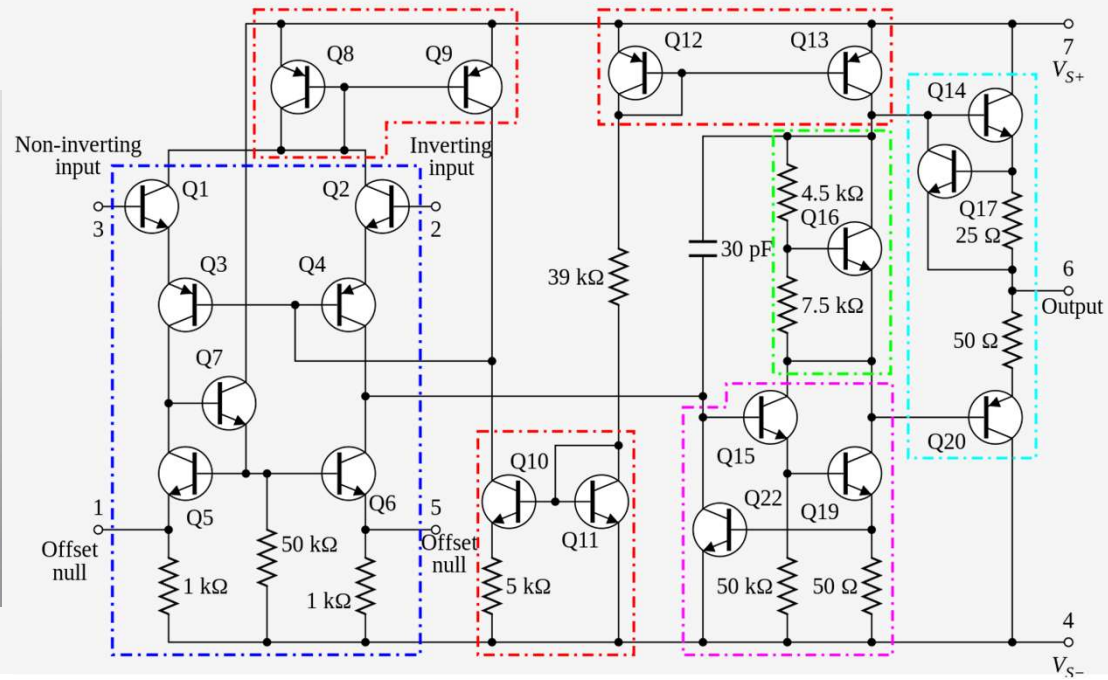
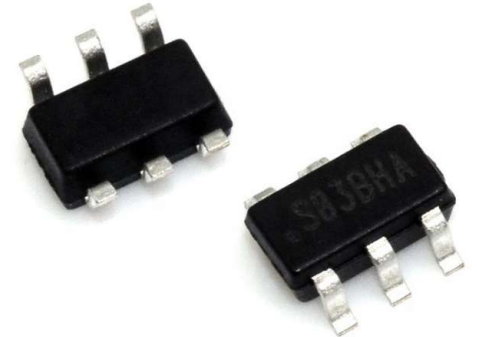
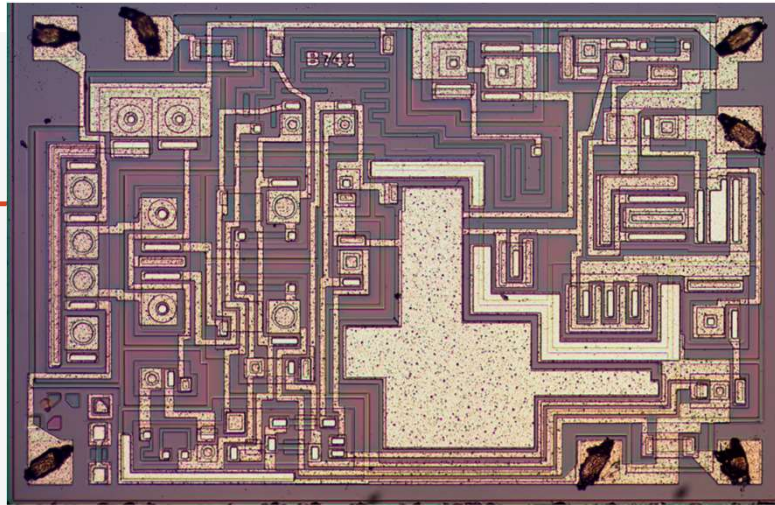
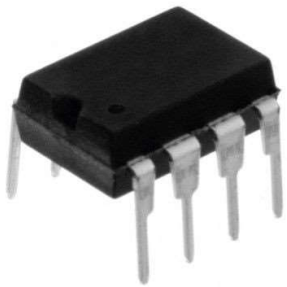


OSNOVE BIOMEDICINSKOG INŽENJERSTVA

OPERACIONI POJAČAVAČI

Uvod



Operacioni pojačavač – princip rada

V^+ - Neinvertujući ulaz

$$V_{OUT} = A_0(V^+ - V^-)$$

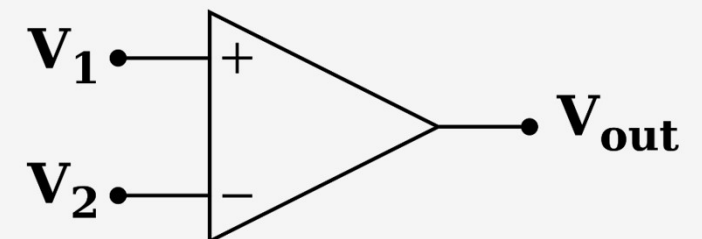
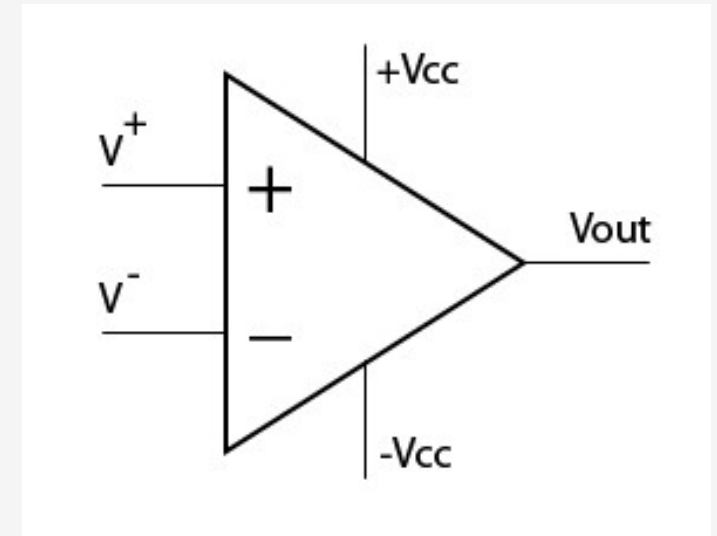
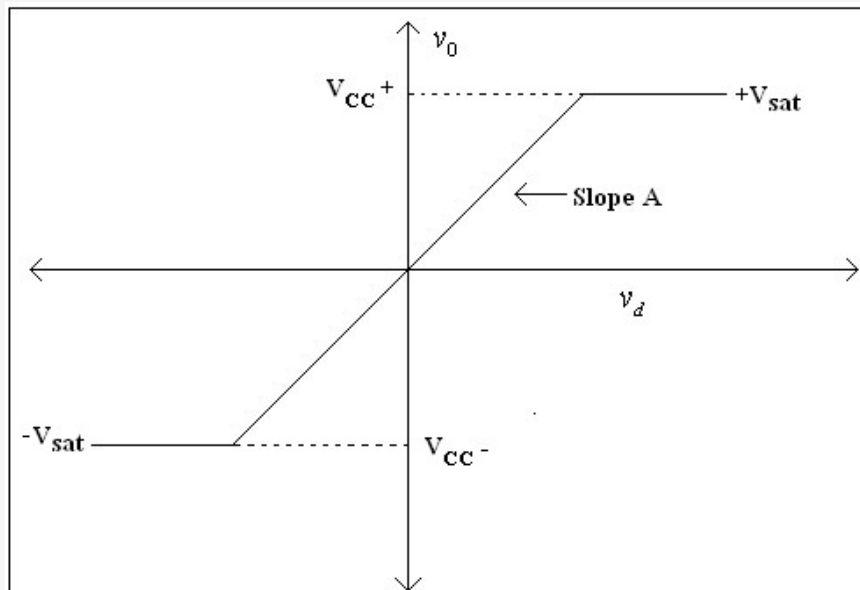
V^- - Invertujući ulaz

