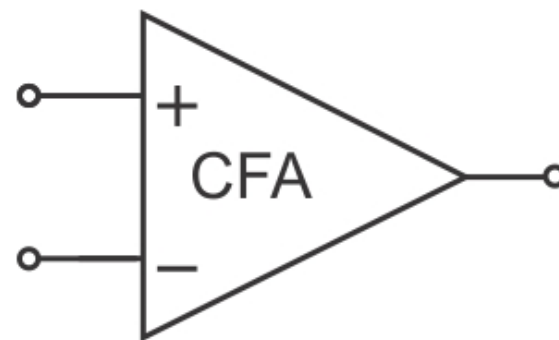
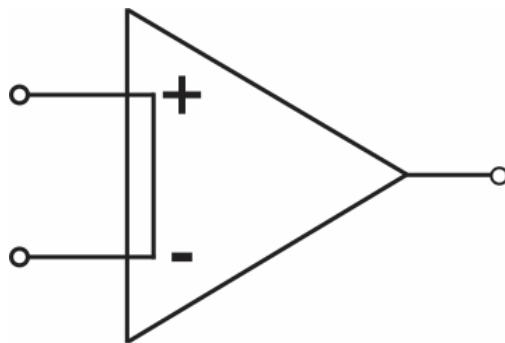


Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

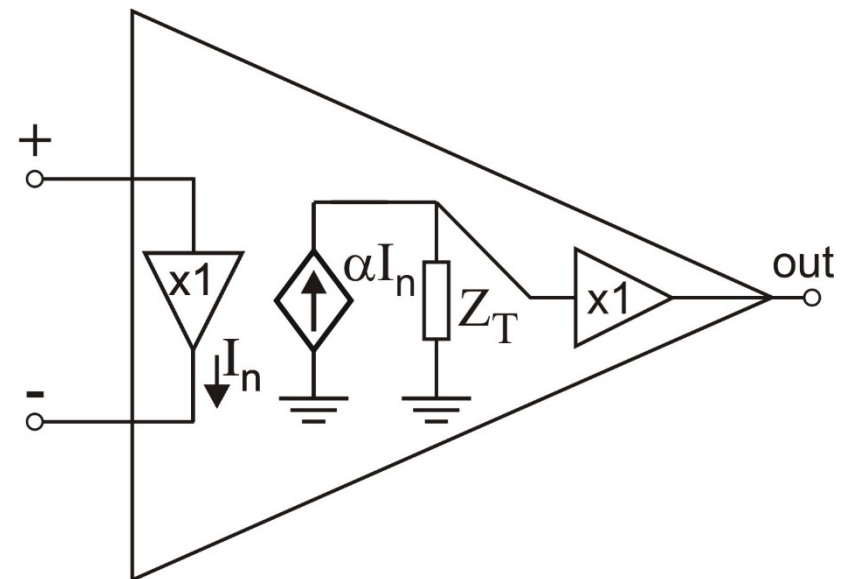
Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

- **Operacioni pojačavač sa strujnom povratnom spregom** (Current feedback amplifier **CFA**) ili **transimpedansni operacioni pojačavač** je direktno spregnuti pojačavač koji na izlazu daje napon srazmeran ulaznoj struji.
- CFA ima kao i standardni operacioni pojačavač simetričan ulaz i asimetričan izlaz (između izlaznog čvora i mase). Za razliku od naponom kontrolisanog operacionog pojačavača kod koga je kontrolišuća veličina diferencijalni ulazni napon kod transimpedansnog operacionog pojačavača kontrolišuća veličina je struja na invertujućem ulazu.



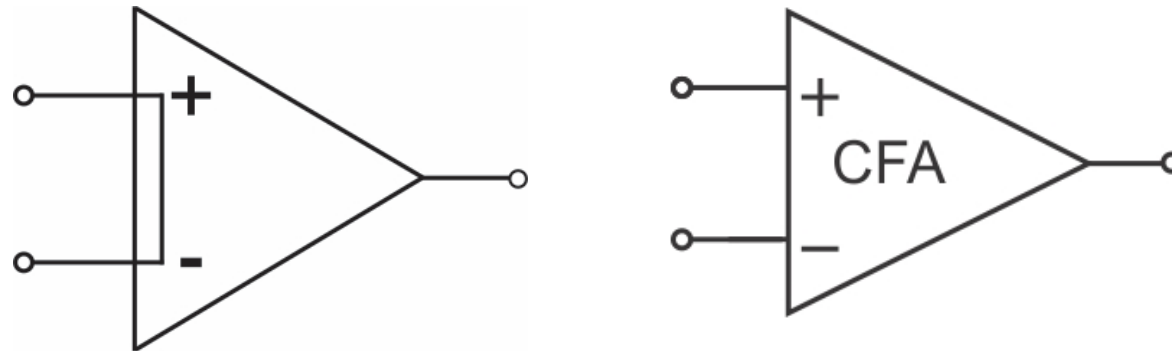
Struktura transimpedansnog operacionog pojačavača

- Operacioni pojačavač sa strujnom povratnom sadrži tri direktno spregnuta stepena:
 - Ulazni naponski bafer
 - Transimpedansni blok Z_T
 - Izlazni naponski bafer
- Ulazni bafer obezbeđuje veliku impedansu na neinvertujućem ulazu i malu impedansu na invertujućem ulazu. Mala impedansa na invertujućem ulazu omogućava uzorkovanje kontolišuće struje.
- U transimpedansnom bloku se pojačava signal. Idealni CFA ima beskonačnu vrednost transimpedanse Z_T .
- Izlaz transimpedasnog bloka je povezan za izlazni bafer čija je funkcija da obezbedi malu izlaznu impedansu.



Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

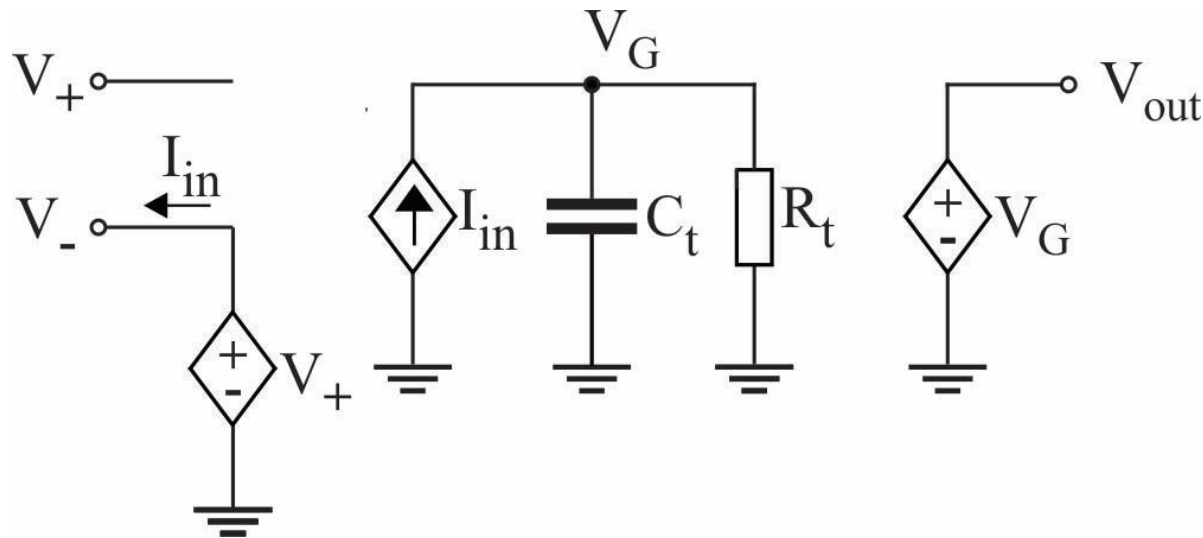
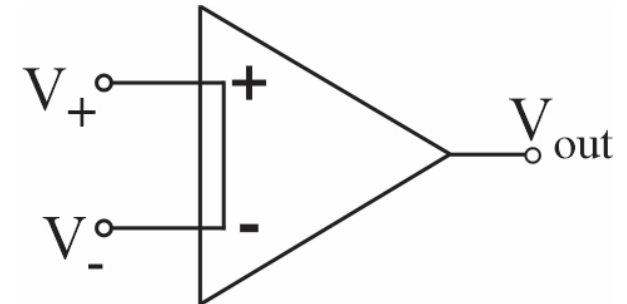
- Karakteristike idealnog transimpedansnog operacionog pojačavača:
 - Ulazna impedansa na neinvertujućem ulazu beskonačna, $Z^+ \rightarrow \infty$.
 - Ulazna impedansa na invertujućem ulazu jednaka nuli, $Z^- = 0$.
 - Izlazna impedansa jednaka nuli, $Z_o = 0$.
 - Transimpedansa, koja predstavlja odnos izlaznog napona i struje na invertujućem ulazu $Z_T = \frac{V_o}{I_n}$, beskonačna, $Z_T \rightarrow \infty$.



Model transimpedansnog operacionog pojačavača

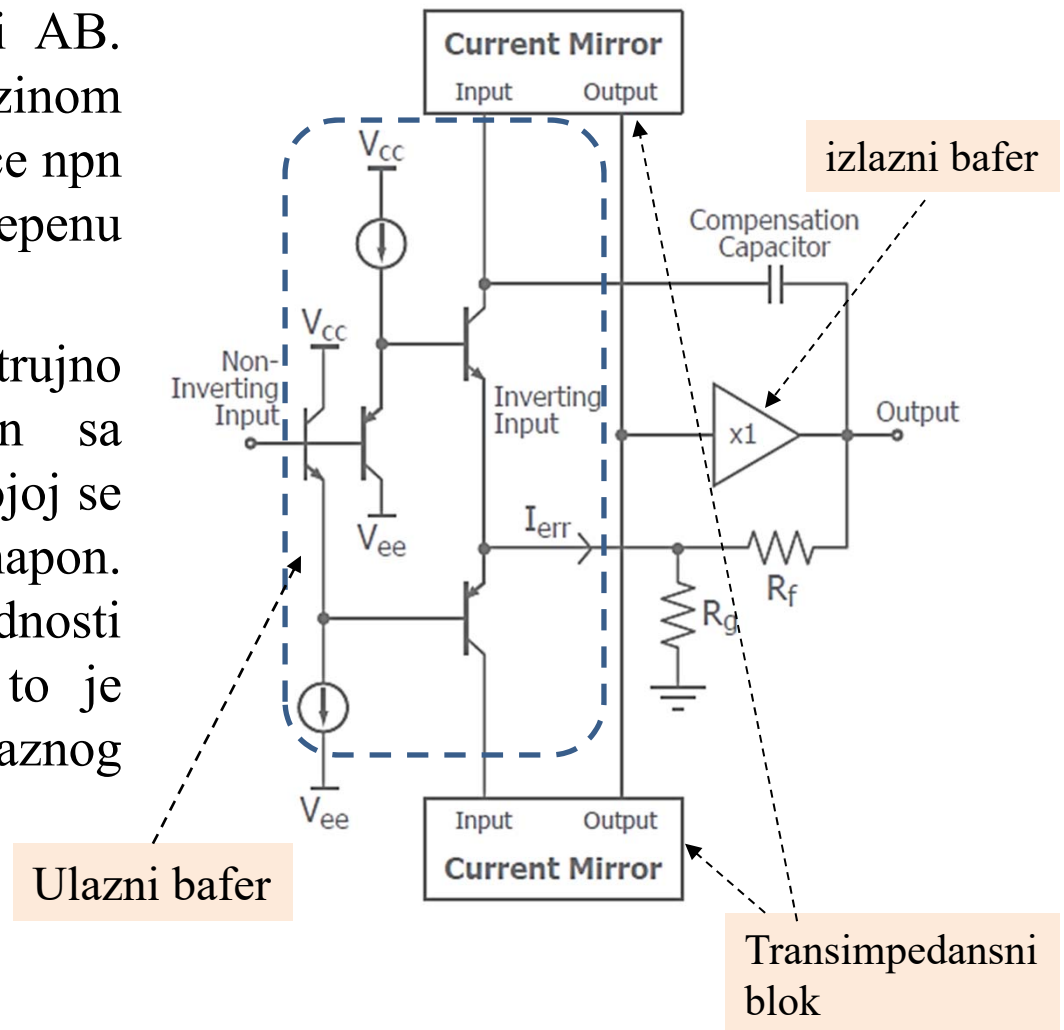
Model idealnog transimpedansnog operacionog pojačavača sadrži dva naponska generatora kontrolisana naponom. Jedan od ovih generatora je povezan za invertujući ulaz a drugi za izlazni čvor. Ovi generatori modeliraju ulazni odnosno izlazni naponski bafer.

Čvor V_G se naziva pojačavački čvor. Ekvivalentna impedansa u ovom čvoru se modelira kao paralelna veza kapacitivnosti C_t , koja je reda pF, i otpornosti R_t koja je reda $10^5 \div 10^6 \Omega$.

