KOMPENZACIJA

Kompenzacijom se podešavaju frekventne karakteristike kružnog pojačanja pojačavača sa povratnom spregom u cilju obezbeđenja:

- stabilnosti pojačavača sa negativnom povratnom spregom (sprečavanje oscilovanja)

- željenog oblika karakteristika pojačanja sa povratnom spregom

Kompenzacija se u osnovi svodi na podešavanje fazne (a time i amplitudske) margine kružnog pojačanja. Može da se vrši u kolu pojačavača ili u kolu povratne sprege (npr. ukoliko je pojačavač integrisan i nema priključke za kompenzaciju, a FM je nedovoljna zbog velikog kapacitivnog opterećenja).

$$\boxed{A_r = A_\infty \frac{A_p}{1+A_p} + \frac{A_d}{1+A_p}}$$

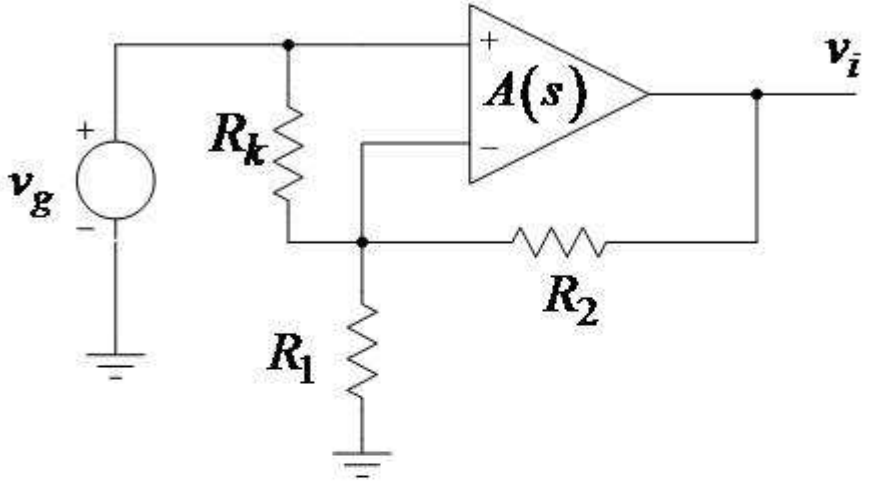
Kada je zavisni generator pojačavača skoro idealan (kao kod OP), $A_d \approx 0 \rightarrow$

$$\boxed{A_r \cong A_\infty \frac{A_p}{1+A_p}}$$

Kompenzacijom se podešava A_p, a A_∞ bi trebalo da ostane nepromenjeno. Stoga se kompenzacioni elementi u kolu povratne sprege obično priključuju između ulaznih priključaka pojačavača, da ne bi uticali na A_∞. Priključivanjem kompenzacionih elemenata između ulaznih priključaka ne može da se realizuje diferencijalna kompenzacija. Međutim, diferencijalna kompenzacija se realizuje na visokim učestanostima, blizu ω_c (na tim učestanostima je A_p malo, pa ne važi $A_r \sim A_\infty$, a tu je i granica propusnog opsega A_r).

1. Kompenzacija u kolu povratne sprege

1.1 Kompenzacija atenuatorom



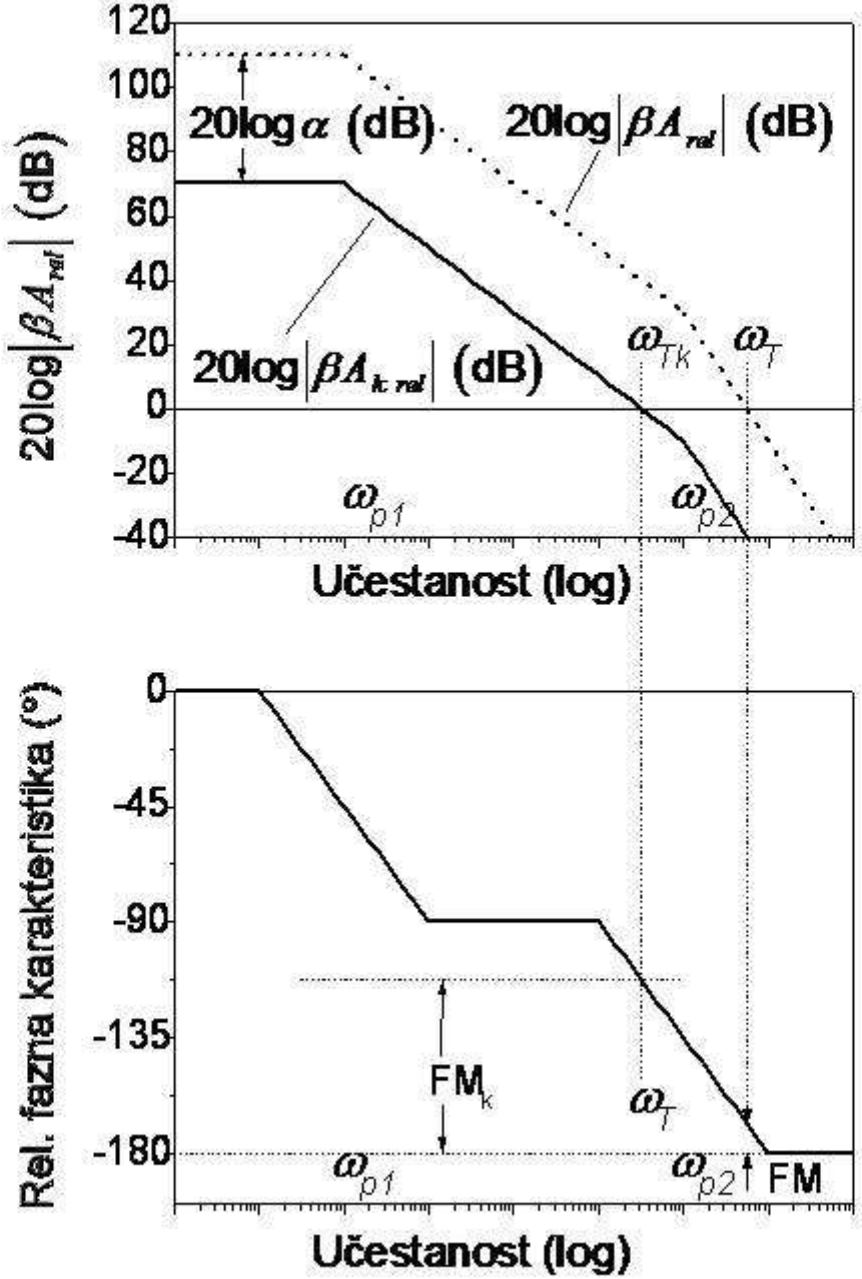
$$\beta A_k(j\omega) = \alpha \cdot \beta A(j\omega)$$

$$\alpha = \text{const}, \quad \alpha < 1$$

$\Rightarrow$Polovi se ne menjaju, pa je fazna karakteristika nepromenjena, a amplitudska se translira naniže

$$20\log\left|\beta A_k(j\omega)\right| = 20\log\left|\beta A(j\omega)\right| + \underbrace{20\log\alpha}_{<0} \Rightarrow \omega_{Tk} < \omega_T \Rightarrow \mathrm{FM}_k > \mathrm{FM}$$

Loše osobine: - manje kružno pojačanje na niskim učestanostima
- uži propusni opseg pojačavača $\left(\omega_{Tk} < \omega_T\right)$

