

ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI SA NAPONSKIM PROCESIRANJEM

Širokopojasni pojačavači sa naponskim procesiranjem (u daljem tekstu: širokopojasni pojačavači) imaju sledeće osobine:

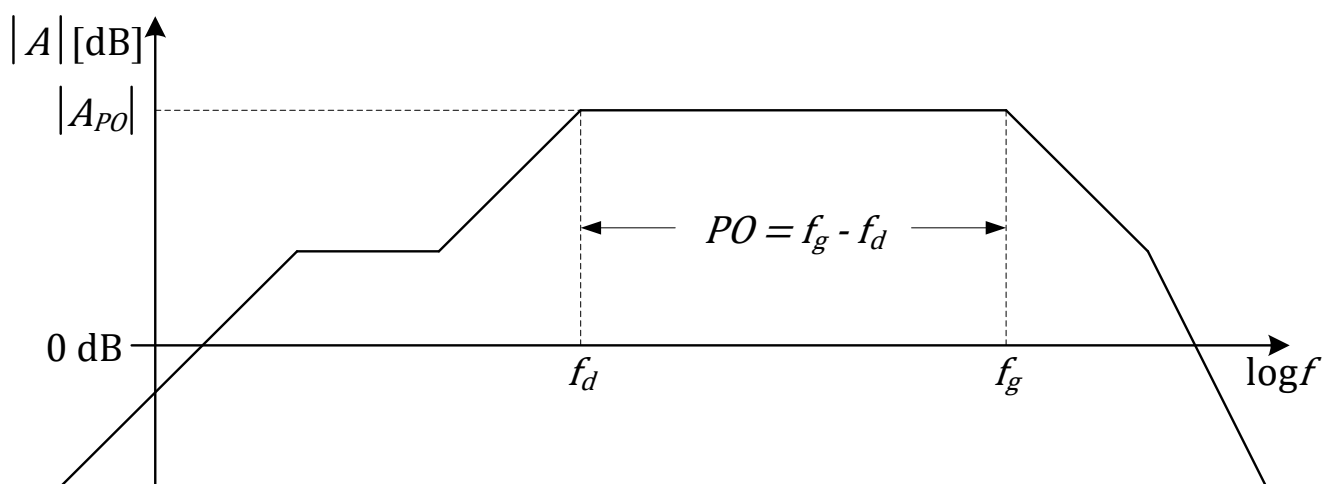
- rade u opsegu od nekoliko Hz do nekoliko MHz (preko 100 MHz)
- nemaju veliko pojačanje (tipično 20 dB, odnosno $A=10$) u propusnom opsegu
- koriste se za pojačanje impulsnih signala (tipično video signala).

Vernost reprodukcije impulsnog signala na izlazu širokopojasnog pojačavača zavisi od:

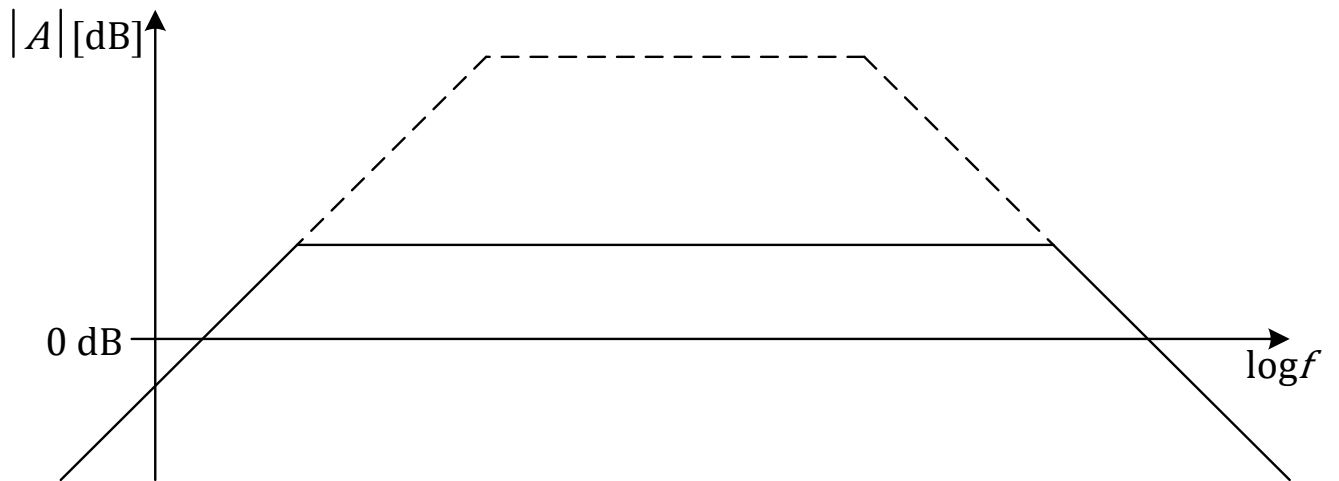
- širine propusnog opsega, s obzirom da je vreme uspostavljanja prednje i zadnje ivice reprodukovanog impulsnog signala obrnuto proporcionalno širini propusnog opsega
- fazne karakteristike koja bi trebalo da bude što linearnija.

Širokopojasni pojačavači se dele na širokopojasne pojačavače izrađene u:

- diskretnoj tehnologiji koji imaju više pojačavačkih stepeni uglavnom u spoju sa zajedničkim emiterom sa kapacitivnom spregom, a proširenje propusnog opsega se postiže uglavnom sa jakim negativnom povratnom spregom, dok se podešavanje amplitudske i fazne karakteristike svakog pojačavačkog stepena obavlja kondenzatorom u grani negativne povratne sprege.
- integrisanoj tehnologiji koji obično imaju dva (najviše tri) direktno spregnuta stepena uglavnom napravljeni kao kaskodni i diferencijalni pojačavači jer imaju manje ulazne kapacitivnosti. Posebnim šemama se smanjuje uticaj parazitnih kapacitivnosti koje su minimizirane u diskretnoj tehnologiji.



Proširivanje propusnog opsega primenom negativne povratne sprege smanjuje pojačanje.

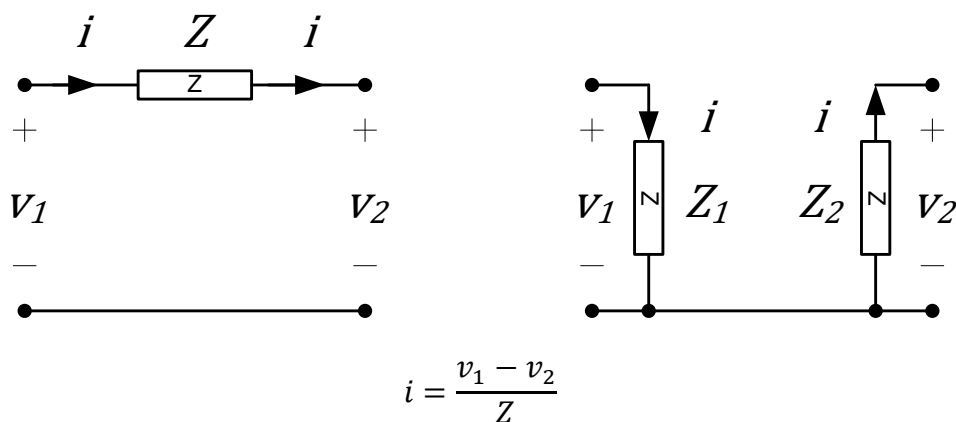


ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI U INTEGRISANOJ TEHNOLOGIJI

Kod širokopoljasnih pojačavača u integrisanoj tehnologiji može doći do smanjivanja propusnog opsega zbog Milerovog efekta – preslikavanja parazitne izlazne i sprežne kapacitivnosti u ulazno kolo, tako da ova preslikana kapacitivnost dovodi do ranijeg obaranja amplitudske karakteristike i time smanjenja propusnog opsega, tako da tipični operacioni pojačavači ne mogu da rade na visokim učestanostima. Pored toga, operacioni pojačavači u integrisanoj tehnologiji se ne prave sa stepenima sa zajedničkim emiterom i sa diferencijalnim stepenom, jer je na silicijumskoj pločici teško realizovati dovoljno velike kapacitivnosti.

MILEROVA TEOREMA

Milerova teorema omogućava preslikavanje sprežne impedanse Z u dve impedanse: Z_1 u ulaznom kolu i Z_2 u izlaznom kolu.