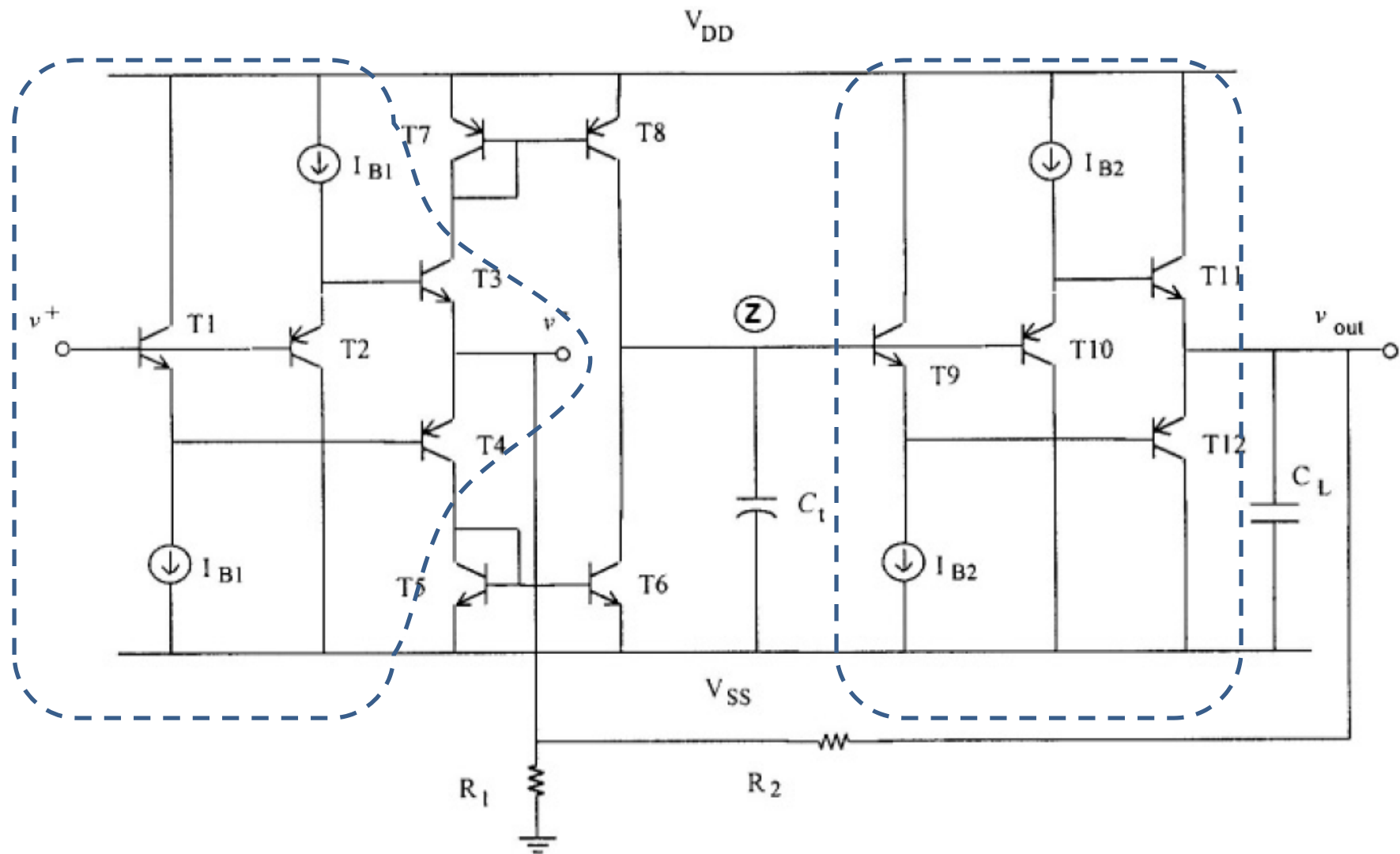


Struktura transimpedansnog operacionog pojačavača

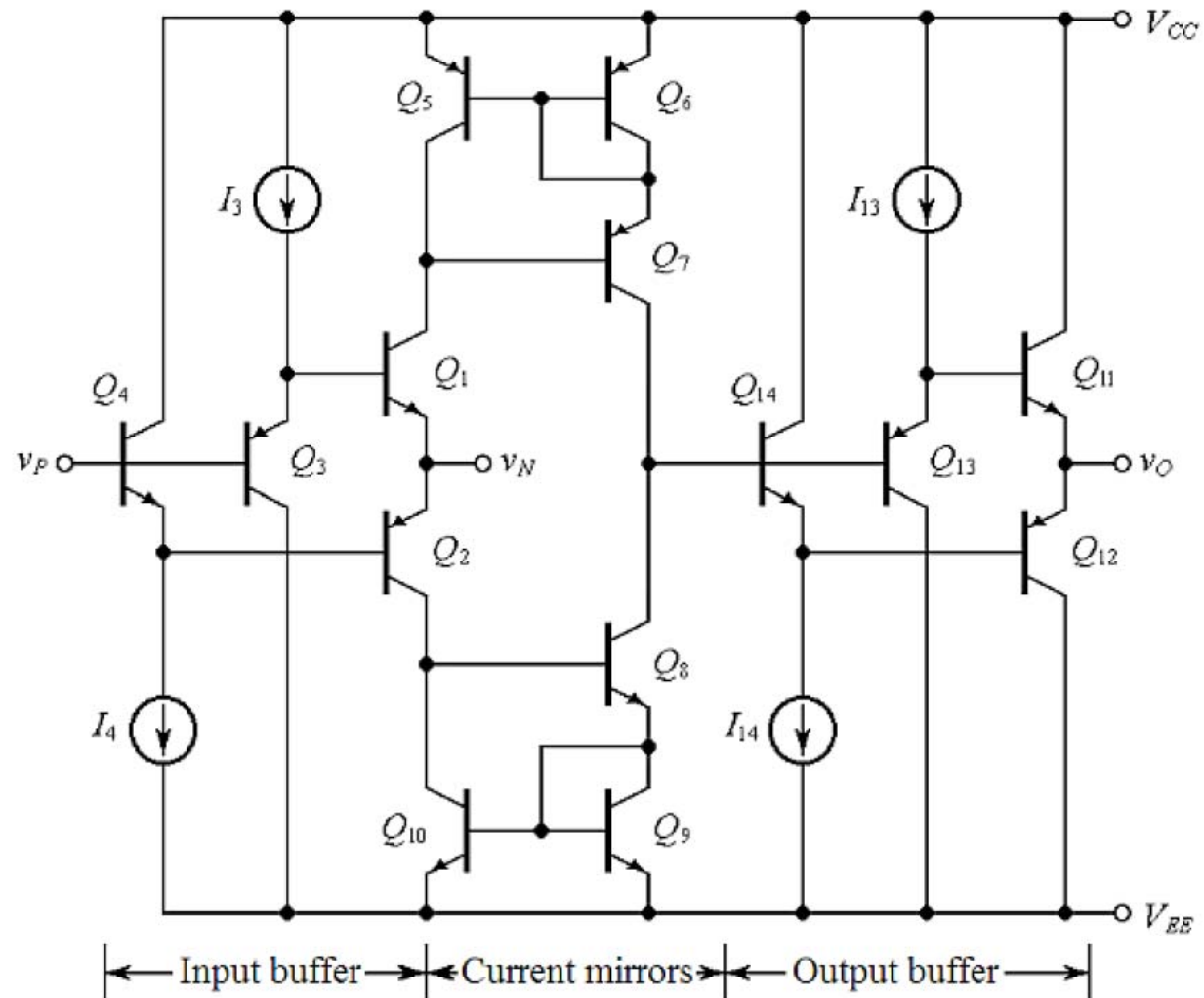
- Ulazni bafer je pojačavač u klasi AB. Ovo kolo odlikuje se velikom brzinom rada. Zavisno od smera struje vodiće npn ili pnp tranzistor u izlaznom stepenu bafera.
- Transimpedansni blok predstavlja strujno ogledalo čiji je izlaz povezan sa takozvanom tačkom pojačanja u kojoj se ulazna struje, I_{err} , konvertuje u napon. Pojačanje će zavisiti od vrednosti impedanse u tački pojačanja, a to je najčešće ulazna impedansa izlaznog bafera.



Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom



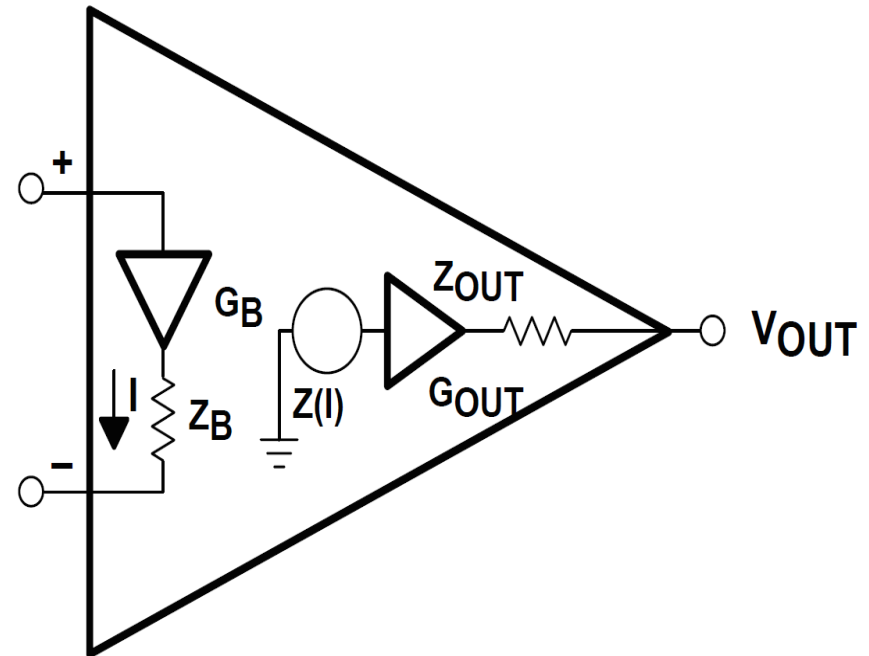
Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom



Pojednostavljena šema transimpedansnog operacionog pojačavača

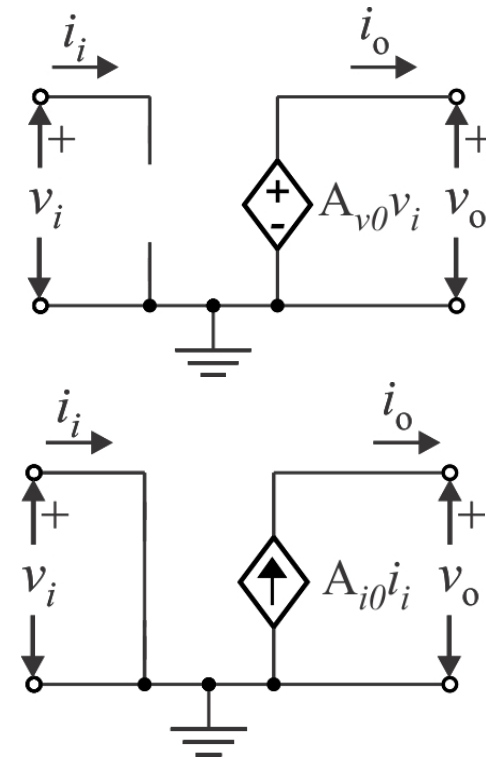
Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

- Ulazne impedanse CFA se znatno razlikuju:
 - Ulazna impedansa na $-$ ulazu (invertujućem ulazu) je vrlo mala, idealno jednaka nuli. Vrednost ove impedanse odgovara izlaznoj impedansi ulaznog bafera, Z_B . Mala impedansa na invertujućem ulazu omogućava uzorkovanje kontolišuće struje.
 - Ulazna impedansa na $+$ ulazu je velika i odgovara ulaznoj impedansi ulaznog bafera.
- Ulazni bafer je jedinični naponski pojačavač.



Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

- Postoje dva osnovna tipa bafera, strujni i naponski.
- **Naponski bafer** je pojačavač čija je uloga da napon koji daje izvor signala (ili prethodni pojačavački stepen) učini nezavisnim od vrednosti struje koja protiče kroz potrošač (ili naredni pojačavački stepen). Idealni naponski bafer ima beskonačno veliku ulaznu impedansu i beskonačno malu izlaznu impedansu.
- **Strujni bafer** treba da obezbedi da struja koju daje izvor signala (prethodni pojačavački stepen) bude nezavisna od promena napona na potrošaču (naredni pojačavački stepen ili potrošač). Praktično rečeno bafer obezbeđuje transformaciju impedanse između dva kola.
- Ukoliko je naponsko pojačanje bafera jednako jedinici on se naziva **voltage follower**, a strujni bafer čije je pojačanje jednako jedinici naziva se **current follower**.

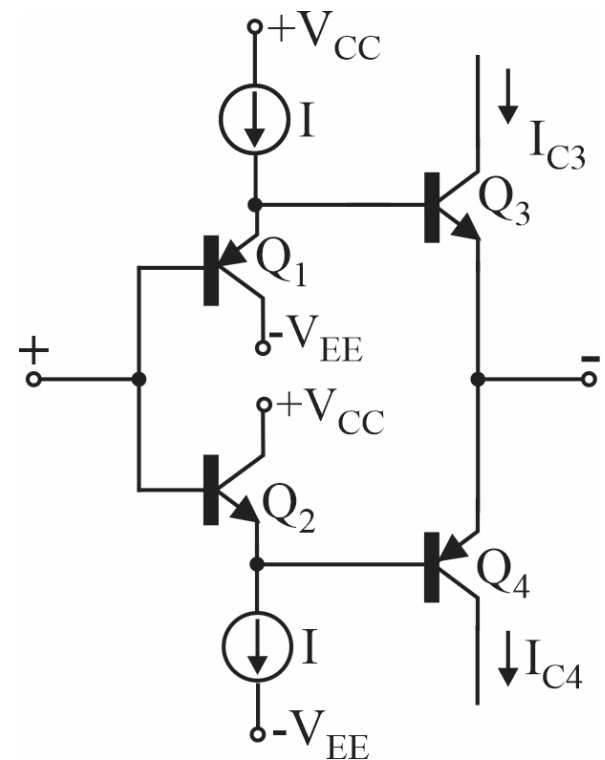


Šema naponskog bafera na ulazu i izlazu

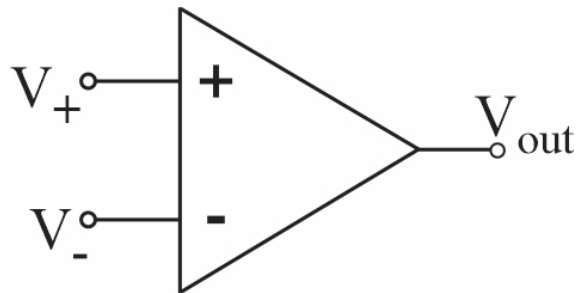
Kolo sadrži **translinearnu petlju** (petlju koja obuhvata pn spojeve komponenata) čije funkcionisanje je određeno uzajamnim dejstvom između tranzistora. Odlika ovih kola je da ne zahtevaju postojanje povratne sprege niti elemenata za kompenzaciju iz čega proizilazi da se mogu primeniti na visokim frekvencijama.

Tranzistori Q1 i Q2 su u sprezi sa zajedničkim kolektorom zahvaljući čemu je postignuta **velika ulazna otpornost na neinvertujućem ulazu**. Tranzistori Q3 i Q4 su u sprezi sa zajedničkom bazom iz čega proizilazi da je **ulazna impedansa na invertujućem ulazu veoma mala**.

Bafer koji se koristi je pojačavač **u klasi AB**. Ovo kolo odlikuje se velikom brzinom rada. Primenjuje se klasa AB umesto klase B da bi se smanjila izobličenja. Zavisno od smera struje na invertujućem ulazu i_n vodiće npn ili pnp tranzistor u izlaznom stepenu bafera. Kada struja ističe vodi Q3. Kada struja i_n utiče vodi Q4.

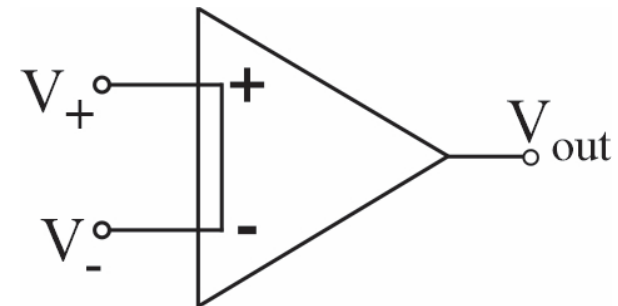


Poređenje operacionog pojačavača sa naponskom povratnom spregom i operacionog pojačavača sa strujnom povratnom spregom



Operacioni pojačavač sa naponskom povratnom spregom (VFA)

- Bolje jednosmerne performanse
- Dodatni stepen slobode pri izboru komponenata
- Niža vrednost šuma



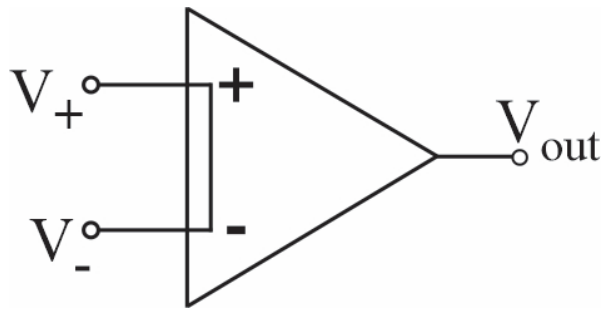
Operacioni pojačavač sa strujnom povratnom spregom (CFA)

- Veća brzina odziva na velike signale (Slew Rate)
- Veća širina propusnog opsega
- Manja izobličenja

Poređenje VFA i CFA

- Najznačajnije prednosti CFA u odnosu na naponski operacioni pojačavač su:
 - Veća brzina odziva na velike signale (slew rate)

Veća vrednost brzine odziva je posledica načina funkcionisanja CFA. Struja koja se uzorkuje na invertujućem ulazu prenosi se strujnim ogledalima do pojačavajućeg čvora, gde se konvertuje u napon. Vrednost brzine odziva na izlazu određena je maksimalnom vrednošću struje koju mogu da daju strujna ogledala i ona tipično iznosi 10 do 15 mA
 - Veća širina popusnog opsega - proističe iz veće brzine odziva CFA
 - Veća linearnost – proističe iz veće širine propusnog opsega CFA.
 - Propusni opseg kola sa CFA ne zavise od pojačanja. Za razliku od standardnog operacionog pojačavača proizvod pojačanje propusni opseg nije konstantan.



Poređenje VFA i CFA

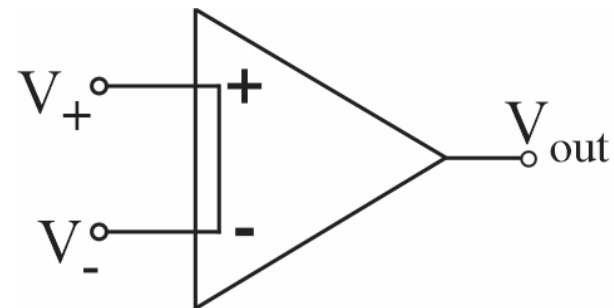
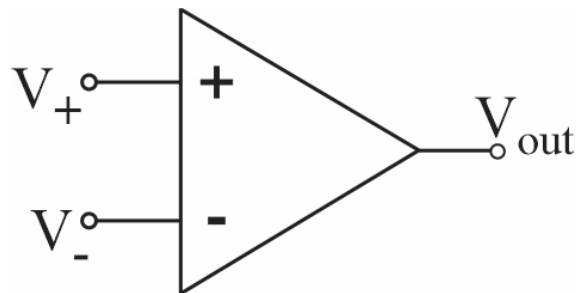
- Nedostaci CFA u odnosu na naponski operacioni pojačavač su:

- Lošije jednosmerne karakteristike (naponski i strujni ofset).

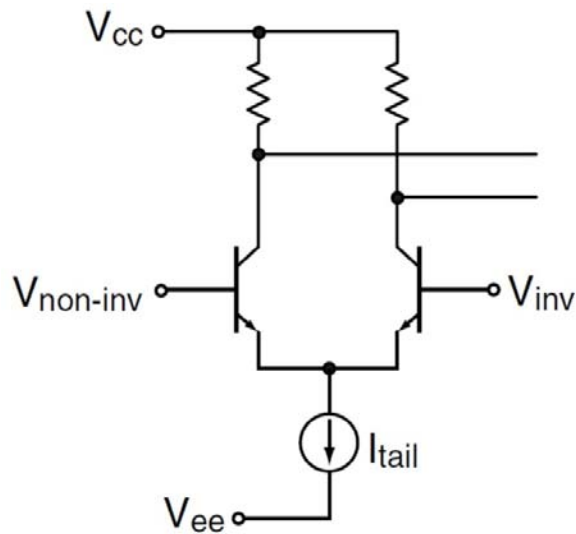
Za razliku od standardnih operacionih pojačavača, ne može postići uparenost invertujućeg i neinvertujućeg ulaza, jer ulazi nisu simetrični.

- Proračun elemenata povratne sprege je komplikovaniji nego kod standardnog operacionog pojačavača, jer se prilikom određivanja vrednosti komponenata mora voditi računa o stabilnosti pojačavača.