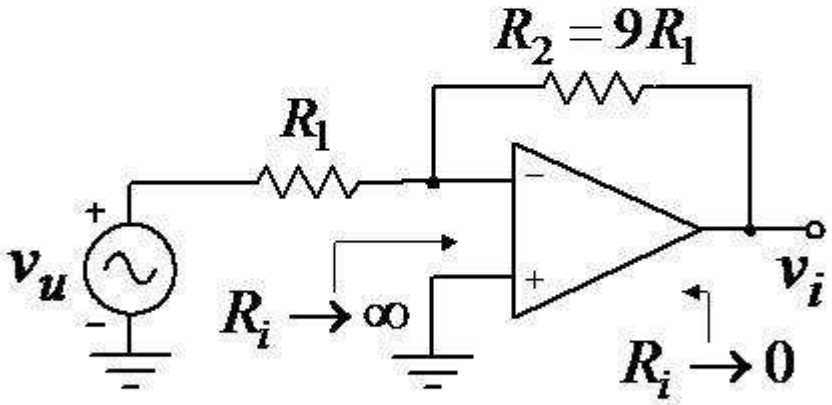

120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
20log α (dB)
20log|βA_real| (dB)
20log|βA_k real| (dB)
ω_Tk
ω_T
ω_p1
ω_p2
20log|βA_real| (dB)
Učestanost (log)
0
-45
-90
-135
-180
FM_k
ω_T
ω_p1
ω_p2
FM
Rel. fazna karakteristika (°)
Učestanost (log)

Primer:

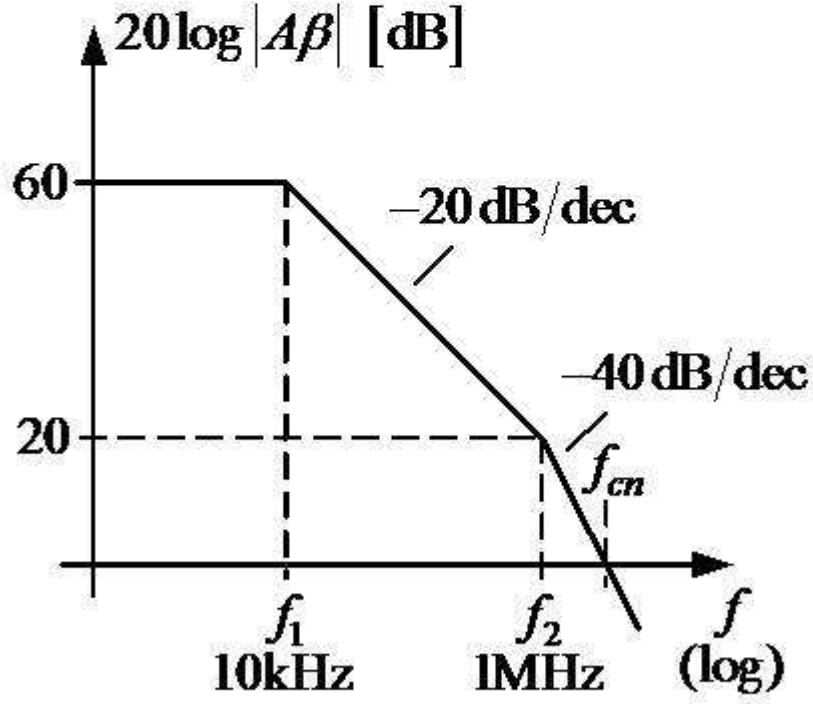
Za operacioni pojačavač (OP) na slici 1 amplitudska karakteristika kružnog pojačanja prikazana je na slici 2.

a) Odrediti kolika je fazna margina pojačavača i da li je pojačavač stabilan.

b) Ako je R_1 = 10k odrediti vrednost kompenzacionog otpornika R_k koji treba vezati između + i – priključka OP da bi FM kompenzovanog pojačavača bila 45°? Kolika je učestanost jediničnog kružnog pojačanja?



Sl. 1.



Sl. 2.

a) Učestanost jediničnog kružnog pojačanja bez kompenzacije je f_{cn} .

$$A(s)=\frac{K}{(1+s/\omega_1)(1+s/\omega_2)}$$

$$20\log\left|A\beta(j\omega_{cn})\right|=0$$

$$60-20\log\sqrt{\left(1+f_{cn}^2/f_1^2\right)\left(1+f_{cn}^2/f_2^2\right)}=0$$

$$6=\log\left[1+f_{cn}^2\left(\frac{1}{f_1^2}+\frac{1}{f_2^2}\right)+\frac{f_{cn}^4}{f_1^2 f_2^2}\right]\Rightarrow 10^6=1+f_{cn}^2\cdot 10^{-8}+f_{cn}^4\cdot 10^{-20}\Rightarrow f_{cn}=3{,}16\,\text{MHz}$$

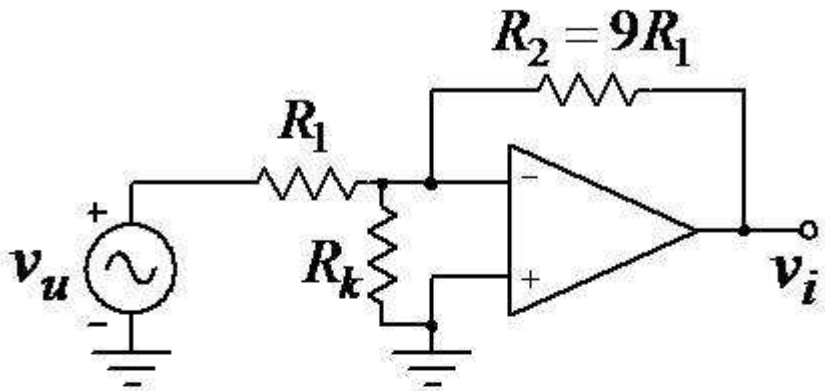
Drugi način (grafički, sa slike): $20\text{dB}=40\frac{\text{dB}}{\text{dec}}\cdot\log\frac{f_{cn}}{f_2}\Rightarrow f_{cn}=\sqrt{10}\,f_2=3{,}16\,f_2$

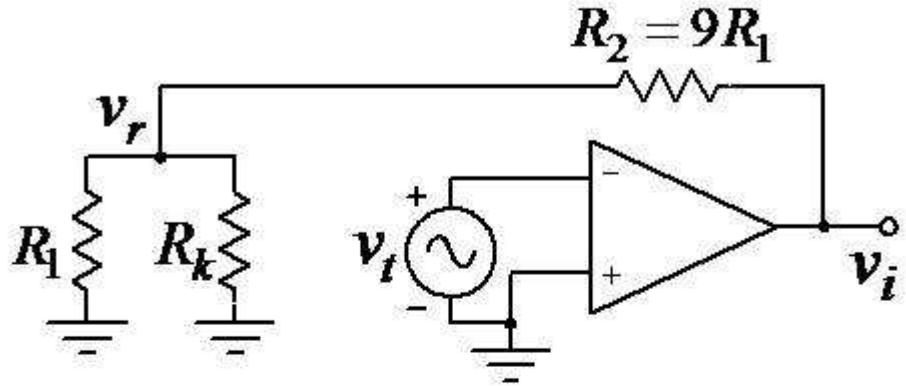
$$\text{FM}=180°+\varphi_r\left[A\beta(j\omega_{cn})\right]=180°+\arctan K-\arctan\frac{f_{cn}}{f_1}-\arctan\frac{f_{cn}}{f_2}$$

$$\text{FM}=180°+0-\arctan\frac{3{,}16\cdot 10^6}{1\cdot 10^4}-\arctan 3{,}16$$

$\text{FM}=180°-89{,}8°-72{,}44°=17{,}7°>0\Rightarrow$ pojačavač je stabilan

b) Kompenzacijom treba da se poveća FM.