V_{OUT} - Izlaz

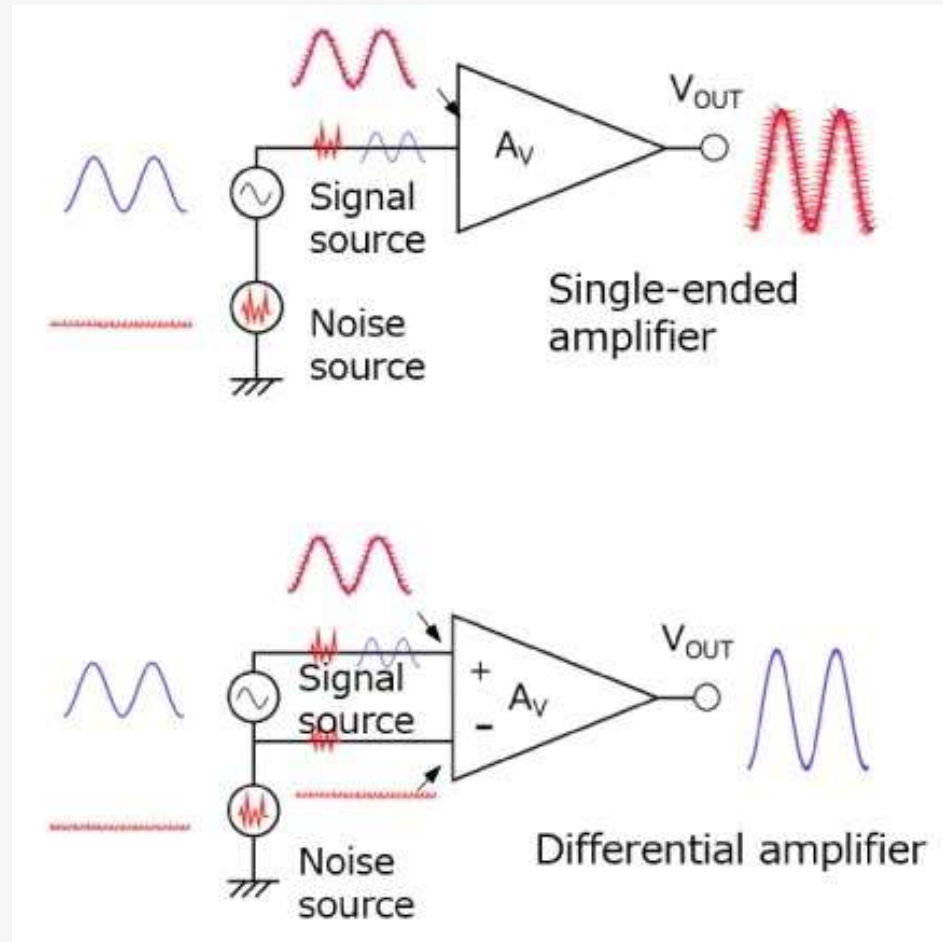
$$V_{OUT} = A_0(V^+ - V^-) + A_c \frac{V^+ + V^-}{2}$$

+Vcc – Pozitivno napajanje

-Vcc – Negativno napajanje



Diferencijalni signal / signal zajedničkog moda

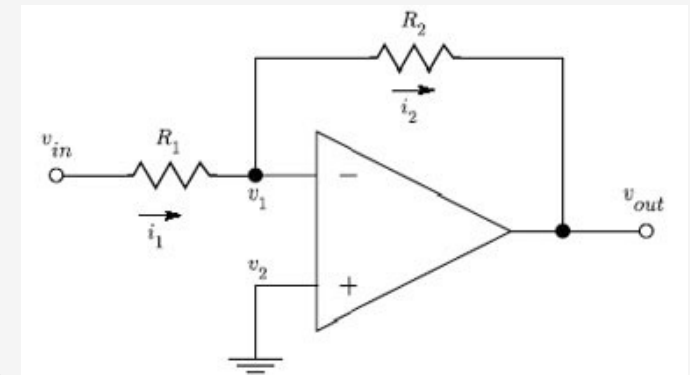


Parametri operacionog pojačavača

Parametar	Vrednost idealni OP	Vrednost realni OP	Jedinica
Pojačanje u otvorenoj povratnoj sprezi - A_0	Beskonačno	$10^6 - 10^8$	V/V ili dB
Proizvod pojačanja u otvorenoj povratnoj sprezi i propusnog opsega - GBP	Beskonačno	100kHz – 100MHz	Hz
Struja polarizacije - I_b	Nula	1pA – 100uA	A
Naponski ofset - V_{os}	Nula	10nV – 10mV	V
Faktor potiskivanja signala zajedničkog moda - CMRR	Beskonačno	70dB – 140dB	dB
Ulazna impedansa za signal zajedničkog moda – Z_c	Beskonačno	10MΩ – 1GΩ	Ω
Ulazna impedansa za signal diferencijalnog moda - Z_d	Beskonačno	10MΩ – 1GΩ	Ω
Izlazna impedansa - Z_o	Nula	1Ω – 1kΩ	Ω

Invertujući pojačavač – Upotrebljeni operacioni pojačavač je idealan

Zbog postojanja negativne povratne sprege i bekonačno velikog pojačanja u otvorenoj povratnoj sprezi, možemo da kažemo da Invertujući ulaz prati neinvertujući ulaz. To znači da ako je neinvertujući ulaz na masi, tada za invertujući ulaz kažemo da je na virtuelnoj masi.



Analizom poslednje jednačine možemo da primetimo da je signal na izlazu invertovan u odnosu na signal na ulazu i da je pomnožen koeficijentom A. Pošto je koeficijent A jednak odnosu otpornosti otpornika u povratnoj sprezi operacionog pojačavača i otpornosti otpornika na ulazu, možemo da zaključimo:

$$i_1 = i_2$$

$$i_1 = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$i_2 = -\frac{V_{out}}{R_2}$$

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

$$V_{out} = -A \cdot V_{in}$$

1. $R_2 > R_1 \Rightarrow A > 1$ – Pojačavamo ulazni signal
2. $R_2 = R_1 \Rightarrow A = 1$ – Invertujemo ulazni signal
3. $R_2 < R_1 \Rightarrow A < 1$ – Slabimo ulazni signal

Koja je svrha operacionog pojačavača u posmatranoj konfiguraciji i kako smo pojačali ulazni signal, ako ne vidimo uticaj rada operacionog pojačavača?

