

4 Frekvencijske kompenzacije operacionih pojačavača

Uvod

Kao što je ranije rečeno, od veličine margine faze zavise karakteristike prelaznih stanja, a posebno premašenje u amplitudskoj karakteristici u blizini granične frekvencije i vreme smirivanja odziva u vremenskom domenu. Zbog toga se u specifikacijama za operacione pojačavače opšte namene zahteva margina faze veća od 45° .

Kompenzacija se može izvesti bez promene prenosne funkcije operacionog pojačavača pravilnim izborom spoljašnje mreže za kompenzaciju ili promenom prenosne funkcije operacionog pojačavača, vezivanjem spoljašnjih kompenzacionih komponenata između priključaka operacionog pojačavača koji su predviđeni za kompenzaciju.

Pojačavači za široki opseg primena imaju izvršenu unutrašnju kompenzaciju tako da on ima veliku marginu faze od 90° . Unutrašnja kompenzacija se izvodi korišćenjem lokalne povratne sprege i može biti izvedena kao kompenzacija sa jednim polom, kompenzacija sa dva pola i kompenzacija sa nulom i polom.

Kompenzacije bez promene prenosne funkcije operacionog pojačavača

Kompenzacije ovog tipa se izvode tako što se kolo spoljašnje povratne sprege modifikuje dodavanjem pasivnih reaktivnih komponenata u cilju povećavanja margine faze.

-Kompenzacija smanjivanjem ulazne impedanse

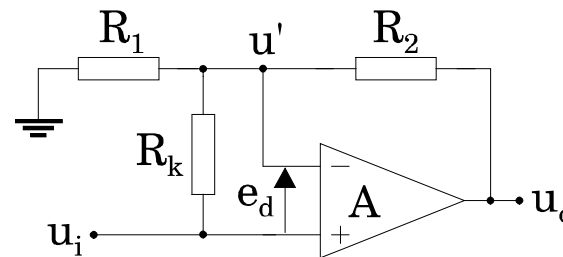
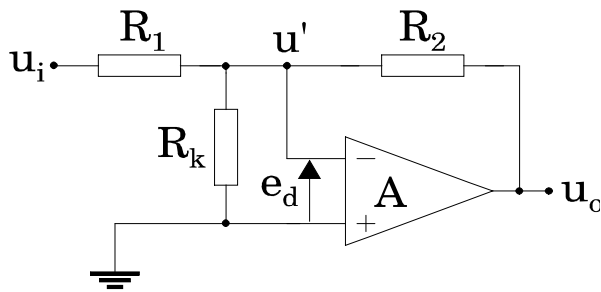
-Diferencijalna (LEAD) kompenzacija

-Integralna (LAG) kompenzacija

-Kompenzacija premošćavanjem

Kompensacija smanjivanjem ulazne impedanse

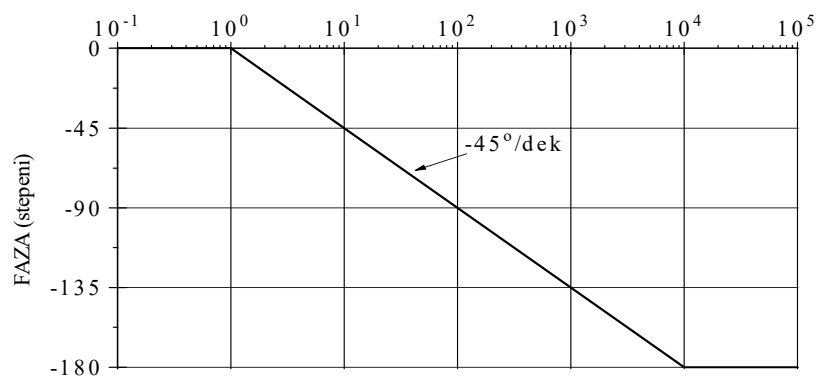
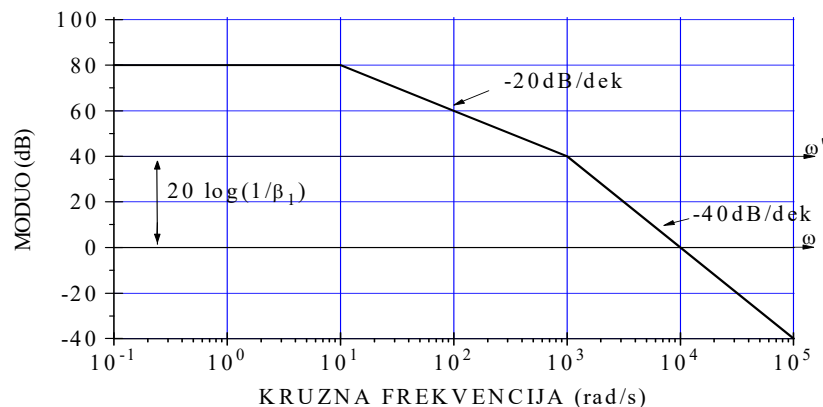
Frekvencijska kompensacija smanjivanjem ulazne otpornosti izvodi se tako što se između ulaznih priključaka operacionog pojačavača veže otpornik za kompensaciju R_k , za invertujući i neinvertujući pojačavač.



$$\beta_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\beta = \frac{\frac{R_1 R_k}{R_1 + R_k}}{R_2 + \frac{R_1 R_k}{R_1 + R_k}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_k}{R_k + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \beta_0 \cdot \beta_1 \quad \beta_1 = \frac{R_k}{R_k + \beta_0 \cdot R_2}$$

Kompensacija smanjivanjem ulazne impedanse



Modulo i faza funkcije kružnog pojačanja nekompenziranog invertujućeg i neinvertujućeg pojačavača $T(s)=A(s)\beta_0$ prikazani su na slici. Sa slike se može videti da je na frekvenciji na kojoj modulo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi -180° , što znači da je margina faze jednaka nuli, odnosno pojačavač je na granici stabilnosti.

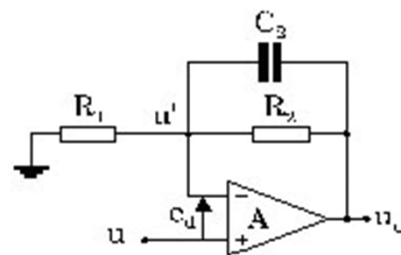
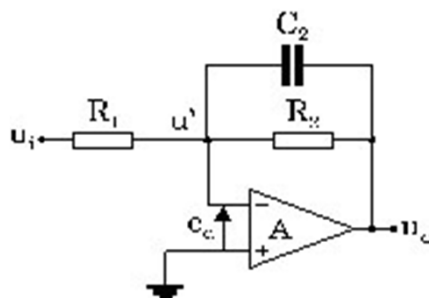
Kompenzacija smanjivanjem ulazne impedanse

Da bi se povećala margina faze treba smanjiti kružno pojačanje pojačavača pri niskim frekvencijama. To se postiže smanjivanjem koeficijenta povratne sprege, odnosno vezivanjem kompenzacionog otpornika R_k između ulaznih priključaka operacionog pojačavača. Tom prilikom se faza pojačavača ne menja, jer je koeficijent povratne sprege i dalje nezavisan od frekvencije. Moduo kružnog pojačanja kompenzovanog pojačavača se može na istom dijagramu nacrtati na isti način i on bi bio identičan po obliku modula kružnog pojačanja nekompenzovanog pojačavača, ali pomeren po vertikali naniže za $20\log\left(\frac{1}{\beta_1}\right)$

što je ekvivalentno podizanju frekvencijske ose za istu vrednost. Ova vrednost se bira u zavisnosti od željene margine faze. Za željenu marginu faze nova frekvencijska osa mora presecati karakteristiku modula kružnog pojačanja na frekvenciji na kojoj faza kružnog pojačanja iznosi: $\varphi(\omega) = -180^\circ + \phi_m$

Diferencijalna (LEAD) kompenzacija

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 , za invertujući i neinvertujući pojačavač.