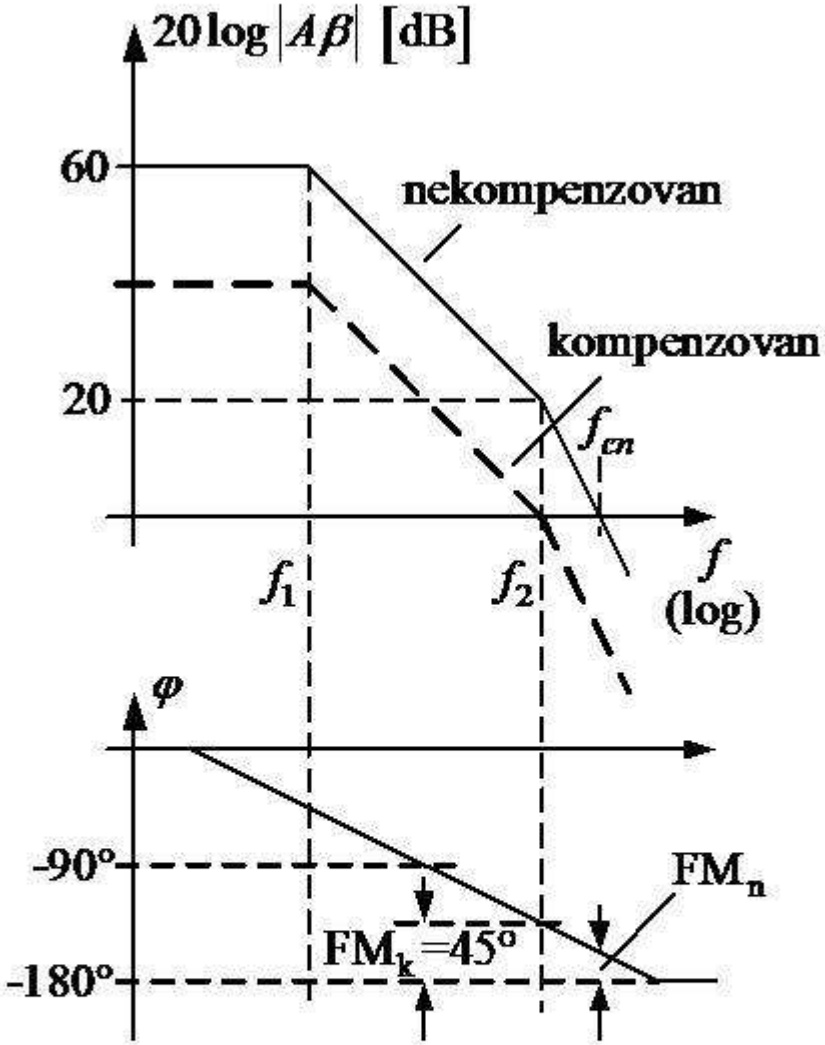




$$(\beta A)_k = \frac{v_r}{v_t} = -A(s)\cdot\frac{R_1 \| R_k}{R_2 + R_1 \| R_k} = -A(s)\cdot\frac{R_1 R_k}{R_2(R_1+R_k)+R_1 R_k} = -A(s)\cdot\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot\frac{R_k}{R_k + \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}}$$

$$(\beta A)_k = (\beta A)_n \cdot \alpha \qquad \alpha = \frac{R_k}{R_k + R_1 \| R_2} < 1 \quad \leftarrow \quad \text{atenuator}$$

Ovakvom kompenzacijom se smanjuje kružno pojačanje, dok se položaj singulariteta $A\beta$ ne menja $\Rightarrow$ Amplitudska karakteristika se spušta za 20logα i jedinična učestanost se približava koordinatnom početku, čime se povećava fazna margina.



Da bi bilo FM = 45° treba pomeriti f_c na učestanost f_2 tj. spustiti amplitudsku karakteristiku za 20 dB.

$$20\log\frac{R_k}{R_k+R_1\|R_2}=-20\,\text{dB}$$

$$R_k+R_1\|R_2=10\,R_k$$

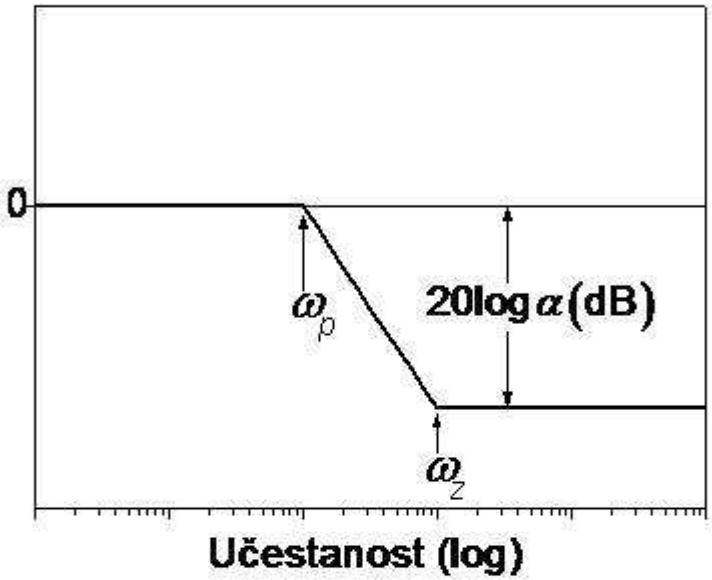
$$\frac{R_1\cdot 9R_1}{10R_1}=9R_k \quad R_k=\frac{R_1}{10}=1\text{k}\Omega$$

Jedinična učestanost kružnog pojačanja je $f_{ck}=f_2=1\text{MHz}$.

Prednosti: - lako se izvodi
- povećava se FM

Nedostaci: - smanjuje se $A_0\beta_0$
- smanjuje se f_c.
- povećava se nivo šuma na ulazu OP i ulazni ofset napon