Preslikana sprežna impedansa Z u ulazno kolo je Z_1 :

$$Z_1 = \frac{v_1}{i} = \frac{v_1}{\frac{v_1 - v_2}{Z}} = Z \frac{v_1}{v_1 - v_2} = Z \frac{1}{1 - \frac{v_2}{v_1}} = \frac{Z}{1 - a}$$

Preslikana sprežna impedansa Z u izlazno kolo je Z_2 :

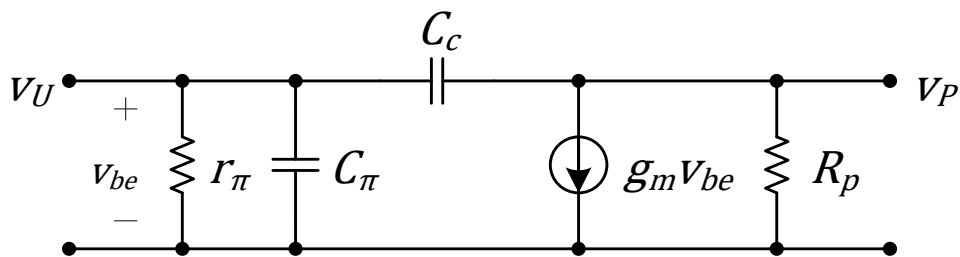
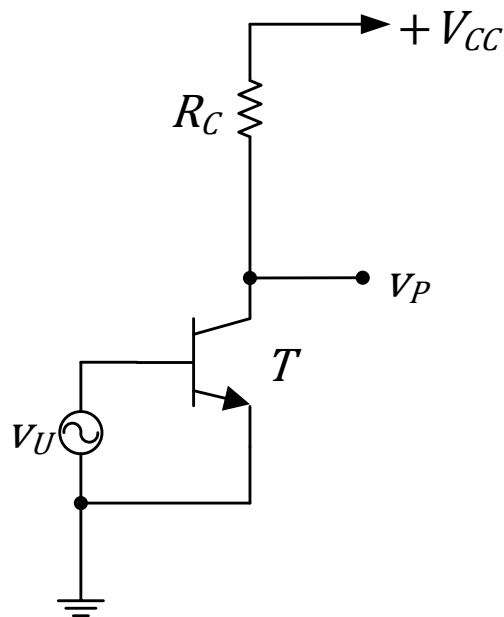
$$Z_2 = -\frac{v_2}{i} = -\frac{v_2}{\frac{v_1 - v_2}{Z}} = Z \frac{v_2}{v_2 - v_1} = Z \frac{1}{1 - \frac{v_1}{v_2}} = \frac{Z}{1 - \frac{1}{a}}$$

gde je:

$$a = \frac{v_2}{v_1}$$

KOMPENZACIJA MILEROVOG EFEKTA

Pojednostavljen stepen sa zajedničkim emitorom i njegova ekvivalentna šema za male signale su:



Nakon što se izvrši unilateralizacija (Milerovanje) sprežne kapacitivnosti dobija se:

$$Z = \frac{1}{sC_c}$$

Preslikana impedansa Z u ulazno kolo je Z_1 :

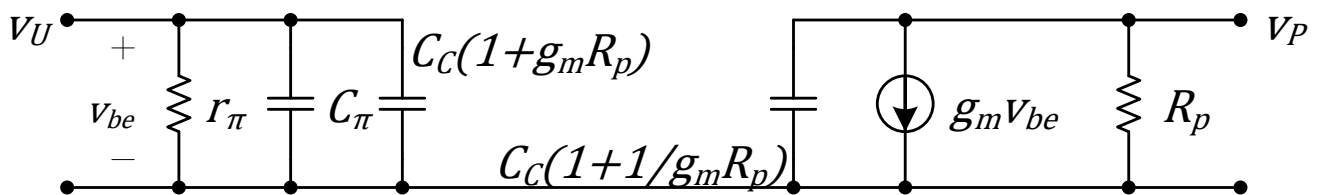
$$Z_1 = \frac{v_1}{i} = Z \frac{1}{1 - \frac{v_2}{v_1}} = \frac{Z}{1 - a} \cong \frac{1}{sC_c(1 + g_m R_p)} \cong \frac{1}{sC_c g_m R_p}$$

Preslikana impedansa Z u izlazno kolo je Z_2 :

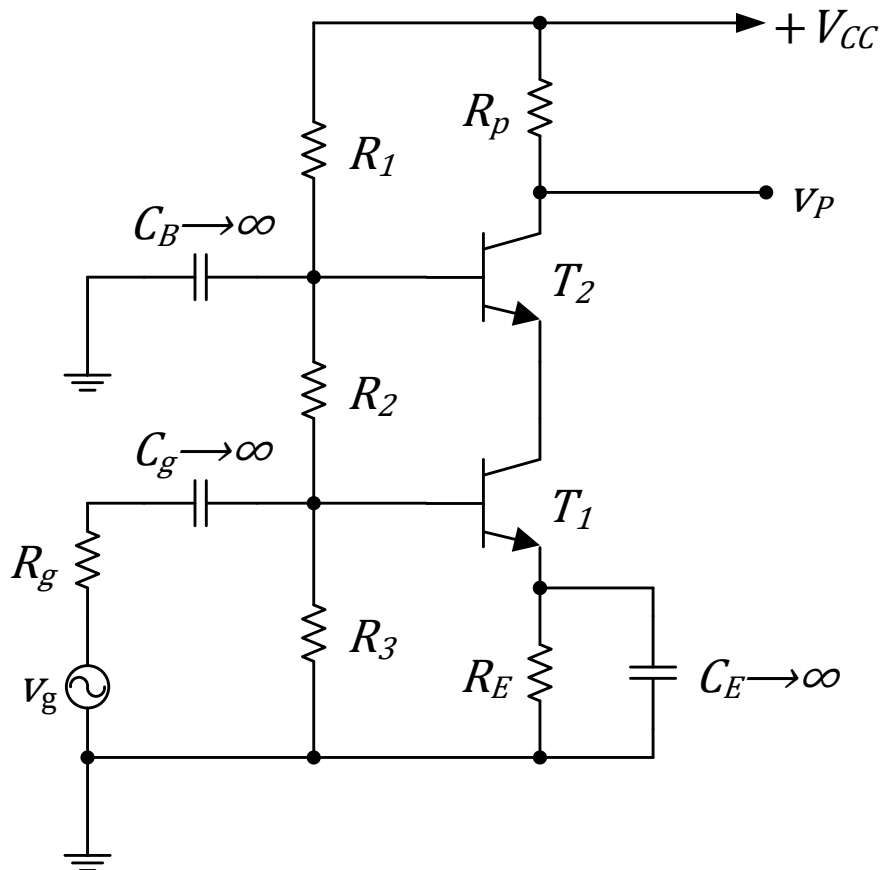
$$Z_2 = -\frac{v_2}{i} = Z \frac{1}{1 - \frac{v_1}{v_2}} = \frac{Z}{1 - \frac{1}{a}} \cong \frac{1}{sC_c \left(1 + \frac{1}{g_m R_p}\right)} \cong \frac{1}{sC_c} \gg Z_1$$

pošto je odnos napona v_2 i v_1 približno:

$$a \cong -g_m R_p$$



Uticaj preslikane sprežne kapacitivnosti u ulazno kolo se eliminiše tako što se umesto stepena sa zajedničkim emiterom koristi kaskodni pojačavač.



Nakon što se izvrši unilateralizacija (Milerovanje) sprežne kapacitivnosti dobija se:

$$Z = \frac{1}{sC_c}$$

Preslikana impedansa Z u ulazno kolo je Z_1 :

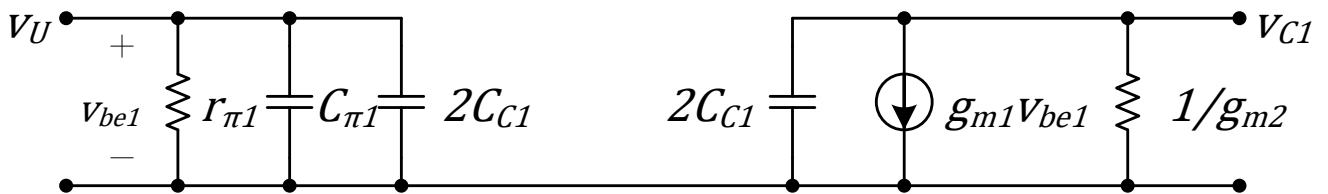
$$Z_1 = \frac{v_1}{i} = Z \frac{1}{1 - \frac{v_2}{v_1}} = \frac{Z}{1 - a} \cong \frac{1}{sC_c(1 + 1)} = \frac{1}{2sC_c}$$