Uticaj pojačanja u otvorenoj povratnoj sprezi na rad invertujućeg pojačavača

Polazimo od osnovne jednačine opisa rada operacionog pojačavača: $V_{OUT} = A_0(V^+ - V^-)$
Analizom električne šeme invertujućeg pojačavača, možemo da izrazimo vrednosti potencijala na Invertujućem i neinvertujućem ulazu pojačavača kao:

$$V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

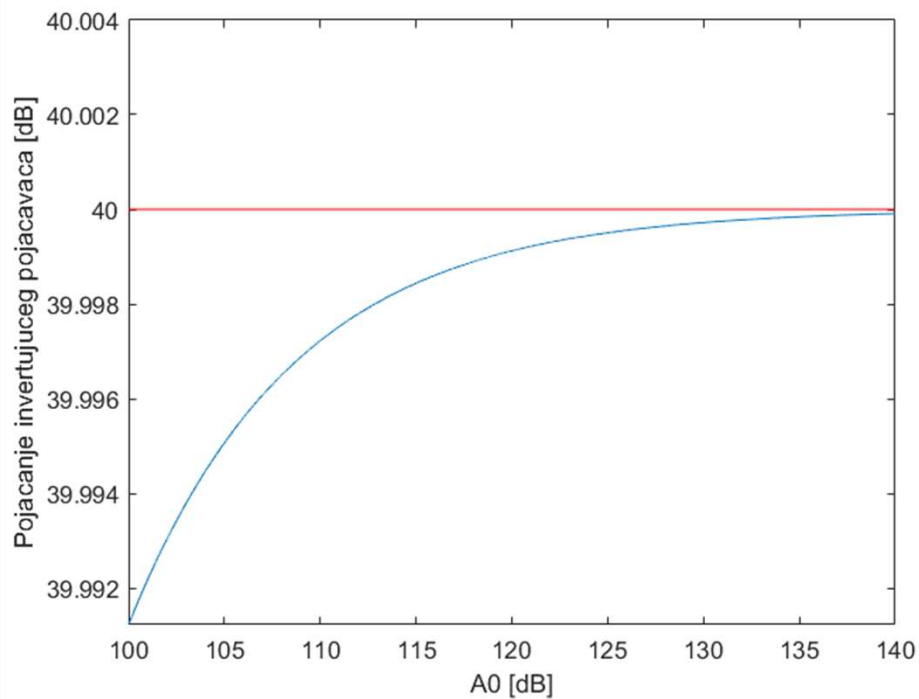
Ubacivanjem prethodne dve jednačine u jednačinu opisa rada operacionog pojačavača i njihovim sredjivanjem, dobijamo:

$$V_{out} = - \frac{R_2}{R_1 \left(1 + \frac{1}{A_0} \right) + \frac{R_2}{A_0}} V_{in}$$

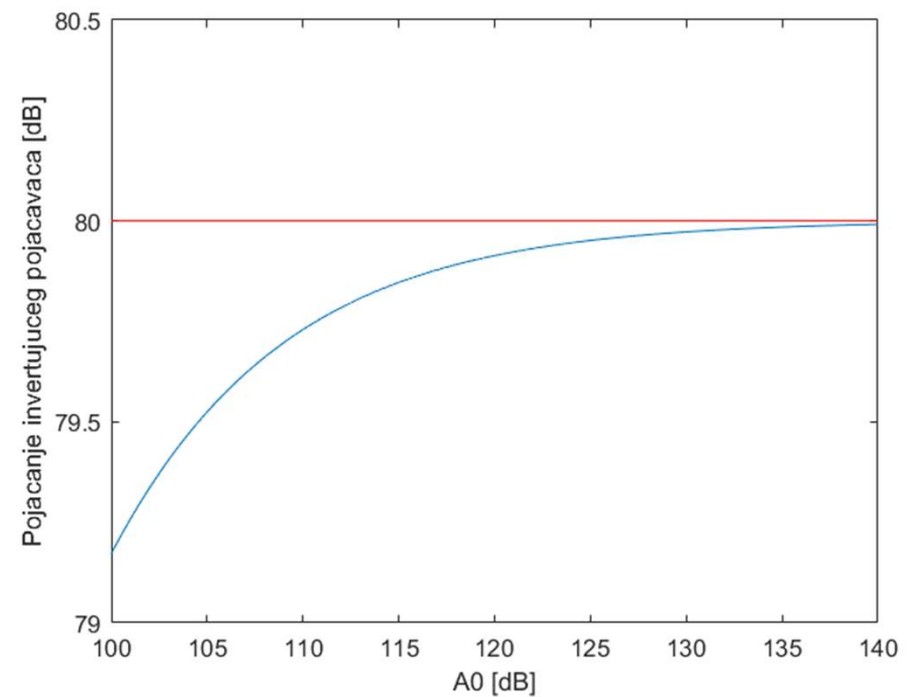
Analizom poslednje jednačine možemo da zaključimo da ako pojačanje u otvorenoj povratnoj sprezi teži ka beskonačno, cela jednačina dobija oblik jednačine koja opisuje rad invertujućeg pojačavača kada je upotrebljeni operacioni pojačavač idealan.

Uticaj pojačanja u otvorenoj povratnoj sprezi na rad invertujućeg pojačavača - Primer

$R1 = 1\text{K}\Omega$
 $R2 = 100\text{K}\Omega$
 $A_o = 100\text{dB} - 140\text{dB}$



$R1 = 10\Omega$
 $R2 = 100\text{K}\Omega$
 $A_o = 100\text{dB} - 140\text{dB}$



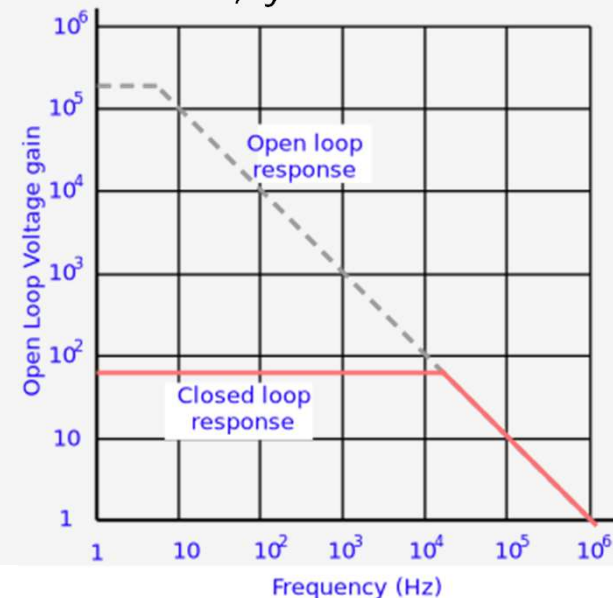
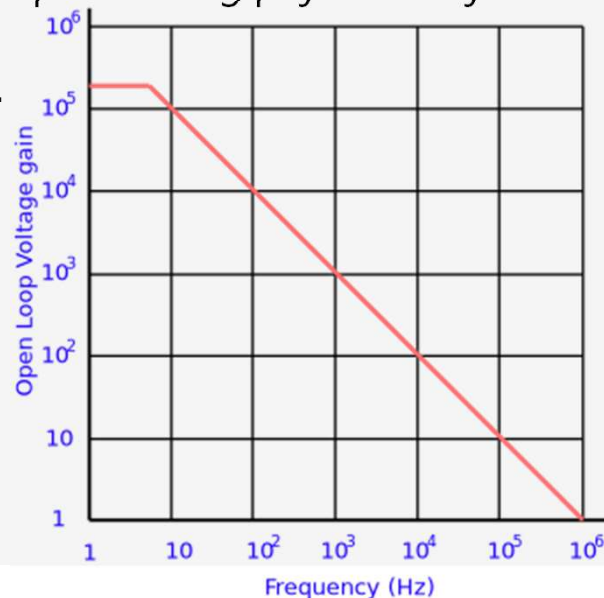
Proizvod pojačanja u otvorenoj povratnoj sprezi i propusnog opsega – GBP (*Gain Bandwidth Product*)