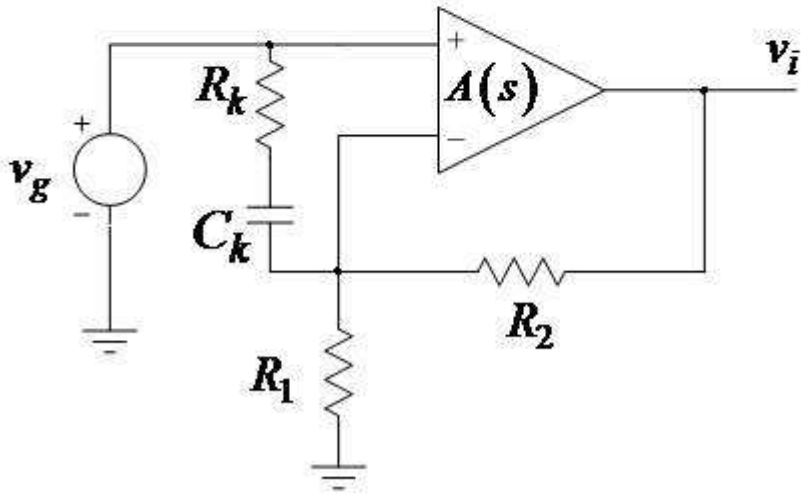
1.2 Integralna kompenzacija



- uvode se nula ω_{zk} i pol ω_{pk} kompenzatora ali je $\omega_{pk} < \omega_{zk}$ (integrator)

$$\beta A_k(s) = \beta A(s) \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_{zk}}}{1 + \frac{s}{\omega_{pk}}}$$

$$\omega_{pk} < \omega_{zk}$$

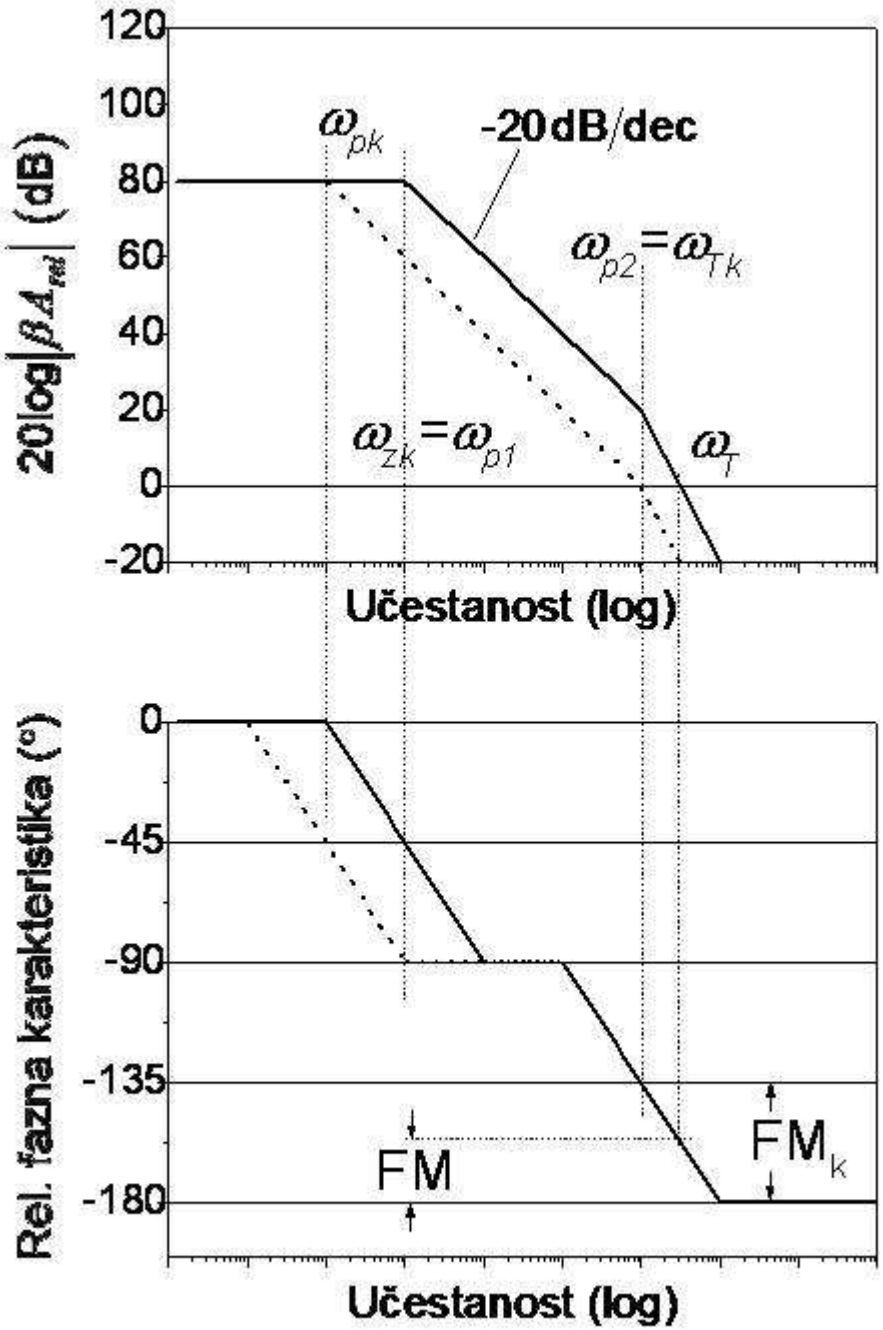


- Ideja je da se poništi ω_{p1} nulom kompenzacionog kola, tako da ω_{pk} postaje prvi pol pojačavača.

$$\left.\begin{array}{l}\omega_{zk} = \omega_{p1} \\ \omega_{pk},\ \omega_{p2} \Rightarrow \mathrm{FM}\end{array}\right\}$$ može nezavisno da se podesi R_k, C_k

- Fazna karakteristika se ne menja u okolini drugog pola, a $\omega_{Tk} < \omega_T$ $\Rightarrow \mathrm{FM}_k > \mathrm{FM}$.

- Kružno pojačanje na f→0 se ne menja, ali je propusni opseg znatno uži ⇒ smanjuje se već za male učestanosti (umanjuju se efekti NPS).



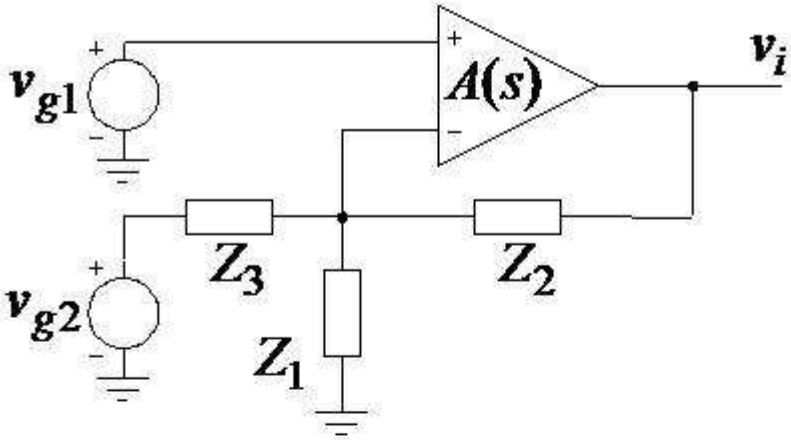
Kada važi Black-ov model:

polovi β kola su nule pojačanja sa povratnom spregom

$$A_r(s)=\frac{A(s)}{1-\beta A(s)}=\frac{\dfrac{P_A(s)}{Q_A(s)}}{1-\dfrac{P_\beta(s)}{Q_\beta(s)}\cdot\dfrac{P_A(s)}{Q_A(s)}}=\frac{P_A(s)Q_\beta(s)}{Q_\beta(s)Q_A(s)-P_\beta(s)P_A(s)}$$

nule β kola su krajevi grana geometrijskog mesta polova pojačanja sa povratnom spregom ("fantom nule")