- Lošije performanse sa stanovišta šuma.

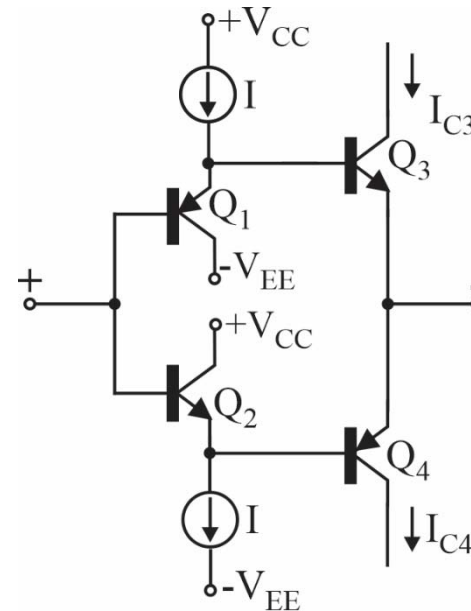


Poređenje jednosmernih karakteristika VFA i CFA



VFA (voltage feedback amplifier)

- Usled simetrije ulaznog kola koju čini diferencijalni pojačavač, O.P. ima dobre jednosmerne karakteristike.
- Nema naponskog niti strujnog ofseta ukoliko su tranzistori diferencijalnog para idealno upareni.
- Varijacije struja baza koje nastaju usled promene napajanja (PSRR), promene radne tačke (CMRR), temperature (drift) ili starenja su približno jednake u oba ulazna tranzistora.

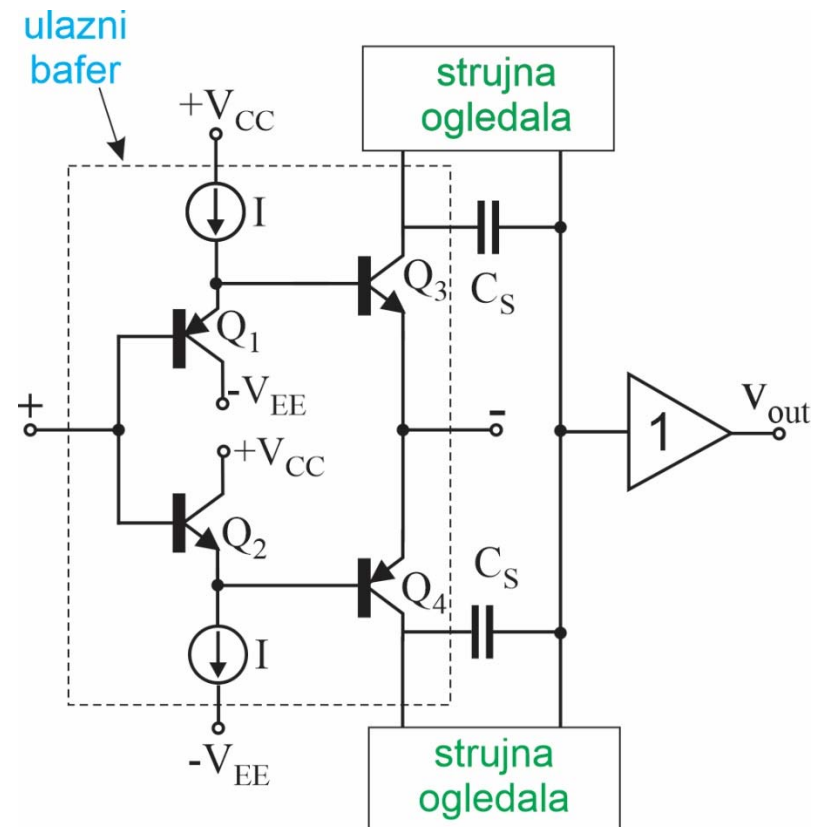


CFA (current feedback amplifier)

- Ulazni pristup nije simetričan. Ulazna struja na + ulazu (ulaz bafera) jednaka je razlici struja npn i pnp tranzistora (teško se uparuje).
- Neujednačenost struja polarizacija na ulazima.
- Nenulta vrednost naponskog ofseta.

Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

- Slew rate je određen maksimalnom strujom kojom se pune i prazne **kompensacione kapacitivnosti** C_C . Vrednost ove struje odgovara maksimalnoj struji dva tranzistora ulaznog bafera (Q_3, Q_4).
- Maksimalna struja koju daje ulazni stepen operacionog pojačavača veća je kod CFA nego kod VFA kao posledica činjenice da:
 - Kod VFA ulazni stepen je diferencijalni pojačavač i maksimalna struja tranzistora u diferencijalnom paru je ograničena vrednošću izvora konstantne struje koji je vezan za emitor.
 - Kod CFA maksimalna struja kroz tranzistore određena je strujom izvora konstantne struje koji je u kolu baze tranzistora čija struja se prenosi do strujnih ogledala (Q_3, Q_4). Odavde sledi da je maksimalna **struja punjenja** kompensacionih kapacitivnosti C_C **približno β puta veća** nego kod naponskih pojačavača.

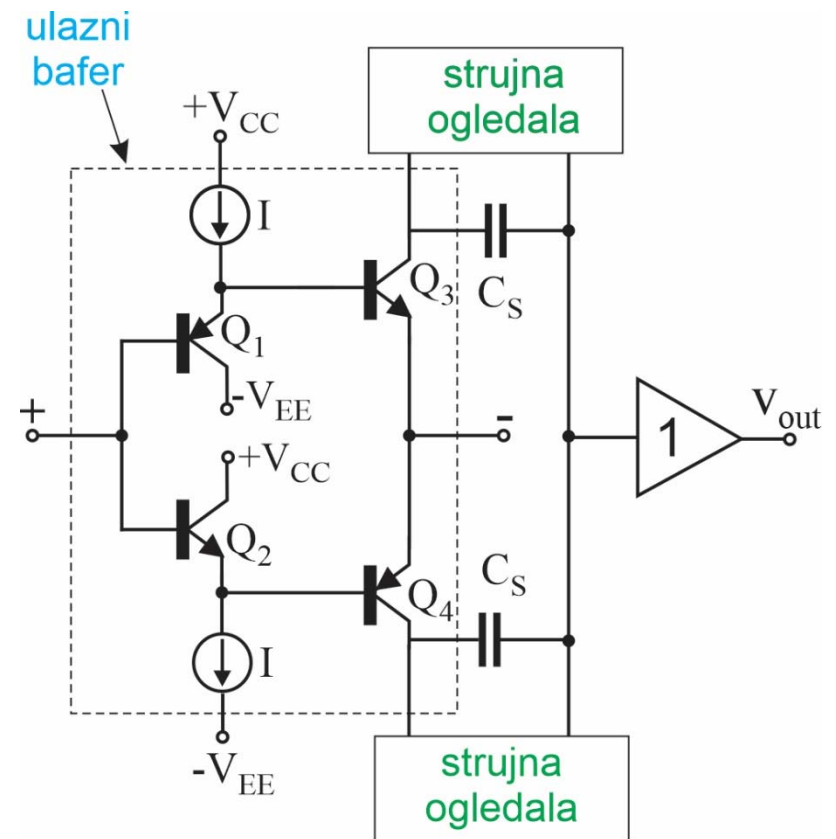


Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

Transimpedansni operacioni pojačavači unose manja izobličenja nego standardni operacioni pojačavač.

Mala vrednost izobličenja je posledica sledećih faktora:

- Kolo osnovnog pojačavača (open loop amplifier) unosi mala izobličenja signala usled simetričnosti. U odnosu na svaki npn tranzistor (Q2 i Q3) postoji komplementarni pnp tranzistor (Q1 i Q4).
- Pri istoj frekvenciji CFA ima veće kružno pojačanje od VFA, što je posledica šireg propusnog opsega CFA. Ovo automatski znači i manja izobličenja kod CFA.



Da se podsetimo !

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

Pretpostavimo da prenosna karakteristika osnovnog pojačavača nije linearna već sadrži više segmenata sa različitim pojačanjima (A_1 , A_2 i A_3).

Prenosna karakteristika kola sa povratnom spregom imaće u svakom od segmenata nagib koji je umanjen onoliko puta koliko iznosi funkciju reakcije:

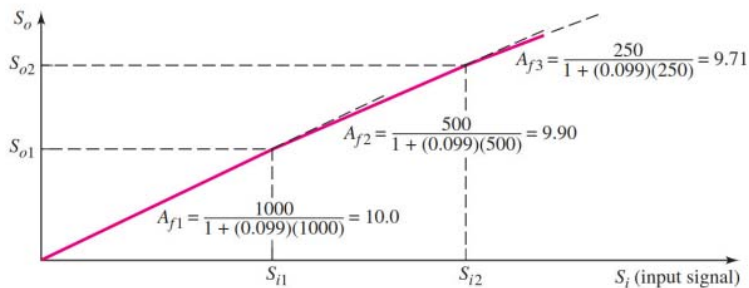
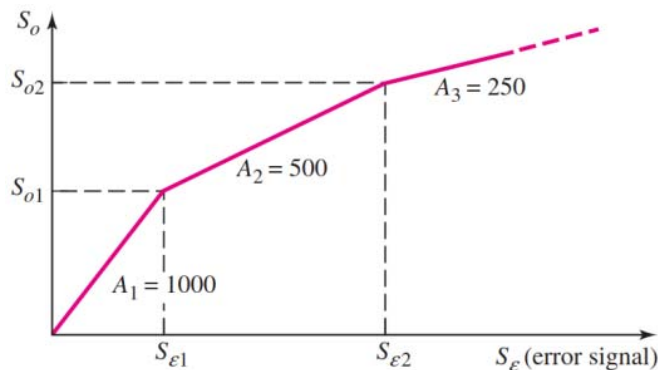
$$A_{ri} = \frac{A_i}{1 - A_i B}$$

Ukoliko je zadovoljeno da je:

$$A_i B \gg 1 \text{ za } i = 1, 2, 3$$

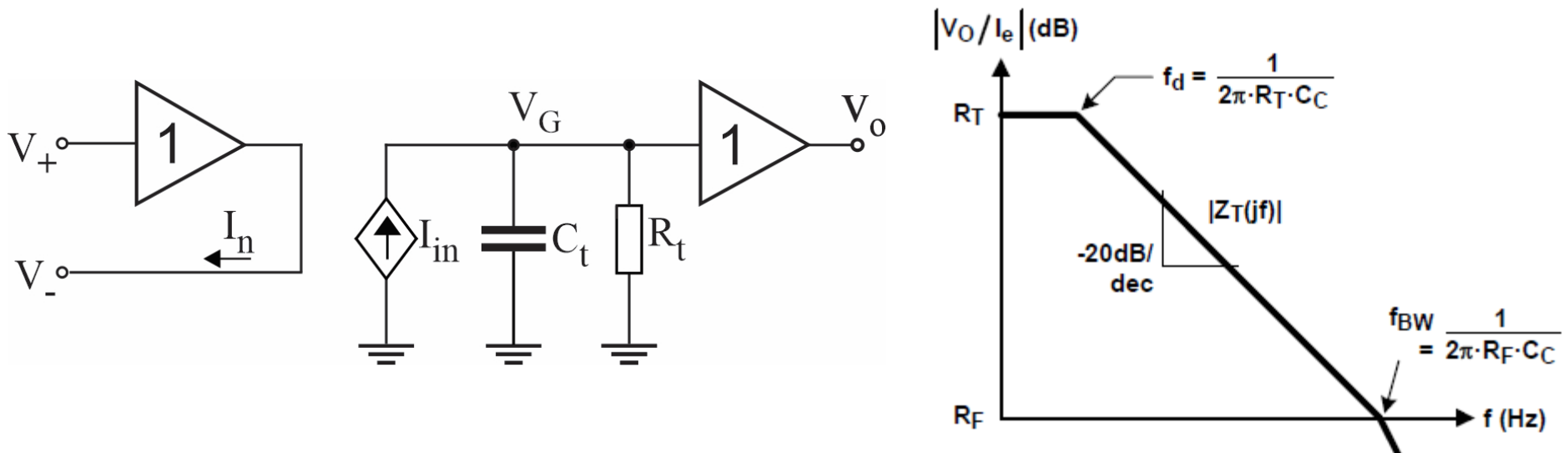
sledi da je nagib u svim segmentima približno isti

$$A_{ri} \approx \frac{1}{B}$$



Prenosna funkcija CFA bez povratne sprege

Frekvencijska karakteristika operacionog pojačavača sa strujnom povratnom spregom ima dominantan pol kreiran kompenzacionom kapacitivnošću C_t . Frekvencija dominantnog pola jednaka je recipročnoj vrednosti proizvoda R_t i C_t , gde je R_t ulazna otpornost izlaznog bafera.

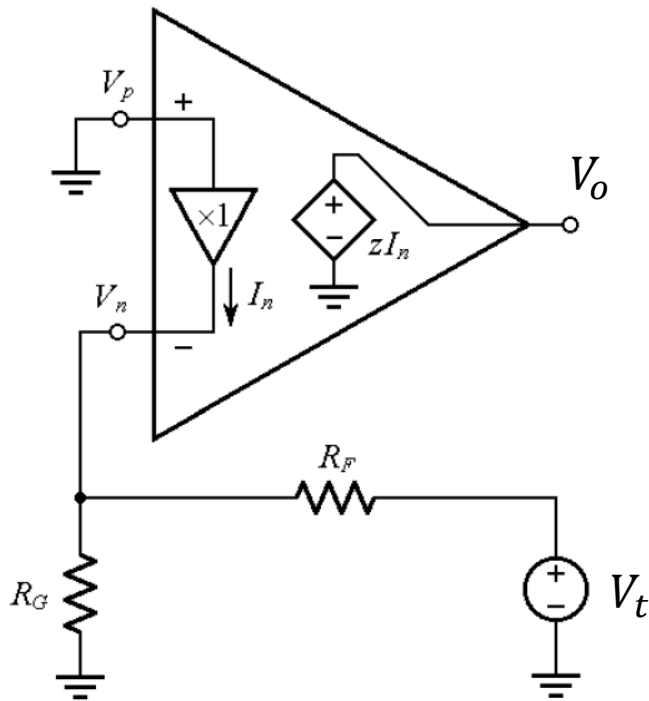


$$Z_T(s) = \frac{V_o(s)}{I_n(s)} = \frac{R_t}{1 + s \cdot C_t \cdot R_t} = \frac{Z_{to}}{1 + \frac{s}{\omega_{3dB}}}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{R_t \cdot C_t}$$

Frekvencija dominantnog pola transimpedanse

Kružno pojačanje kola sa CFA



Kružno pojačanje kola se može odrediti i tako što se prekine kolo povratne sprege i u pravcu prostiranja signala postavi testni generator V_t . Odnos napona na mestu prekida i testnog generatora predstavlja kružno pojačanje.

Ukoliko smatramo da je bafer idealan potencijal na invertujućem ulazu biće jednak nuli i samim tim neće teći struja kroz otpornik R_G .

$$V_n = V_p = V_{in} = 0$$

$$I_n = \frac{V_n}{R_G} + \frac{V_n - V_t}{R_F} = -\frac{V_t}{R_F}$$

$$Z_T(s) = \frac{V_o(s)}{I_n(s)}$$

$$T(s) = \frac{V_o}{V_t} \Big|_{V_{in} = 0} = Z_T(s) \cdot I_n = -\frac{Z_T(s)}{R_F}$$

Koeficijent povratne sprege β je:

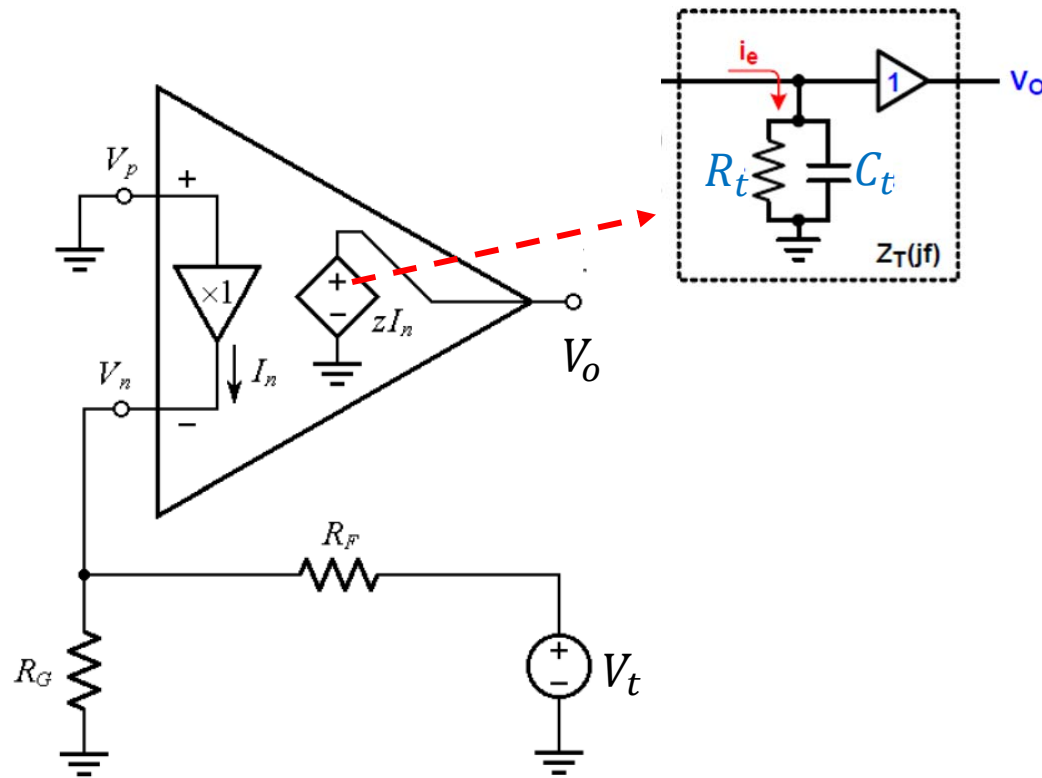
$$\beta = \frac{V_o}{V_t} \Big|_{V_{in} = 0} = -\frac{1}{R_F}$$

$$\beta = -\frac{1}{R_F}$$

Kružno pojačanje kola $T(s)$ može se izraziti kao:

$$T(s) = -\frac{Z_T(s)}{R_F}$$

Kružno pojačanje kola sa CFA



Transimpedansa $Z_t(s)$ predstavlja ulaznu impedansu izlaznog bafera. Ova impedansa se može prikazati kao paralelna veza otpornosti, R_t , i kapacitivnosti, C_t .

$$Z_T(s) = \frac{V_o}{I_n} = \frac{R_t}{1 + s \cdot C_t \cdot R_t}$$

$$T(s) = -\frac{Z_T(s)}{R_F} = -\frac{R_t}{R_F} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_t \cdot R_t}$$

$$T(s) = \frac{T_o}{1 + \frac{s}{\omega_{3dB}}}$$

$$T_o = -\frac{R_t}{R_F}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{C_t \cdot R_t}$$

ω_{3dB} je granična frekvencija kružnog pojačanja i istovremeno granična frekvencija osnovnog pojačavača.

