

# DISKRETNI POJAČAVAČ NA NISKIM UČESTANOSTIMA

Bodeova amplitudska karakteristika funkcije prenosa pojačavača se crta sabiranjem parcijalnih amplitudskih karakteristika konstante, nula i polova, što zahteva određivanje konstante, nula i polova funkcije prenosa.

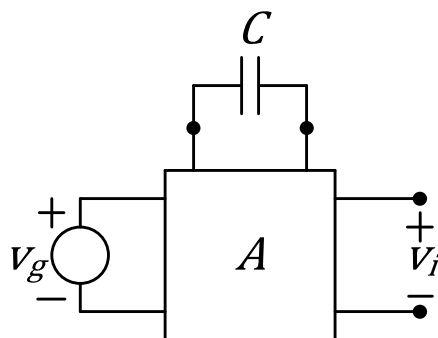
Bodeova fazna karakteristika funkcije prenosa se crta sabiranjem parcijalnih faznih karakteristika konstante, nula i polova, što takođe zahteva određivanje konstante, nula i polova funkcije prenosa.

Međutim, moguće je odrediti konstantu, nule i polove funkcije prenosa sa minimalnim izračunavanjem na osnovu sledećeg seta pravila:

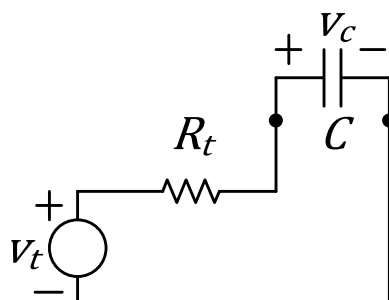
1. Broj polova u funkciji prenosa je jednak broju nezavisnih reaktivnih elemenata u kolu.
2. Na ovom predmetu su reaktivni elementi isključivo kondenzatori.
3. Sprežni kondenzator (vezan na red sa signalom) ima nulu u nuli.
4. U kolu sa jednim kondenzatorom  $C$  mora postojati jedan pol  $\omega_p$ .
5. Pol  $\omega_p$  je određen dinamičkom otpornošću  $R_d$  koju "vidi" kondenzator  $C$ .

$$\omega_p = \frac{1}{CR_d}$$

Linearizovano kolo sa pobudnim generatorom  $v_g$ , kondenzatorom  $C$  i izlaznim naponom  $v_i$  se može predstaviti na sledeći način:



Kolo se prema kondenzatoru  $C$  ponaša kao ekvivalentni Thevenenov generator napona  $v_t$  i unutrašnje otpornosti  $R_t$ .



Dinamička otpornost  $R_d$ , koju "vidi" kondenzator  $C$  kada je pobudni generator  $v_g$  isključen, čime je i Tevenenov generator  $v_t$  isključen, je jednaka otpornosti Tevenenovog generatora  $R_t$ .

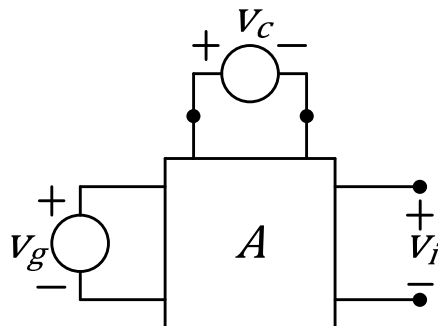
$$R_d = R_t$$

Napon  $v_C$  na krajevima kondenzatora  $C$  je:

$$v_C = v_t \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R_d + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{v_t}{1 + j\omega C R_d} = \frac{v_t}{1 + j \frac{\omega}{\frac{1}{C R_d}}}$$

$$v_C = \frac{v_t}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}} = \frac{k_3 v_g}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}}$$

Prema teoremi kompenzacije, kondenzator  $C$  se zamenjuje generatorom sa naponom  $v_C$  na krajevima kondenzatora  $C$ .



Izlazni napon  $v_i$  se izračunava teoremom superpozicije  $v_g$  i  $v_C$ .

$$v_i = k_1 v_g + k_2 v_C = k_1 v_g + \frac{k_2 k_3 v_g}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}} = \frac{k_1 + k_2 k_3 + j k_1 \frac{\omega}{\omega_p}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}} v_g$$