Preslikana impedansa Z u izlazno kolo je Z_2 :

$$Z_2 = -\frac{v_2}{i} = Z \frac{1}{1 - \frac{v_1}{v_2}} = \frac{Z}{1 - \frac{1}{a}} \cong \frac{1}{sC_c \left(1 + \frac{1}{1}\right)} \cong \frac{1}{2sC_c} = Z_1$$

pošto je odnos napona v_2 i v_1 približno:

$$a \cong -g_{m1} \frac{1}{g_{m2}} = -1$$

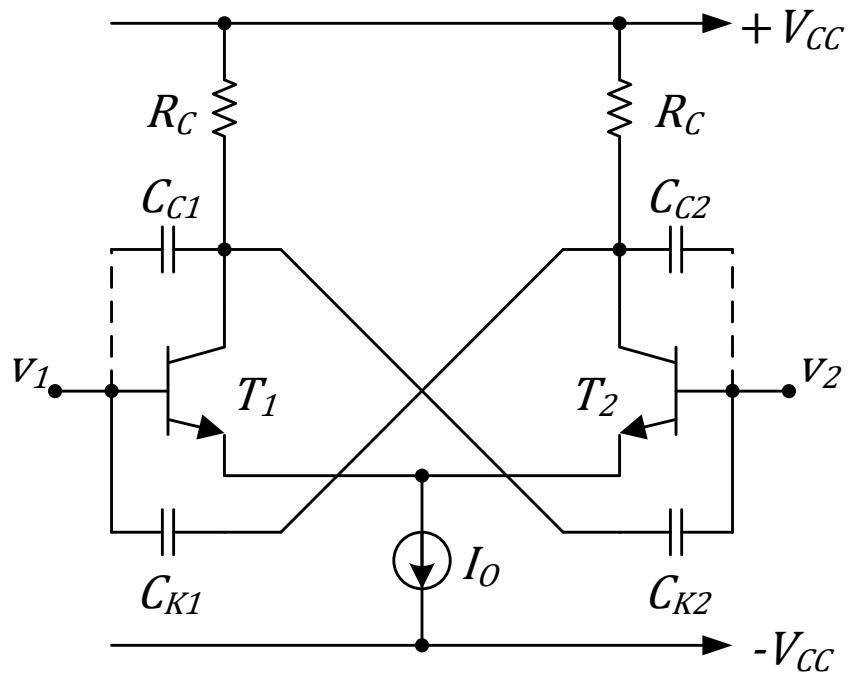


S obzirom na osobinu da se ulazna kapacitivnost preslikava sa malim faktorom, širokopojasni pojačavači u integrisanoj tehnologiji najviše koriste kaskodne pojačavače čija je osnovna namena da kompenzuju parazitne kapacitivnosti koje bi se preslikale Milerovim efektom.

Drugi razlog je što se kaskodni pojačavač sastoji od:

- stepena sa zajedničkim emiterom koji ima srednju ulaznu otpornost i malo pojačanje od -1.
- stepena sa zajedničkom bazom koji ima veliki propusni opseg, tako da stepen sa zajedničkim emiterom u suštini ograničava propusni opseg.

Drugi način kompenzacije (eliminacije uticaja) preslikane sprežne kapacitivnosti je dodavanje mostne povratne sprege pomoću dve nove kapacitivnosti C_{K1} i C_{K2} , tako da se u ulazno kolo preslikava nulta kapacitivnost.



S obzirom da se u integriranoj tehnologiji ne može precizno definisati veličina kapacitnosti zbog površine i debljine oksida, teži se da se tehnološkim postupkom veličine kapacitnosti C_{C1} , C_{K1} , C_{C2} i C_{K2} izjednače da bi njihov odnos bio isti, tako da se kapacitnosti C_{K1} i C_{K2} prave kao parazitne kapacitnosti C_{C3} i C_{C4} dva dodatna tranzistora.

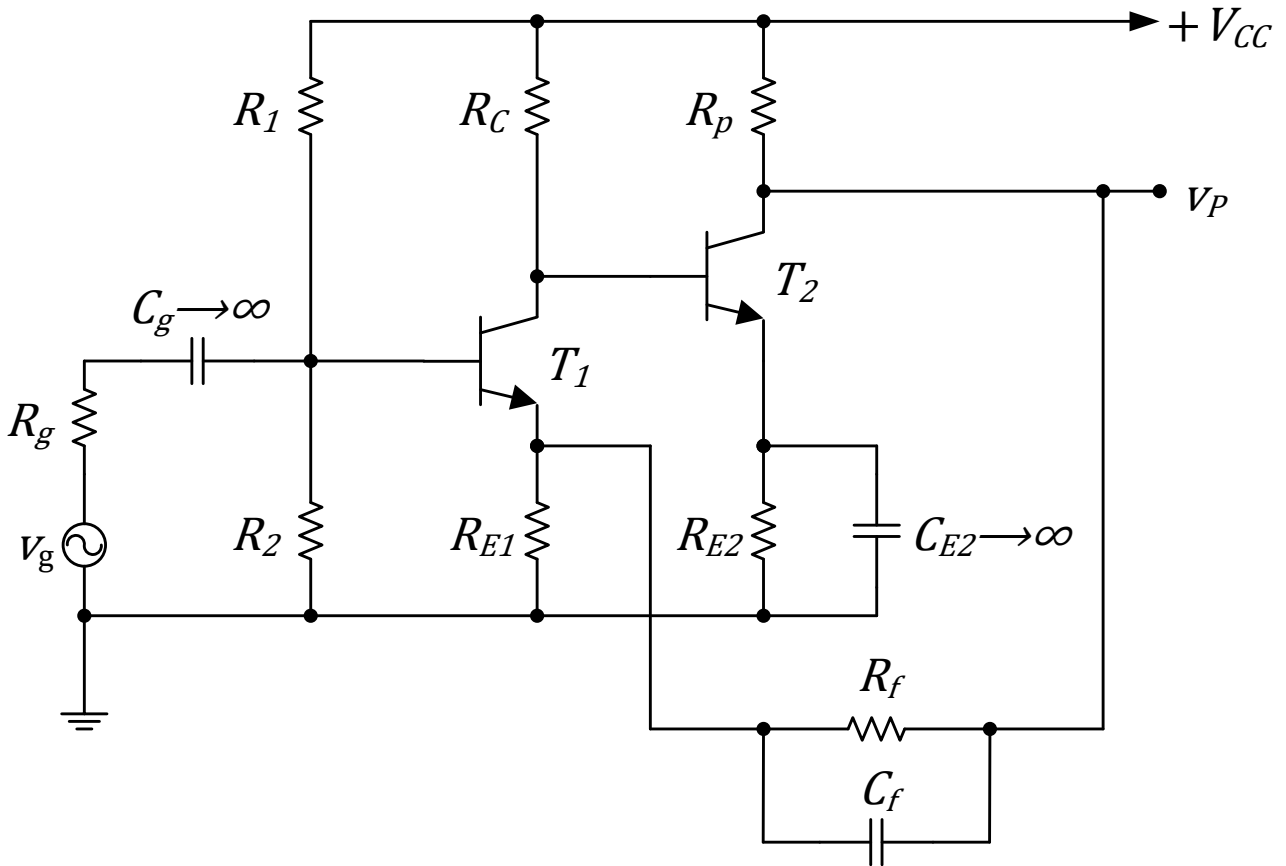
Zbog toga je umesto polarizacije dva ulazna tranzistora neophodna polarizacija četiri tranzistora.

ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI U DISKRETNJOJ TEHNOLOGIJI

S obzirom da je kod širokopoljasnih pojačavača u diskretnoj tehnologiji primenjena negativna povratna sprega mogu se razlikovati dve osnovne varijante koje su potpuno dualne jedna drugoj:

- sa redno-naponskom negativnom povratnom spregom
- sa paralelno-strujnom negativnom povratnom spregom.

ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI SA REDNO-NAPONSKOM NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM



Širokopojasni pojačavač sa redno-naponskom negativnom povratnom spregom se sastoji od dva stepena sa zajedničkim emiterom koji sa jakim redno-naponskom negativnom povratnom spregom povećava propusni opseg i istovremeno smanjuje pojačanje u propusnom opsegu.

S obzirom da je reakcija redno-naponska, ulazna otpornost sa reakcijom se povećava, dok izlazna otpornost sa reakcijom opada.