Kružno pojačanje kola sa CFA

Kružno pojačanje

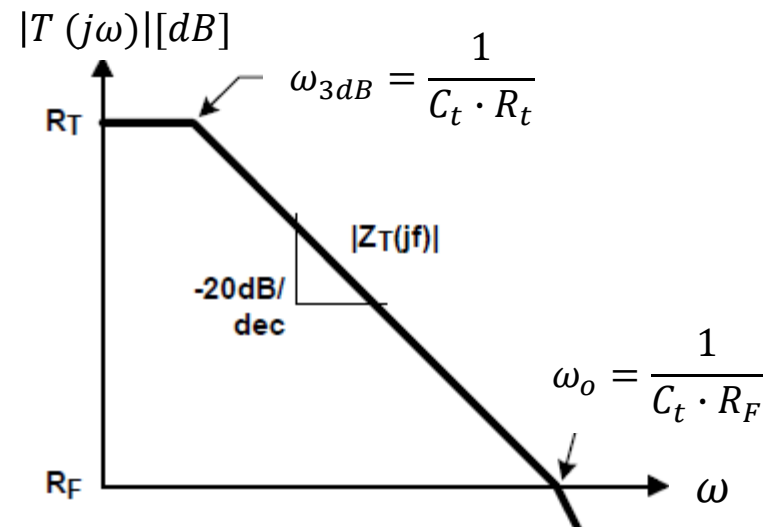
$$T(s) = \frac{R_T}{R_F} \cdot \frac{1}{1 + j\omega/\omega_{3dB}}$$

Kružno pojačanje na frekvencijama mnogo većim od granične frekvencije:

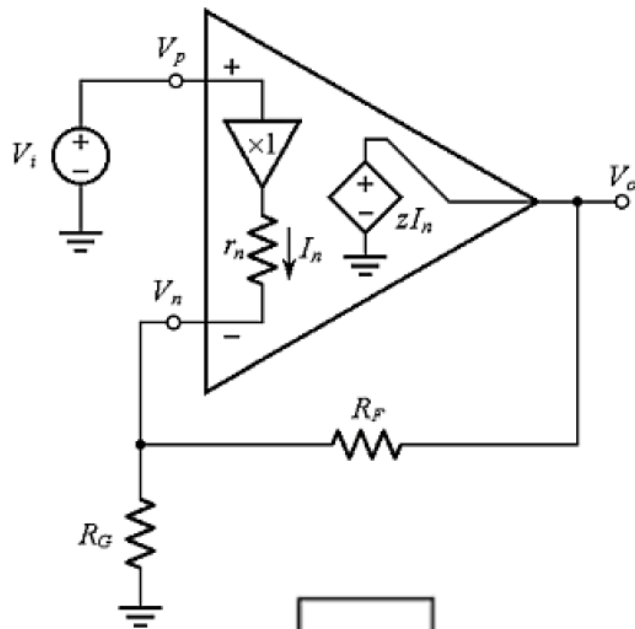
$$\omega \gg \omega_{3dB} \Rightarrow |T(j\omega)| \approx \frac{R_T}{R_F} \cdot \frac{\omega_{3dB}}{\omega} = \frac{1}{C_t \cdot R_F \cdot \omega}$$

Iz gornje jednačine sledi da je frekvencija jediničnog kružnog pojačanja ω_o jednaka

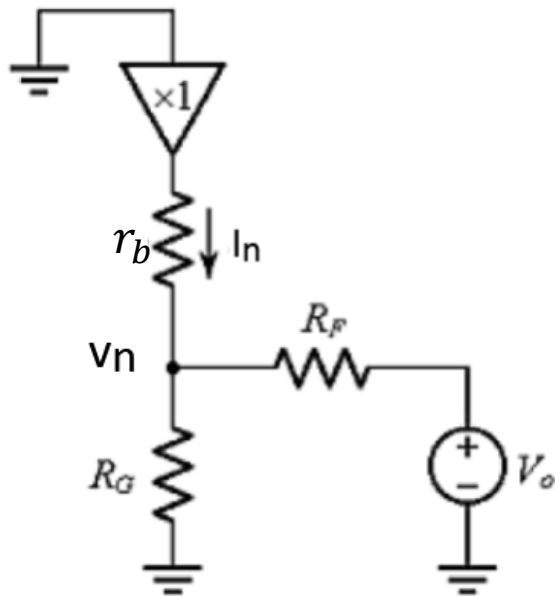
$$|T(j\omega)| = 1 \Rightarrow \omega_t = \frac{1}{C_t \cdot R_F}$$



Uticaj izlazne impedanse bafera na koeficijent povratne sprege



Idealan bafer ima nultu izlaznu otpornost. Ukoliko uzmemo u obzir izlaznu impedansu ulaznog bafera r_b dobićemo tačniji izraz za koeficijent povratne sprege β , kao i za graničnu frekvenciju kola sa povratnom spregom ω_{3dB} . Iz kola za određivanje koeficijenta povratne sprege ($v_{in} = 0$, kolo povratne sprege prekinuto na izlazu operacionog u tu je vezan testni generator) dobijamo:



$$\frac{v_n - v_o}{R_F} + \frac{v_n}{R_G} + \frac{v_n}{r_B} = 0$$

$$i_n = -\frac{v_n}{r_B}$$

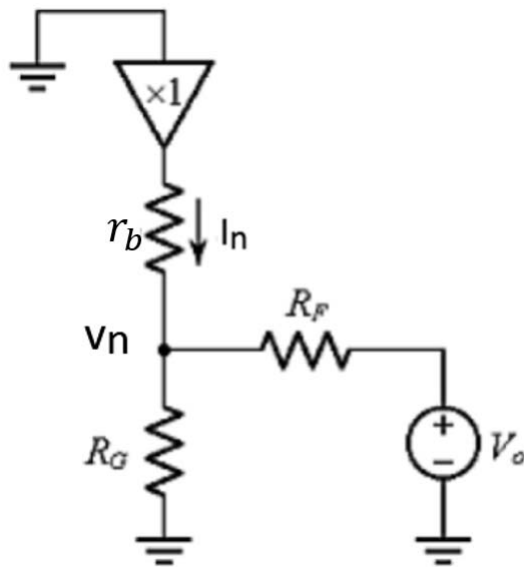
$$\beta' = \frac{i_n}{v_o} = -\frac{1}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}$$

Uticaj izlazne impedanse bafera na koeficijent povratne sprege

Graničnu frekvenciju kola sa povratnom spregom ω_{3dB} kada se uzme u obzir impedansa bafera je (umesto β zamenimo β'):

$$\omega_{3dB} \approx \omega_o \cdot Z_{to} \cdot \beta'$$
$$\omega_{3dB} = \omega_o \cdot Z_{to} \cdot \beta' = \frac{\omega_o \cdot Z_{to}}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}$$

Iz izraza za koeficijent povratne sprege sledi da se uticaj izlazne otpornosti bafera r_B može zanemariti ukoliko je ispunjen uslov $R_F \gg r_B$.



$$\text{za } R_F \gg r_B \quad \beta' = \frac{I_n}{V_o} = -\frac{1}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)} \approx -\frac{1}{R_F}$$
$$\omega_{3dB} = \omega_o \cdot Z_{to} \cdot \frac{1}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)} \approx \omega_o \cdot \frac{Z_{to}}{R_F}$$

Stabilnost kola sa CFA

Stabilnost kola sa povratnom spregom zavisi od kružnog pojačanja a ne zavisi od ulaznog signala. Parametri operacionog pojačavača koji utiču na kružno pojačanje su transimpedansa Z_t i izlazna impedansa ulaznog bafera r_{o1} . Od spoljnjih komponenti dominantan uticaj ima otpornost koja povezuje izlaz i invertujući ulaz R_F .

$$|T(j\omega)|[dB] = 20 \cdot \log|Z_T(j\omega) \cdot \beta|$$

$$\arg\{T(j\omega)\} = \arg\{Z_T(j\omega)\}$$

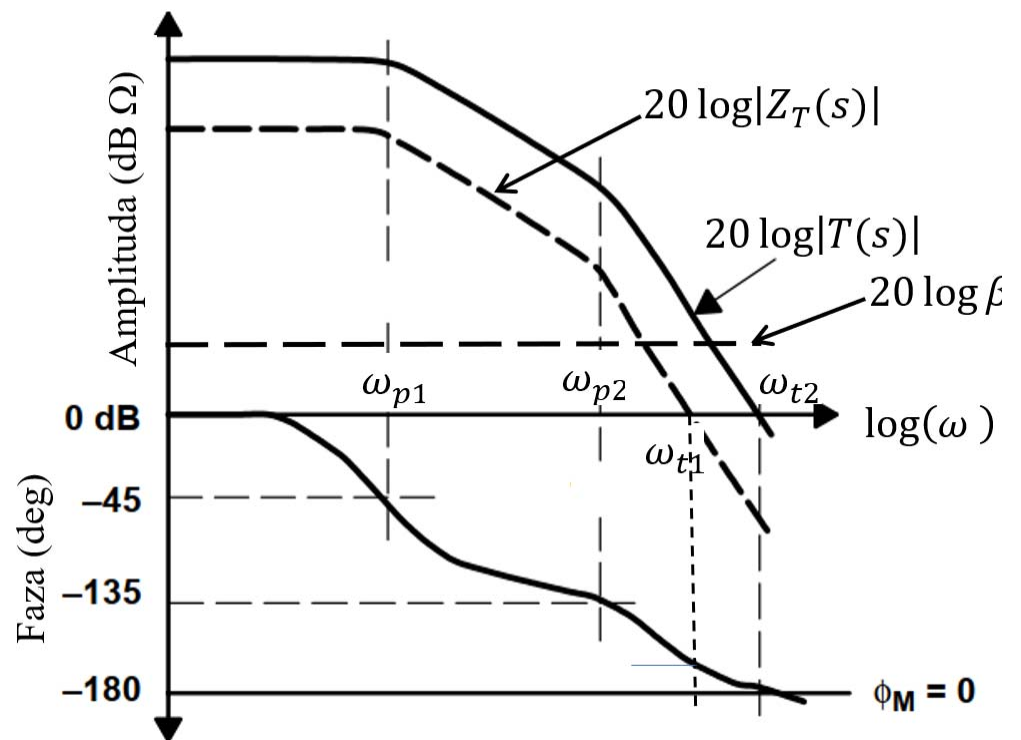
Razmotrimo situaciju u kojoj su dva pola prenosne funkcije CFA ispod frekvencije jediničnog pojačanja ω_t .

$$Z_T(s) = \frac{Z_{T0}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)}$$

Koeficijent povratne sprege β ne utiče na položaj polova niti na faznu karakteristiku. Što je veća vrednost koeficijenta povratne sprege β , veća je frekvencija jedničnog pojačanja ω_T , a samim tim manja je margina faze, odnosno kolo je nestabilnije.

$$|T(j\omega_t)| = 1 \quad \phi_m = \arg\{T(j\omega_t)\} + 180^\circ$$

$$\beta \nearrow \quad \omega_T \searrow \quad \arg\{T(j\omega_T)\} \searrow \quad \phi_m \searrow$$



Stabilnost kola sa CFA

Što je veća vrednost R_F kolo je stabilnije jer se smanjuje β i frekvencija jediničnog kružnog pojačanja a povećava margina faze. Sa druge strane umanjnjem otpornosti R_F sužava se propusni opseg, što se vidi iz izraza za graničnu frekvenciju kola sa povratnom spregom. Optimalna vrednost R_F predstavlja kompromis između širine propusnog opsega i stabilnosti. Preporučena vrednost otpornosti R_F zadaje se od strane proizvođača integrisanog kola.

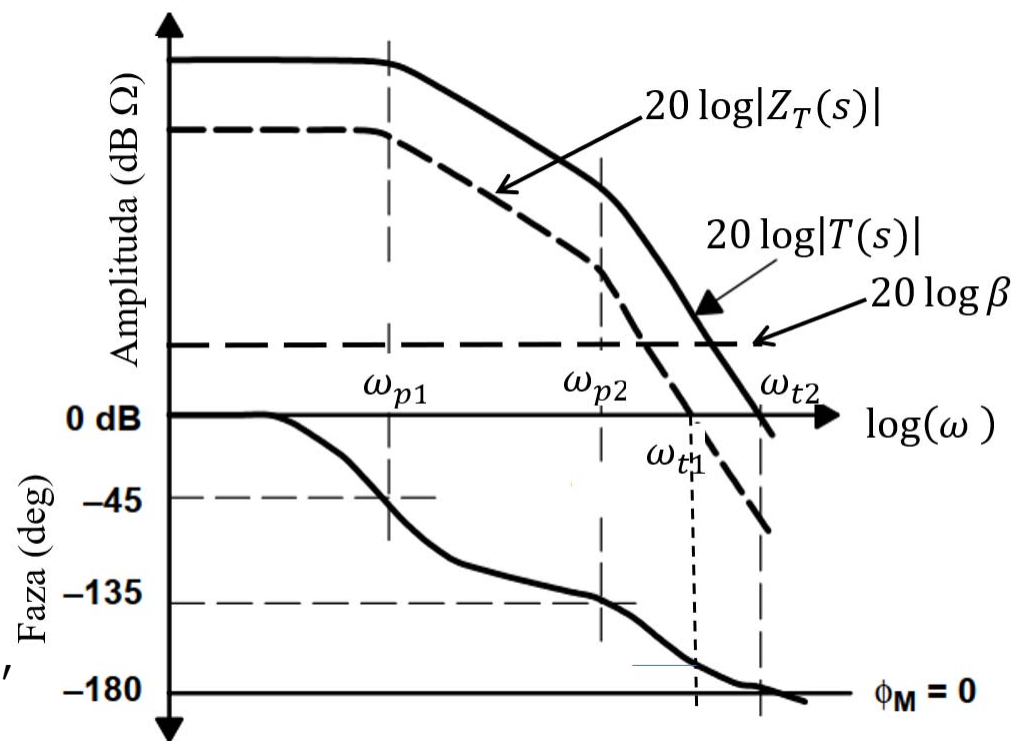
$$\beta = -1/R_f$$

$$20 \cdot \log|T(j\omega)| = 20 \cdot \log|Z_T(j\omega)| - 20 \cdot \log R_F$$

Tačniji izraz za koeficijent povratne sprege uzima u obzir i uticaj nenulte vrednosti izlazne impedanse ulaznog bafera, Z_B . Vrednost ove impedanse se povećava sa porstom frekvencije i ima uticaj samo pri dovoljno visokim frekvencijama.