Operacioni pojačavač svojom strukturom može da se modeluje kao sistem prvog reda, tj. pomoću osnovnih Parametara kao što su pojačanje u otvorenoj povratnoj prezi i propusni opseg. Na osnovu ovoga možemo da kažemo da je funkcija prenosa operacionog pojačavača data sa:

$$G_{OP}(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_g}} = \frac{V_{out}}{V^+ - V^-} \quad \text{gde je } \omega_g = 2\pi f_g$$

Granična učestanost f_g operacionog pojačavača je određena parametrom GBP, tj.:

$$GBP = A_0 \cdot f_g = \text{const.}$$



Uticaj GBP parametra na rad invertujućeg pojačavača

Zamenom vrednosti za invertujući i neinvertujući ulaz operaciog pojačavača u funkciju prenosa i njenim Sredjivanjem dobijamo:

$$V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

$$G_{OP}(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}} = \frac{V_{out}}{V^+ - V^-}$$

$$G_{INV}(j\omega) = - \frac{R_2}{R_1 \left(1 + \frac{1}{A_0}\right) + \frac{R_2}{A_0}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1(1 + A_0) + R_2}}$$

Gde je pojačanje invertujućeg pojačavača određeno sa:

$$A_{INV} = \frac{R_2}{R_1 \left(1 + \frac{1}{A_0}\right) + \frac{R_2}{A_0}}$$

Propusni opseg invertujućeg pojačavača je određen sa:

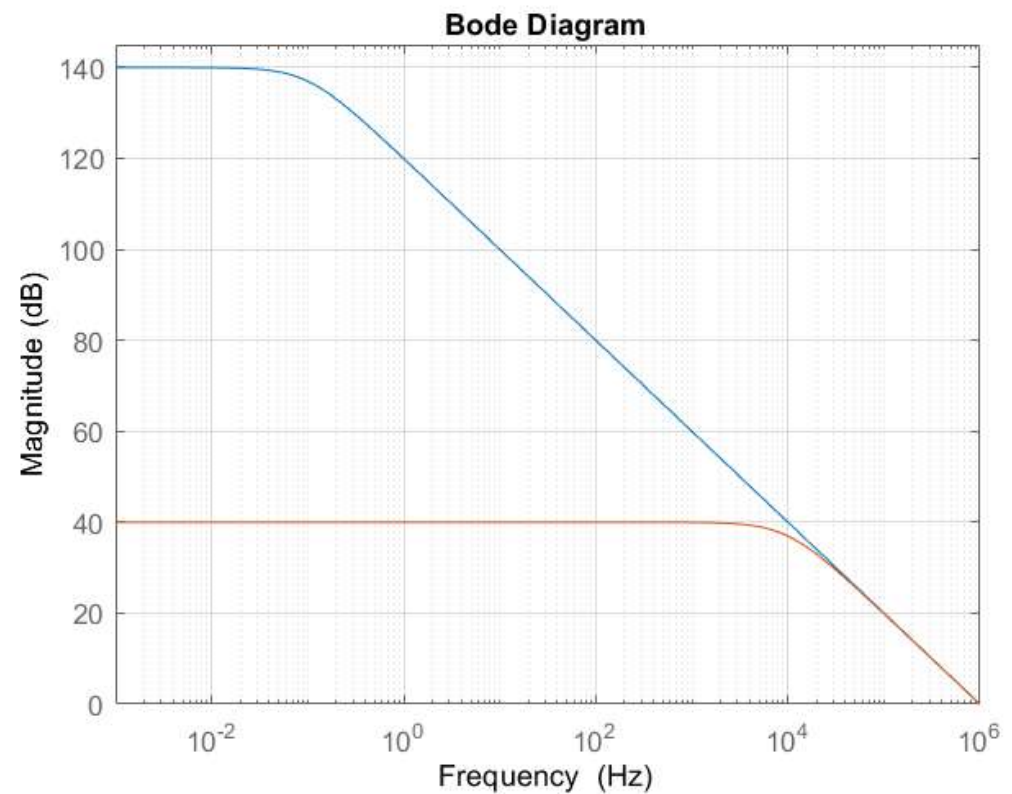
$$\omega_{ginv} = \omega_g \cdot \frac{R_1(1 + A_0) + R_2}{R_1 + R_2}$$

Uticaj GBP parametra na rad invertujućeg pojačavača - primer

$R1 = 1\text{K}\Omega$
 $R2 = 100\text{K}\Omega$
 $\text{GBP} = 1\text{MHz}$
 $A0 = 140\text{dB}$

Plavi dijagram predstavlja Bodeovu amplitudsku karakteristiku operacionog pojačavača.

Crveni dijagram predstavlja Bodeovu amplitudsku karakteristiku invertujućeg pojačavača, kada je upotrebljen operacioni pojačavač sa datim karakteristikama.



Struja polarizacije

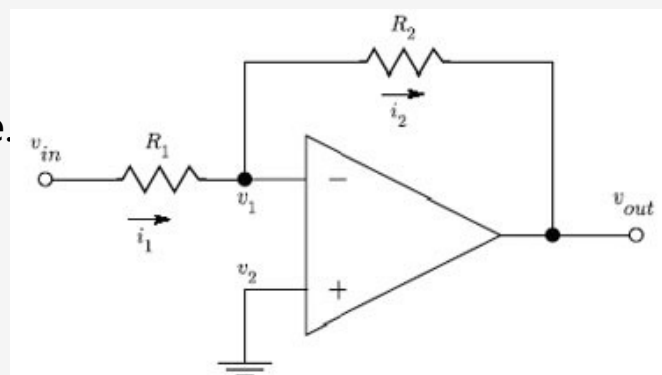
Ulazni stepen operacionog pojačavača predstavljaju baze tranzistora. Da bi se pobudili ulazni tranzistori i da bi radili u mirnoj radnoj tački, neophodno je obezbediti odgovarajuće struje baza ulaznih tranzistora koje se nazivaju struje polarizacije. Uticaj struje polarizacije na rad neke konfiguracije je najjednostavnije pokazati na primeru invertujućeg pojačavača.