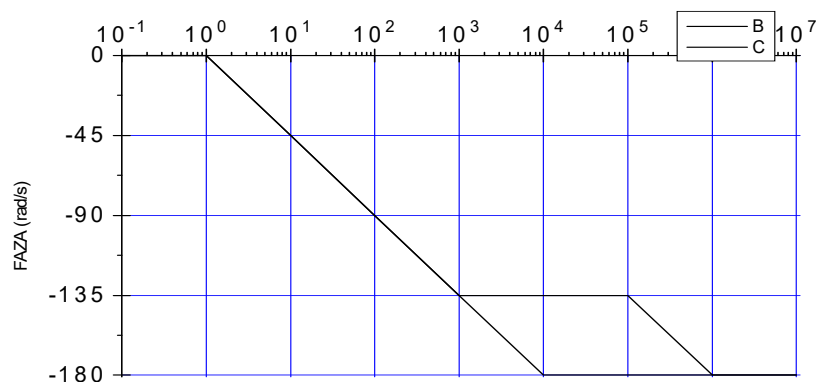
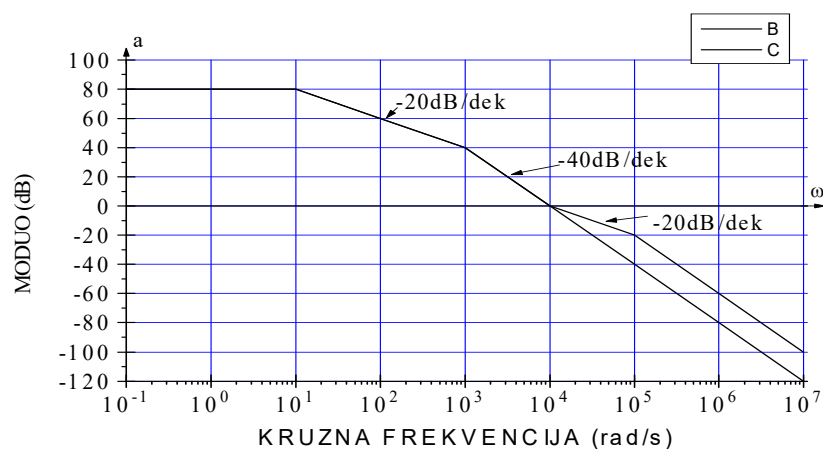
$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + \frac{R_2}{1 + sC_2R_2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + sC_2R_2}{1 + sC_2\beta_0R_2} \quad \beta = \beta_0 \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}}$$

ω_z i ω_p su nula i pol koje unosi kolo povratne sprege: $\omega_z = \frac{1}{C_2R_2}$ $\omega_p = \frac{\omega_z}{\beta_0}$

Diferencijalna (LEAD) kompenzacija

Moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača pre ubacivanja kondenzatora za kompenzaciju prikazani su punom linijom (označeni su oznakom B).

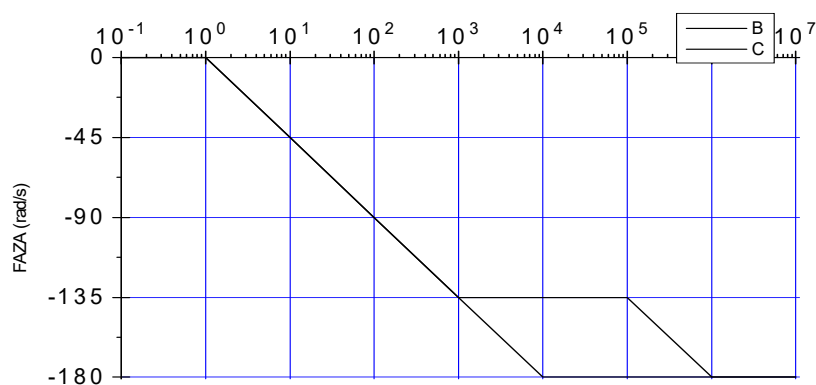
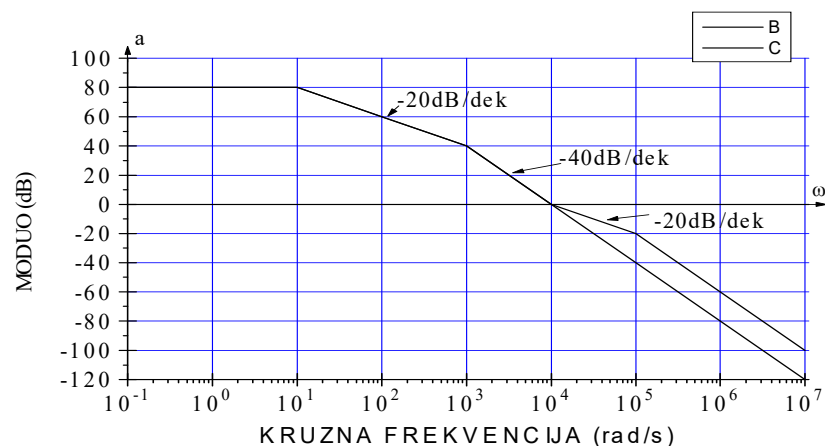
Na frekvenciji na kojoj moduo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi -180° , što znači da je margina faze jednaka nuli.



Ubacivanjem kondenzatora za kompenzaciju C_2 paralelno otporniku R_2 , prenosna funkcija kola povratne sprege postaje zavisna od frekvencije i pored konstante dobija nulu i pol. Kako je koeficijent povratne sprege β_0 manji od jedinice nula je 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).

Diferencijalna (LEAD) kompenzacija

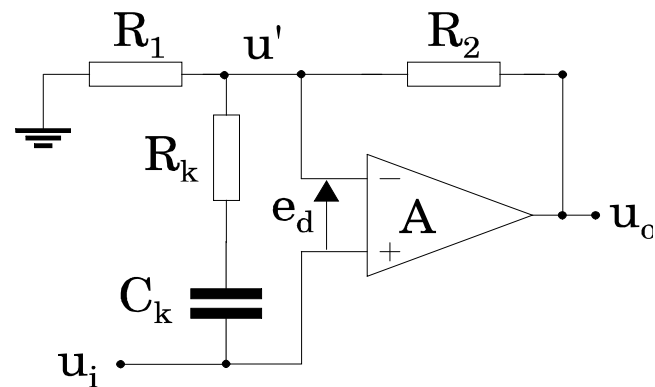
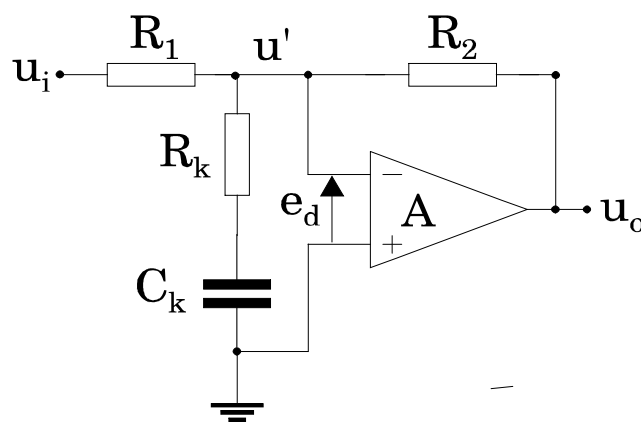


Na slikama su prikazani moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena diferencijalna kompenzacija i označeni su sa C. Margina faze ovakvog kola je 45° . Međutim, ukoliko se ne dobije željena margina faze položaj nule kola povratne sprege treba iterativno pomerati do dobijanja željene margine.

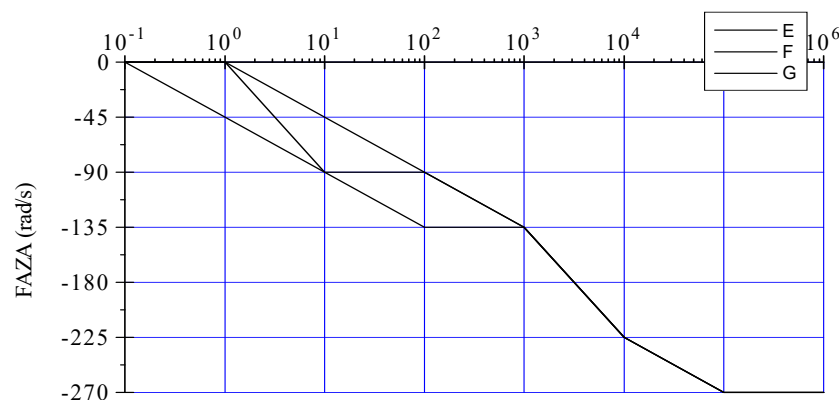
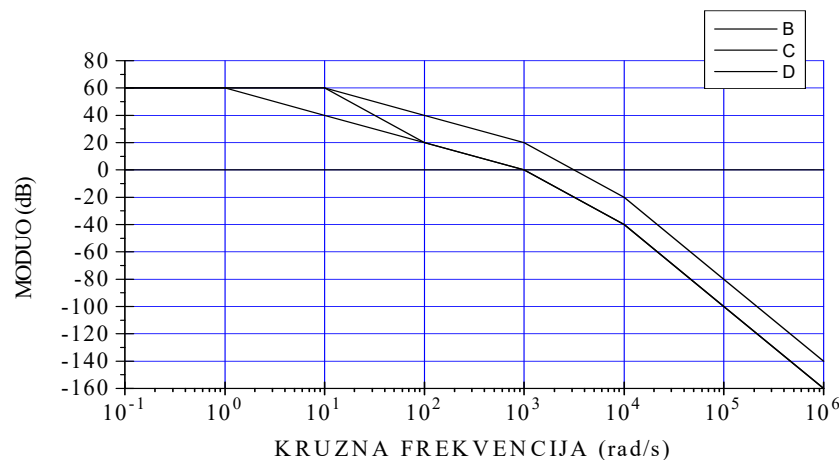
Izraz za koeficijent povratne sprege kompenzovanih pojačavača ne menja se ukoliko je kod pojačavača izvršena kompenzacija uticaja ulaznih struja polarizacija vezivanjem otpornika R_3 za neinvertujući ulaz operacionog pojačavača.