Ako je kompenzacija u β kolu integralna, kompenzaciona nula i pol su na niskim učestanostima, pa bitno utiču na $A_r(s)$ na niskim učestanostima. Ovaj uticaj se približno neutrališe vezivanjem kompenzacionog kola između ulaznih priključaka pojačavača $A(s)$, pošto tada ovo kolo ne utiče na A_∞ tj. na vrednost $A_r(s)$ pri beskonačnom pojačanju pojačavača. Ovo se može posmatrati i preko izmenjene vrednosti pobudnog signala na oba ulaza pojačavača, tj. superpozicijom →



$$V_i(s) = \frac{A(s)}{1 + \frac{Z_1 \parallel Z_3}{Z_2 + Z_1 \parallel Z_3} \cdot A(s)} \cdot \left(V_{g1}(s) - \frac{Z_1 \parallel Z_2}{Z_3 + Z_1 \parallel Z_2} \cdot V_{g2}(s) \right)$$

$$V_{g1}(s) = V_{g2}(s) = V_g(s):$$

$$A_r(s) = \frac{V_i(s)}{V_g(s)} = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1 \parallel Z_2} \cdot \frac{A(s)}{1 + \frac{Z_1 \parallel Z_3}{Z_2 + Z_1 \parallel Z_3} \cdot A(s)}$$

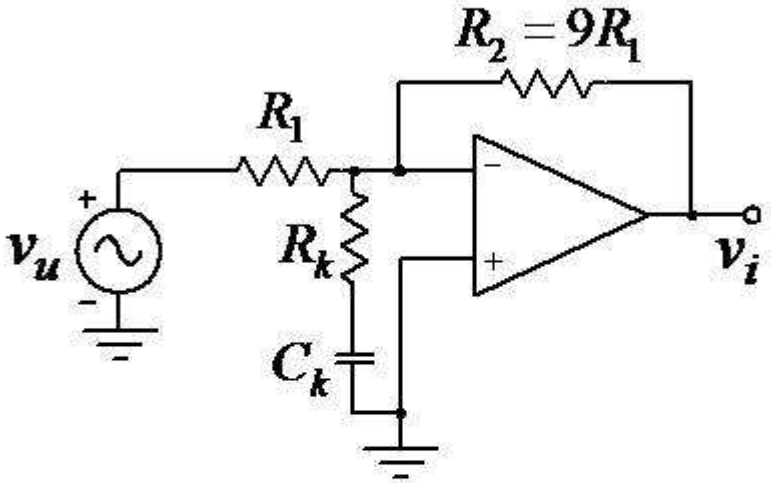
$$Z_1 = R_1;\ Z_2 = R_2;\ Z_3 = R_k + \frac{1}{sC_k} = \frac{1 + sC_k R_k}{sC_k}:$$

$$A_r(s) = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} \cdot \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + sC_k R_k}{1 + sC_k (R_k + R_1 \parallel R_2)} \cdot A(s)}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{(1 + sC_k R_k) \cdot A(s)}{1 + sC_k (R_k + R_1 \parallel R_2)}}$$

rezultat je kao da su kompenzacioni pol i nula u kolu pojačavača, uz isto β kao u nekompenzovanom kolu ←

Primer:

Za pojačavač iz prethodnog zadatka odrediti elemente serijskog integralnog kompenzatora tako da FM bude 45°.



zamenom u izrazu u prvom zadatku:

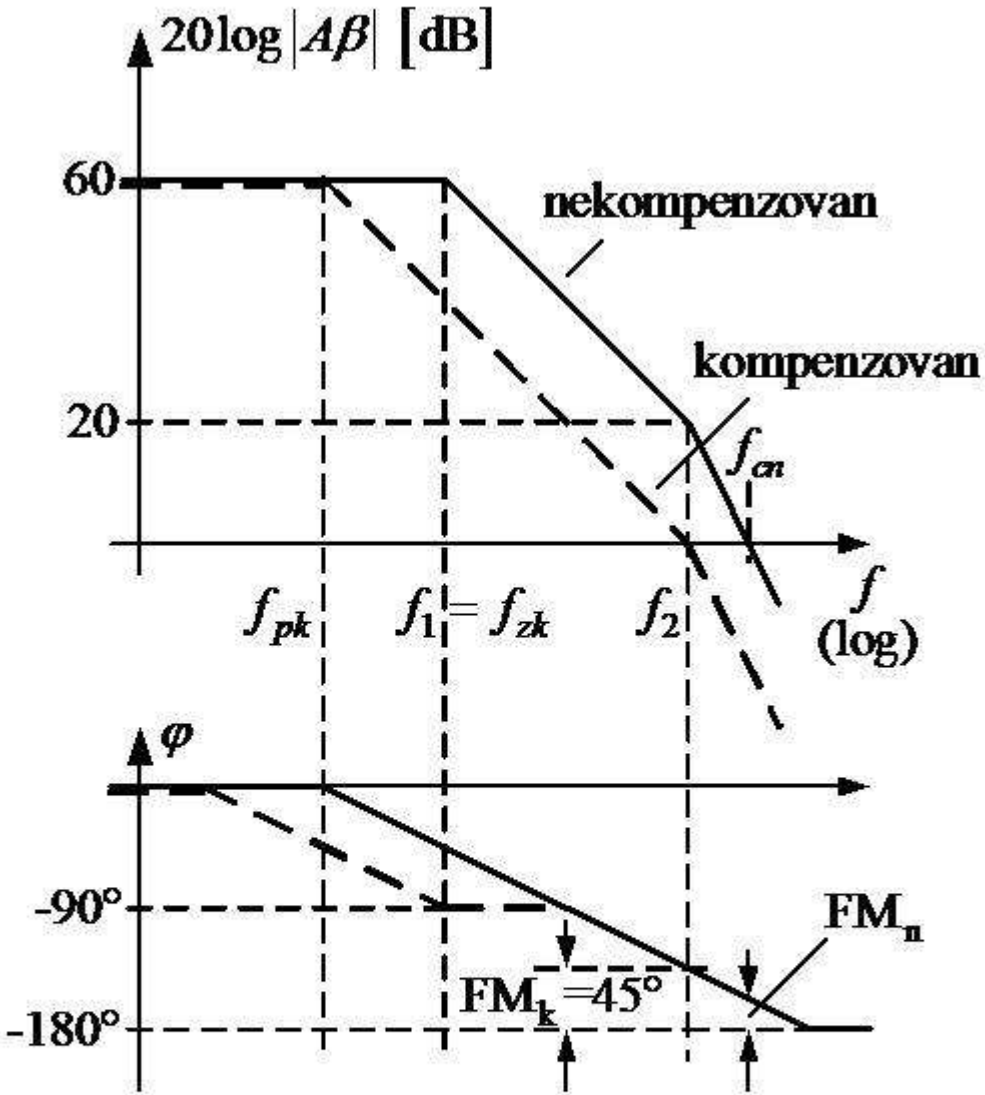
$$R_k \rightarrow R_k + \frac{1}{sC_k}$$

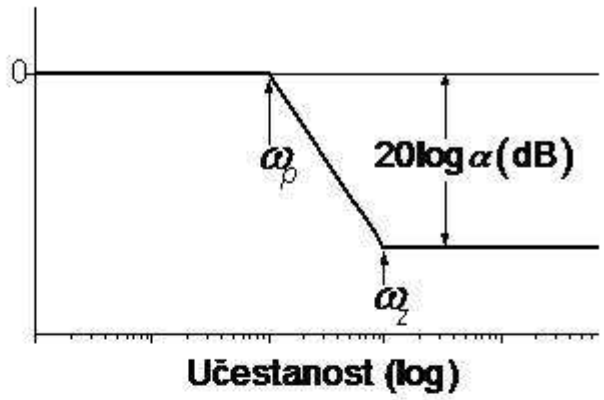
$$(\beta A)_k = -A(s)\cdot\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot\frac{R_k+\frac{1}{sC_k}}{R_k+\frac{1}{sC_k}+R_1\|R_2}$$