Struja I_2 pojačavača sa slike je jednaka zbiru struje I_1 i struje polarizacije. Na osnovu toga možemo da napišemo sledeće:

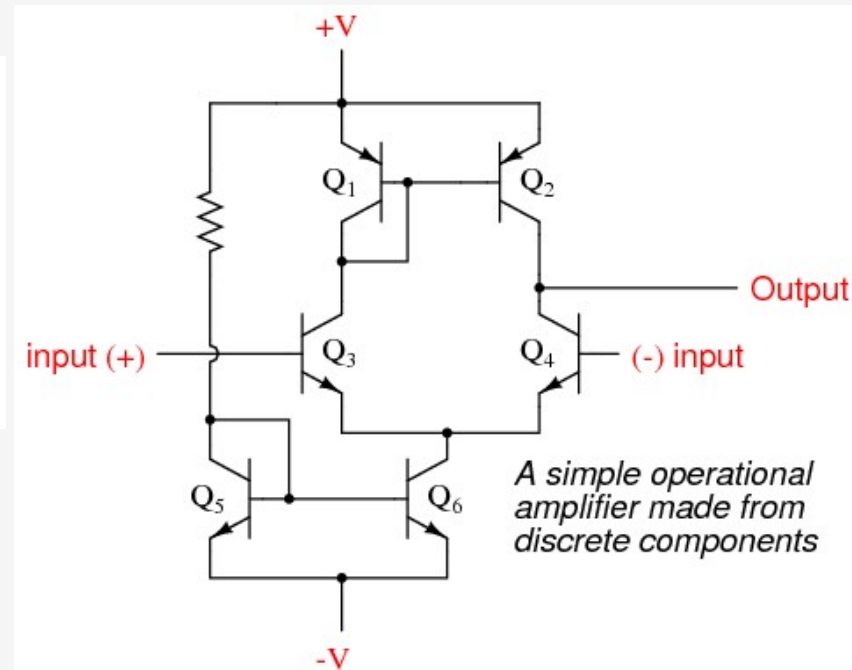
$$i_2 = i_1 + i_b$$

$$i_1 = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$i_2 = -\frac{V_{out}}{R_2}$$



$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} - R_2 \cdot i_b$$



Struja polarizacije

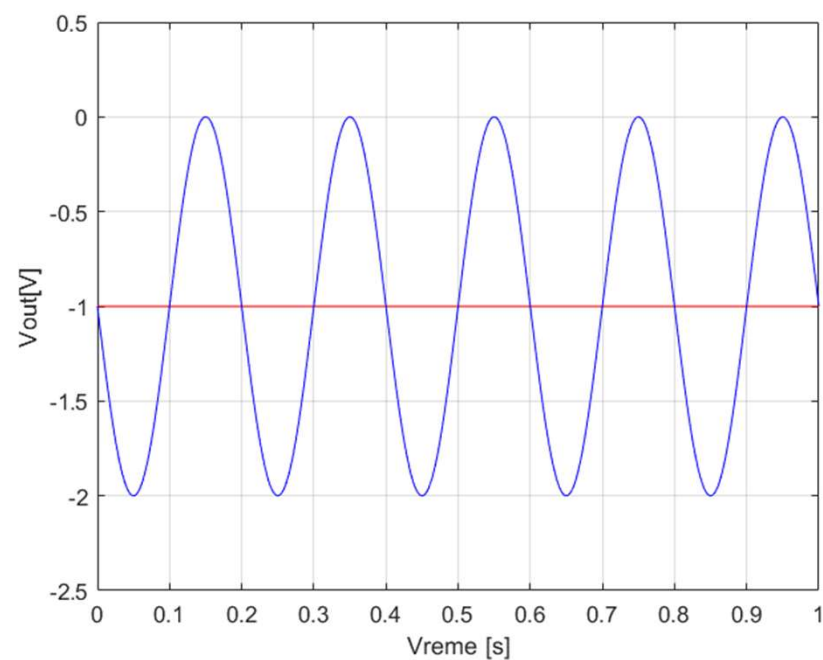
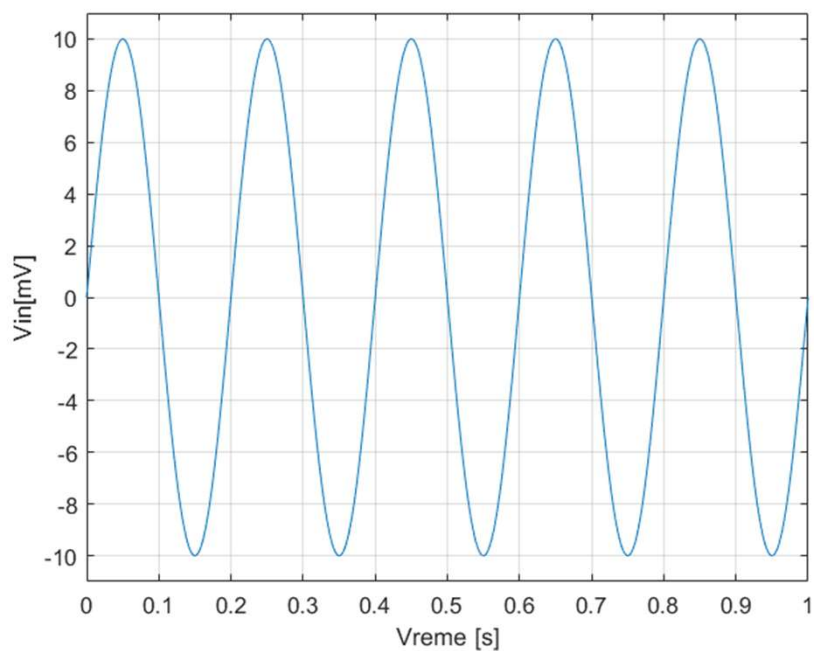
$R1 = 1\text{K}\Omega$

$R2 = 100\text{K}\Omega$

$i_b = 10\mu\text{A}$

$V_{in} = 10\text{mV} * \sin(10 * \pi * t)$

Struja polarizacije smanjuje dinamički opseg pada pojačavača!!!!



Eliminacija uticaja struje polarizacije na rad invertujućeg pojačavača

$$I_1 = \frac{V_i - V^-}{R_1} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{V^- - V_o}{R_2} \quad (2)$$

$$I_B = \frac{0 - V^+}{R_3}$$

$$V^+ = V^- \Rightarrow I_B = -\frac{V^-}{R_3} \Rightarrow V^- = -R_3 \cdot I_B \quad (3)$$

$$I_1 = I_B + I_2 \quad (4)$$

(3) ubacimo u (1) i (2), pa onda (1) i (2) u (4).

$$\frac{V_i + R_3 \cdot I_B}{R_1} = I_B + \frac{-R_3 \cdot I_B - V_o}{R_2} \quad / R_1 \cdot R_2$$