Integralna (LAG) kompenzacija

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



Integralna (LAG) kompenzacija



Modulo i faza kružnog pojačanja pojačavača pre priključivanja kompenzacionih elemenata prikazani su punim linijama na slikama i označeni sa B i E, respektivno. Može se videti da je na frekvenciji na kojoj modulo kružnog pojačanja opadne na 0dB faza iznosi -180° , što znači da je margina faze, u ovom slučaju, jednaka nuli.

Integralna (LAG) kompenzacija

Posle vezivanja elemenata za kompenzaciju koeficijent povratne sprege pojačavača iznosi:

$$\beta = \frac{\frac{R_1(1+sC_k R_k)}{1+sC_k(R_k+R_1)}}{R_2 + \frac{R_1(1+sC_k R_k)}{1+sC_k(R_k+R_1)}} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \frac{1+sC_k R_k}{1+sC_k(R_k+\beta_0 R_2)} \quad \beta = \beta_0 \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}}$$

ω_z i ω_p su nula i pol koje unosi kolo povratne sprege:

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

Integralna (LAG) kompenzacija

Kada je kolo sa pasivnom negativnom povratnom spregom koeficijent povratne sprege β_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.

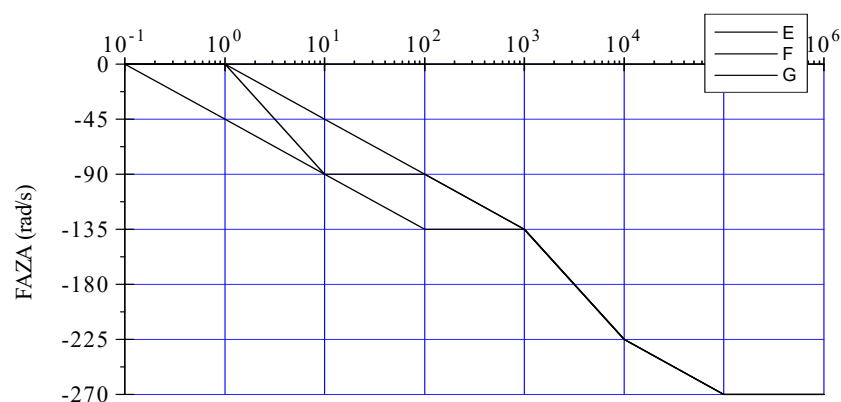
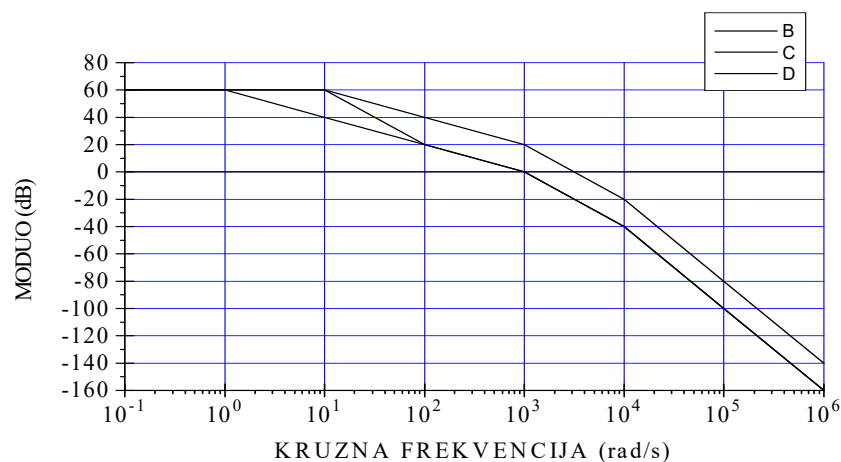
Ukoliko se izvršava integralna kompenzacija dominantnim polom, nulom kola povratne sprege treba poništiti najmanji pol u prenosnoj funkciji operacionog pojačavača. Položaj pola koji unosi kolo povratne sprege treba odrediti iz uslova da njegovim delovanjem počinje nagib modula kružnog pojačanja od -20dB/dec sve dok moduo kružnog pojačanja ne padne na jedinicu (0dB), posle čega počinje delovanje drugog po veličini pola u prenosnoj funkciji operacionog pojačavača.

Integralna (LAG) kompenzacija

Ukoliko se izvršava integralna kompenzacija *sa maksimalnom širinom propusnog opsega* funkcije kružnog pojačanja, frekvencija pola kola povratne sprege mora biti jednaka najmanjem polu prenosne funkcije operacionog pojačavača, tako da nagib modula funkcije kružnog pojačanja posle ove frekvencije iznosi -40dB/dec . 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.

Ukoliko se ne dobije željena margina faze, položaj nule kola povratne sprege treba iterativno pomerati na odgovarajuću stranu do dobijanja željene margine.

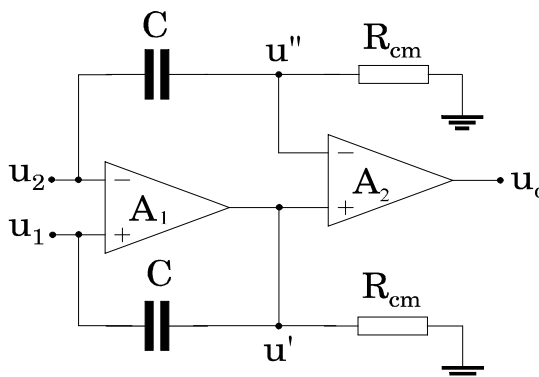
Integralna (LAG) kompenzacija



Na slikama su prikazani moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena integralna kompenzacija dominantnim polom (C i F), i moduo i faza kružnog pojačanja pojačavača kod koga je izvršena integralna kompenzacija sa maksimalnom širinom propusnog opsega funkcije kružnog pojačanja (D i G).

Kompensacija premoščavanjem

Kompensacija premoščavanjem (FEED FORWARD) se koristi kada je potrebno poboljšati karakteristike pojačavača u vremenskom domenu. To se postiže povećanjem frekvencije jediničnog pojačanja.



Prvi stepen je diferencijalni pojačavač sa velikim naponskim pojačanjem, ali i malim propusnim opsegom. Drugi stepen je širokopojasni pojačavač sa malim naponskim pojačanjem. Kondenzatorima je premošćen prvi stepen pri visokim frekvencijama, i tada karakteristike pojačavača određuje drugi stepen.