Ako se usvoje sledeće pretpostavke:

- Izvrši se unilateralizacija tranzistora T_1 i T_2
- Smatra se da je na učestanostima od interesa impedansa:

$$Z_f = R_f \parallel \frac{1}{sC_f}$$

takva da je $|Z_f| \gg R_{E1}$, može se smatrati da položaji mirnih radnih tačaka tranzistora T_1 i T_2 mogu nezavisno da se posmatraju jer gotovo sva struja u mirnom radnom stanju tranzistora T_1 prolazi kroz granu $R_C - R_{E1}$, dok gotovo sva struja u mirnom radnom stanju tranzistora T_2 prolazi kroz granu $R_p - R_{E2}$, a gotovo zanemarljiva struja prolazi kroz granu reakcije

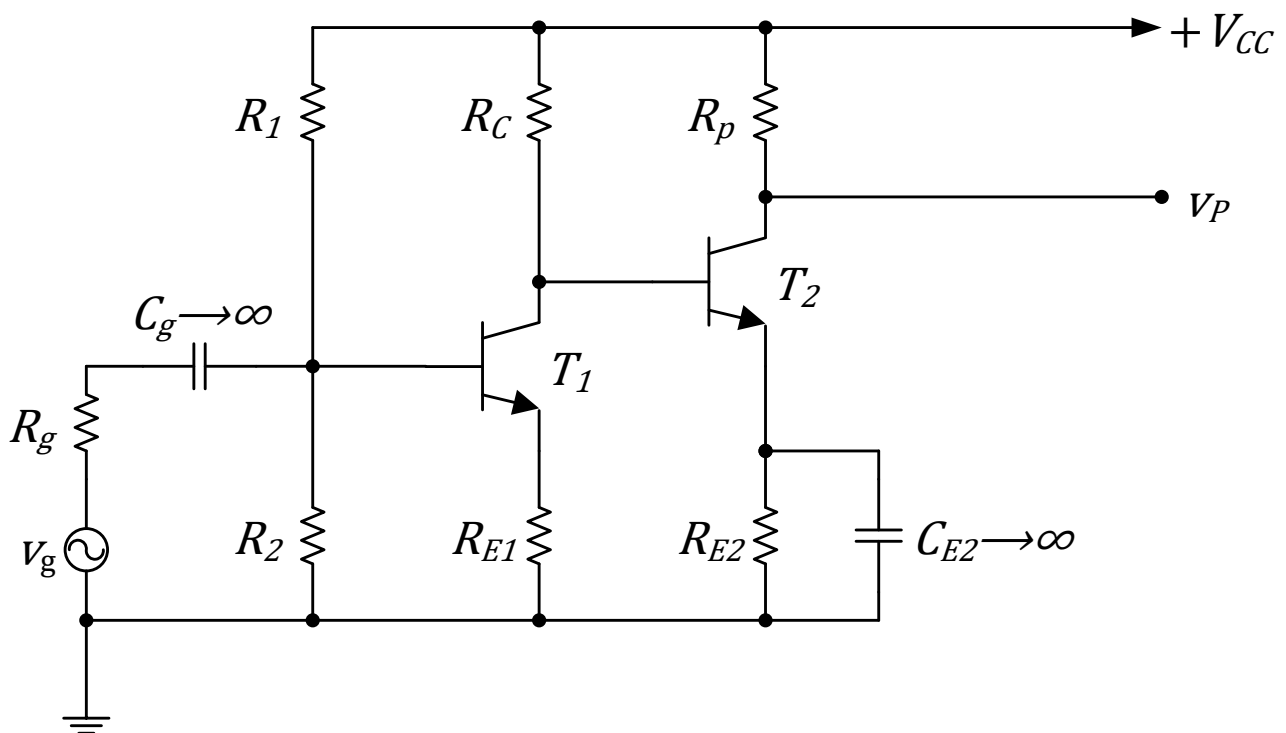
$$Z_f = R_f \parallel \frac{1}{sC_f}$$

S obzirom da se prilikom razmatranja ovog kola mora voditi računa o sledećim karakteristikama:

- podešavanje željenog oblika amplitudske ili fazne karakteristike ovog kola
 - propusnom opsegu
 - stabilnosti ovog pojačavača na visokim učestanostima,
- akcenat pri projektovanju se stavlja na jednu od ove tri važne karakteristike.

Razlikujemo tri slučaja:

1. BEZ REAKCIJE



$$Z_f = R_f \parallel \frac{1}{sC_f} \rightarrow \infty$$

$$R_f \rightarrow \infty$$

$$C_f \rightarrow 0$$

$$\beta_0 = 0$$

$$\beta_0 A_0 = 0$$

Prenosna funkcija kola je:

$$A(s) = \frac{v_p(s)}{v_g(s)} = \frac{A_0}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)} = \frac{A_0}{1 + s(\tau_1 + \tau_2) + s^2\tau_1\tau_2}$$

gde je:

Pojačanje kola bez reakcije na niskim učestanostima je:

$$A_0 = A(\omega = 0) = \frac{g_{m2}R_C R_p}{R_E}$$

Vremenska konstanta prvog unilateralizovanog tranzistora T_1 je:

$$\tau_1 \cong C[(R_g + r_b) || r_\pi]$$

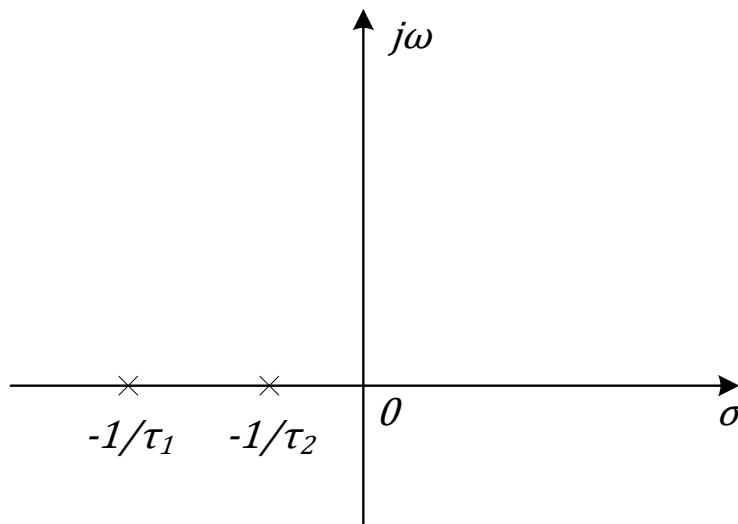
Vremenska konstanta drugog unilateralizovanog tranzistora T_2 je:

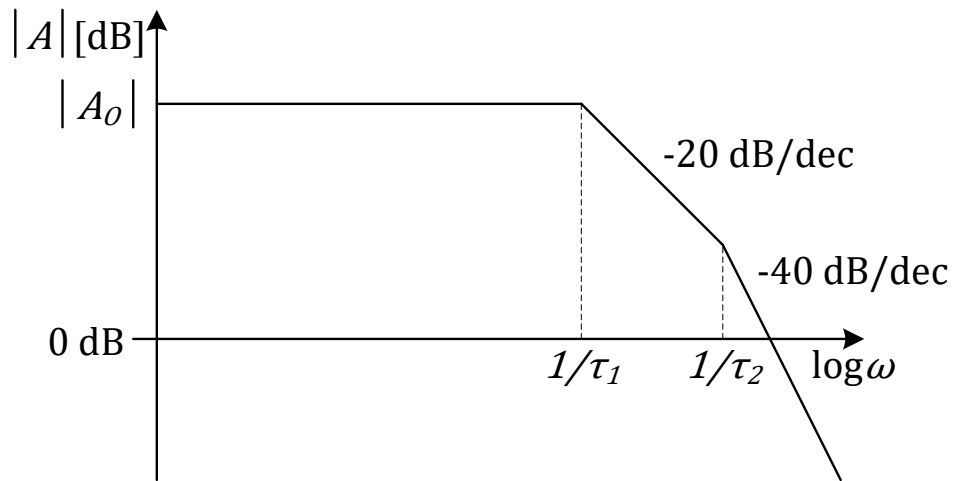
$$\tau_2 \cong C[(R_C + r_b) || r_\pi]$$

Kapacitivnost posle izvršene unilateralizacije (Milerovanja) tranzistora T_1 i T_2 je:

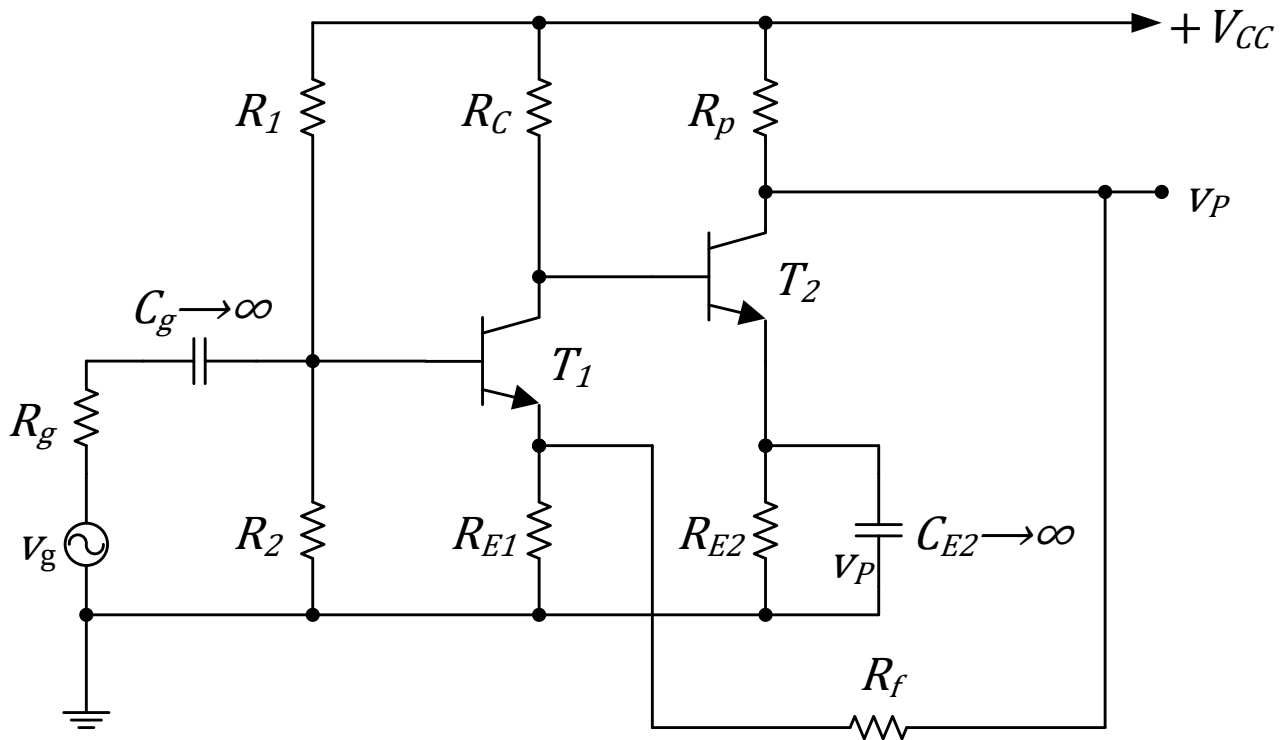
$$C = C_\pi + C_C g_{m2} R_p$$

U ovom slučaju su geometrijsko mesto korenova i amplitudska karakteristika funkcije prenosa dati na sledećim graficima:





2. OTPORNA REAKCIJA



$$Z_f = R_f \parallel \frac{1}{sC_f} = R_f$$

$$R_f \neq \infty$$

$$C_f \rightarrow 0$$

$$\beta_0 \cong \frac{R_E}{R_E + R_f} \cong \frac{R_E}{R_f}$$

$$\beta_0 A_0 \cong \frac{R_E}{R_f} A_0$$

Prenosna funkcija kola je:

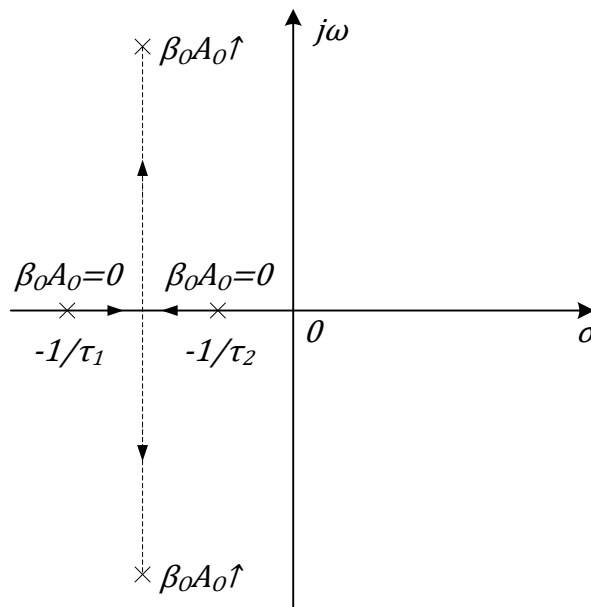
$$A(s) = \frac{A_0}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}$$

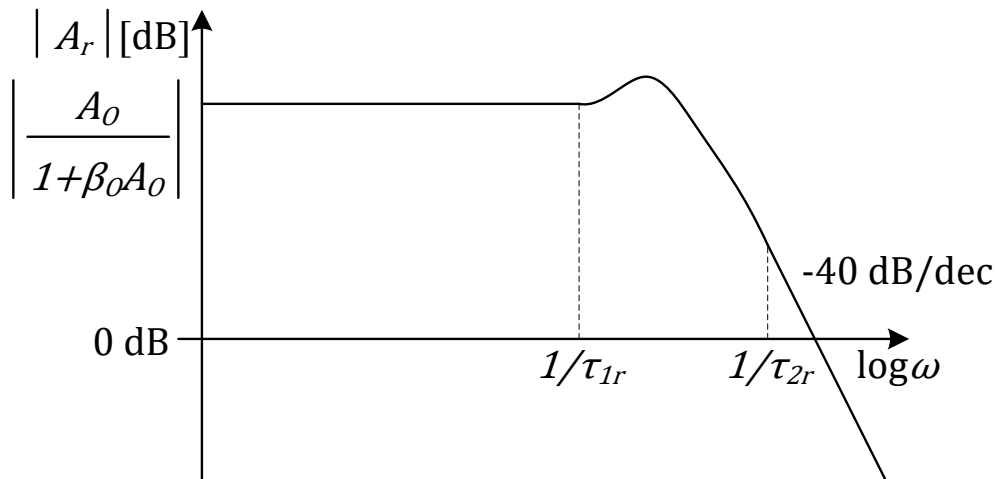
$$A_r(s) = \frac{v_p(s)}{v_g(s)} = \frac{A(s)}{1 + \beta_0 A_0}$$

$$A_r(s) = \frac{\frac{A_0}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}}{1 + \beta_0 \frac{A_0}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}} = \frac{A_0}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) + \beta_0 A_0}$$

$$A_r(s) = \frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0 + s(\tau_1 + \tau_2) + s^2 \tau_1 \tau_2} = \frac{\frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0}}{1 + s \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 + \beta_0 A_0} + s^2 \frac{\tau_1 \tau_2}{1 + \beta_0 A_0}}$$

U ovom slučaju su geometrijsko mesto korenova i amplitudska karakteristika funkcije prenosa dati na sledećim graficima:





Uvođenjem negativne povratne sprege se pojačanje u propusnom opsegu smanjuje $1 + \beta_0 A_0$, dok se propusni opseg povećava $1 + \beta_0 A_0$ puta, odnosno polovi su na višim učestanostima.

$$A_r(s = 0) = \frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0}$$

S obzirom da u kolu reakcije postoji sam jedan parametar – otpornik R_f , ne može se istovremeno podešavati i pojačanje i širina propusnog opsega.

Ponašanje geometrijskog mesta polova je:

- Za $R_f \rightarrow \infty$ je $\beta_0 A_0 = 0$ i nema negativne povratne sprege
- Za $R_f \neq \infty$ koje se smanjuje uključuje se negativna povratna sprege, polovi se kreću jedan prema drugom po apcisi, a zatim se razdvajaju duž prave paralelne ordinati
- Za $R_f \rightarrow 0$ je $\beta_0 A_0 \rightarrow \infty$.

Položaj polova koji zaklapaju ugao od 30° sa apcisom odgovara Bessel-ovoj maksimalno ravnoj faznoj karakteristici.

Položaj polova koji zaklapaju ugao od 45° sa apcisom odgovara Butterworth-ovoj maksimalno ravnoj amplitudskoj karakteristici.

Postupak projektovanja ovog širokopojasnog pojačavača je sledeći:

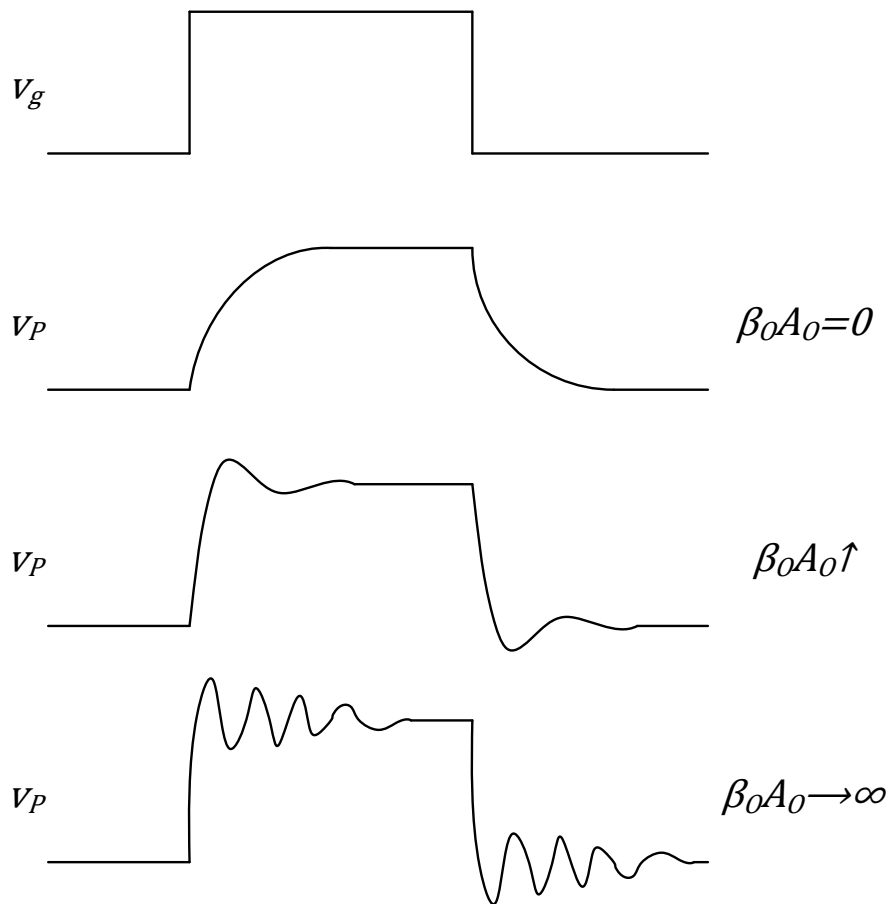
- Na osnovu položaja polova u kompleksnoj ravni se bira R_f .
- Na osnovu izabranog R_f se izračunava pojačanje u propusnom opsegu na niskim učestanostima:

$$\beta_0 \cong \frac{R_E}{R_E + R_f} \cong \frac{R_E}{R_f}$$

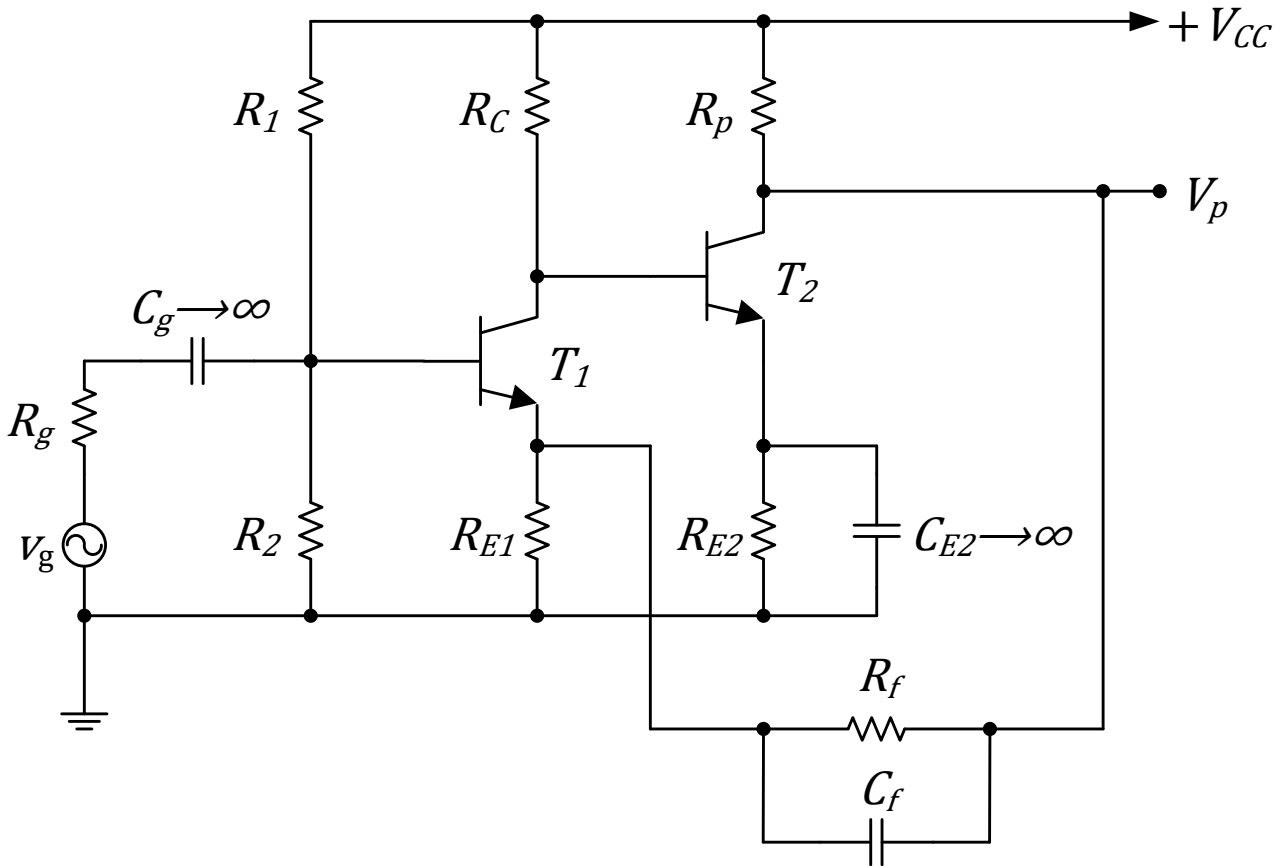
$$A_r(s = 0) = \frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0}$$

Odziv na izlazu kola $v_p(s)$ na ulazni pravougaoni impulsni signal $v_G(s)$ je:

- Za $\beta_0 A_0 = 0$ se propušta manje harmonika i blaže su ivice uspostavljanja signala.
- Za $\beta_0 A_0 \uparrow$ se propušta više harmonika i strmije su ivice uspostavljanja signala.
- Za $\beta_0 A_0 \rightarrow \infty$ odnosno $\beta_0 A_0 \gg 1$ je mnogo viših harmonika propušteno i pojačano, tako da je odziv praćen oscilacijama.



3. OTPORNO-KAPACITIVNA REAKCIJA



$$Z_f = R_f \parallel \frac{1}{sC_f} = R_f$$

$$R_f \neq \infty$$

$$C_f \neq 0$$

Prenosna funkcija kola je:

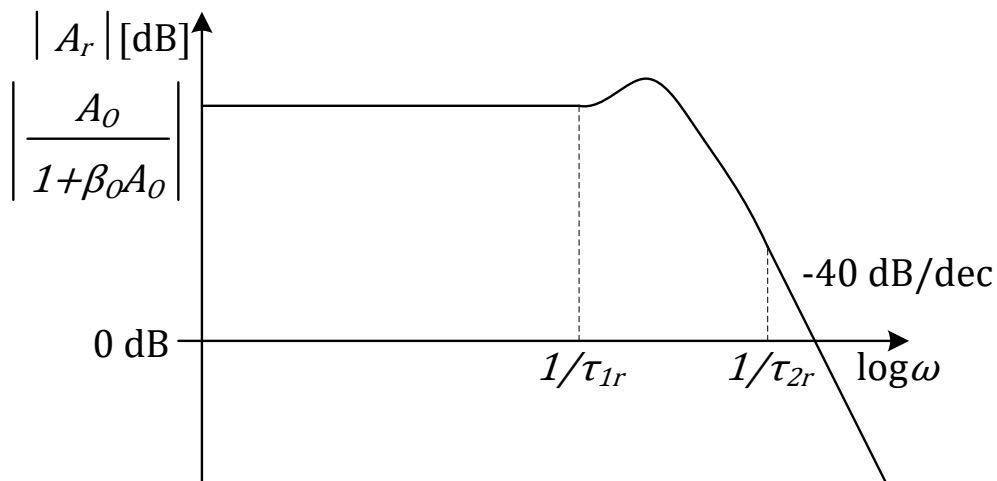
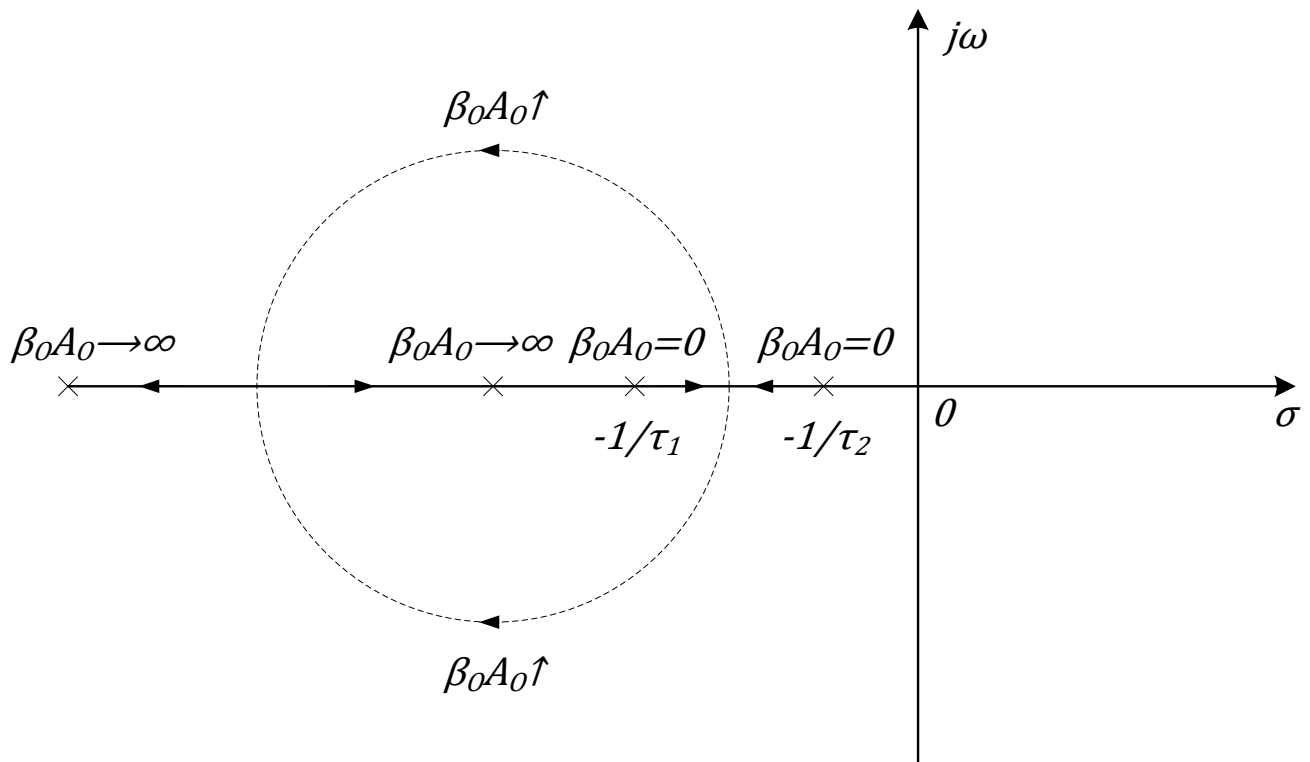
$$A_r(s) = \frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0 + s(\tau_1 + \tau_2 + \tau_f \beta_0 A_0) + s^2 \tau_1 \tau_2} = \frac{\frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0}}{1 + s \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_f \beta_0 A_0}{1 + \beta_0 A_0} + s^2 \frac{\tau_1 \tau_2}{1 + \beta_0 A_0}}$$