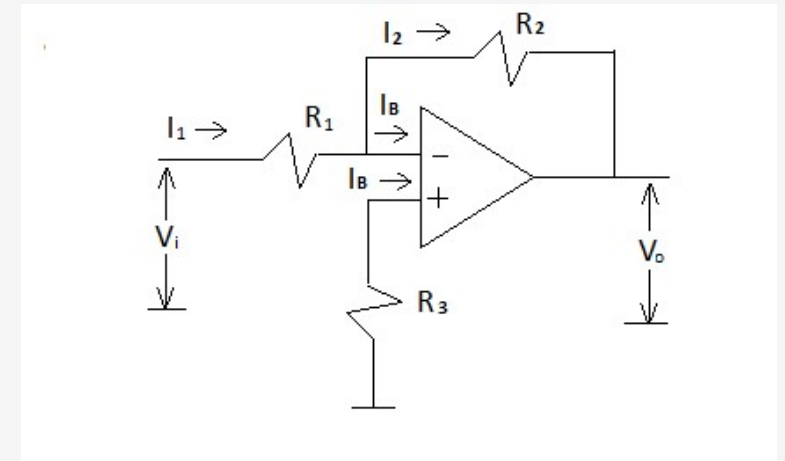
$$V_i \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 \cdot I_B = I_B \cdot R_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_3 \cdot I_B - V_o \cdot R_1 \quad / : R_1$$

$$V_o = I_B \cdot R_2 - I_B \cdot R_3 - V_i \cdot \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i + I_B \cdot (R_2 - R_3 - \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1})$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i + I_B \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

da bismo izbacili uticaj struje I_B treba da vazi $R_1 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_3 = 0 \Rightarrow$



$$R_3(R_1 + R_2) = R_1 \cdot R_2, \quad R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

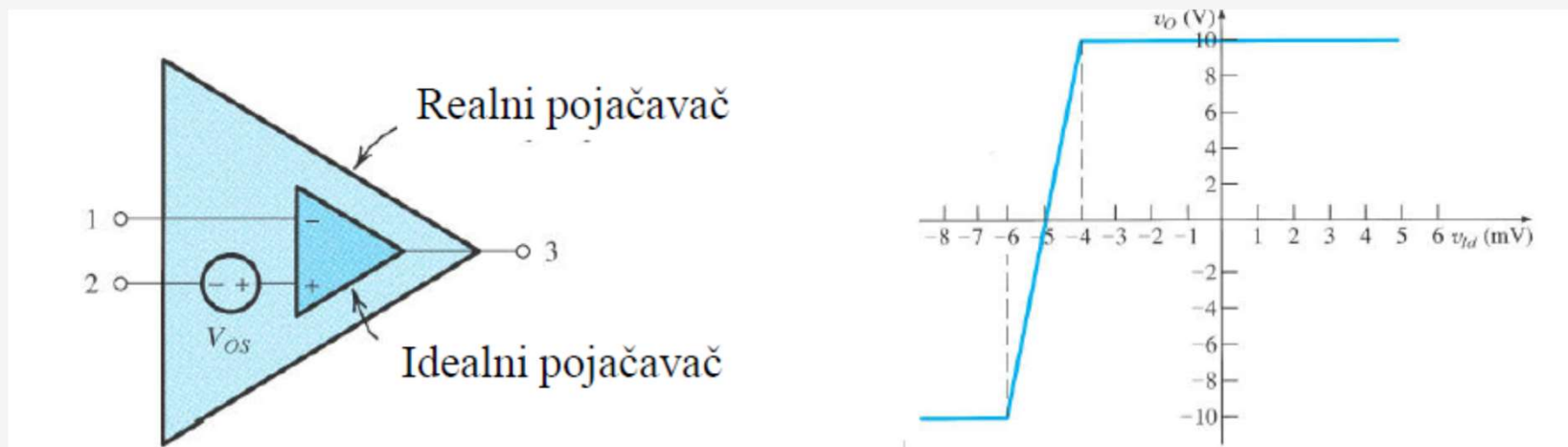
Otpornik R_3 treba da bude paralelna veza otpornika R_1 i R_2

Naponski ofset- ulazna naponska razdešenost

Definicija: Napon koji treba dovesti između ulaznih priključaka operacionog pojačavača da bi napon na izlazu bio jednak nula.

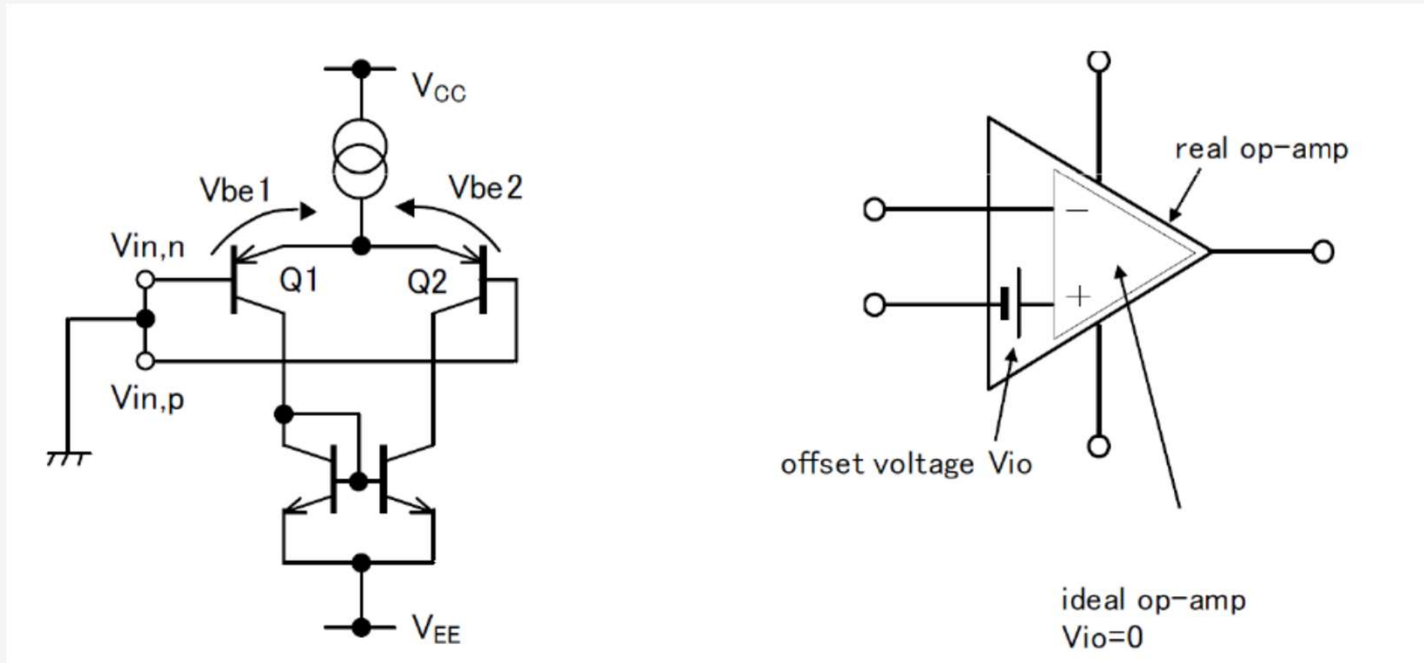
Uzrok: Ovo je posledica ulaznog pojačavača (diferencijalnog pojačavača). Kada se ulazi kratkospoje, napon na izlazu **nije jednak nuli**.

Modeliranje: **Naponski** ofset modelira se jednosmernim generatorom na invertujućem ili neinvertujućem ulazu.