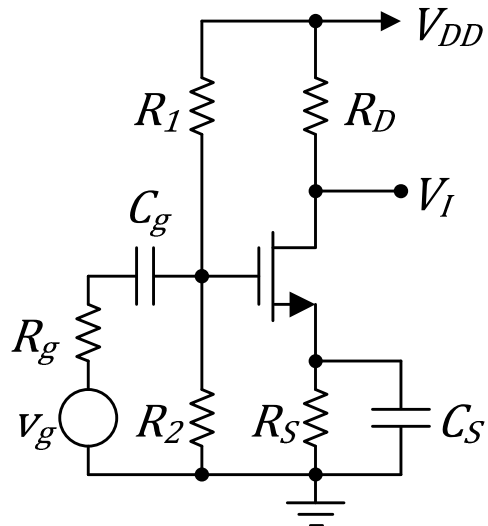
$$A = \frac{v_i}{v_{g_i}} = (k_1 + k_2 k_3) \frac{1 + j \frac{k_1 \omega}{(k_1 + k_2 k_3) \omega_p}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}}$$

Dakle, funkcija prenosa ima pol  $\omega_p$  koji je određen dinamičkom otpornošću  $R_d$  koju "vidi" kondenzator  $C$ .

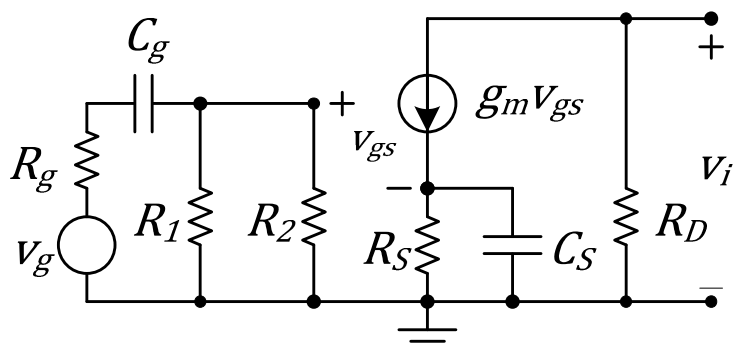
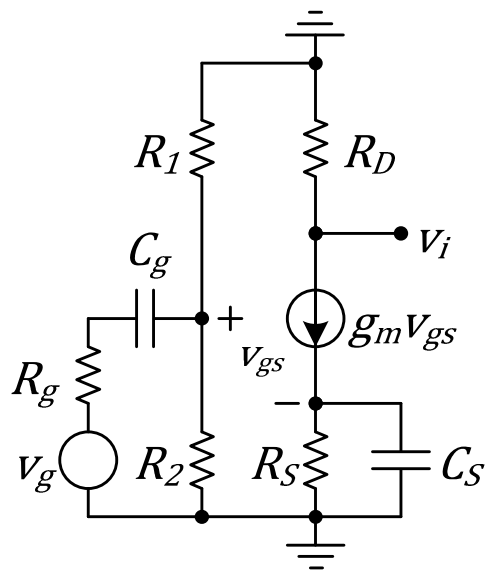
## POJAČAVAČ U SPOJU SA ZAJEDNIČKIM SORSOM NA NISKIM UČESTANOSTIMA

Pojačavač u spoju sa zajedničkim sorsom tipično ima 2 kondenzatora:

1. Sprežni kondenzator  $C_g$
2. Kondenzator u sorsu  $C_S$ .



Odgovarajuća šema pojačavača za male signale je:



Već iz složenosti šeme pojačavača za male signale se može zaključiti da je izračunavanje funkcije prenosa i određivanje nula i polova iz funkcije prenosa zahtevan i dugotrajan posao podložan mogućim greškama, iako je samo jedan tranzistor u kolu.

### PRVA NULA FUNKCIJE PRENOSA

Prva nula  $\omega_{zg}$  funkcije prenosa, koja potiče od sprežnog kondenzatora  $C_g$ , je na nultoj učestanosti.

$$\omega_{zg} = 0$$

Konstanta koja obezbeđuje bezdimenzionalnost parcijalnog doprinosa pojačanju je usvojena da bude prvi pol  $\omega_{pg}$  funkcije prenosa.

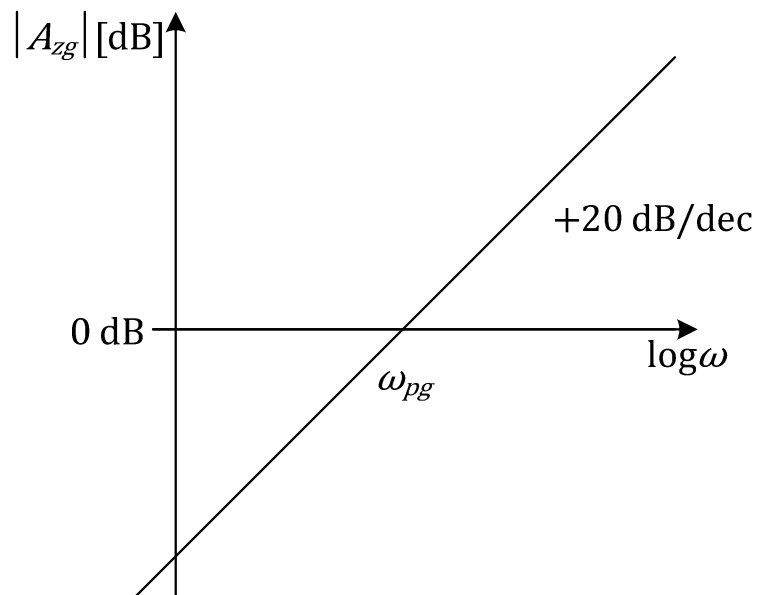
Parcijalni doprinos prve nule  $\omega_{zg}$  amplitudskoj i faznoj karakteristici pojačavača je:

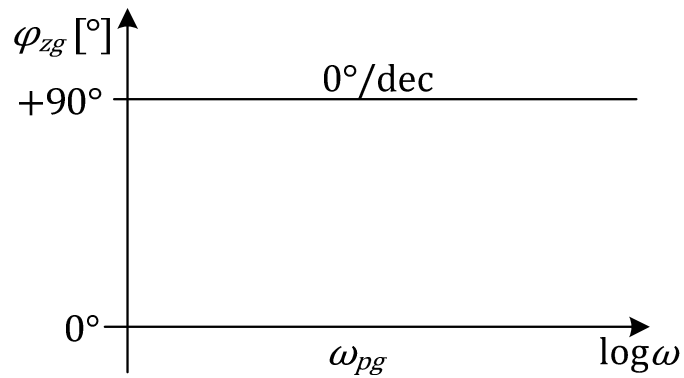
$$A_{zg} = \frac{s}{\omega_{pg}} = j \frac{\omega}{\omega_{pg}}$$

$$|A_{zg}| = \frac{\omega}{\omega_{pg}}$$

$$|A_{zg}|[\text{dB}] = 20 \log \left( \frac{\omega}{\omega_{pg}} \right)$$

$$\varphi_{zg} = \text{arctg} \left( \frac{1}{0} \right) = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$





### DRUGA NULA FUNKCIJE PRENOSA

Nakon što se jedanput izračuna funkcija prenosa, uočava se da je druga nula  $\omega_{zS}$ , koja potiče od kondenzatora u sorsu  $C_S$ :

$$\omega_{zS} = \frac{1}{C_S R_S}$$

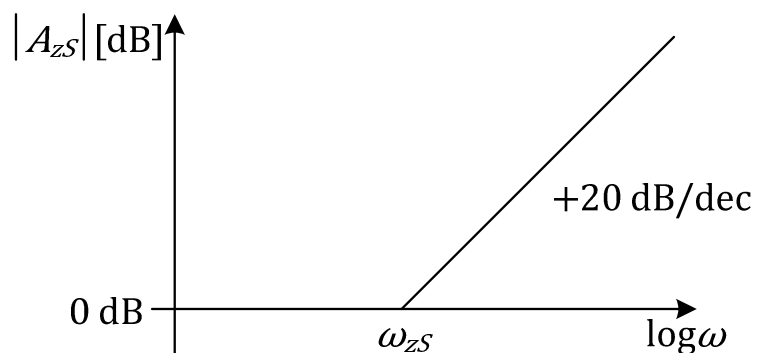
Parcijalni doprinos druge nule  $\omega_{zS}$  amplitudskoj i faznoj karakteristici pojačavača je:

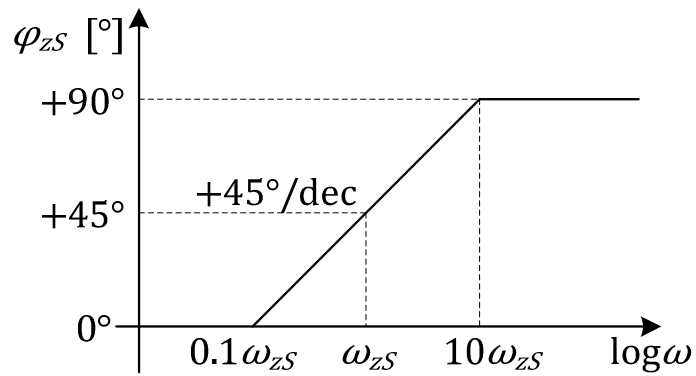
$$A_{zS} = 1 + \frac{s}{\omega_{zS}} = 1 + j \frac{\omega}{\omega_{zS}}$$

$$|A_{zS}| = \left| 1 + j \frac{\omega}{\omega_{zS}} \right| = \sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_{zS}} \right)^2}$$

$$|A_{zS}|[\text{dB}] = 20 \log \sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_{zS}} \right)^2}$$