Kompensacija premoščavanjem

Pojačanje pojačavača bez kompenzacije je dato izrazom:

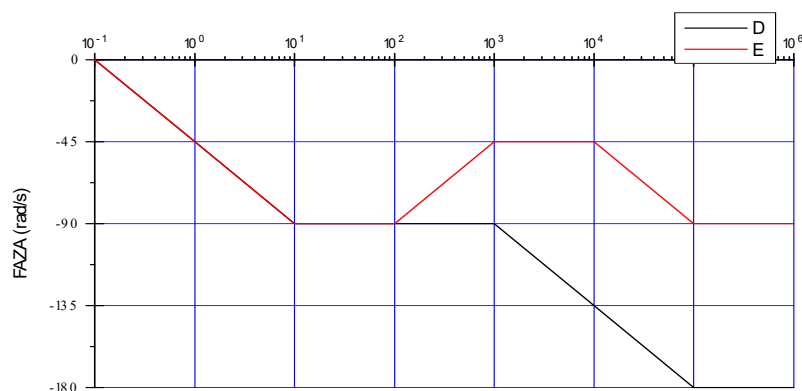
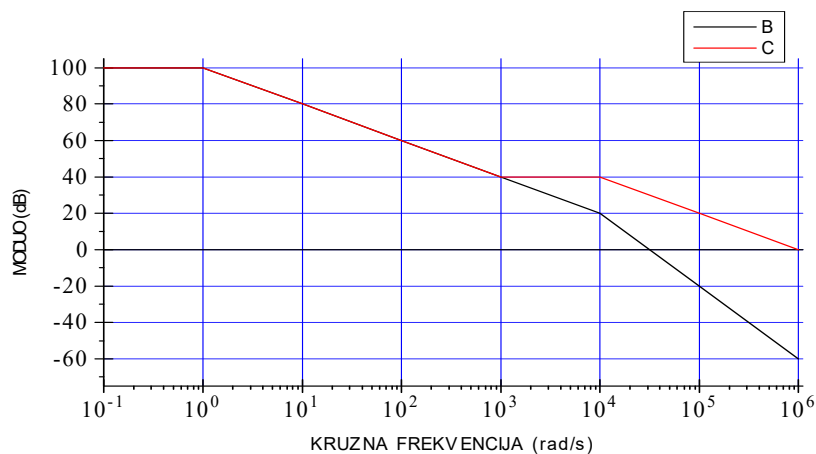
$$A(s) = \frac{U_i(s)}{U_1(s) - U_2(s)} = A_1(s) \cdot A_2(s)$$

Primenom kompenzacije premoščavanjem pojačanje se modifikuje:

$$A'(s) = A_2(s) \cdot \left(A_1 + \frac{sCR_{cm}}{1 + sCR_{cm}} \right)$$

R_{cm} je otpornost između svakog od ulaza drugog stepena i mase

Kompensacija premoščavanjem



Na slici su prikazani punom linijom moduo i faza pojačavača bez kompenzacije (B i D), a isprekidanom linijom moduo i faza pojačavača kod koga je izvršena kompenzacija premoščavanjem (C i E).

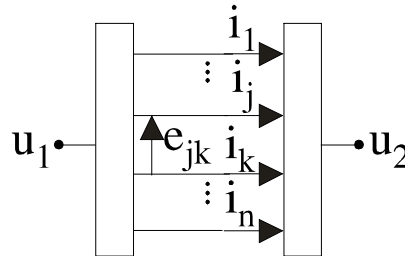
Frekvencija jediničnog pojačanja povećana je za 1.5 dekade, a margina faze sa 22.5° na 90° .

Kompenzacije sa promenom prenosne funkcije operacionog pojačavača

Ove kompenzacije se izvode vezivanjem kompenzacionih elemenata na priključke operacionog pojačavača koji su predviđeni za to, a vrednosti kompenzacionih elemenata biraju se u zavisnosti od primene operacionog pojačavača. Drugi način ove kompenzacije se izvodi u samom operacionom pojačavaču, najčešće u kolu lokalne povratne sprege koristeći Milerov efekat, čime se malim vrednostima elemenata za kompenzaciju vrši značajna promena prenosne funkcije operacionog pojačavača. Ovakve kompenzacije koriste se kod operacionih pojačavača koji se mogu koristiti za širok opseg primena.

Bisekciona teorema

Bisekciona teorema se može primeniti na kola sa topološkom simetrijom:



Kola sa topološkom simetrijom osa simetrije deli na dva potpuno identična dela, a za analizu celog kola dovoljno je posmatrati samo jedan od tih delova.

a) Kada se kolo pobuđuje simetričnim (common mode) signalima tako da je:

$$u_1 = u_2 = u_{cm}$$

struje i naponi u mreži ne menjaju svoje vrednosti ako se grane koje presecaju osu simetrije prekinu (otvore). Drugim rečima, u tom slučaju su struje i_1, i_2, \dots, i_n jednake nuli.

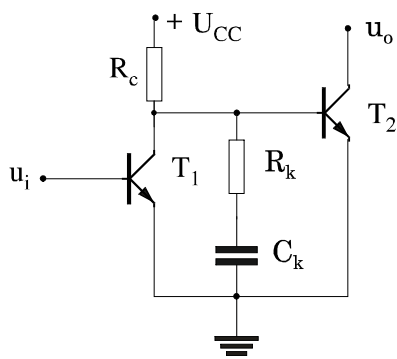
b) Kada se kolo pobuđuje nesimetričnim (diferencijalnim) signalima tako da je:

$$u_1 = -u_2 = u_d/2$$

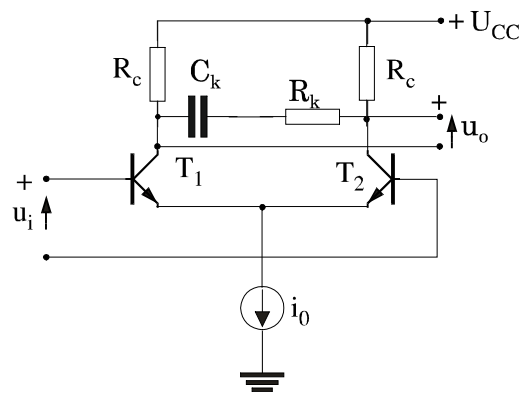
struje i naponi u mreži ne menjaju svoje vrednosti ako se grane koje presecaju osu simetrije spoje na masu. Drugim rečima, naponi e_{jk} ($j, k=1, \dots, n$) jednaki su nuli, odnosno duž ose simetrije postoji virtualna masa.

Kompensacija dominantnim polom

Kompensacija dominantnim polom se realizuje priključivanjem redne veze otpornika R_K i kondenzatora C_K paralelno kolektorskom otporniku jednog pojačavačkog stepena, što je ekvivalentno priključivanju iste redne veze na ulaz sledećeg stepena, što je prikazano uprošćenom električnom šemom na slici 1. Još češće se ovakvo kompenzaciono kolo vezuje između kolektora tranzistora u diferencijalnom pojačavaču, koji se uvek koristi kao ulazni stepen operacionog pojačavača, što je prikazano šemom na slici 2:



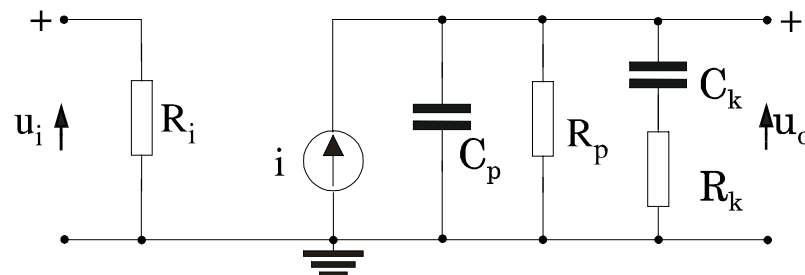
Slika 1



Slika 2

Kompensacija dominantnim polom

Oba ova električna kola mogu se svesti na ekvivalentni model:



R_i predstavlja ulaznu otpornost pojačavača, a C_p i R_p predstavljaju ekvivalentnu kapacitivnost i otpornost opterećenja na izlazu (uzimajući u obzir i sledeći stepen), respektivno. Struja strujnog generatora je funkcija ulaznog napona, pa je dovoljno posmatrati prenosnu impedansu kola, koja se u slučaju da kompenzaciono kolo nije priključeno može napisati u obliku:

$$\frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_p}{1 + sC_p R_p} = \frac{R_p}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \quad \text{jednopolna funkcija sa polom } \omega_p$$

Kompensacija dominantnim polom

Posle vezivanja kompenzacionih elemenata izraz za prenosnu impedansu postaje:

$$\frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_p(1 + sC_K R_K)}{1 + s(C_p R_p + C_K R_K + C_K R_p) + s^2 C_p C_K R_p R_K}$$

Novodobijena funkcija prenosne impedanse ima dva pola (ω_{p1} i ω_{p2}) i jednu nulu (ω_z). Za ostvarivanje kompenzacije dominantnim polom, odnosno za dobijanje dva jako razdvojena pola (nula se nalazi između polova), elemente za kompenzaciju treba odabrati tako da su ispunjeni sledeći uslovi:

$$R_K \ll R_p \quad \text{i} \quad C_K \gg C_p$$

Drugi uslov je razlog što se ova kompenzacija ne izvodi u samom integrisanom kolu, jer veliki kondenzator C_K zahteva veliku površinu čipa. Ukoliko su navedeni uslovi ispunjeni izraz za prenosnu impedansu se pojednostavljuje i postaje:

$$\frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_p(1 + sC_K R_K)}{1 + sC_K R_p + s^2 C_p C_K R_p R_K}$$