Naponski ofset- ulazna naponska razdešenost

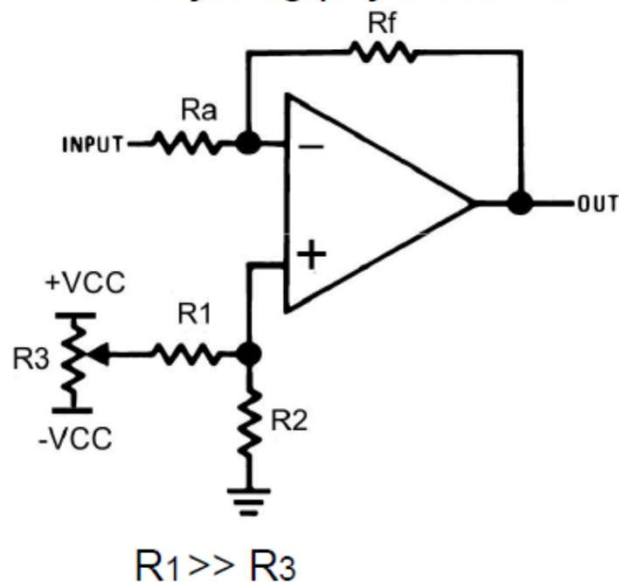
Naponski ofset je jednak **razlici** napona na emitorskim spojevima tranzistora u diferencijalnom **paru**:
$$V_{io} = V_{be1} - V_{be2}$$



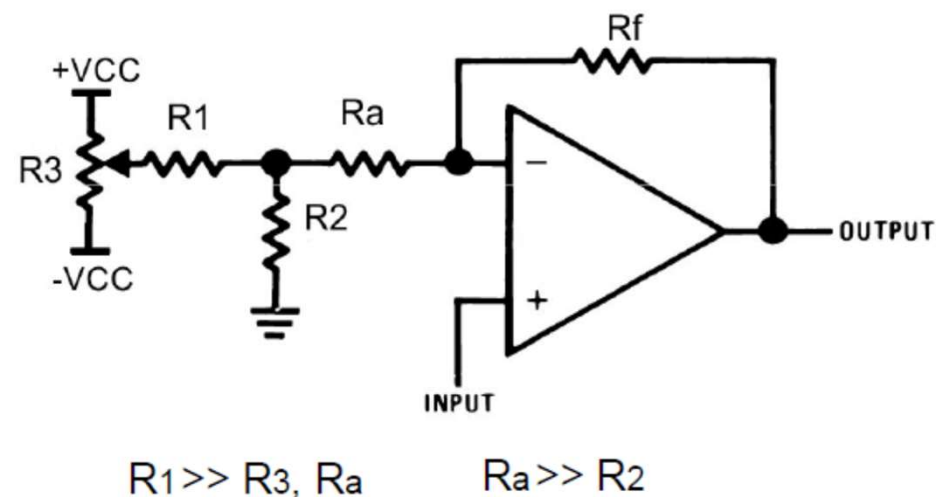
Naponski ofset- ulazna naponska razdešenost

Spoljašnja kompenzacija

Spoljašnja kompenzacija Invertujućeg pojačavača



Spoljašnja kompenzacija neinvertujućeg pojačavača



R_2 treba da ima malu vrednost, desetak oma, da promena otpornosti potencijometra nebi uticala na otpornost izmedju ulaza i mase. Iz istog razloga R_1 treba da bude što veće.

Faktor potiskivanja signala zajedničkog moda

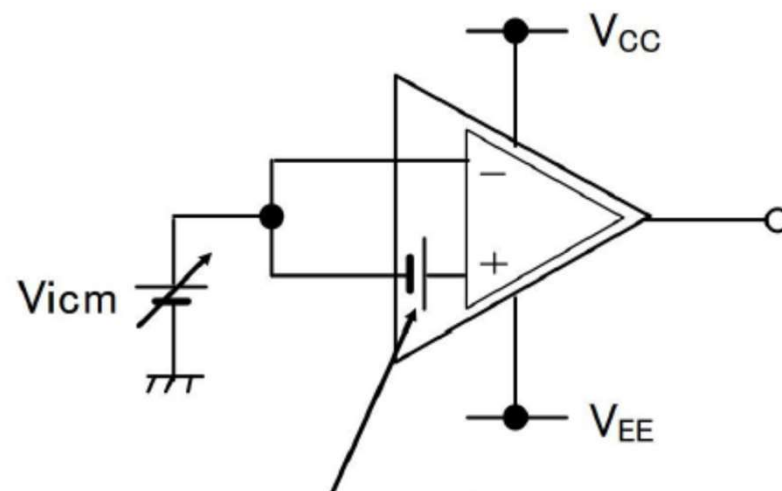
- **Definicija:** Faktor potiskivanja predstavlja odnos diferencijalnog pojačanja i pojačanja srednje vrednosti

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

- **Značenje:** CMRR predstavlja odnos promene srednje vrednosti signala na ulazu ΔV_{icm} i varijacija naponskog ofseta koja ona prouzrokuje.

$$CMRR = \frac{\Delta V_{iCM}}{\Delta V_{io}}$$

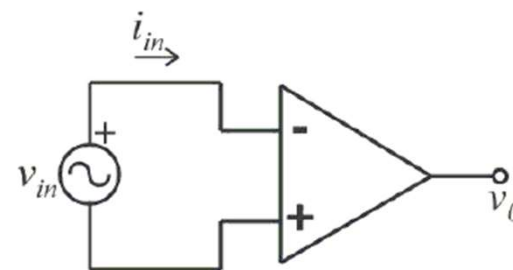
- **Uzrok:** Usled promene srednje vrednosti signala na ulazu menjaju se radne tačke ulaznog diferencijalnog para. Ova promena radnih tačaka odražava se na promenu naponskog ofseta.



Kada se menja V_{icm}
menja se i V_{io}

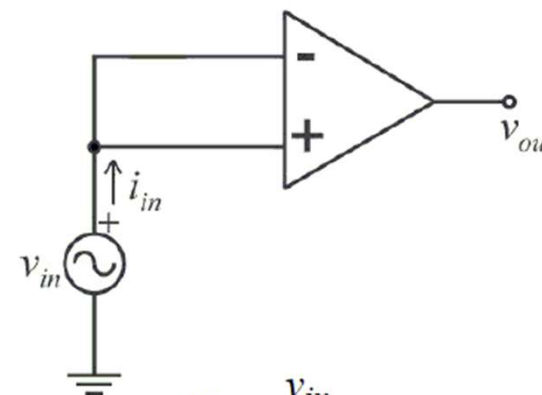
Ulazna impedansa

▪ **Diferencijalna ulazna impedansa, R_{id} ,** se meri kao odnos napona i struje naizmeničnog naponskog generatora priključenog između ulaza operacionog pojačavača.



$$R_{id} = \frac{v_{in}}{i_d}$$

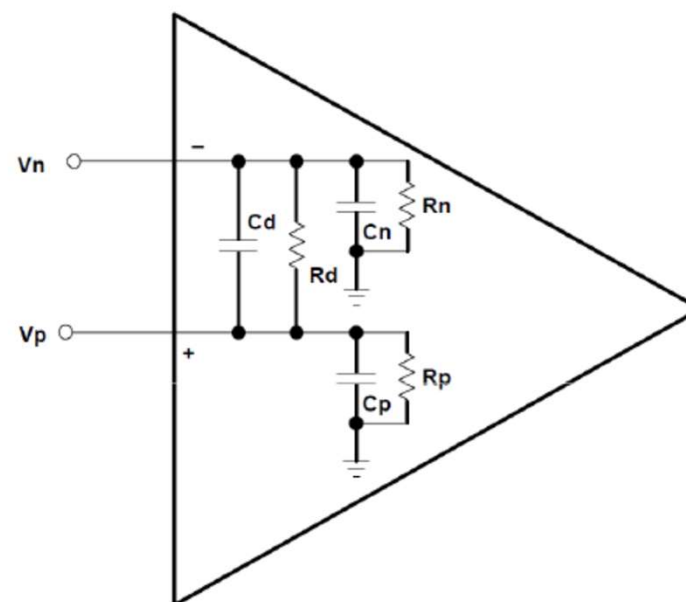
▪ **Ulazna impedansa za srednju vrednost signala, R_{ic} ,** se meri u kolu u kome se spoje ulazi operacionog pojačavača i između čvora spoja i referentnog čvora veže naizmenični naponski generator. Ulazna impedansa predstavlja odnos napona i struje na naponskom generatoru.