Dominantan pol kompenzovanog pojačavača postavlja se na niže učestanosti čime se smanjuje f_c, a faza se na višim učestanostima ne menja, tj. fazna margina raste.

$$(\beta A)_k = (\beta A)_n\cdot\frac{1+sC_kR_k}{1+sC_k(R_k+R_1\|R_2)} = (\beta A)_n\cdot\frac{1+s/\omega_{zk}}{1+s/\omega_{pk}}$$

$$\omega_{zk} = \frac{1}{C_kR_k}; \qquad \omega_{pk} = \frac{1}{C_k(R_k+R_1\|R_2)} \qquad \omega_{zk} > \omega_{pk}$$





Da bi se postigla FM = 45° treba podesiti $f_{ck} = f_2$, što se može postići poklapanjem $f_{zk} = f_1$ i postavljanjem $f_{pk} < f_1$ (karakteristika je istog oblika samo ima prvi pol na nižim učestanostima)

Fazna karakteristika se ne menja na visokim učestanostima jer su f_{pk} i f_{zk} na niskim učestanostima.

$$(1)\quad \omega_{zk}=\frac{1}{C_k R_k}=2\pi f_1=2\pi\cdot 10^4$$

$$(2)\quad 60-20\log\frac{f_2}{f_{pk}}=0 \;\Rightarrow\; f_2=10^3 f_{pk} \;\Rightarrow\; f_{pk}=10^3=\frac{1}{2\pi C_k\left(R_k+R_1\|R_2\right)}$$

$$2\pi\cdot 10^3\left(\frac{1}{2\pi\cdot 10^4}+C_k\frac{9R_1^{\cancel{2}}}{10\,\cancel{R_1}}\right)=1 \;\Rightarrow\; C_k=\frac{\frac{\cancel{9}}{\cancel{10}}}{\frac{\cancel{9}}{\cancel{10}}R_1}\cdot\frac{1}{2\pi\cdot 10^3}=16\text{nF}$$

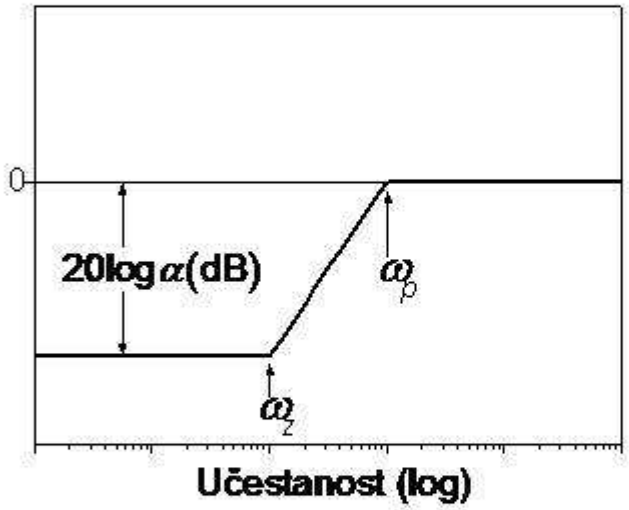
Iz (1): $R_k=1\text{k}\Omega$

Prednost: - ne menja se pojačanje na niskim učestanostima

Nedostaci: - smanjuje se f_c
- vremenski odziv se sporo smiruje

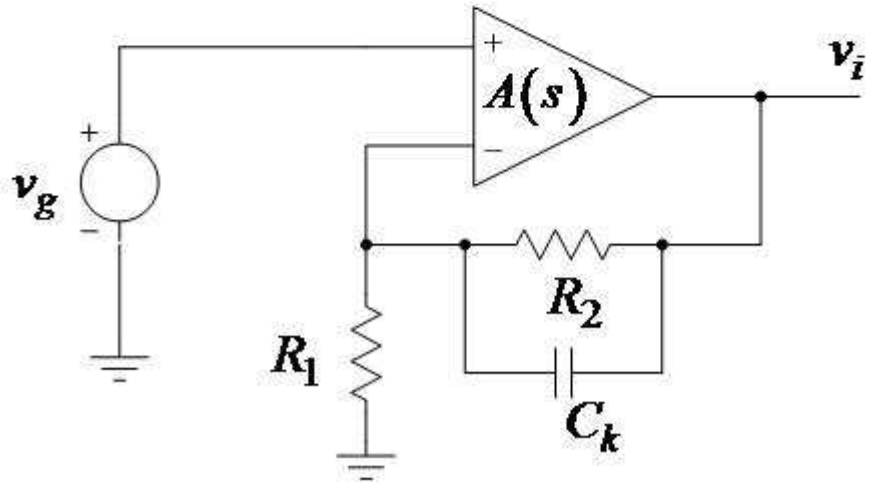
1.3 Diferencijalna kompenzacija

uvodi se kompenzaciono kolo sa nulom ω_{zk} i polom ω_{pk} , uz $\omega_{zk} < \omega_{pk}$



← amplitudska karakteristika kompenzacionog kola (kao diferencijator)

Kompenzaciono kolo koristi razdelnik kola povratne sprege, da se ne bi promenilo $A_r(0)$ →