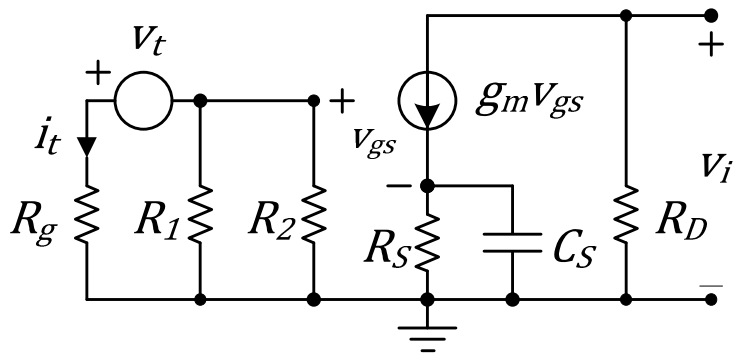
$$\varphi_{zS} = \text{arctg} \left( \frac{\omega}{\omega_{zS}} \right)$$



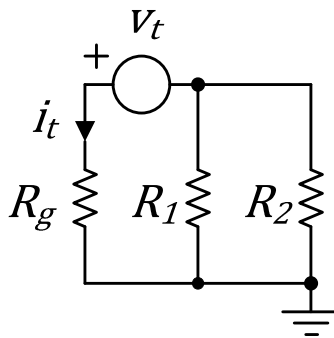


### PRVI POL FUNKCIJE PRENOSA

Prvi pol  $\omega_{pg}$  koji potiče od sprežnog kondenzatora  $C_g$ , je određen dinamičkom otpornošću  $R_{dg}$  koju "vidi" sprežni kondenzator  $C_g$ , a koja se određuje za isključen pobudni generator  $v_g$  i priključen test generator  $v_t$  umesto sprežnog kondenzatora  $C_g$ .



$$\omega_{pg} = \frac{1}{C_g R_{dg}}$$



$$R_{dg} = \frac{v_t}{i_t} = R_g + R_1 \parallel R_2 \cong R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\omega_{pg} = \frac{R_1 + R_2}{C_g R_1 R_2} > \omega_{zg} = 0$$

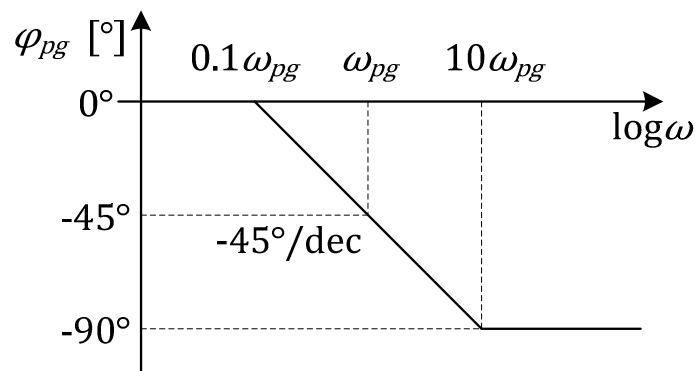
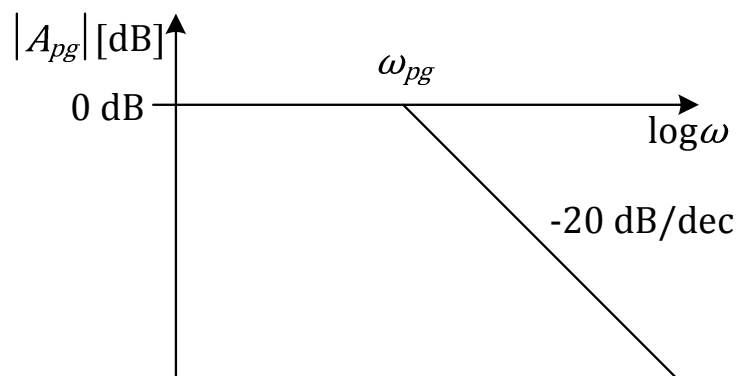
Parcijalni doprinos prvog pola  $\omega_{pg}$  amplitudskoj i faznoj karakteristici pojačavača je:

$$A_{pg} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{pg}}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{pg}}}$$

$$|A_{pg}| = \left| \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{pg}}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right)^2}}$$