$$\beta' = \frac{1}{R_F + Z_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}$$

$$20 \cdot \log|A \cdot \beta'| = 20 \cdot \log|Z_T| - 20 \cdot \log\beta'$$



Uticaj kapacitivnosti na invertujućem ulazu na graničnu frekvenciju

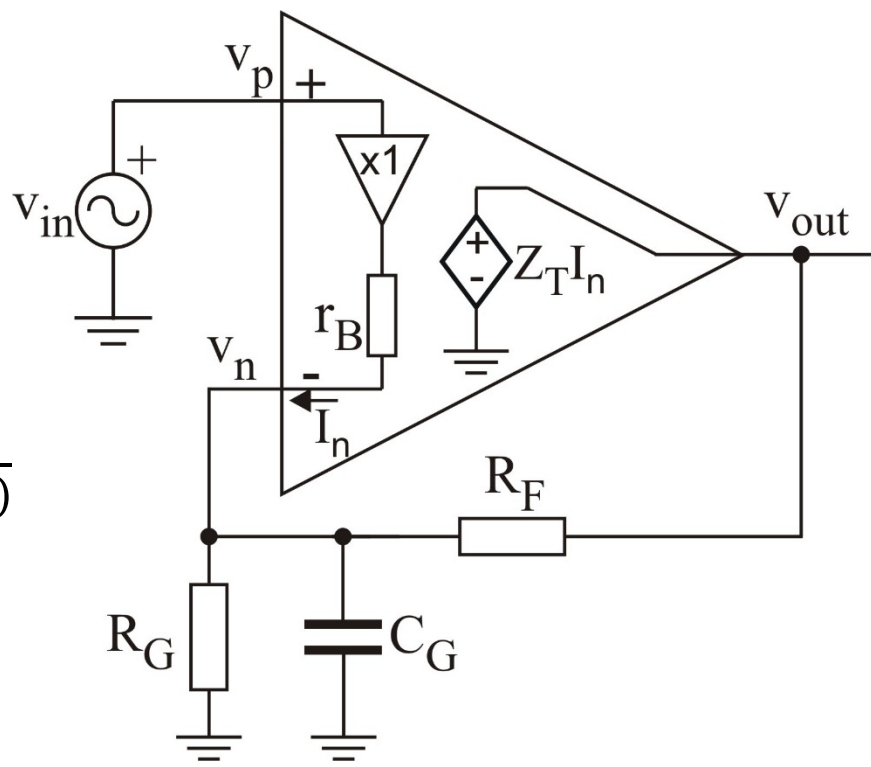
Kapacitivnost paralelna sa pojačavačkim otpornikom R_G uvodi novi pol u frekvencijsku karakteristiku kružnog pojačanja. Na osnovu analitičkog izraza za taj pol sledi da će izlazna otpornost bafera r_B imati dominantan uticaj na položaj pola (jer je $r_B \ll R_F$ i $r_B \ll R_G$). Ovo nije povoljna situacija jer se na izlaznu otpornost bafera, koja je posledica proizvodnih tolerancija integrisanog kola, ne može uticati. Pri većoj vrednosti kapacitivnosti C_G novonastali pol može da se približi frekvenciji jedničnog kružnog pojačanja što će prouzrokovati umanjene margine faze i nestabilnost.

$$Z_G = \frac{R_G \cdot \frac{1}{s \cdot C_G}}{R_G + \frac{1}{s \cdot C_G}} = \frac{R_G}{1 + s \cdot C_G \cdot R_G}$$

$$\beta' = \frac{1}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{Z_G}\right)} \quad r_B \ll R_F, R_G$$

$$\beta' = \frac{Z_T(s)}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_G \cdot (r_B || R_F || R_G)}$$

$$T(s) = Z_T(s) \cdot \beta' \approx \frac{Z_T(s)}{R_F} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_G \cdot r_B}$$



Uticaj kapacitivnosti između izlaza i invertujućeg ulaza na graničnu frekvenciju

Ukoliko u kolu postoji kapacitivnost u paraleli sa otpornikom u povratnoj sprezi R_F , koeficijent povratne sprege će postati frekvencijski zavistan i sadržaće jedan pol i jednu nulu. Frekvencija nule je manja od frekvencije pola (jer je $r_B \ll R_F$).

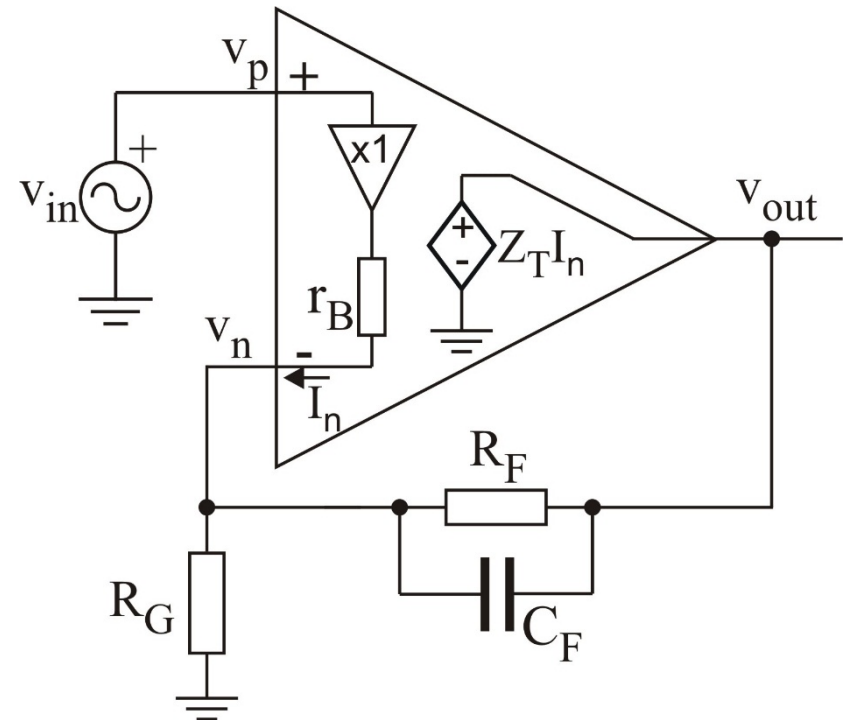
$$Z_F = \frac{R_F \cdot \frac{1}{s \cdot C_F}}{R_F + \frac{1}{s \cdot C_F}} = \frac{R_F}{1 + s \cdot C_F \cdot R_F}$$

Nakon što se R_F zameni sa Z_F u izrazu za koeficijent povratne sprege dobja se:

$$\beta' = \frac{1}{Z_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{Z_F}{R_G}\right)} = \frac{1}{Z_F \left(1 + \frac{r_B}{R_G}\right) + r_B}$$

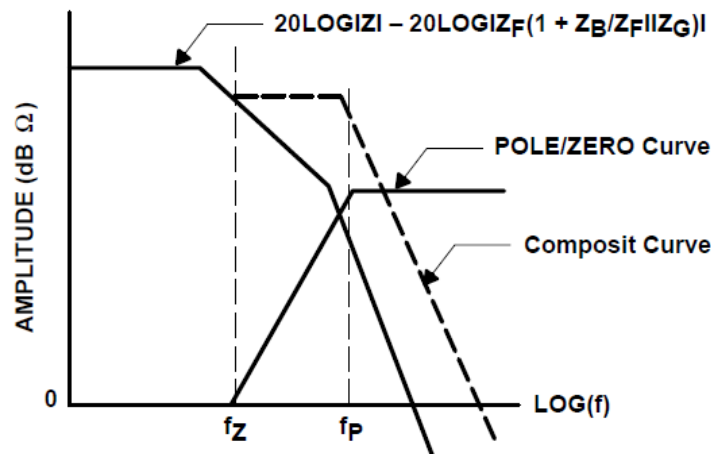
$$\beta' \approx \frac{1}{Z_F + r_B} = \frac{1}{R_F} \cdot \frac{1 + s \cdot C_F \cdot R_F}{1 + s \cdot C_F \cdot r_B}$$

$$T(s) = Z_T(s) \cdot \beta' \approx \frac{Z_T(s)}{R_F} \cdot \frac{1 + s \cdot C_F \cdot R_F}{1 + s \cdot C_F \cdot r_B}$$



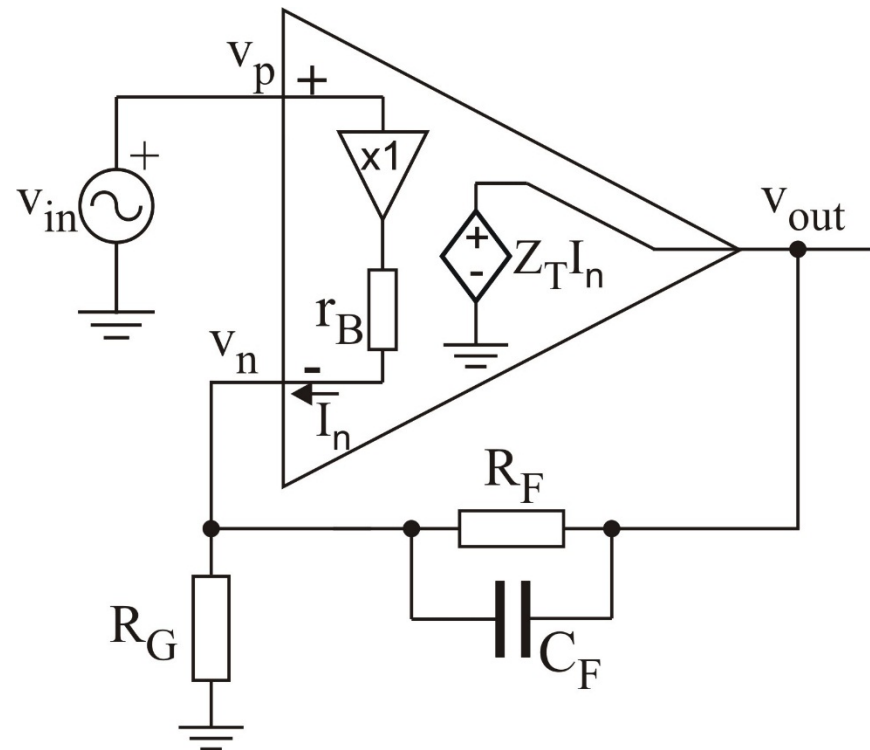
Uticaj kapacitivnosti između izlaza i invertujućeg ulaza na graničnu frekvenciju

Pod dejstvom nule i pola povećava se frekvencija na kojoj je moduo kružnog pojačanja jednak jedinici, $|T(j\omega_t)|=1$. Odavde sledi da će margina faze biti manja i da će kolo biti manje stabilno.



$$T(s) \approx \frac{Z_T(s)}{R_F} \cdot \frac{1 + s \cdot C_F \cdot R_F}{1 + s \cdot C_F \cdot r_B}$$

$$T(s) \approx \frac{Z_T(s)}{R_F} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}}$$



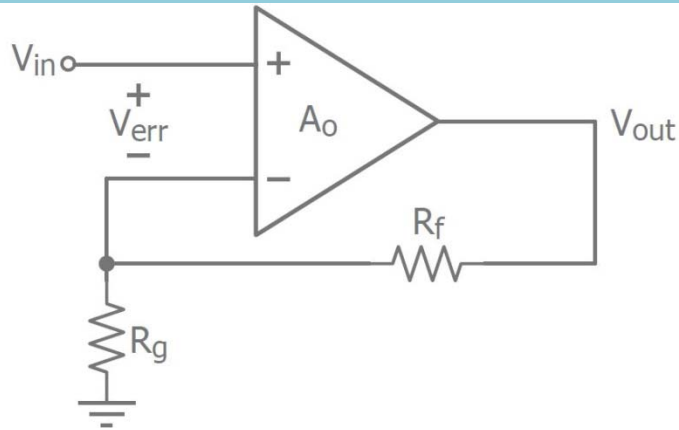
Frekvencija nule

$$\omega_z = \frac{1}{C_F \cdot R_F}$$

Frekvencija pola

$$\omega_p = \frac{1}{C_F \cdot r_B}$$

Granična frekvencija kola sa povratnom spregom



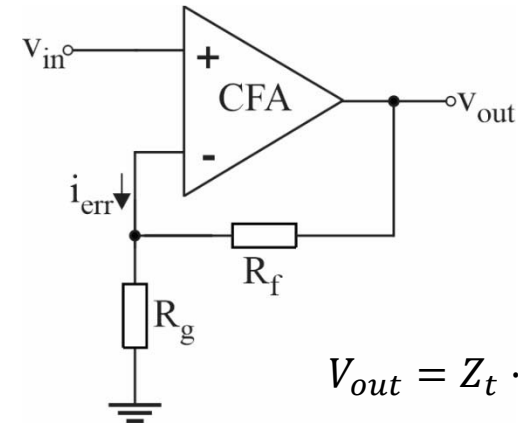
$$V_{out} = A \cdot V_{err}$$

$$\beta = \left. \frac{v_{err}}{v_{out}} \right|_{v_{in} = 0} = -\frac{R_g}{R_f + R_g}$$

$$V_{err} = V_{in} - V_{out} \cdot \left(\frac{R_g}{R_f + R_g} \right) = V_{in} + V_{out} \cdot \beta$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 - A \cdot \beta}$$

β Koeficijent povratne sprege
 A naponsko pojačanje u otvorenoj sprezi
 Z_t transimpedansa u otvorenoj sprezi



$$V_{out} = Z_t \cdot I_{err}$$

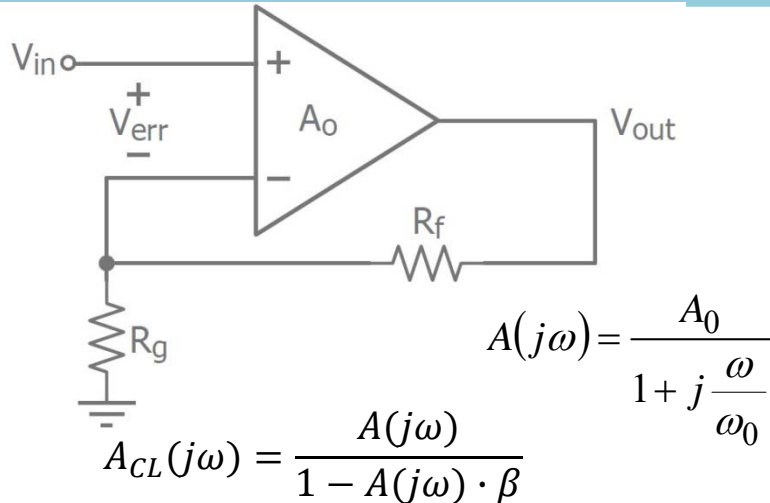
$$\beta = \left. \frac{I_{err}}{v_{out}} \right|_{v_{in} = 0} = -\frac{1}{R_f}$$

$$\frac{V_{in}}{R_g} + \frac{V_{in} - V_{out}}{R_f} - I_{err} = 0$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(\frac{R_f + R_g}{R_f R_g} \right) \frac{Z_t}{1 - Z_t \beta}$$

- Pod dejstvom negativne povratne sprege menja se napon na izlazu operacionih pojačavača V_{out} na takav način da:
 - Kod VFA smanjuje napon na ulazu V_{err} (kod idealnog pojačavača jednak je nuli)
 - Kod CFA smanjuje struju na invertujućem ulazu I_{err} (kod idealnog pojačavača je jednaka nuli)

Granična frekvencija kola sa povratnom spregom

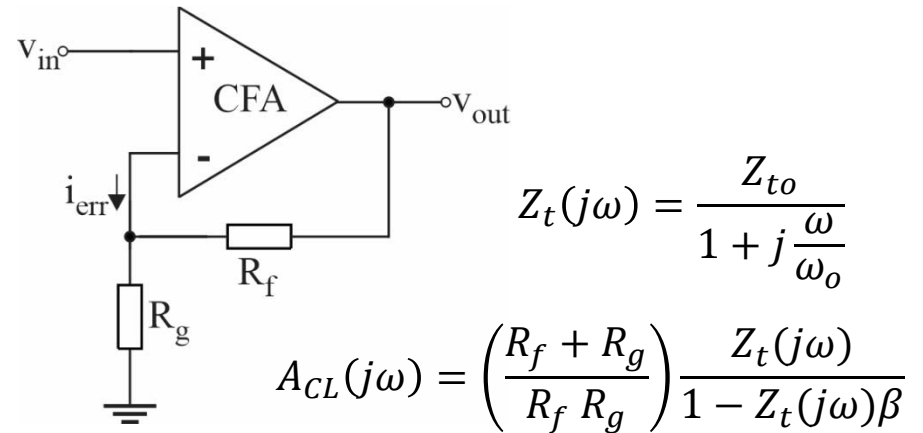


$$A_{CL}(j\omega) = \frac{A_o}{1 - A_o\beta} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_o(1 - A_o\beta)}}$$

$$A_{CL}(j\omega) = A_{CLO} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{3dB}}} \approx \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_o A_o \beta}}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{\omega_o A_o}{A_{CLO}}$$

Granična frekvencija kola sa povratnom spregom ω_{3dB} inverzno je proporcionalna jednosmernom pojačanju kola sa povratnom spregom A_{CLO} .



$$A_{CL}(j\omega) = \left(\frac{R_f + R_g}{R_f R_g} \right) \frac{Z_{to}}{1 - Z_{to}\beta} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_o(1 - Z_{to}\beta)}}$$