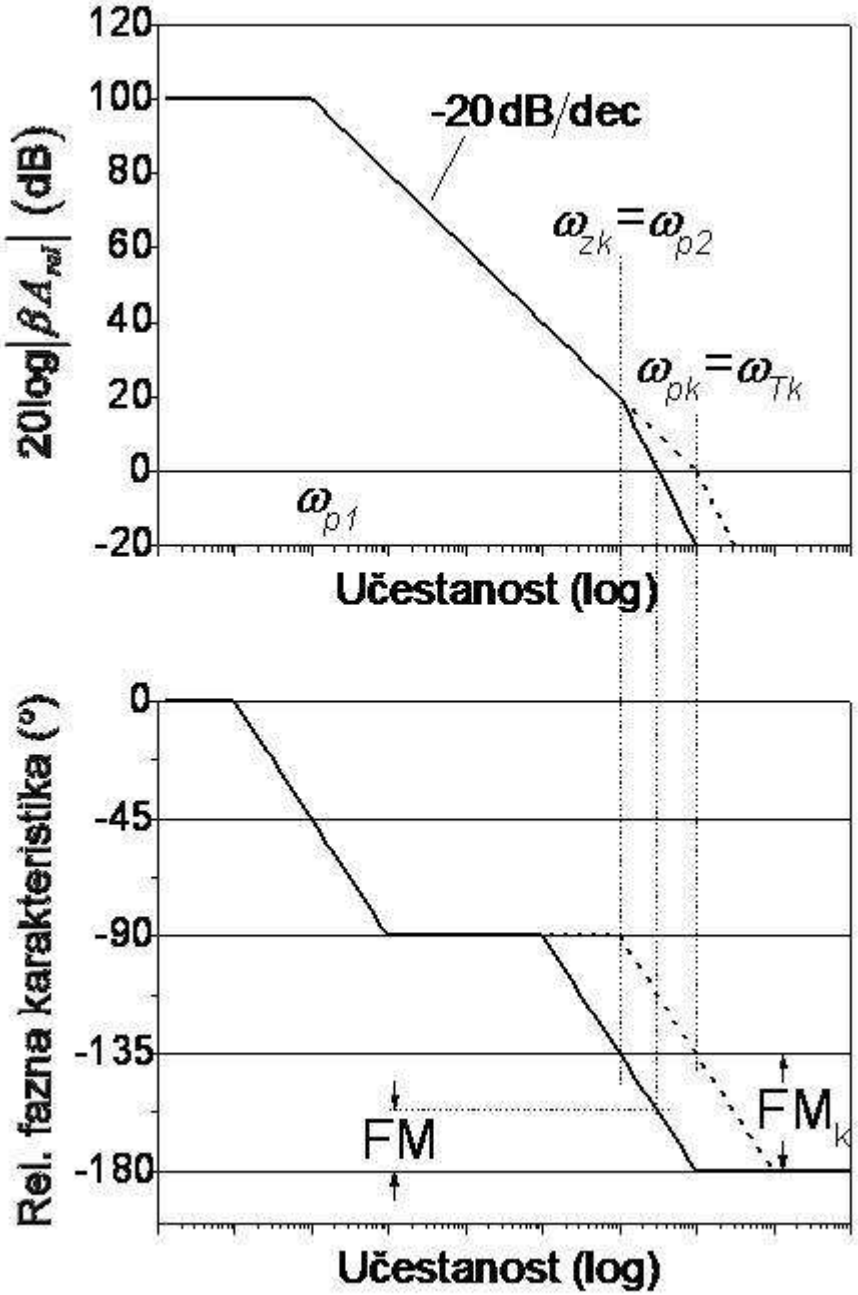


$$\beta A_k(s) = -\frac{R_1}{R_1 + \dfrac{R_2}{1 + sR_2C_k}} \cdot A(s)$$

$$\beta A_k(s) =$$

$$-\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A(s) \frac{1 + sR_2C_k}{1 + s(R_1 \parallel R_2)C_k}$$

$$\omega_{zk} = \frac{1}{R_2C_k} < \omega_{pk} = \frac{1}{(R_1 \parallel R_2)C_k}$$



Ideja je da se poništi ω_{p2} nulom kompenzacionog kola, tako da ω_{pk} postaje drugi pol kružnog pojačanja

$$\left.\begin{array}{l}\omega_{zk} = \omega_{p2} \\ \text{položaj } \omega_{pk} \text{ određuje } \mathrm{FM}_k\end{array}\right\}$$

problem je što se iz prvog uslova odredi C_k, a time je određena i učestanost ω_{pk}

$$\left.\frac{\omega_{pk}}{\omega_{zk}} = \frac{R_2}{\dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{1}{\dfrac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{1}{|\beta|}\right\}$$

odnos ω_{zk} i ω_{pk} ne može da se bira

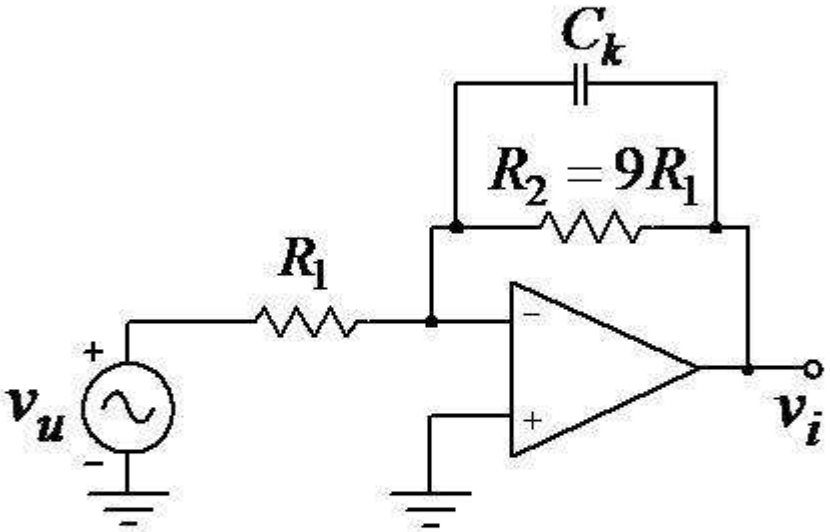
Ako je ω_{p2} znatno manje od ω_c, željena vrednost FM može da se postigne uz $\omega_{zk} \neq \omega_{p2}$
Dodatni stepen slobode može da se dobije ako se (paralelno otporniku R_2) umesto C_k priključi redna veza C_k i R_k. Tada je $\omega_{pk} / \omega_{zk} < 1/|\beta|$
Dobre osobine: - kružno pojačanje na niskim učestanostima se ne menja
- $\omega_{Tk} > \omega_T$

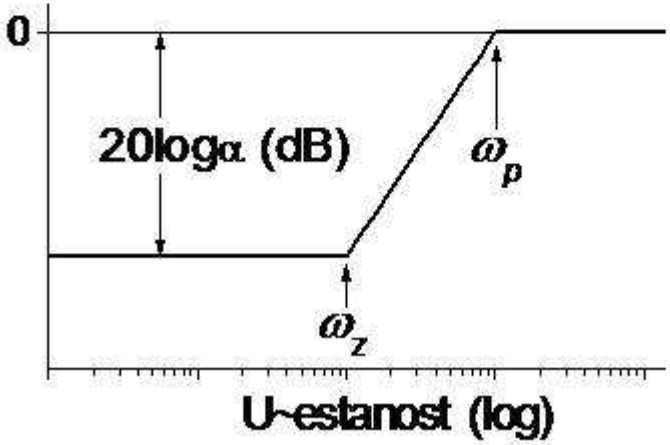
Loše: učestanost pola A_∞ se poklapa sa ω_{zk}, što utiče na graničnu učestanost sa NPS

$$A_\infty = 1 + \frac{R_2}{R_1\left(1 + sR_2C_k\right)} \leftarrow \text{ima pol u } -1/R_2C_k$$

Primer:

Za pojačavač iz prethodnog primera odrediti vrednost kondenzatora C_k u serijskom diferencijalnom kompenzatoru tako da FM kompenzovanog kružnog pojačanja bude 45°.