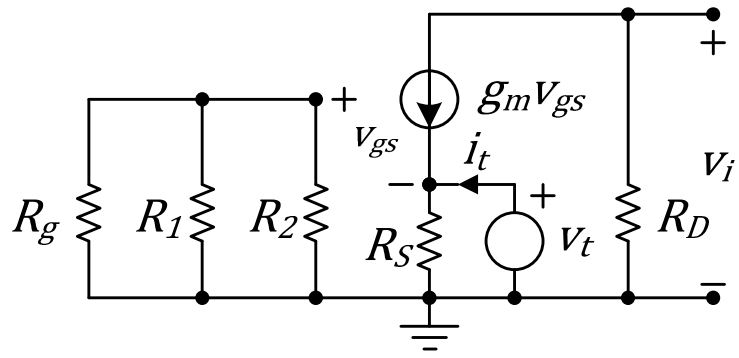
$$|A_{pg}|[\text{dB}] = -20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right)^2}$$

$$\varphi_{pg} = -\text{arctg}\left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right)$$

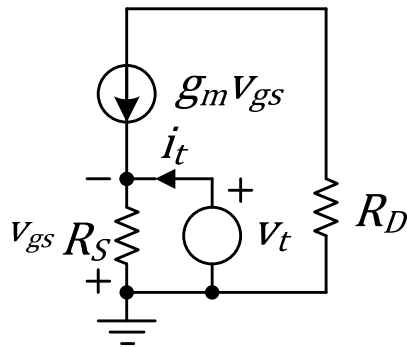


## DRUGI POL FUNKCIJE PRENOSA

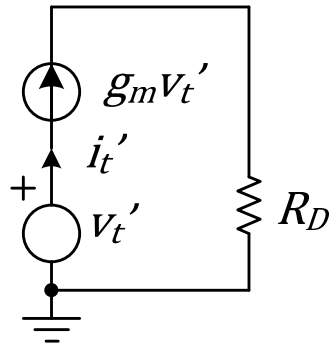
Drugi pol  $\omega_{ps}$  koji potiče od kondenzatora u sorsu  $C_S$  je određen dinamičkom otpornošću  $R_{dS}$  koju "vidi" kondenzator u sorsu  $C_S$ , a koja se određuje za isključen pobudni generator  $v_g$  i priključen test generator  $v_t$  umesto kondenzatora u sorsu  $C_S$ .



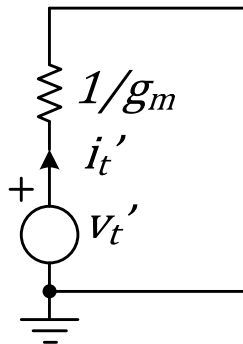
$$\omega_{ps} = \frac{1}{C_S R_{ds}}$$



$$R_{ds} = \frac{v_t}{i_t} = R_S \parallel R'_{ds}$$



$$R'_{ds} = \frac{v'_t}{i'_t} = \frac{v'_t}{g_m v'_t} = \frac{1}{g_m}$$





$$R_{ds} = R_S \parallel \frac{1}{g_m} = \frac{R_S \frac{1}{g_m}}{R_S + \frac{1}{g_m}} = \frac{R_S}{1 + g_m R_S}$$

$$\omega_{pS} = \frac{1 + g_m R_S}{C_S R_S} > \omega_{zS} = \frac{1}{C_S R_S}$$

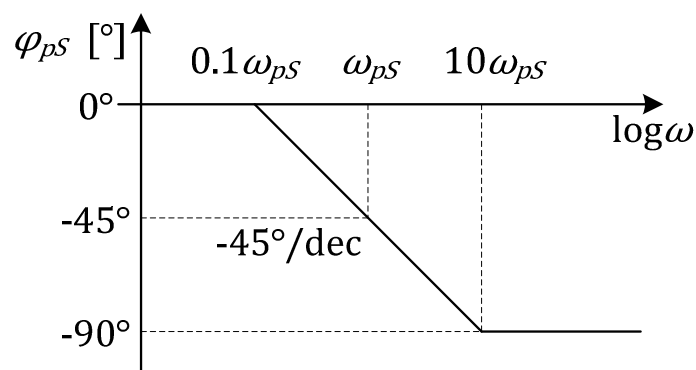
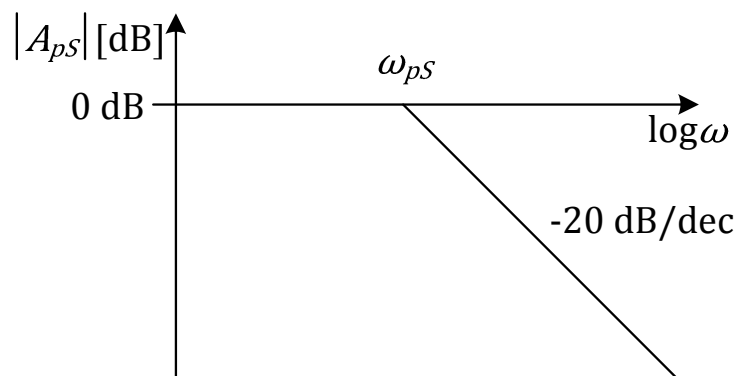
Parcijalni doprinos drugog pola  $\omega_{pS}$  amplitudskoj i faznoj karakteristici pojačavača je:

$$A_{pS} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{pS}}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{pS}}}$$

$$|A_{pS}| = \left| \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{pS}}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{pS}}\right)^2}}$$

$$|A_{pS}|[\text{dB}] = -20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{pS}}\right)^2}$$

$$\varphi_{pS} = -\text{arctg}\left(\frac{\omega}{\omega_{pS}}\right)$$



## KONSTANTA FUNKCIJE PRENOSA

Pojačanje u propusnom opsegu se izračunava za učestanosti  $\omega$  dovoljno veće od oba pola  $\omega_{pg}$  i  $\omega_{ps}$ , odnosno impedanse oba kondenzatora  $C_g$  i  $C_s$  mnogo manje od dinamičkih otpornosti  $R_{dg}$  i  $R_{ds}$  koje "vide" kondenzatori  $C_g$  i  $C_s$ , respektivno, tako da se oba kondenzatora  $C_g$  i  $C_s$  mogu smatrati kratkim spojevima.

$$\omega \gg \omega_{pg} = \frac{1}{C_g R_{dg}}$$

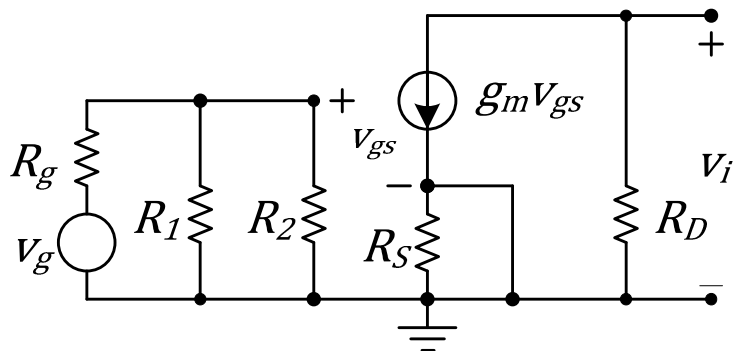
$$R_{dg} \gg \frac{1}{\omega C_g}$$

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_{dg} \gg \left| \frac{1}{j\omega C_g} \right|$$

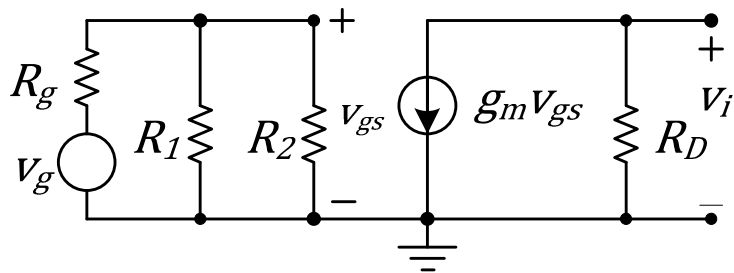
$$\omega \gg \omega_{ps} = \frac{1}{C_s R_{ds}}$$