Kompensacija dominantnim polom

Poslednji izraz se može napisati korišćenjem oznaka za nulu i polove:

$$\frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_P \left(1 + \frac{s}{\omega_Z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)} = \frac{R_P \left(1 + \frac{s}{\omega_Z}\right)}{1 + s \left(\frac{1}{\omega_{P1}} + \frac{1}{\omega_{P2}}\right) + \frac{s^2}{\omega_{P1}\omega_{P2}}}$$

Ukoliko je ω_{p1} dominantni pol i mnogo manji od ω_{p2} , poslednji izraz se pojednostavljuje i postaje:

$$\frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_P \left(1 + \frac{s}{\omega_Z}\right)}{1 + \frac{s}{\omega_{P1}} + \frac{s^2}{\omega_{P1}\omega_{P2}}} \quad \longrightarrow \quad \omega_Z = \frac{1}{C_K R_K}, \quad \omega_{P1} = \frac{1}{C_K R_P}, \quad \omega_{P2} = \frac{1}{C_P R_K}$$

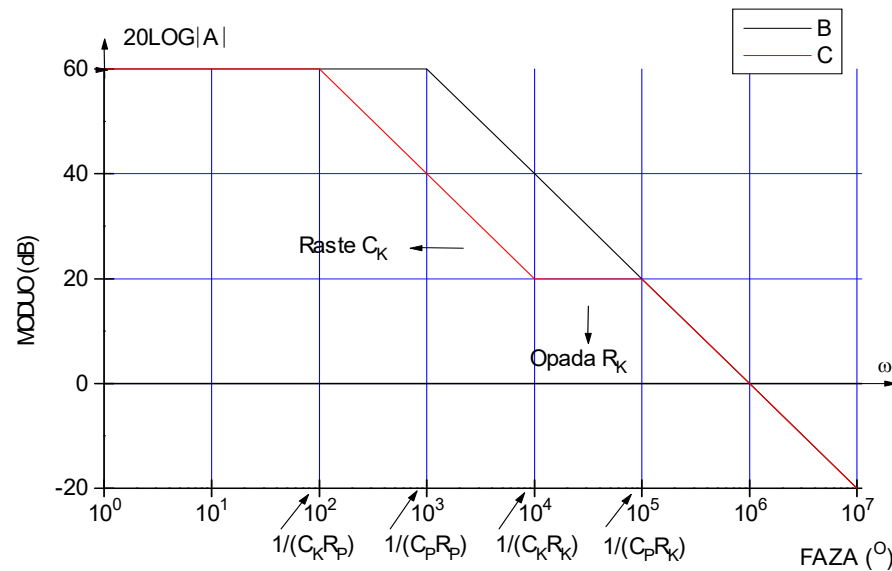
$$\frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_P (1 + s C_K R_K)}{(1 + s C_K R_P)(1 + s C_P R_K)}$$

dva pola, od kojih je jedan dominantan,
i jedna nula

Kompenzacija dominantnim polom

Bodeov dijagram

Bodeov dijagram za amplitudsku karakteristiku pojačavačkog stepena pre kompenzacije prikazan je na slici punom linijom - B, dok je ista karakteristika za slučaj kompenzovanog pojačavača prikazana isprekidanom linijom - C.

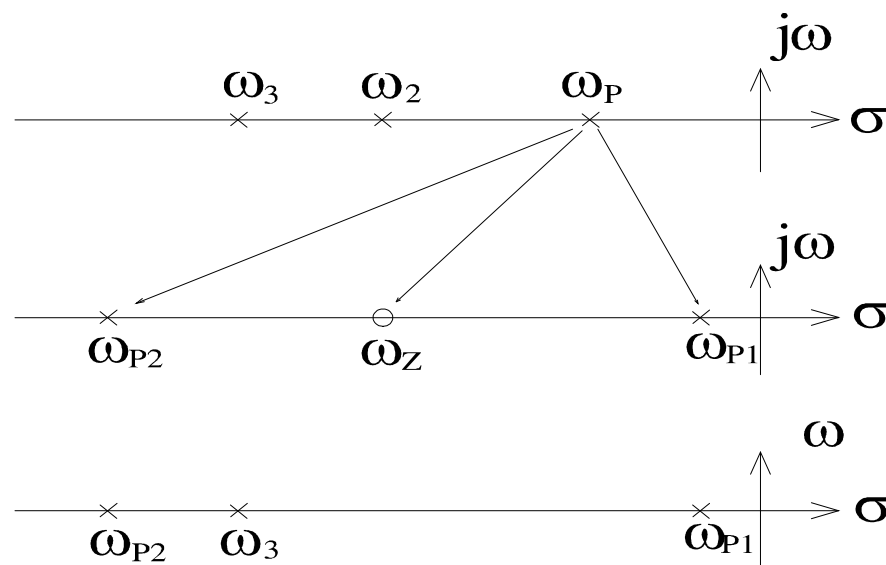


Uvođenjem dominantnog pola smanjuje se propusni opseg pojačavača. Propusni opseg je utoliko uži što je C_K veće, jer je dominantni pol sve niži. Međutim, sa smanjivanjem R_K nula i drugi pol se udaljavaju od prvog pola što prvi pol čini sve dominantnijim, tako da u slučaju $R_K=0$ ostaje samo prvi pol koji je bliži koordinatnom početku od pola pojačavača pre kompenzacije.

Kompensacija dominantnim polom

Bodeov dijagram

Kada operacioni pojačavač ima višepolnu prenosnu funkciju, na primer tropolnu, kompensacija se vrši u stepenu koji generiše pol sa najnižom vrednošću, a položaj nule generisane kompenzacijom treba odabrati tako da se poklopi sa položajem po veličini drugog pola u prenosnoj funkciji. Na taj način nula eliminiše uticaj drugog pola, što je predstavljeno na slici:

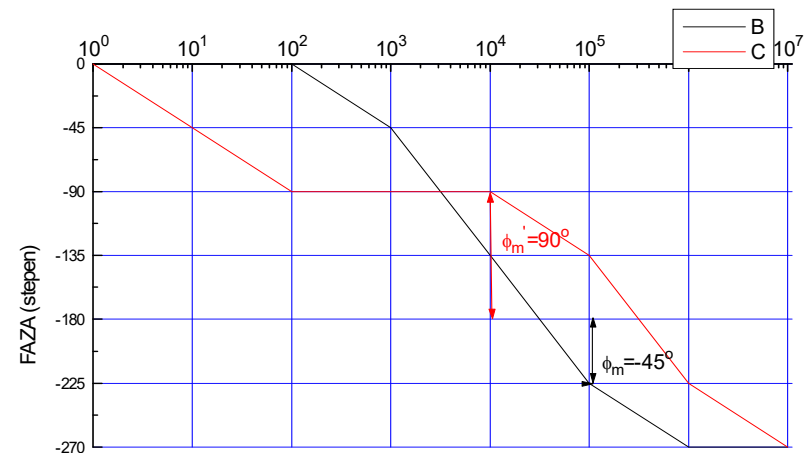
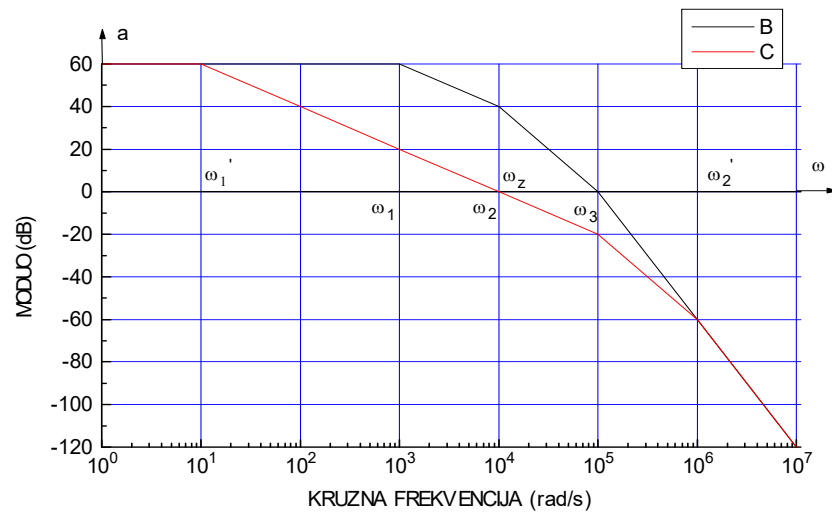