gde je:

$$\tau_f = R_f C_f$$

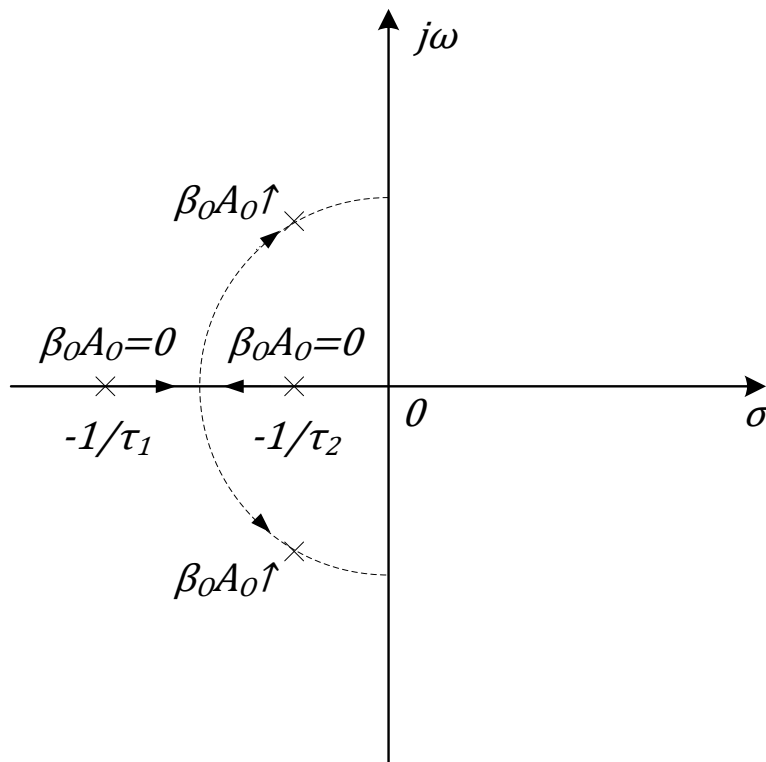
Iz prenosne funkcije kola se vidi da se prilikom promene R_f i C_f menja slobodan član u imeniocu i član uz s .

U prvom slučaju, ako fiksiramo C_f , a menjamo R_f , geometrijsko mesto korenova i amplitudska karakteristika funkcije prenosa su dati na sledećim graficima:



- Za $\beta_0 A_0 \uparrow$ polovi se kreću po kružnici ulevo, čime se širi propusni opseg, pri čemu Q faktor polova ne teži beskonačnosti već se smanjuje.
- Za $\beta_0 A_0 \rightarrow \infty$ jedan pol ulazi u fiksiranu tačku, a drugi odlazi u beskonačnost.
- Za istu amplitudsku karakteristiku mogu da postoje dve vrednosti na krugu, pri čemu jedna odgovara manjem a druga većem pojačanju.

U drugom slučaju, ako fiksiramo R_f a menjamo C_f , geometrijsko mesto korenova je dato na sledećem grafiku:



Postupak projektovanja ovog širokopojasnog pojačavača je sledeći:

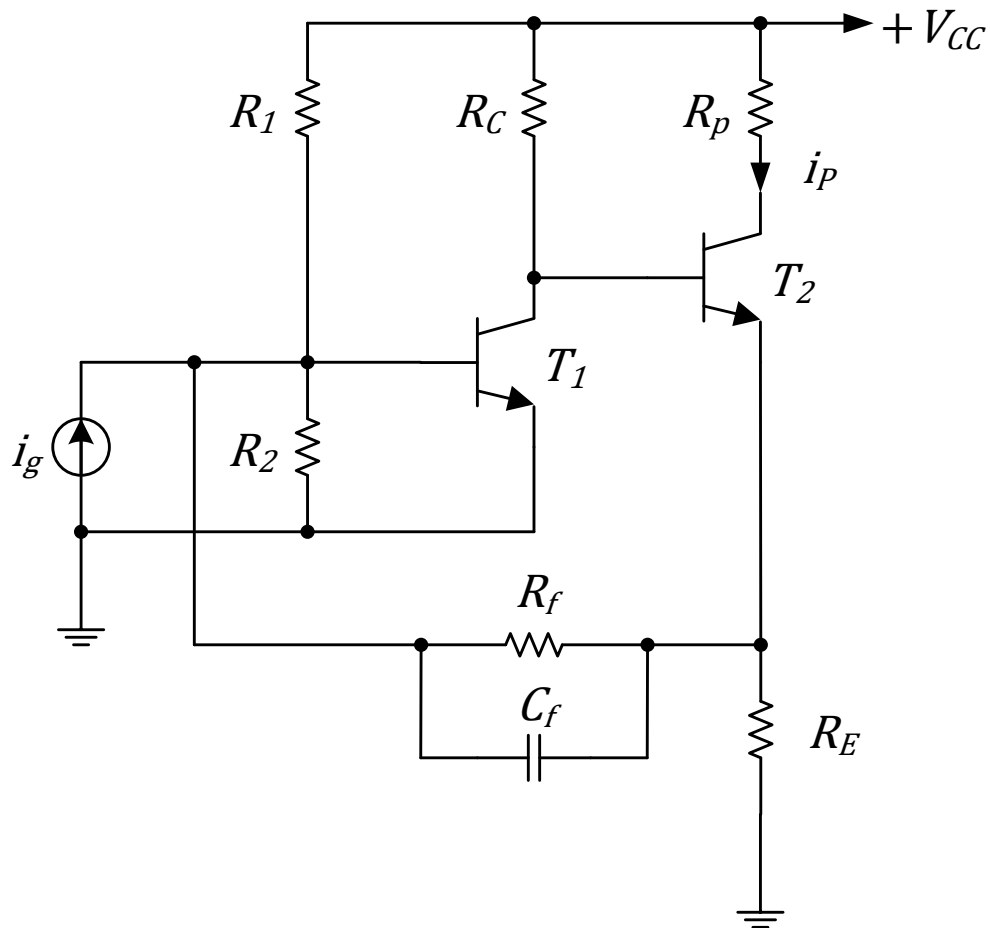
- Na osnovu položaja polova u kompleksnoj ravni se bira R_f .
- Na osnovu izabranog R_f se izračunava pojačanje u propusnom opsegu na niskim učestanostima:

$$\beta_0 \cong \frac{R_E}{R_E + R_f} \cong \frac{R_E}{R_f}$$

$$A_r(s = 0) = \frac{A_0}{1 + \beta_0 A_0}$$

- Sa C_f se menja Q faktor polova pomeranjem položaja polova po kružnici čime se bira širina propusnog opsega.

ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI SA PARALELNO-STRUJNOM NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM



Širokopojasni pojačavač sa paralelno-strujnom negativnom povratnom spregom se sastoji od dva stepena sa zajedničkim emiterom koji sa jakom paralelno-strujnom negativnom povratnom spregom povećava propusni opseg i istovremeno smanjuje pojačanje u propusnom opsegu.