$$R_{ds} \gg \frac{1}{\omega C_s}$$

$$\frac{R_s}{1 + g_m R_s} = R_{ds} \gg \left| \frac{1}{j\omega C_s} \right|$$



$$v_{gs} = v_g \frac{R_1 \parallel R_2}{R_g + R_1 \parallel R_2} \cong v_g$$



$$v_i = -g_m R_D v_{gs} \cong -g_m R_D v_g$$

$$A_{PO} = \frac{v_i}{v_g} = -g_m R_D$$

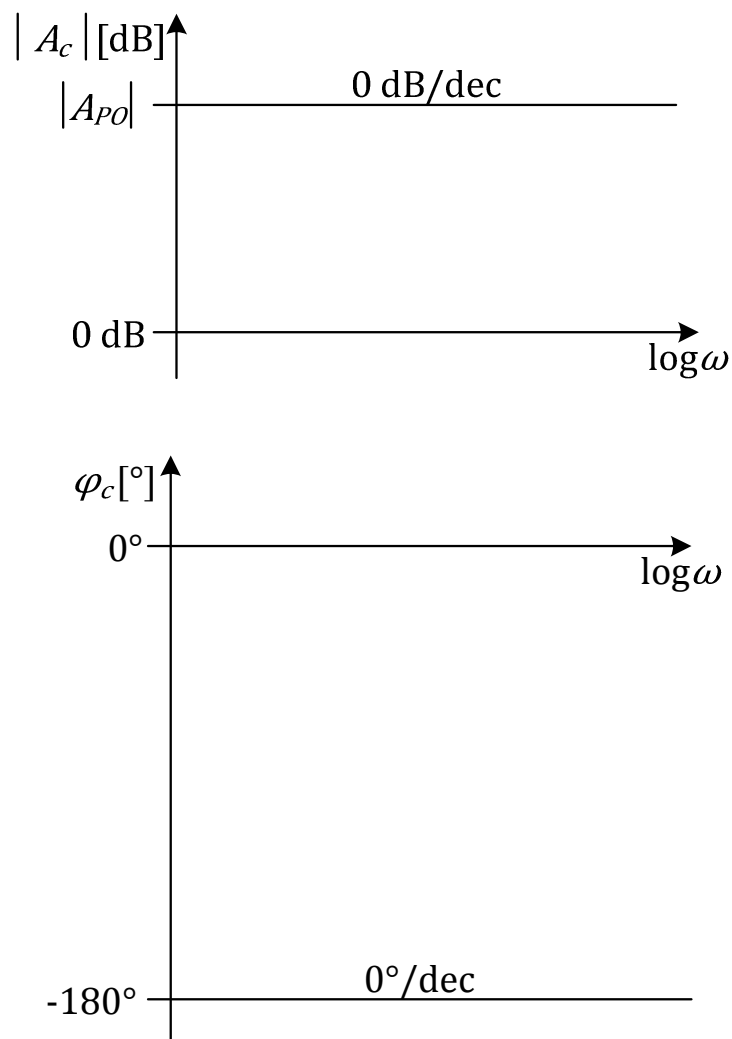
Parcijalni doprinos konstante  $A_{PO}$  amplitudskoj i faznoj karakteristici pojačavača je:

$$A_c = A_{PO}$$

$$|A_c| = |A_{PO}| = g_m R_D$$

$$|A_c|[\text{dB}] = 20\log|A_{PO}|$$

$$\varphi_c = \text{arctg}\left(\frac{0}{-1}\right) = \pm\pi = \pm 180^\circ$$



Faza može biti slobodno izabrana da bude  $+180^\circ$  ili  $-180^\circ$ , obično tako da se kompletna fazna karakteristika ne preklapa sa parcijalnim faznim karakteristikama zbog jasnoće dijagrama.

## KOMPLETNA FUNKCIJA PRENOSA

Kompletna funkcija prenosa se dobija množenjem svih parcijalnih doprinosa:

$$\begin{aligned}A_c &= A_{PO} \\A_{zg} &= \frac{s}{\omega_{pg}} = j \frac{\omega}{\omega_{pg}} \\A_{zs} &= 1 + \frac{s}{\omega_{zs}} = 1 + j \frac{\omega}{\omega_{zs}} \\A_{pg} &= \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{pg}}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{pg}}} \\A_{ps} &= \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{ps}}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{ps}}}\end{aligned}$$
$$A = A_c A_{zg} A_{zs} A_{pg} A_{ps} = A_{PO} \frac{\frac{s}{\omega_{pg}} \left(1 + \frac{s}{\omega_{zs}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{pg}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{ps}}\right)} = A_{PO} \frac{j \frac{\omega}{\omega_{pg}} \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{zs}}\right)}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{pg}}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{ps}}\right)}$$

Amplitudska karakteristika pojačavača se dobija sabiranjem svih parcijalnih doprinosa:

$$\begin{aligned}|A_c|[\text{dB}] &= 20 \log |A_{PO}| \\|A_{zg}|[\text{dB}] &= 20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right) \\|A_{zs}|[\text{dB}] &= 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{zs}}\right)^2} \\|A_{pg}|[\text{dB}] &= -20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right)^2} \\|A_{ps}|[\text{dB}] &= -20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{ps}}\right)^2} \\|A|[\text{dB}] &= 20 \log |A_c A_{zg} A_{zs} A_{pg} A_{ps}| \\|A|[\text{dB}] &= 20 \log |A_c| + 20 \log |A_{zg}| + 20 \log |A_{zs}| + 20 \log |A_{pg}| + 20 \log |A_{ps}| \\|A|[\text{dB}] &= |A_c|[\text{dB}] + |A_{zg}|[\text{dB}] + |A_{zs}|[\text{dB}] + |A_{pg}|[\text{dB}] + |A_{ps}|[\text{dB}] \\|A|[\text{dB}] &= 20 \log |A_{PO}| + 20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right) + 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{zs}}\right)^2} \\&\quad - 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right)^2} - 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{ps}}\right)^2}\end{aligned}$$