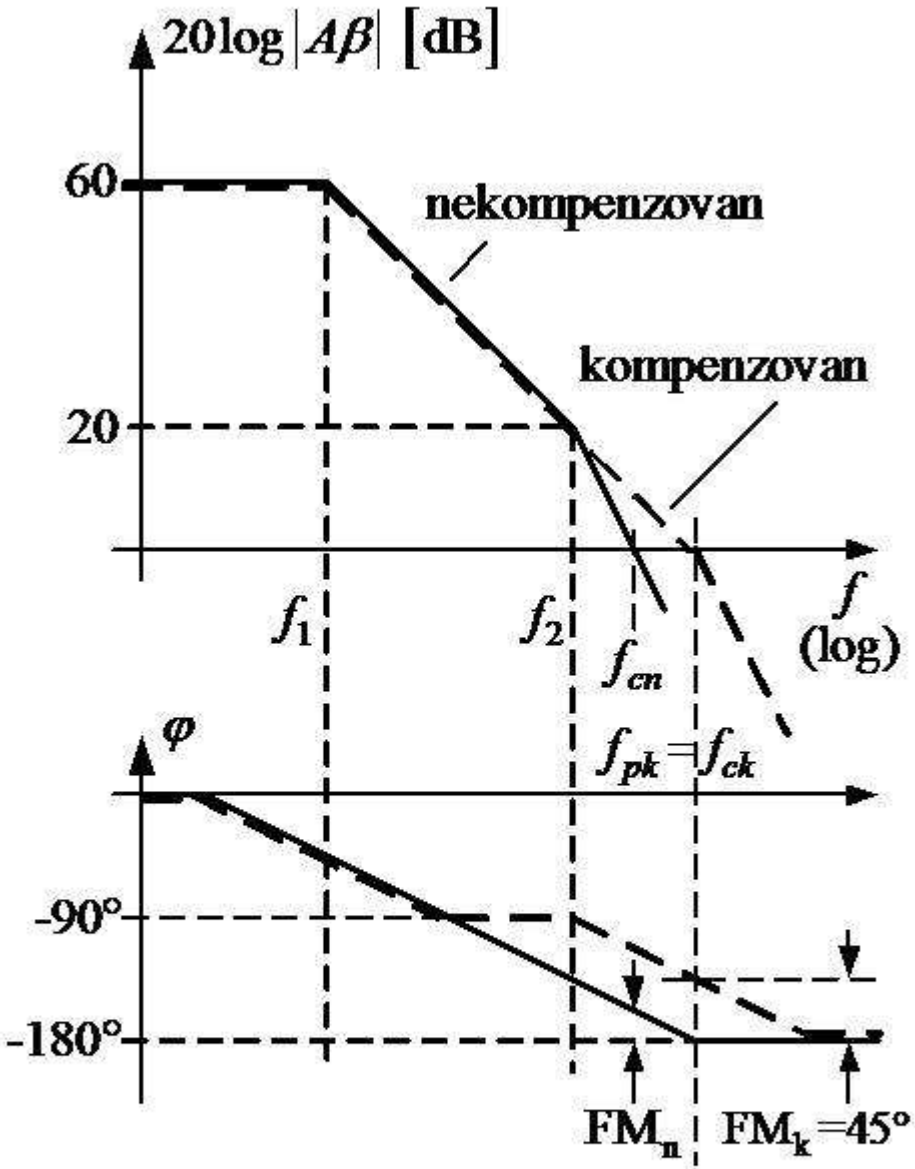
$$(\beta A)_k = -A(s)\cdot\frac{R_1}{R_1+\dfrac{R_2}{1+sC_kR_2}}$$

$$(\beta A)_k = -A(s)\cdot\frac{R_1(1+sC_kR_2)}{R_1+R_2+sC_kR_1R_2}$$

$$(\beta A)_k = -A(s)\cdot\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot\frac{1+sC_kR_2}{1+sC_k(R_1\|R_2)}$$

$$(\beta A)_k = (\beta A)_n\cdot\frac{1+s/\omega_{zk}}{1+s/\omega_{pk}}$$

$$\omega_{zk} = \frac{1}{C_kR_2};\quad \omega_{pk} = \frac{1}{C_k(R_1\|R_2)}\qquad \omega_{zk} < \omega_{pk}$$



Nagib amplitudske karakteristike u okolini drugog pola se smanjuje (po apsolutnoj vrednosti) "pomeranjem" drugog pola ka višim učestanostima, čime se povećava f_c a fazna karakteristika se pomera udesno.

Da bi se postigla FM = 45° treba podesiti $f_{ck} = f_{pk} > f_2$, a uticaj f_2 treba poništiti nulom f_{zk}.

$$f_{zk}=\frac{1}{2\pi C_k R_2}=f_2=1\text{MHz} \;\Rightarrow\; C_k=\frac{1}{2\pi f_2 R_2}=1{,}8\text{pF} \;\Rightarrow\; f_{pk}=10\text{MHz}$$

$$f_{ck}=f_{pk} \quad 60-20\log\frac{f_{ck}}{f_1}=0 \;\Rightarrow\; f_{ck}=10^3 f_1=10\text{MHz}$$

Prednosti: - ne menja se $(\beta A)_k$ u njegovom propusnom opsegu

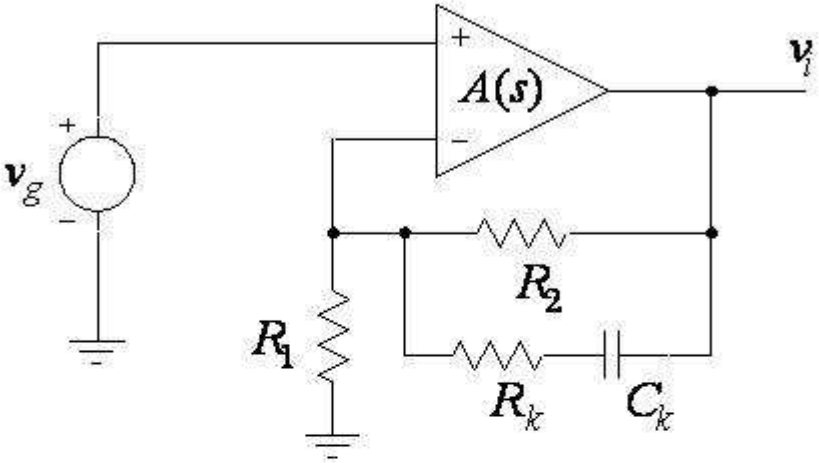
- povećava se f_c

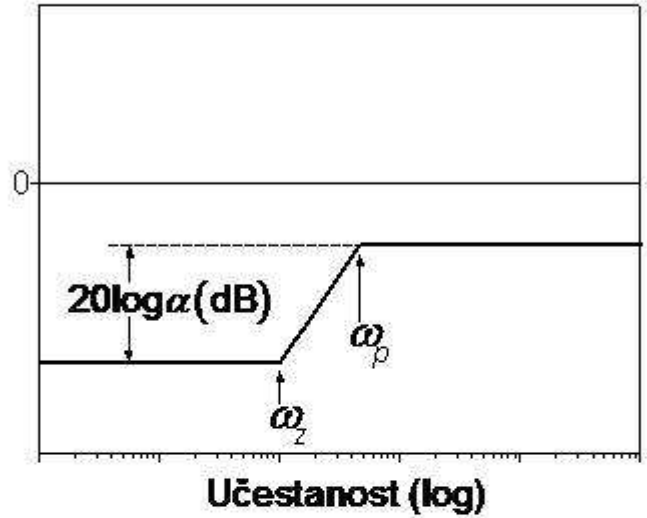
Nedostaci: - postoji samo jedan stepen slobode (C_k)

$$\frac{f_{zk}}{f_{pk}}=\frac{\dfrac{1}{2\pi C_k R_2}}{\dfrac{1}{2\pi C_k (R_1 \| R_2)}}=\frac{\dfrac{R_1 R_2}{R_1+R_2}}{R_2}=\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

- primenljiva je samo u sistemima gde je R_2 dovoljno veliko u odnosu na R_1 (~10x) tj. $f_{pk} \gg f_{zk}$ (npr. neupotrebljiva je kod jediničnog pojačavača)

U slučaju da je potrebno zadovoljiti uslov $\frac{R_1}{R_1+R_2} < \frac{f_{zk}}{f_{pk}} < 1$, dodatni stepen slobode može se ostvariti uključivanjem R_k redno sa C_k:





Umesto uključivanja R_k, može se zadržati odnos $\frac{f_{zk}}{f_{pk}} = \frac{R_1}{R_1+R_2}$ i postići potrebna vrednost FM ako se odustane od poništavanja višeg pola kompenzacionom nulom →