Kompensacija dominantnim polom

Bodeov dijagram

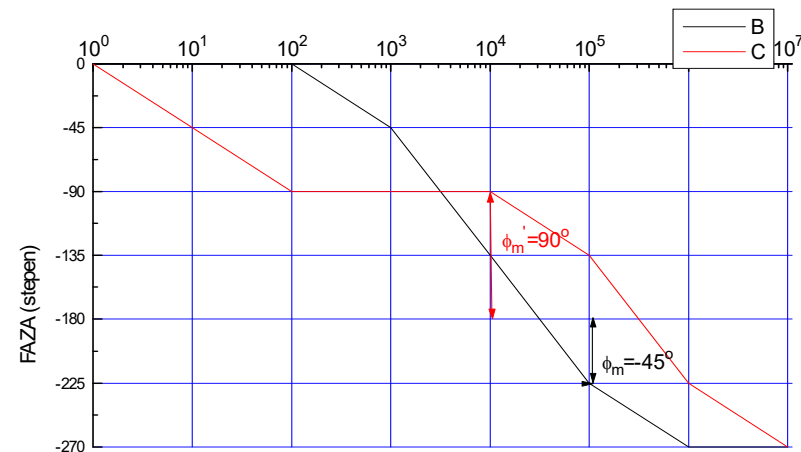
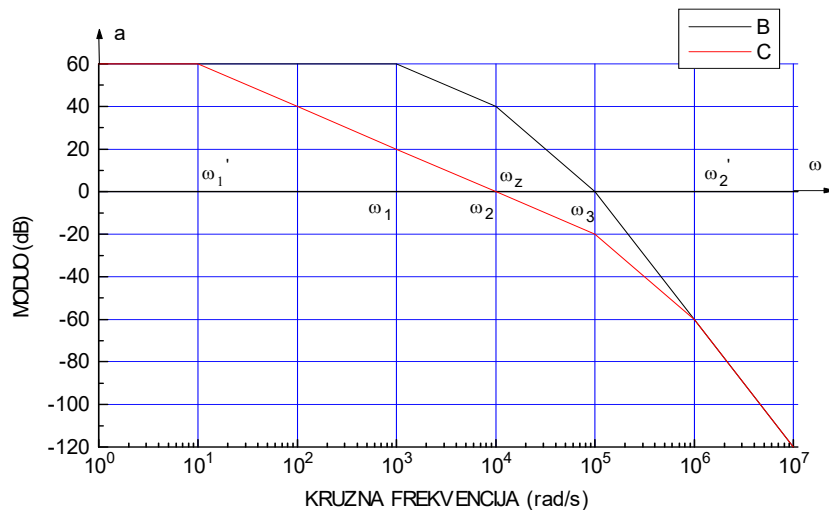
Ukoliko je prenosna funkcija operacionog pojačavača pre kompenzacije data izrazom:

$$A(s) = \frac{10^3}{\left(1 + \frac{s}{10^3}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{10^4}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{10^5}\right)}$$



Kompensacija dominantnim polom

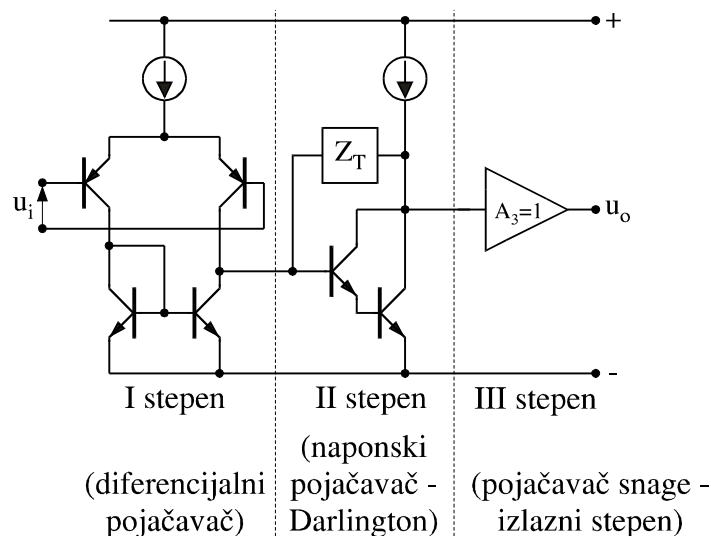
Bodeov dijagram



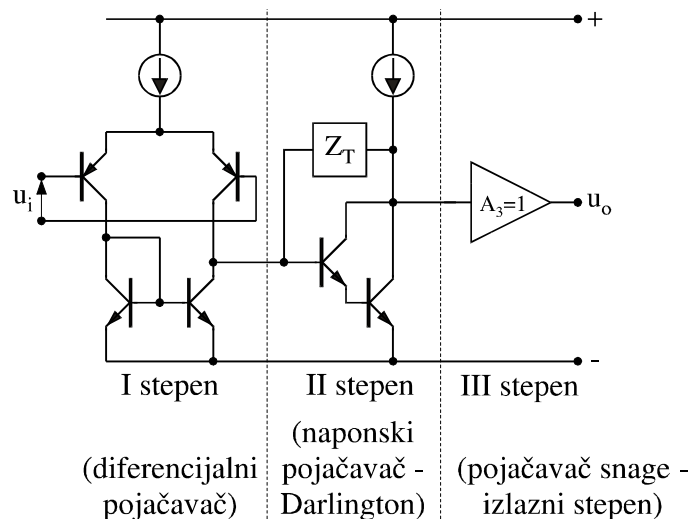
Margina faze nekompenzovanog operacionog pojačavača je negativna i iznosi -45° , pa je stoga pojačavač nestabilan u slučaju jedinične povretne sprege, što predstavlja najkritičniji režim rada. Međutim, kod kompenzovanog pojačavača amplitudska karakteristika ima nagib od -20dB/dec u širokom opsegu frekvencija, do frekvencije koja je iznad frekvencije jediničnog pojačanja. Samim tim je i fazni ugao u najvećem delu ovog opsega -90° , tako da i u najkritičnijem slučaju jediničnog pojačavača margina faze ima veliku vrednost (90°). Naravno, to je postignuto na račun smanjenja propusnog opsega pojačavača.

Kompensacija u kolu lokalne povratne sprege

Za kompenzaciju operacionih pojačavača sa internom (unutrašnjom) kompenzacijom potrebna je velika vrednost kondenzatora za kompenzaciju C_K što u tehnologiji integrisanih kola nije izvodljivo. Međutim kako je u pojačavačima sa dva naponska pojačavačka stepena pojačanje drugog stepena veliko, kondenzatorom male vrednosti, vezanim u kolo lokalne povratne sprege, korišćenjem Millerovog efekta, može se postići efekat ekvivalentan priključivanju velike kapacitivnosti između ulaza drugog stepena i mase. Uprošćena šema tipičnog integrisanog operacionog pojačavača sa kompenzacijom u kolu lokalne povratne sprege prikazana je na slici:

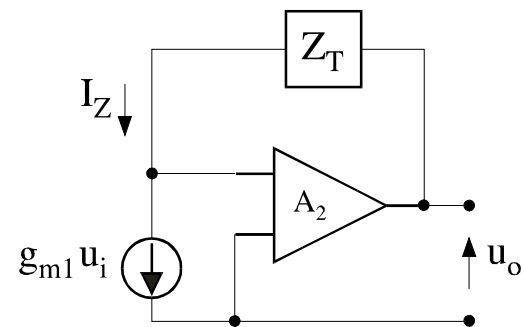
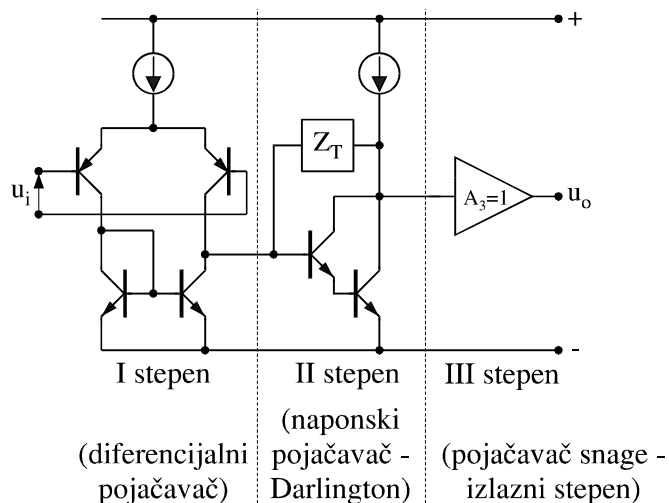


Kompensacija u kolu lokalne povratne sprege



Ulazni stepen je diferencijalni pojačavač sa dinamičkim opterećenjem u kolektorskom kolu za transformaciju simetričnog u nesimetrični izlaz. Drugi stepen je naponski pojačavač sa Darlingtonovim parom tranzistora za dobijanje velikog naponskog pojačanja. U ovom kolu izvedena je lokalna povratna sprega preko impedanse Z_T . Izlazni stepen izveden je kao pojačavač sa jediničnim pojačanjem čiji je uticaj na prenosnu funkciju nedominantan.