Fazna karakteristika pojačavača se dobija sabiranjem svih parcijalnih doprinosa:

$$\varphi_c = \pm 180^\circ$$

$$\varphi_{zg} = 90^\circ$$

$$\varphi_{zs} = \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{zs}}\right)$$

$$\varphi_{pg} = -\arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right)$$

$$\varphi_{ps} = -\arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{ps}}\right)$$

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_{zg} + \varphi_{zs} + \varphi_{pg} + \varphi_{ps}$$

$$\varphi = \pm 180^\circ + 90^\circ + \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{zs}}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{pg}}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{ps}}\right)$$

Za uobičajene vrednosti elemenata u pojačavaču, redosled nula i polova je:

$$0 = \omega_{zg} < \omega_{pg} < \omega_{zs} < \omega_{ps}$$

$$\omega_{pg} = \frac{R_1 + R_2}{C_g R_1 R_2}$$

$$\omega_{zs} = \frac{1}{C_s R_s}$$

$$\omega_{ps} = \frac{1 + g_m R_s}{C_s R_s}$$

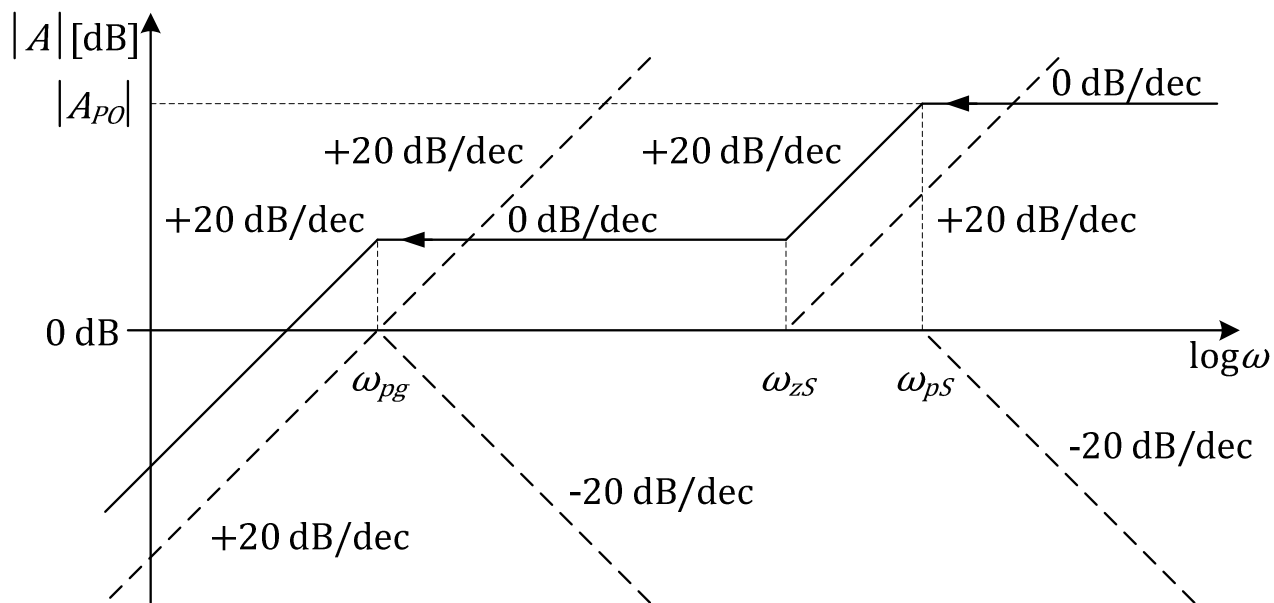
s obzirom da su kondenzatori sličnog reda veličine, a ulazni otpornici  $R_1$  i  $R_2$  su za nekoliko redova veličine veće vrednosti od otpornika u sorsu  $R_s$ .

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \ll \frac{1 + g_m R_s}{R_s} = \frac{1}{R_s} + g_m$$

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gg \frac{R_s}{1 + g_m R_s}$$

Naravno, moguće je nacrtati amplitudsku i fazu karakteristiku pojačavača i za bilo koje neuobičajene vrednosti elemenata u pojačavaču.

Kompletna amplitudska karakteristika pojačavača se crta s desna ulevo u smeru strelica počev od  $A_{PO}$ , vodeći računa o sumarnom nagibu koji se dobija sabiranjem svih parcijalnih nagiba.



Kompletna fazna karakteristika pojačavača se crta sa bilo koje strane, vodeći računa o sumarnom nagibu koji se dobija sabiranjem svih parcijalnih nagiba, kao i sumarnoj fazi sa obe strane.