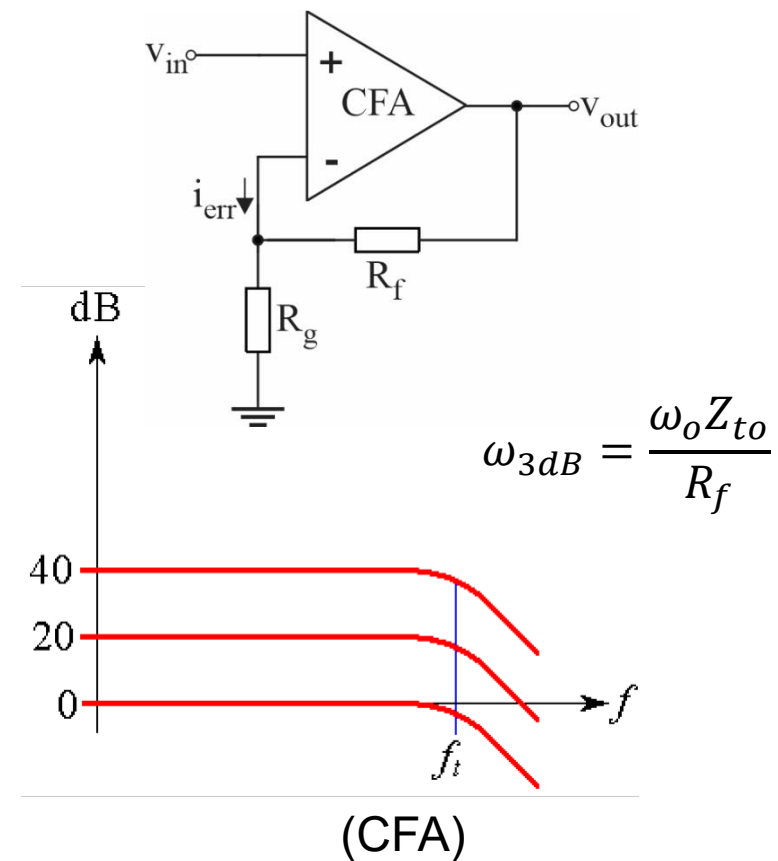
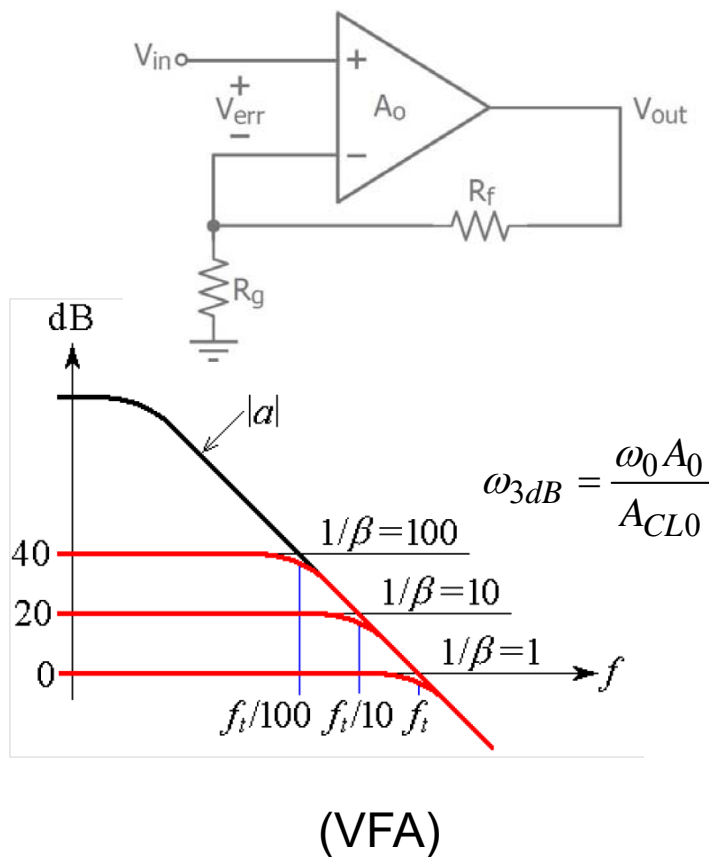
$$A_{CL}(j\omega) = A_{CLO} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{3dB}}} \approx \left(\frac{R_f + R_g}{R_f R_g \beta} \right) \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_o Z_t \beta}}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{\omega_o Z_{to}}{R_f}$$

Granična frekvencija kola sa povratnom spregom ω_{3dB} zavisi od otpornika koji povezuje izlaz i invertujući ulaz pojačavača R_f .

Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

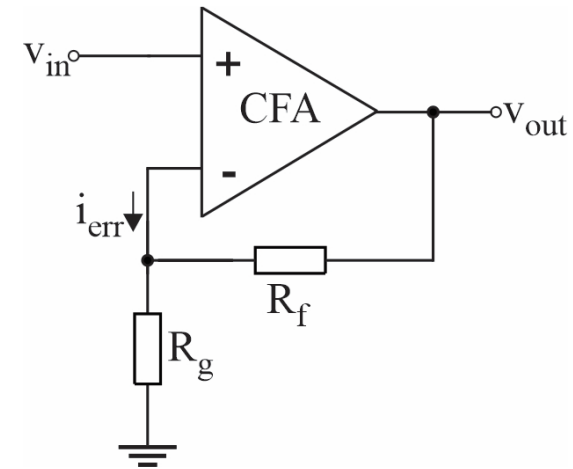
Kod standardnih operacionih pojačavača proizvod pojačanja i propusnog opsega je konstantan. Veće pojačanje kola sa povratnom spregom znači manju frekvenciju propusnog opsega i obrnuto $A_{CLO}\omega_{3dB} = \omega_o A_o$. Sa druge strane u kolima sa transrezistansnim operacionim pojačavačima granična frekvencija ne zavisi od jednosmerne vrednosti pojačanja sa povratnom spregom A_{CLO} .



Povezivanje CFA koje obezbeđuje stabilnost kola

$$\omega_{3dB} = \frac{\omega_o Z_{to}}{R_f}$$

Propusni opseg zavisi od otpornika u povratnoj sprezi R_F



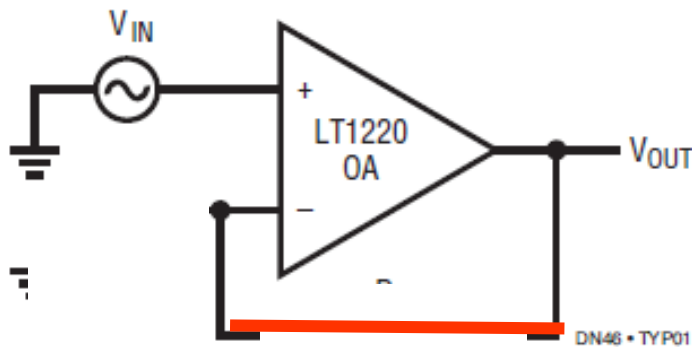
- Impedansa u povratnoj sprezi bi zbog stabilnosti trebala da bude otporna, nikako kapacitivna.
- R_f se ne može proizvoljno menjati. Za svaki CFA se navodi **preporučena vrednost za otpornik u povratnoj sprezi, R_F** . Za ovu vrednost otpornosti dobija se maksimalni propusni opseg kola koje je stabilno.
 - Ukoliko se poveže veći otpornik od propisanog smanjiće se propusni opseg.
 - Ukoliko se poveže manja otpornost od propisane smanjuju se margine faze i kolo može postati nestabilno.

Povezivanje CFA koje obezbeđuje stabilnost kola

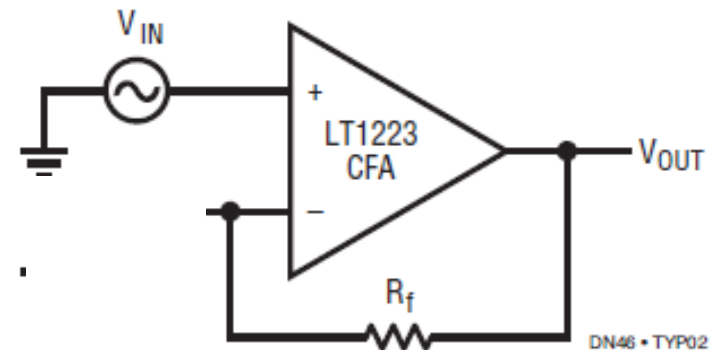
Prilikom povezivanja CFA moraju se voditi računa o sledećem:

1. Otpornost između invertujućeg ulaza i izlaza treba da bude jednaka ili veća od vrednosti preporučene od strane proizvođača.
2. Treba izbegavati kapacitivna opterećenja
3. Treba izbegavati kapacitvnosti između invertujućeg ulaza i izlaza.

Op Amp Adjustable Gain Amp



Current Feedback Amp Adjustable Gain Amp

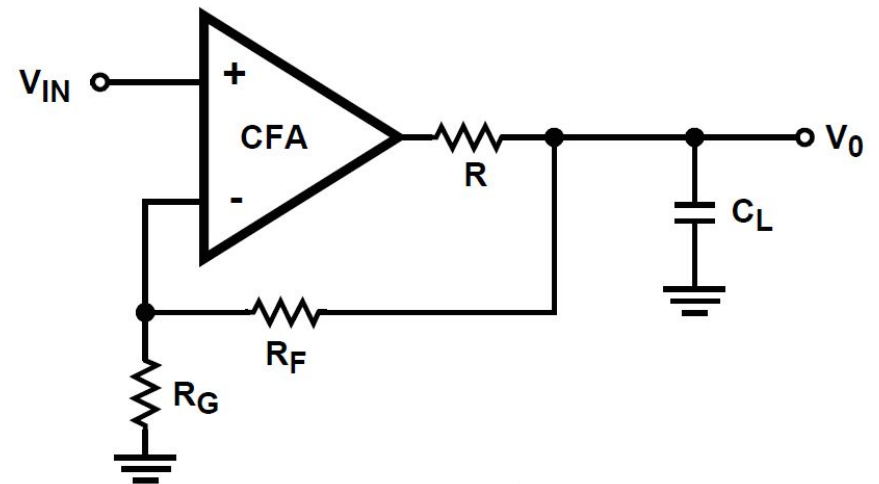
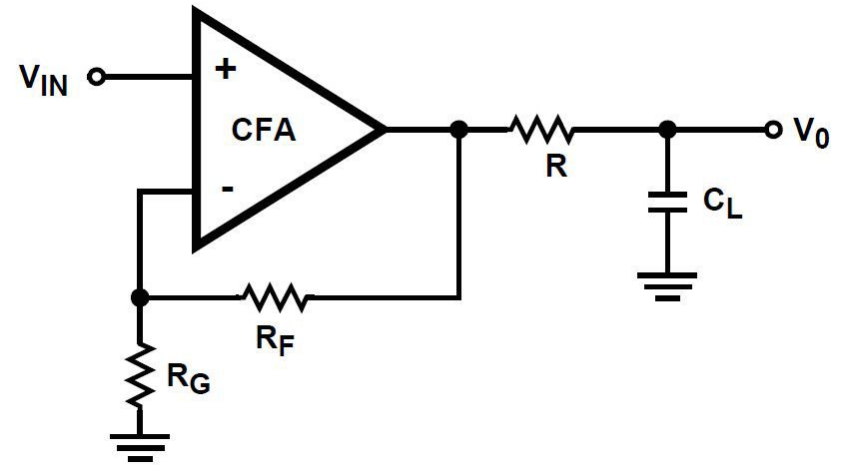


Česta greška u implementaciji CFB pojačavača je kratkospajanje izlaza i invertujućeg ulaza da bi se dobio jedinični bafer. Ukoliko napravi ovakav spoj kolo će početi da osciluje. Da bi kolo funkcionisalo **neophodno je da se primenjuje preporučena otpornost u povratnoj sprezi.**

Povezivanje CFA koje obezbeđuje stabilnost kola

Kapacitivno opterećenje

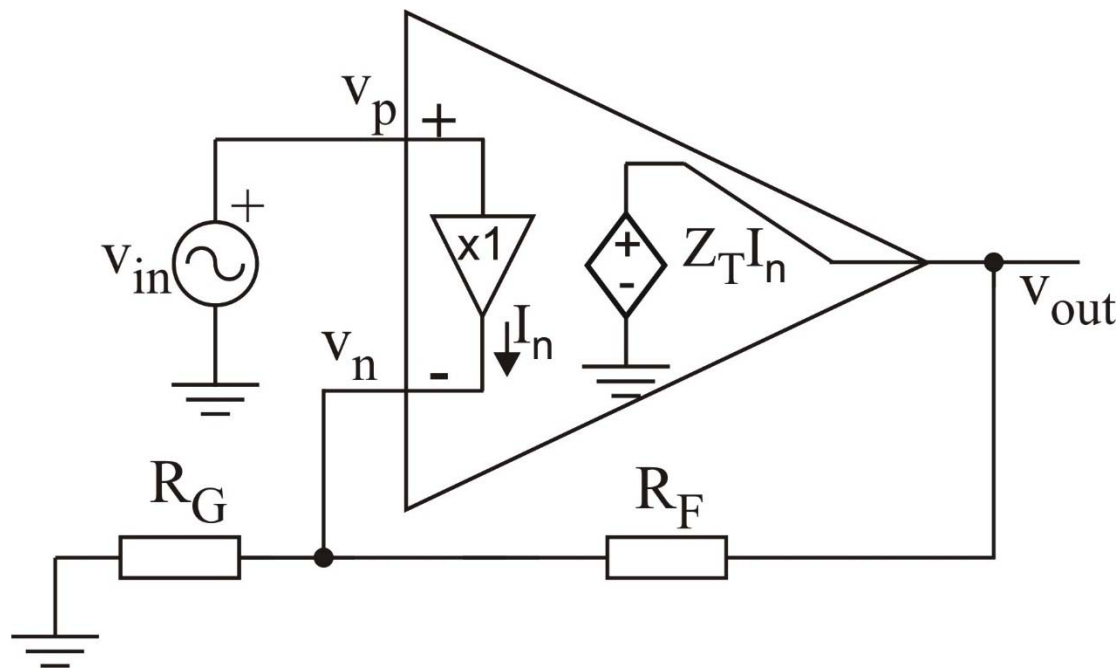
- Kapacitivno opterećenje može da prouzrokuje nestabilnost kola ili dovede do oscilacija. Da bi se sprečila ova pojava dodaje se mala otpornost na red sa izlazom.
- **Izolaciona otpornost** je najefektivnija ukoliko nije unutar povratne sprege (gornja slika) ali u tom slučaju formira NF filter sa opterećenjem C_L .
- Ukoliko je otpornost dodata unutar povratne sprege (donja slika) nema efekta filtriranja signala i povratna sprega eliminiše grešku. Ova tehnika međutim nije primenjiva na sve pojačavače.



Neinvertujući pojačavač realizovan sa CFA

Kolo nenvertujućeg pojačavača ima istu strukturu kao pojačavač realizovan primenom standardnog operacionog pojačavača koji koristi naponsku povratnu spregu. Analitički zraz za idealno pojačanje ova dva kola takođe se ne razlikuje. Neophodani uslovi da se dobije idealna vrednost pojačanja kola sa povratnom spregom su da:

- Transimpedansa ima veliku vrednost, $Z_T \rightarrow \infty$
- Izlazna impedansa ulaznog bafera Z_B bude zanemariva, $Z_B=0$.



$$\frac{V_n}{R_G} + \frac{V_n - V_{out}}{R_F} = I_n$$

$$V_n = V_{in} - Z_B \cdot I_n \approx V_{in}$$

$$V_{out} = Z_T \cdot I_n$$

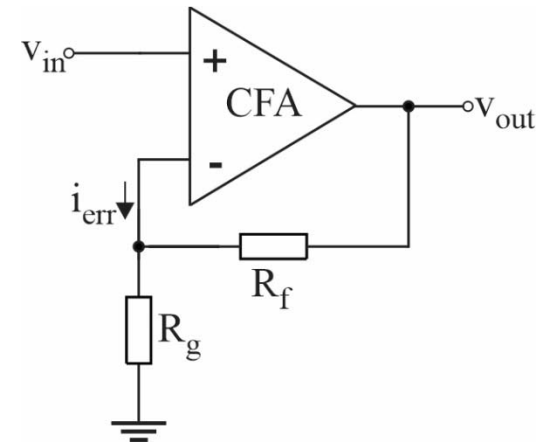
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_T \cdot (R_F + R_G)}{R_G \cdot (Z_T + R_F)}$$

$$A_{CL0} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_G}}{1 + \frac{R_F}{Z_T}}$$

$$A_{CL0} = \lim_{Z_T \rightarrow \infty} A_n = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

Jednosmerno pojačanje neinvertujućeg pojačavača

$$A_{CL0} = 1 + \frac{R_f}{R_g}$$



Jednosmerno pojačanje se može podesiti otpornikom R_g . Zato se ovaj otpornik obično naziva pojačavački otpornik (gain resistor). Ukoliko je potrebno povećati pojačanje treba smanjiti otpornost povezanu sa invertujućim ulazom R_g .