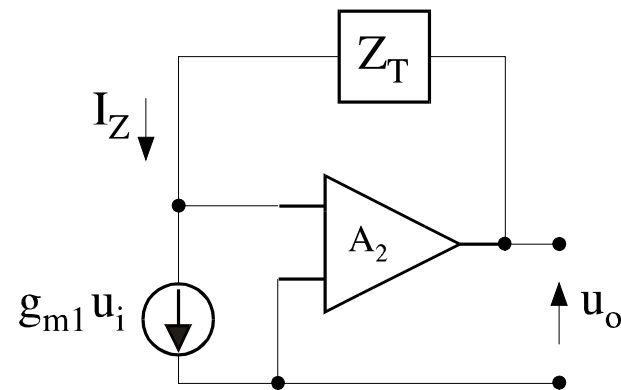
Kompensacija u kolu lokalne povratne sprege



Slika 2

Drugi pojačavački stepen ima veliko naponsko pojačanje i jaku lokalnu povratnu spregu, pa je njegova ulazna impedansa sasvim mala u poređenju sa izlaznom impedansom prvog stepena. Može se smatrati da se drugi stepen pobuđuje naponom kontrolisanim strujnim generatorom nezavisnim od frekvencije. U tom slučaju operacioni pojačavač se može predstaviti uprošćenom šemom prikazanom na slici 2

Kompensacija u kolu lokalne povratne sprege



Pojačanje pojačavača pri visokim frekvencijama dato je izrazom:

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = g_{m1} \cdot Z_T(s)$$

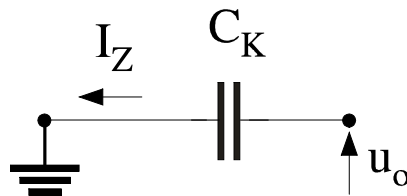
$$Z_T(s) = \frac{U_i(s)}{I_Z(s)} \quad \text{prenosna impedansa kola reakcije}$$

Kompensacija sa jednim polom

Iz prethodnog izraza se vidi da je prenosna funkcija pojačavača određena karakteristikama kola lokalne povratne sprege u drugom pojačavačkom stepenu, naravno samo u frekvencijskom opsegu u kome je kružno pojačanje u kolu sa lokalnom reakcijom, veliko.

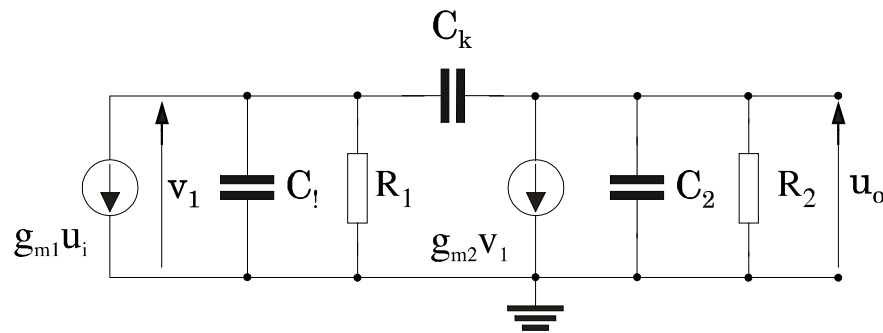
Ako se u kolo lokalne povratne sprege, od ulaza do izlaza drugog pojačavačkog stepena, veže samo kondenzator C_K , kao na slici, drugi stepen radi kao integrator, pa se prenosna funkcija celog pojačavača svodi na jednopolnu funkciju:

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = g_{m1} \cdot Z_T(s) = \frac{g_{m1}}{sC_K} \quad \longrightarrow \quad Z_T(s) = \frac{U_i(s)}{I_Z(s)} = \frac{1}{sC_K}$$



Kompensacija sa jednim polom

Ekvivalentna šema drugog pojačavačkog stepena:



R_1 (R_2) i C_1 (C_2) su ekvivalentne ulazne (izlazne) otpornosti i kapacitivnosti drugog pojačavačkog stepena, respektivno. Očigledno je da bez kondenzatora za kompenzaciju C_K postoje dve vremenske konstante: R_1C_1 i R_2C_2 , i one određuju dva pola prenosne funkcije koja se može predstaviti sledećim izrazom:

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \left(-\frac{g_{m1}R_1}{1 + sR_1C_1} \right) \left(-\frac{g_{m2}R_2}{1 + sR_2C_2} \right) = \frac{g_{m1}g_{m2}R_1R_2}{\left(1 + \frac{s}{\omega_1} \right) \left(1 + \frac{s}{\omega_2} \right)}$$

Kompensacija sa jednim polom

Kada se izvrši kompensacija vezivanjem kondenzatora C_K prenosna funkcija operacionog pojačavača je data izrazom:

$$A(s) = \frac{g_{m1}g_{m2} \left(1 - \frac{sC_K}{g_{m2}} \right)}{1 + s[R_1(C_1 + C_K) + R_2(C_2 + C_K) + g_{m2}R_1R_2C_K] + s^2R_1R_2[C_1C_2 + C_K(C_1 + C_2)]}$$

Polinom u imeniocu ovog izraza $D(s)$ može se napisati u faktorisanom obliku:

$$D(s) = \left(1 + \frac{s}{\omega_1} \right) \left(1 + \frac{s}{\omega_2} \right) = 1 + s \left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} \right) + \frac{s^2}{\omega_1\omega_2}$$

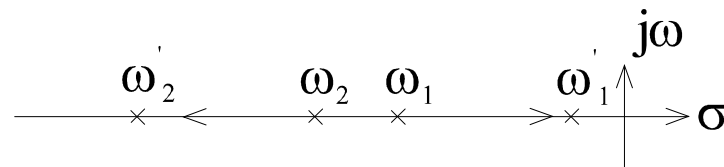
Kompensacija sa jednim polom

Pretpostavimo da je ω_1' dominantan pol, tj. $\omega_1' \ll \omega_2'$, prethodni izraz se može pojednostaviti i napisati u obliku:

$$D(s) = 1 + \frac{s}{\omega_1'} + \frac{s^2}{\omega_1' \omega_2'}$$

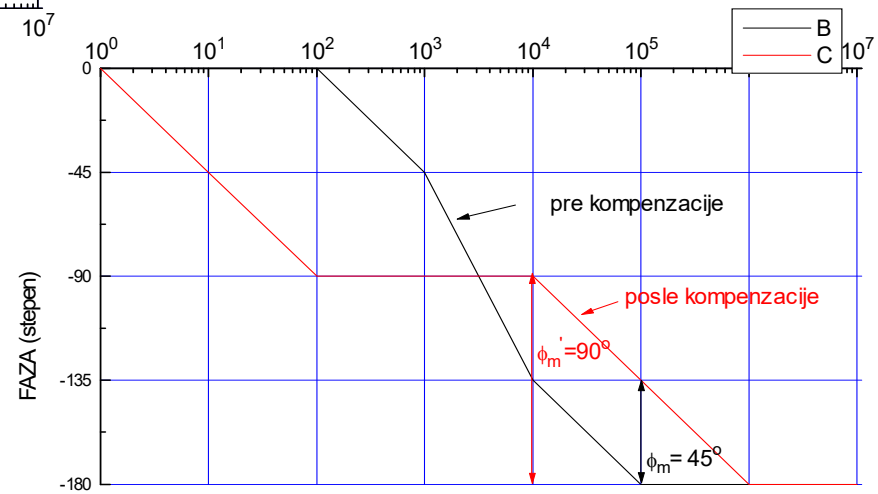
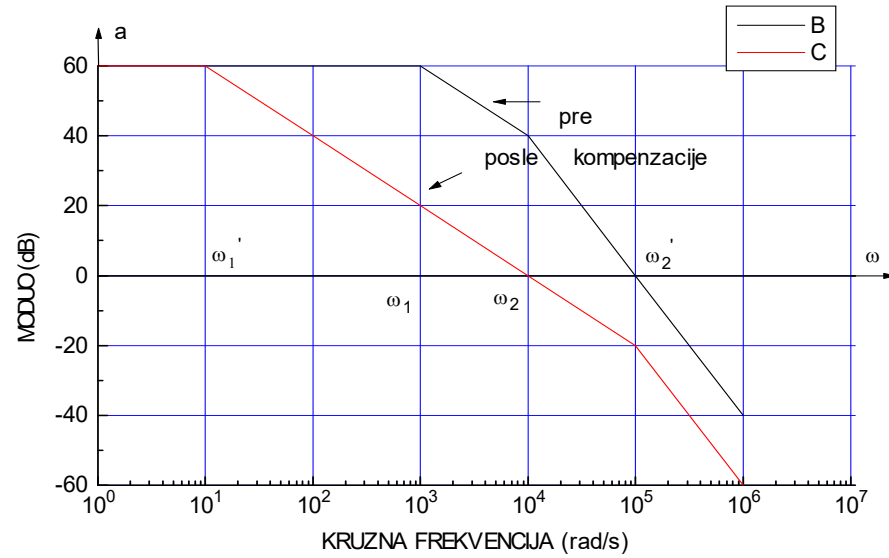
$$\omega_1' = \frac{1}{R_1(C_1 + C_K) + R_2(C_2 + C_K) + g_{m2}R_1R_2C_K} \cong \frac{1}{g_{m2}R_1R_2C_K} \quad \omega_2' \cong \frac{g_{m2}C_K}{C_1C_2 + C_K(C_1 + C_2)}$$