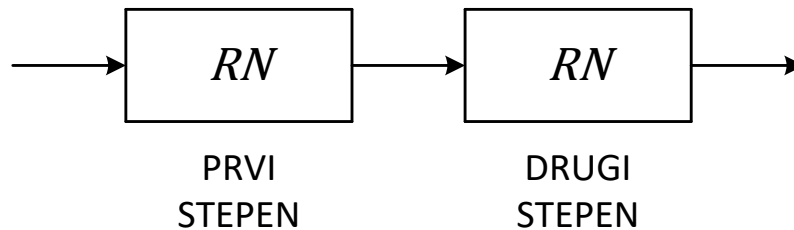
S obzirom da je reakcija paralelno-strujna, ulazna otpornost sa reakcijom se smanjuje, dok izlazna otpornost sa reakcijom raste.

Potpuno iste jednačine važe kao za prethodno kolo, samo računajući odnos izlazne i ulazne struje umesto izlaznog i ulaznog napona.

$$A_r(s) = \frac{i_p(s)}{i(s)} = \frac{A(s)}{1 + \beta_0 A_0}$$

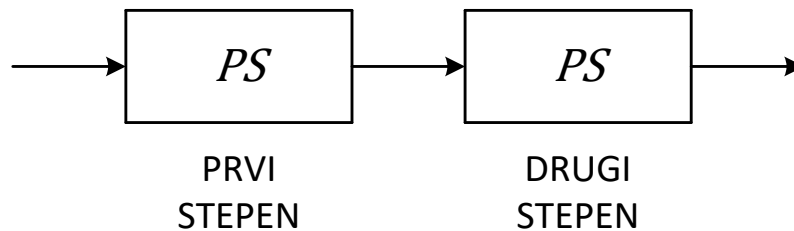
KASKADIRANJE ŠIROKOPOJASNIH POJAČAVAČA SA REDNO-NAPONSKOM NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM

Širokopojasni pojačavači sa redno-naponskom negativnom povratnom spregom mogu da se lako kaskadiraju pošto se izlaz prethodnog pojačavačkog stepena ponaša približno kao idealni naponski generator koga ne opterećuje ulaz narednog pojačavačkog stepena zbog velike ulazne impedanse.



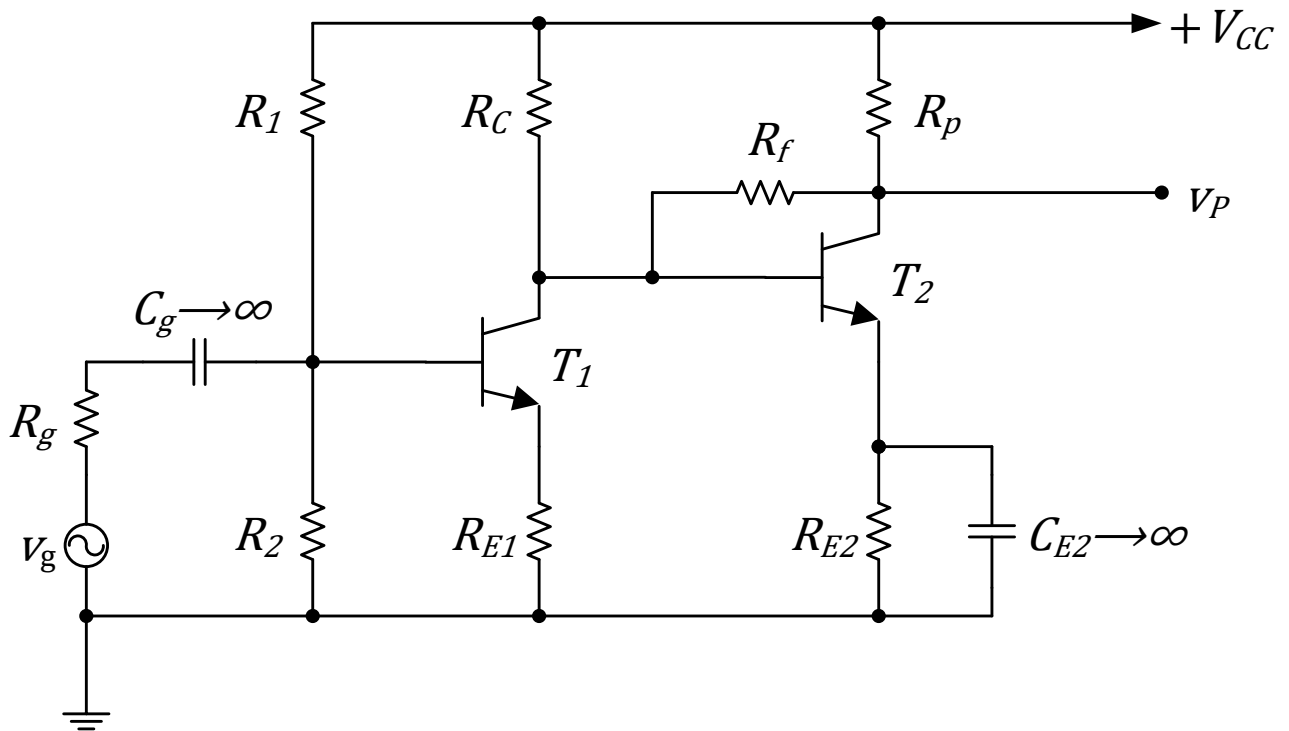
KASKADIRANJE ŠIROKOPOJASNIH POJAČAVAČA SA PARALELNO-STRUJNOM NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM

Širokopojasni pojačavači sa paralelno-strujnom negativnom povratnom spregom mogu da se lako kaskadiraju pošto se izlaz prethodnog pojačavačkog stepena ponaša približno kao idealni strujni generator koga ne opterećuje ulaz narednog pojačavačkog stepena zbog male ulazne impedanse.

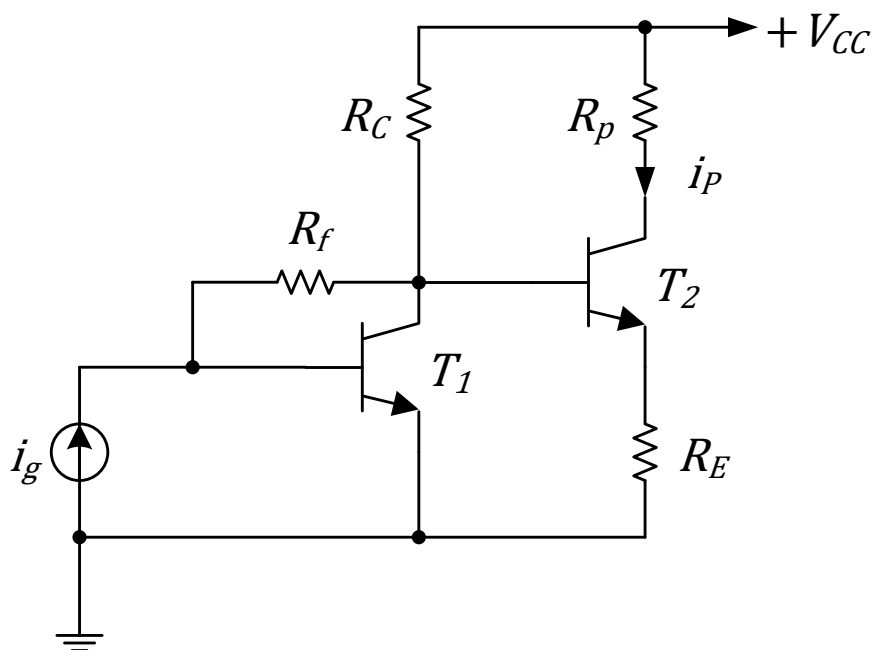


Drugim rečima, ako želimo pojačavač sa strmijim prelazom na višim učestanostima, onda mogu da se kaskadiraju dve sekcije (sa ukupno 4 pola) tako da će amplitudska karakteristika na višim učestanostima biti strmija.

ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI SA LOKALNOM NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM



Na izlazu je lokalna negativna povratna sprega koja smanjuje izlaznu otpornost, dok je ulazna otpornost relativno velika (ne toliko kao kad postoji globalna negativna povratna sprega), pa se i ovakvi pojačavački stepeni mogu kaskadirati.



Na ulazu je lokalna negativna povratna sprega koja smanjuje ulaznu otpornost, dok je izlazna otpornost relativno velika (ne toliko kao kad postoji globalna negativna povratna sprega), pa se i ovakvi pojačavački stepeni mogu kaskadirati.

Prednosti ovakvih širokopojasnih pojačavača su:

- Ovakvim pojačavačkim stepenima se postiže apsolutna stabilnost.
- I jedan i drugi tranzistor se nezavisno polarišu.
- Nije potrebna aproksimacija $R_f \gg R_{E1}$.