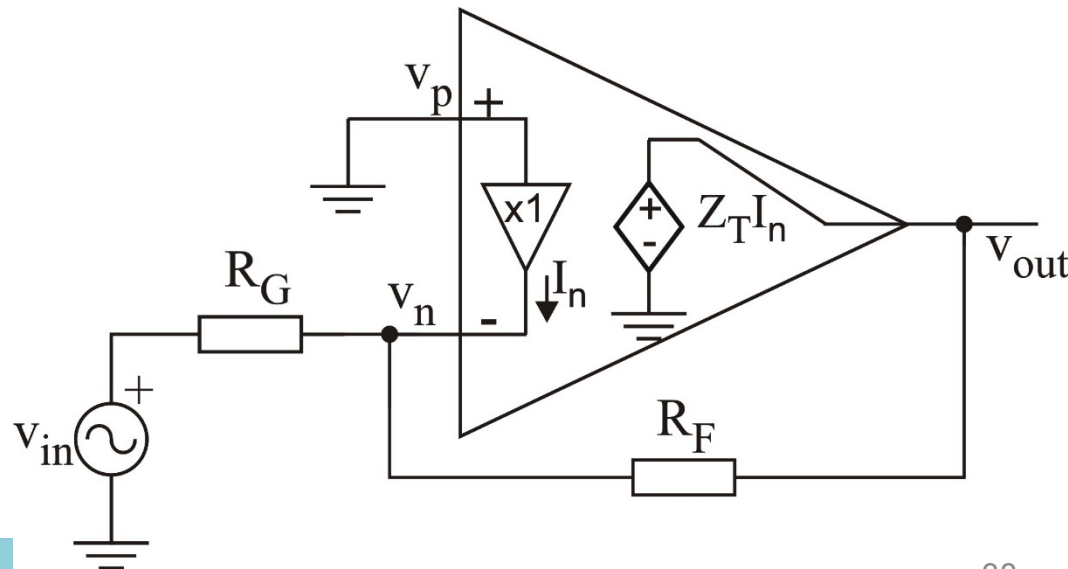
R_g se može menjati u širokim granicama bez većeg uticaja na graničnu frekvenciju i stabilnost pojačavača. Pri tome treba voditi računa o sledećem:

- Pri suviše malom pojačanju R_g ima veliku vrednost. U tom slučaju može doći do pomeranja granične frekvencije zbog interakcije ove otpornosti sa parazitnim kapacitivnostima.
- Ukoliko R_g ima malu vrednosti koja se približava vrednosti izlazne impedanse ulaznog bafera dolazi do deljenja struja koje protiče kroz otpornost R_f između otpornosti bafera i R_g a samim tim i od umanjenja pojačanja.

Invertujući pojačavač realizovan sa CFA

Kolo invertujućeg pojačavača ima istu strukturu kao pojačavač realizovan primenom standardnog operacionog pojačavača sa naponskom povratnom spregom. Ovo kolo ređe se koristi u odnosu na neinvertujući pojačavač jer je teže uskladiti vrednosti komponenata. Neophodani uslovi za dobijanje idealnog pojačanja kola sa povratnom spregom su kao kod neinvertujućeg pojačavača: $Z_T \rightarrow \infty$ i $Z_B \rightarrow 0$.

Zadovoljavajuća vrednost pojačanja može se postići podešavanjem otpornika R_F i R_G . Za otpornik R_F se usvaja unapred zadata vrednost jer od nje zavisi stabilnost kola. Vrednosti otpornosti R_G nebi trebala da bude suviše mala jer u tom slučaju dolazi do izražaja izlazna impedansa ulaznog bafera Z_B .



$$\frac{V_n - V_{in}}{R_G} + \frac{V_n - V_{out}}{R_F} = I_n$$

$$V_n = V_{in} - Z_B \cdot I_n \approx V_{in}$$

$$V_{out} = Z_T \cdot I_n$$

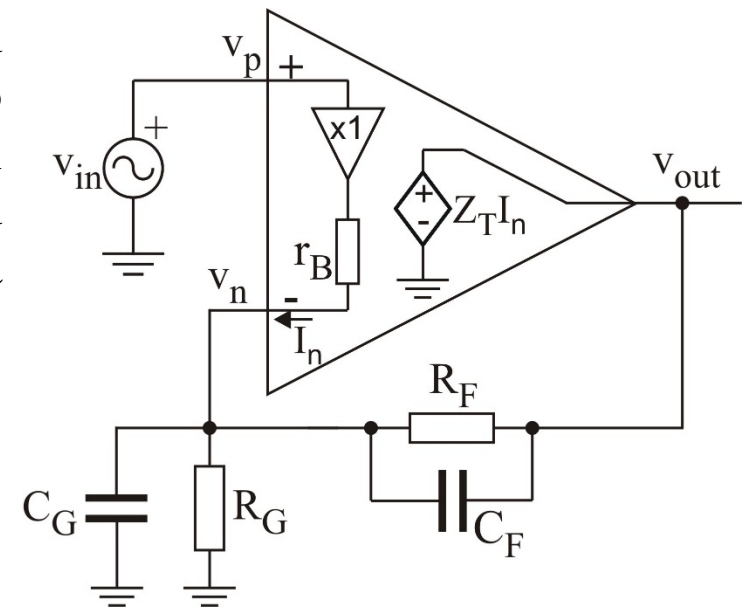
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{Z_T \cdot R_F}{R_F \cdot R_G + Z_T \cdot R_G}$$

$$A_{CL} = \frac{-\frac{R_F}{R_G}}{1 + \frac{R_F}{Z_T}}$$

$$A_{CLid} = \lim_{Z \rightarrow \infty} A_{CL} = -\frac{R_F}{R_G}$$

Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

Kada su istovremeno prisutne kapacitivnost između invertujućeg ulaza i mase, C_G , i kapacitivnosti paralelno sa otpornikom R_F , C_F , u frekvencijskoj karakteristici kružnog pojačanja postoje nula i pol. U ovom slučaju mogu se izborom vrednosti R_F i R_G podesiti nula i pol na takav način da dodje do njihovog uzajamnog potiranja.



$$Z_F = \frac{R_F}{1 + s \cdot C_F \cdot R_F} \quad Z_G = \frac{R_G}{1 + s \cdot C_G \cdot R_G}$$

$$\beta' = \frac{1}{Z_F + R_B \cdot \left(1 + \frac{Z_F}{Z_G}\right)}$$

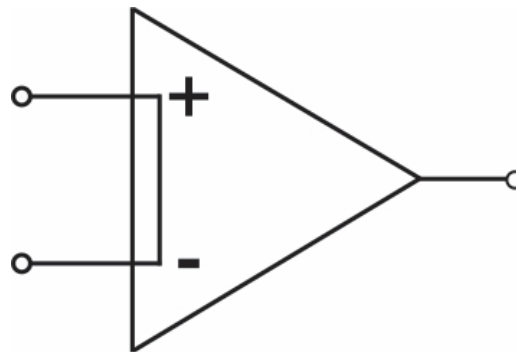
$$Z_T(s) = \frac{Z_T(s)}{R_F + r_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)} \cdot \frac{1 + s \cdot C_F \cdot R_F}{1 + s \cdot (C_F + C_G) \cdot (r_B || R_F || R_G)}$$

$$\omega_z = \omega_p \Rightarrow R_F \cdot C_F = (C_F + C_G) \cdot (r_B || R_F || R_G)$$

$$R_F \cdot C_F \approx r_B \cdot C_G$$

Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

- CFA se primenjuje kao i naponski pojačavač **u kolima sa negativnom povratnom spregom.**
- U većini kola standardni operacioni pojačavač (pojačavač sa naponskom povratnom spregom) se može zameniti operacionim pojačavačem sa strujnom povratnom spregom, CFA.
- CFA se najviše koristi u primenama gde je potreban **širi propusni opseg, veća brzina i manja izobličenja.** Prednosti CFOA zasnivaju se na činjenici da se struje u kolu mogu brže menjati nego naponi.



Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

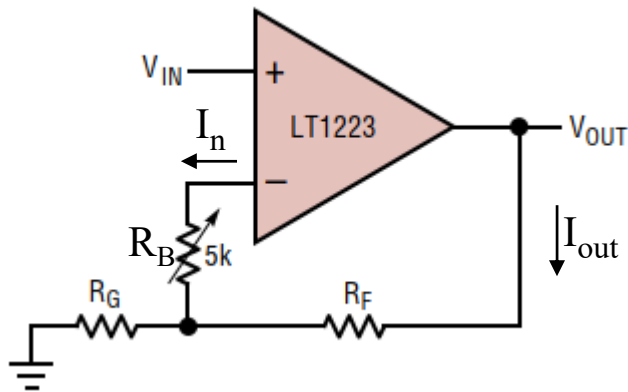
Najčešće primene transrezistansnih operacioni pojačavača su:

- Konvertora impedanse
- Aktivni filtari
- Harmonijski oscilatori
- Širokopolasni pojačavači

Prednost kola sa transrezistansnim operacionim pojačavačem u odnosu na kola koja sadrže standardni operacioni pojačavač sa naponskom povratnom spregom je da se mogu koristiti na znatno višim frekvencijama signala.

Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Pojačavač sa promenljivim propusnim opsegom



Vrednost otpornost koja je povezana za invertujući ulaz R_B utiče na graničnu frekvenciju pojačavača prema jednačini:

$$\omega_{3dB} \approx \omega_o \cdot Z_{to} \cdot \beta'$$

$$\beta' = \frac{I_n}{V_{out}} = \frac{i_{out}}{v_{out}} \frac{i_n}{i_{out}} = \frac{1}{R_F + R_G \parallel R_B} \frac{R_G}{R_G + R_B} = \frac{1}{R_F + R_B \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}$$

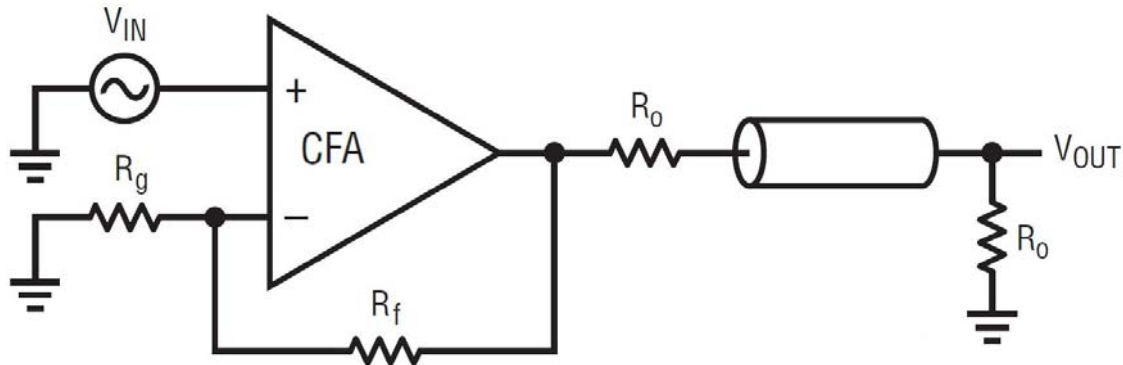
Otpornik R_B neće uticati na jednosmerno pojačanje pojačavača koje je jednako:

$$A_{CL} = \lim_{Z_t \rightarrow \infty} A_n = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

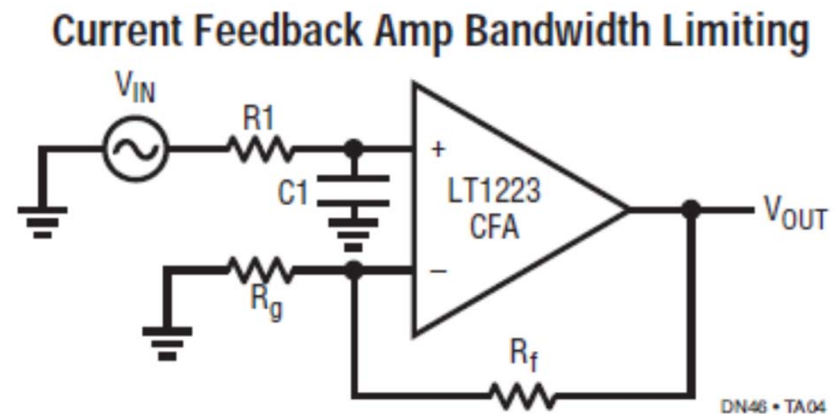
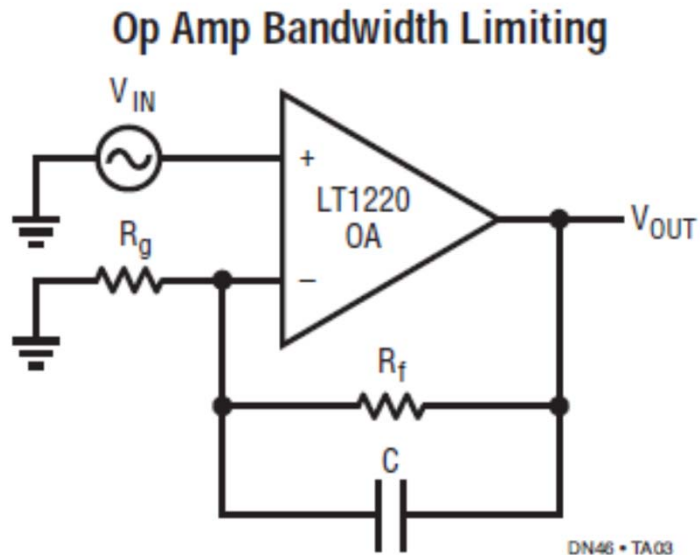
Pojačavač za signal koji se prenosi koaksijalnim kablom

- Vezivanjem otpornosti za prilagođenje na ulazu i izlazu, R_0 , izoluje se pojačavač od kapacitivnih opterećenja u kablju. Na ovaj način pojačavač može da radi pri maksimalnom propusnom opsegu.



Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Ograničenje propusnog opsega



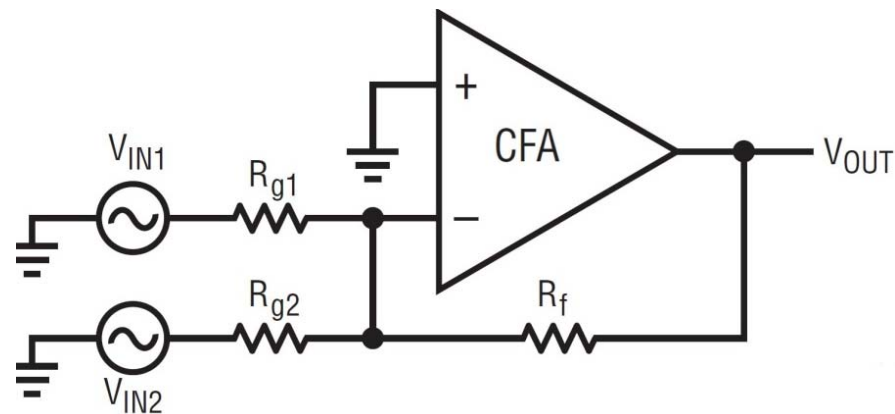
Uobičajeno je da se ograničenje propusnog opsega VFA obavlja ubacivanjem male kapacitivnosti u paraleli sa R_F .

Ukoliko se kondenzator male kapacitivnosti poveže sa invertujućim ulazom kolo postaje nestabilno i mogu nastupiti oscilacije. Zato se za potrebe smanjenja propusnog opsega kondenzator vezuje za neinvertujući ulaz.

Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Sabirač

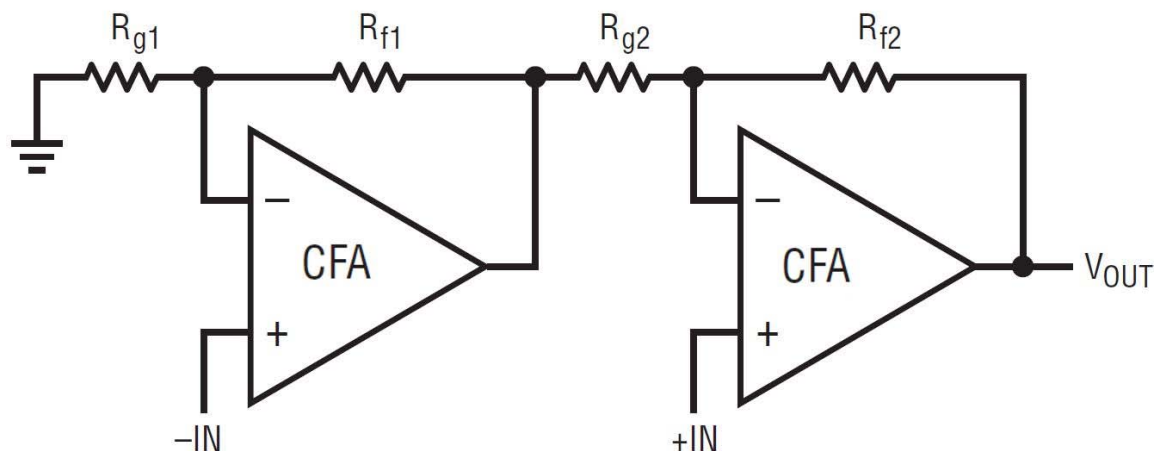
- Pojavljuju se isti problemi kao kod invertujućeg pojačavača.
- Potrebno je pri izboru elemenata kola voditi istovremeno računa i o stabilnosti i o tačnosti.



Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Instrumentacioni pojačavač

- Otpornosti u povratnoj sprezi R_{f1} i R_{f2} se biraju da budu jednake. Na taj način se postiže da propusni opseg oba pojačavača bude jednak.
- Potiskivanje srednje vrednosti signala na visokim frekvencijama je bolje nego kod standardnih operacionih pojačavača.



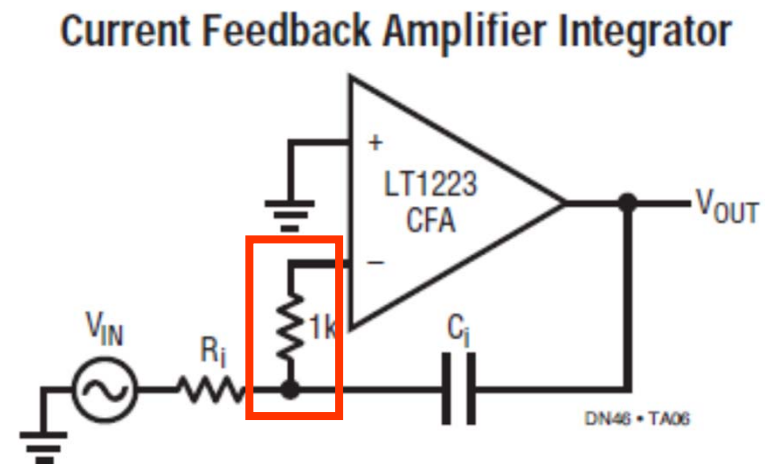
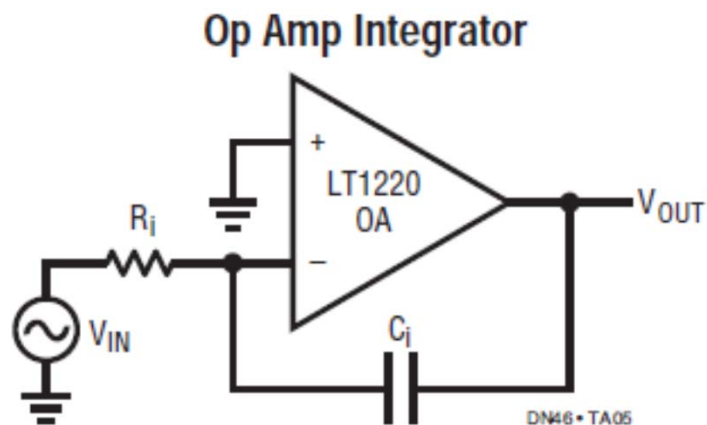
$$R_{f1} = R_{f2}$$

$$R_{g1} = (G-1) \cdot R_{f1}$$

$$R_{g2} = \frac{R_{f2}}{(G-1)}$$

Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Integrator

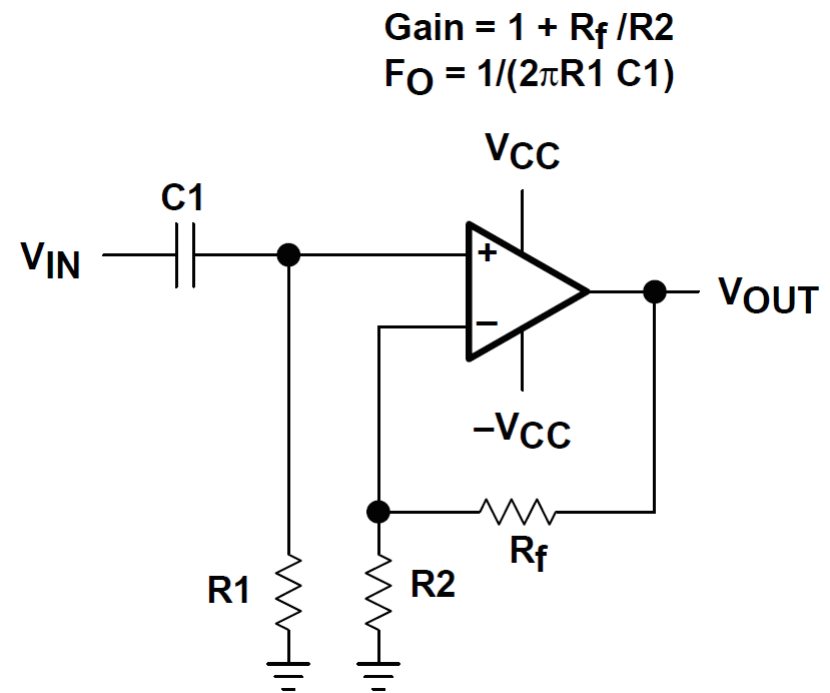
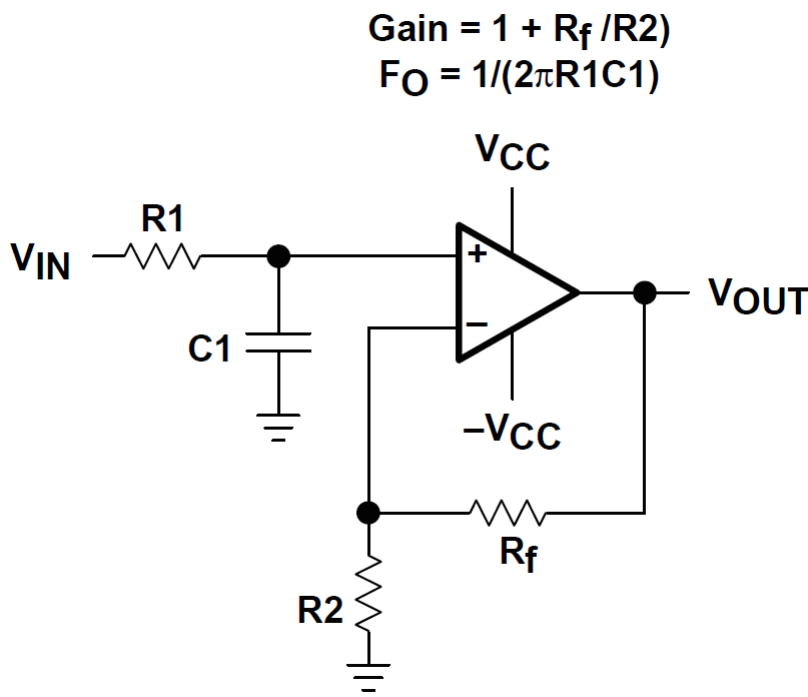


Kolo integratora koje je realizovano primenom CFA mora da sadrži otpornost vezanu za invertujući ulaz da bi se obezbedila stabilnost kola.

Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Aktivni filtri

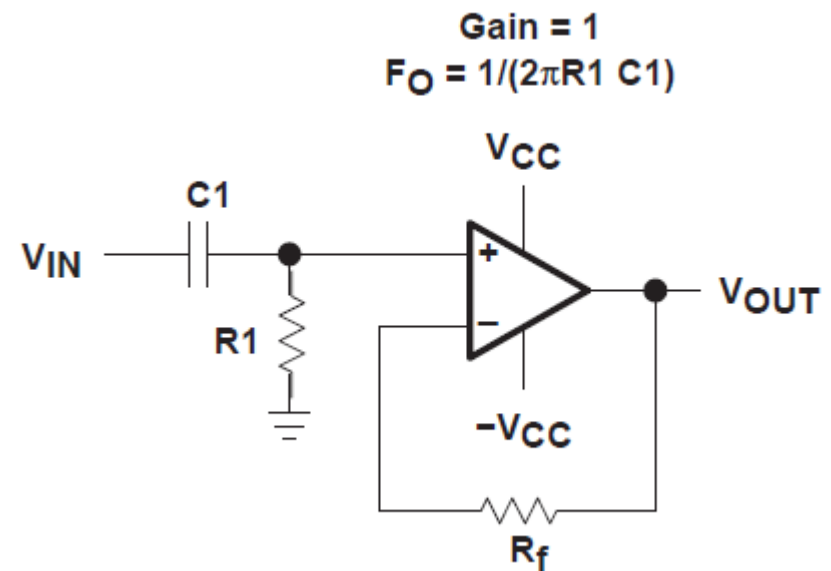
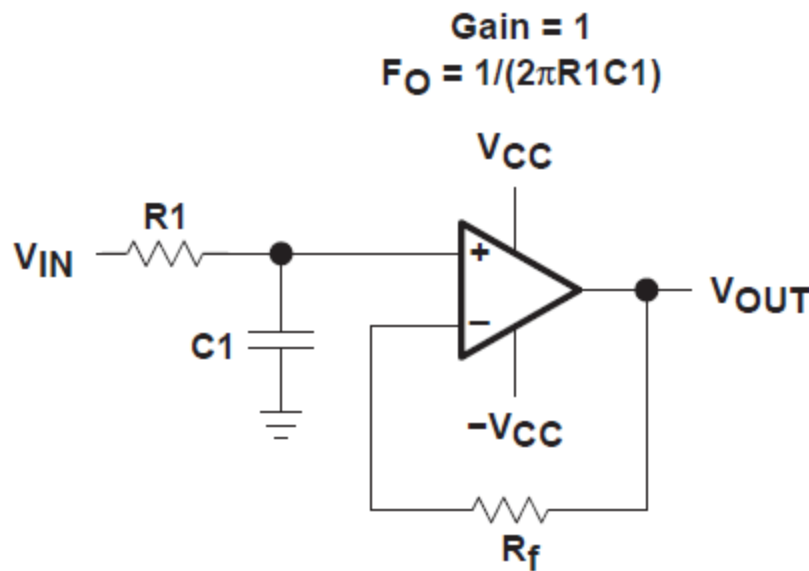
- Operacioni pojačavač sa strujnom povratnom spregom može se koristiti za realizaciju aktivnih filtara uz sledeća ograničenja:
 - Nije dozvoljeno povezati izlaz i invertujući ulaz kondenzatorom
 - Otpornik koji povezuje invertujući ulaz i izlaz mora da ima tačno definisanu vrednost
- Sva kola aktivnih filtara sa standardnim operacionim pojačavačima koja zadovoljavaju gornje kriterijume mogu se koristiti i za realizaciju filtara sa CFA.



Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Aktivni filtri

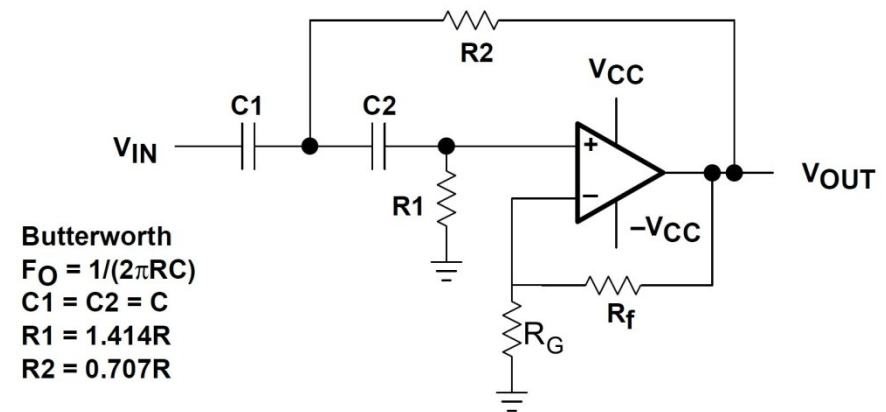
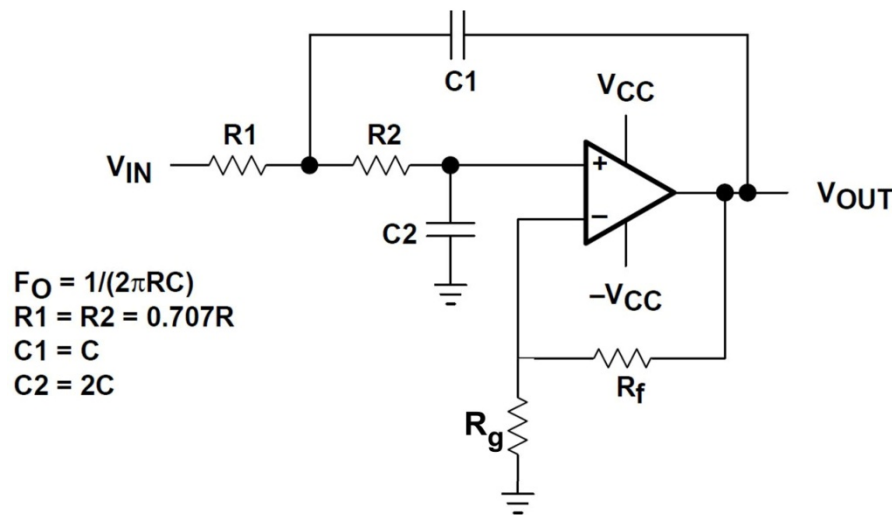
- Praktično sve filterske funkcije se mogu realizovati primenom CFA izuzev propusnika opsega sa velikom vrednošću Q faktora.
- Na slici su filtri sa jednostrukim polom i jediničnim nominalnim pojačanjem.



Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Aktivni filtri

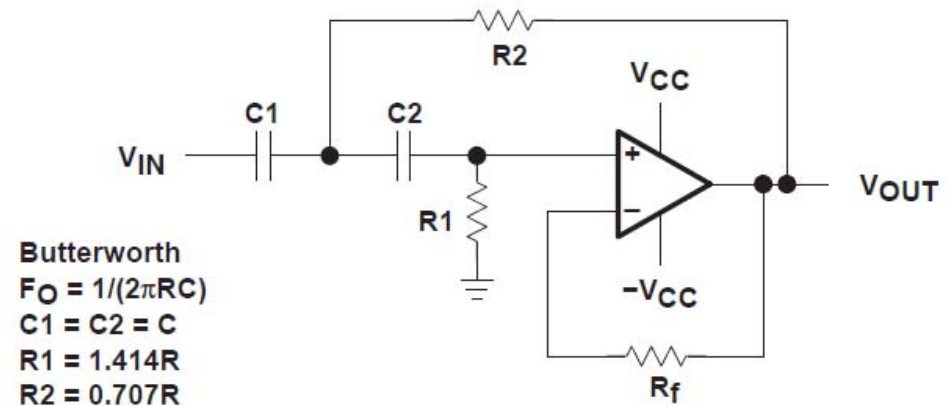
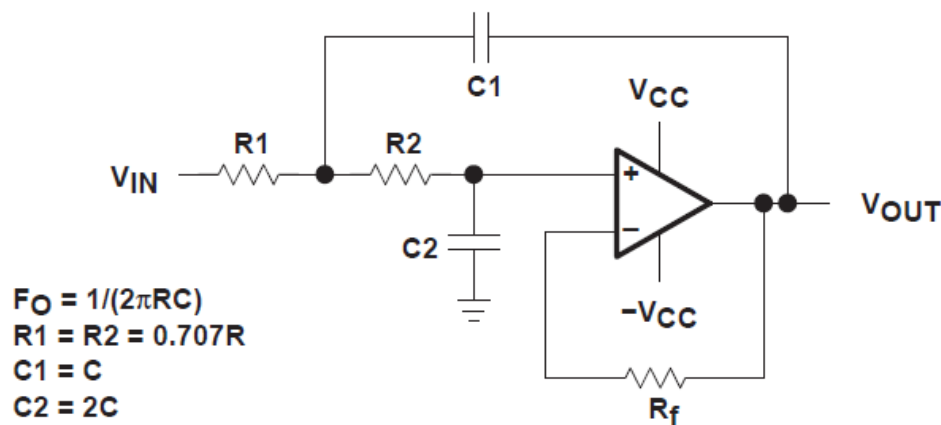
- Neinvertujuća Sallen-Key topologija aktivnog filtra je pogodna za realizaciju sa CFA. Na slici levo je NF filter, a na slici desno VF filter. Nominalno pojačanje filtra (pojačanje u propusnom opsegu) se reguliše otpornikom R_G između izlaza i mase.



Primene transimpedansnih operacionih pojačavača

Aktivni filtri

- Kada se realizuje filter čije je nominalno pojačanje jednako 1, kod standardnog operacionog pojačavača povezuju se izlaz i invertujući ulaz. Ukoliko se za realizaciju filtra koristi transimpedansi operacioni pojačavač to nije moguće pa se pa se umesto toga između invertujućeg ulaza i izlaza vezuje otpornik R_f preporučene vrednosti.



Operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom

Osnovna pitanja

1. Odlike transimpedansnog operacionog pojačavača i struktura transimpedansnog operacionog pojačavača (2,3).
2. Karakteristike idealnog transimpedansnog operacionog pojačavača, model CFA (4,5).

Ostala pitanja

3. Šta je naponski bafer i čemu služi. Naponski bafer primenjen u CFA (10,11).
4. Poređenje standardnog operacionog pojačavača i pojačavača sa strujnom povratnom spregom (12,13,14,15).
5. Prenosna funkcija CFA bez povratne sprege (19).
6. Frekvencijska zavisnost kružno pojačanje kola sa CFA (20,21,22).
7. Uticaj izlazne impedanse ulaznog bafera na koeficijent povratne sprege (23,24).
8. Stabilnost kola sa CFA (25,26)
9. Granička frekvencija kola sa CFA (30,31,32)
10. Povezivanje CFA koje obezbeđuje stabilnost kola (33,34,35).