U prvoj aproksimaciji dominantni pol zavisi samo od vrednosti kondenzatora koji potiče od Millerovog efekta kondenzatora u kolu lokalne povratne sprege C_K (ulazna kapacitivnost se povećava na vrednost $C_K(1 + g_{m2}R_2) \cong g_{m2}R_2C_K$). Sa povećanjem vrednosti kondenzatora za kompenzaciju C_K dominantni pol se smanjuje, a nedominantni pol se povećava, zbog čega se kondenzator C_K naziva *kondenzatorom za razdvajanje polova*, što je ilustrovano slikom:



Kompensacija sa jednim polom

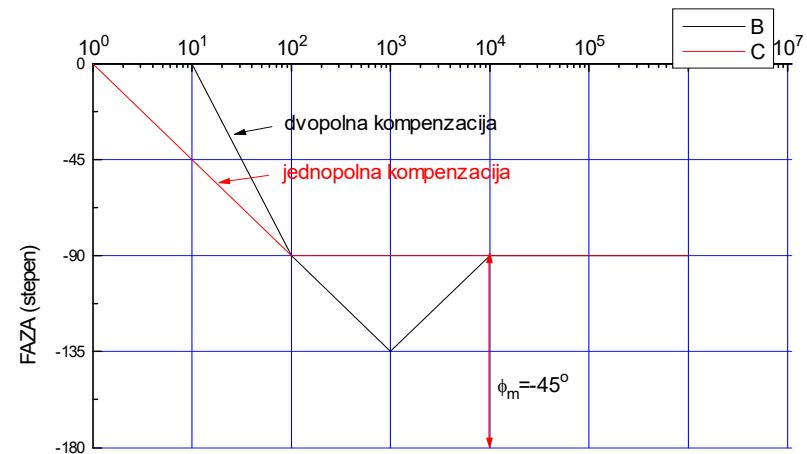
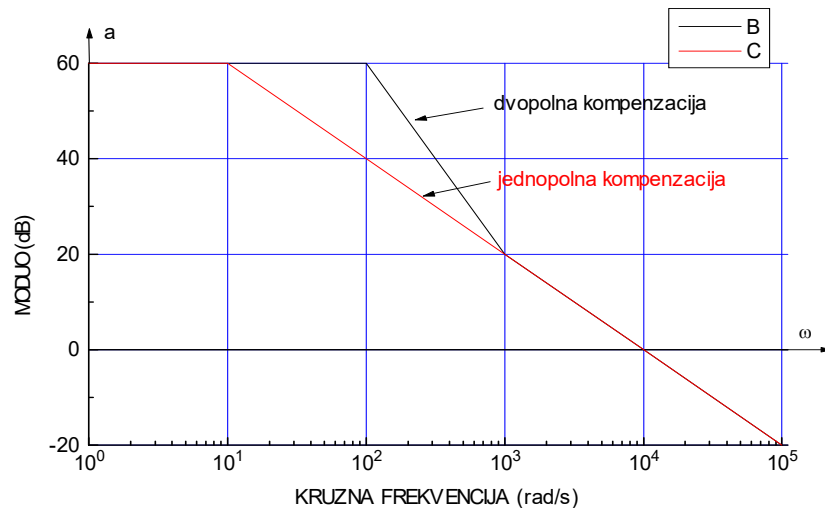
Amplitudska i fazna karakteristika



Kompensacija sa dva pola

Kompenzacijom jednim dominantnim polom osigurava se velika margina faze pri svim iznosima otporne povratne sprege, ali se istovremeno znatno sužava propusni opseg kružnog pojačanja, a samim tim i propusni opseg pojačavača sa reakcijom (pojačanje pojačavača u zatvorenoj petlji).

Na veličinu faze funkcije kružnog pojačanja u okolini kritične frekvencije najveći uticaj ima nagib amplitudske karakteristike na toj frekvenciji i u njenoj okolini i on treba da je što manji (idealno je oko 20dB/dec), a za povećanje propusnog opsega nagib amplitudske karakteristike pri nižim frekvencijama može biti i veći (40dB/dec).



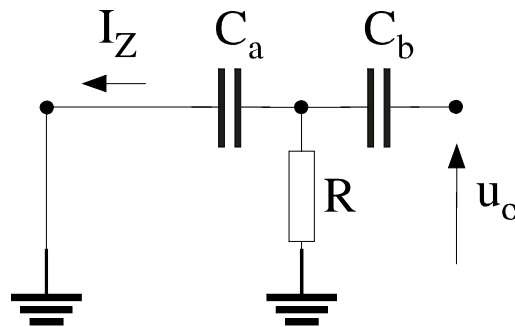
Kompensacija sa dva pola

Ovakav oblik prenosne funkcije može se ostvariti ukoliko se umesto kondenzatora C_K u kolu lokalne povratne sprege priključi kompenzacioni četvoropol sa slike, čija je prenosna impedansa data izrazom:

$$Z_T(s) = \frac{U_o(s)}{I_Z(s)} = \frac{1 + sR(C_a + C_b)}{s^2 RC_a C_b}$$

Prenosna funkcija operacionog pojačavača ima oblik:

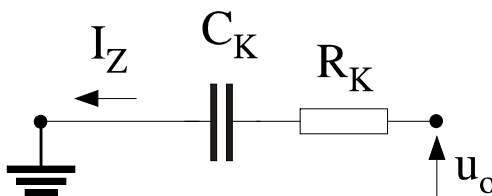
$$A(s) = \frac{A'_0(1 + s\tau)}{s^2} \quad A'_0 = \frac{g_{m1}g_{m2}i\tau}{RC_a C_b} = R(C_a + C_b)$$



Kompensacija sa nulom i polom

U slučaju da se izlaz pojačavača kapacitivno optereti, kapacitivno opterećenje C_L i izlazna otpornost operacionog pojačavača R_O unose dodatni pol u prenosnu funkciju pa se margina faze smanjuje kada je taj novi pol $\omega_L=1/(R_O C_L)$ ispod frekvencije jediničnog pojačanja (ispod kritične frekvencije).

Stepen stabilnosti pojačavača može se u tom slučaju znatno poboljšati priključivanjem redne veze otpornika R_K i kondenzatora C_K u kolo lokalne povratne sprege



Prenosna impedansa ovog kola data je izrazom:
$$Z_T = \frac{1 + sR_K C_K}{sC_K}$$

a prenosna funkcija operacionog pojačavača je tada:
$$A(s) = \frac{g_{m1} g_{m2} (1 + sR_K C_K)}{sC_K}$$

Kompensacija sa nulom i polom

Položaj nule prenosne funkcije kompenziranog pojačavača obično se postavlja niže od kritične frekvencije nekompenziranog pojačavača.

U mnogim pojačavačima sa jednopolnom kompenzacijom, koja se izvodi na spoljašnim priključcima, u samom pojačavaču je ugrađen mali otpornik od nekoliko Ω na red sa kondenzatorom za kompenzaciju C_K . Nula koja se na taj način generiše u prenosnoj funkciji nalazi se na nekoliko puta višoj frekvenciji od frekvencije jediničnog pojačanja.

