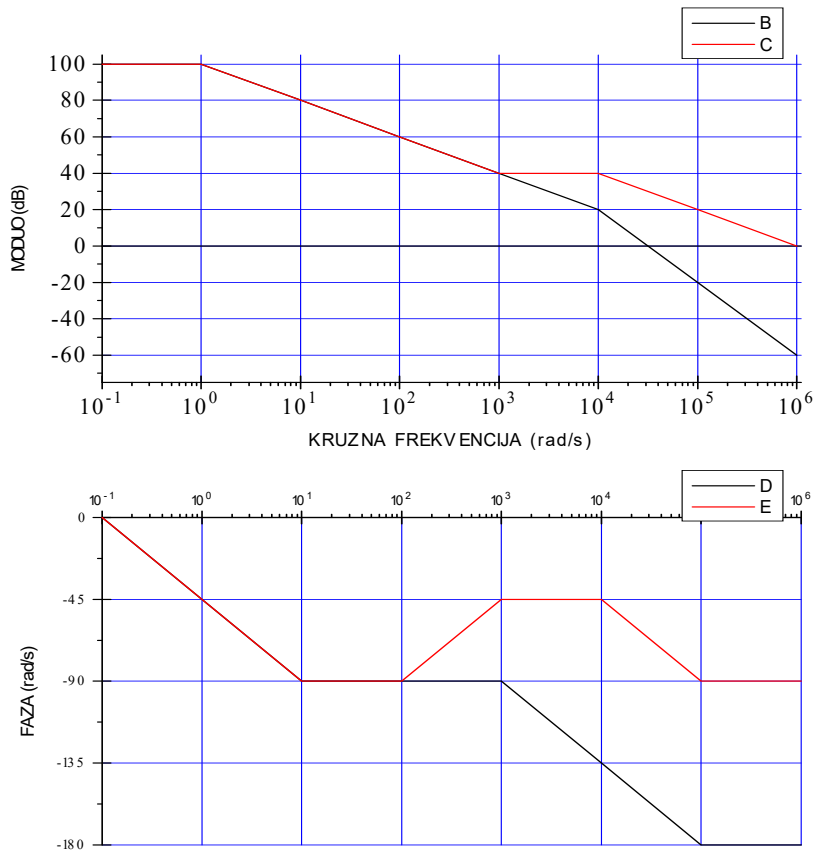


Slika 4.5.1

**REŠENJE:** Kada ne bi postojali kondenzatori za premošćavanje prvog pojačavača, koji je inače uskopojasni sa nešto većim pojačanjem pojačanje celog pojačavača bi bilo:

$$(4.5.4) \quad A(s) = A_1 \cdot A_2 = \frac{10^5}{(1+s)(1+10^{-4}s)},$$

a moduo i faza ove prenosne funkcije prikazana je na slici 4.5.2 sa oznakom B i D, respektivno.



Slika 4.5 2

Naponi na ulazima drugog pojačavača mogu se napisati na sledeći način:

$$(4.5.5) \quad u' = A_1(u_1 - u_2) + \frac{R_{cm}}{R_{cm} + \frac{1}{sC}} u_1 \quad i$$

$$(4.5.6) \quad u'' = \frac{R_{cm}}{R_{cm} + \frac{1}{sC}} u_2.$$

Izlazni napon celog pojačavača je prema tome dat izrazom:

$$(4.5.6) \quad u_i = A_2(u' - u'') = A_2 \left( A_1 + \frac{sCR_{cm}}{1 + sCR_{cm}} \right) (u_1 - u_2).$$

Posle zamene datih izraza za  $A_1$  i  $A_2$  u poslednji izraz dobija se pojačanje celog pojačavača u obliku:

$$(4.5.7) \quad A'(s) = \frac{10^5(1 + 10^{-3}s)}{(1 + s)(1 + 10^{-4}s)}.$$

Moduo i faza pojačavača kod koga je izvršena kompenzacija premoščavanjem prikazani su na slici 4.5.2 sa oznakama C i E, respektivno.