$$R_{ic} = \frac{v_{in}}{i_{CM}}$$

Ulazna impedansa

- Parazitne impedanse na oba ulaza se modeliraju sa po tri otpornosti i kapacitivnosti. Ulazna impedansa ima uticaj na kolo jedino kada je velika unutrašnja impedansa pobudnog generatora.
- Ulazna kapacitivnost je red pikofarada. Može da prouzrokuje umanjeње margine faze kada su otpornosti u povratnoj sprezi velike.
- Ulazna diferencijalna otpornost je reda 10^7 do 10^{12} oma. Uobičajeno je da se u katalogima navodi otpornost koja se vidi na jednom od priključaka kada je drugi kratkospojen. Ova otpornost je praktično jednaka diferencijalnoj otpornosti.

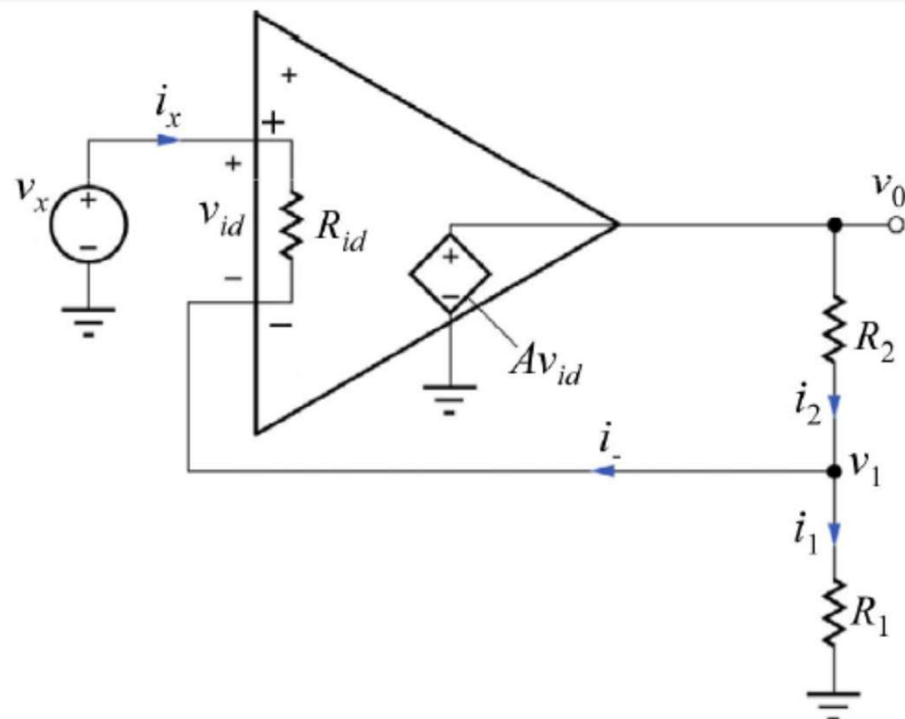


$$R_{id} = R_d \parallel (R_n + R_p)$$

$$R_{ic} = R_n \parallel R_p$$

Ulazna otpornost

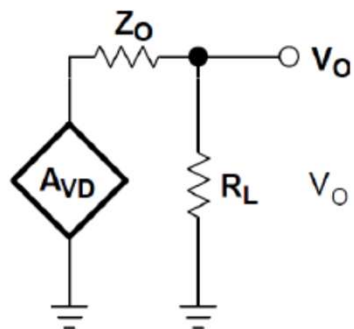
Pod dejstvom negativne povratne sprege, ulazna otpornost se povećava. Za kolo neinvertujućeg pojačavača ulazna otpornost se može približno odrediti kao proizvod ulazne diferencijalne otpornosti operacionog pojačavača i funkcije reakcije.



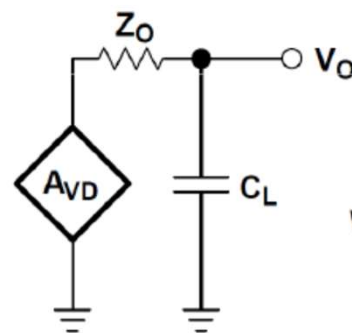
$$i_x = \frac{v_x - v_1}{R_{id}}$$
$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_0 = \beta \cdot v_0 = A \cdot \beta \cdot (v_x - v_1)$$
$$i_x = \frac{v_x - \frac{A \cdot \beta}{1 + A \cdot \beta} v_x}{R_{id}}$$
$$R_{in} = R_{id} (1 + A \beta)$$

Izlazna otpornost

- Tipična vrednost izlazne otpornosti O.P. je između 10Ω i 100Ω .
- Ukoliko je opterećenje kapacitivno javiće se dodatni fazni pomeraj koji deluje tako da smanjuje marginu faze.



$$V_O = A \cdot V_{in} \frac{R_L}{R_L + R_0}$$

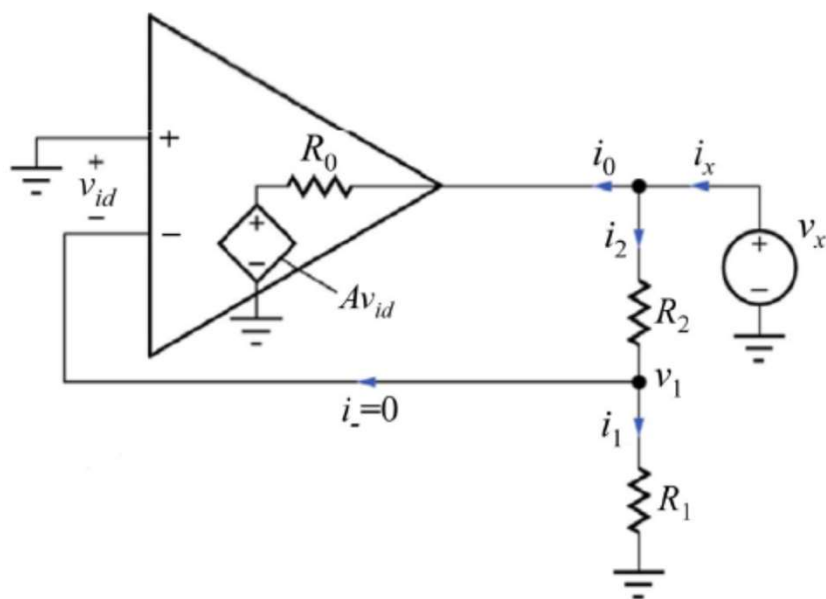


$$V_O = \frac{A \cdot V_{in}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R_0 C_L}$$

Izlazna otpornost

Pod dejstvom negativne povratne sprege, izlazna otpornost se smanjuje. Za kolo invertujućeg ili neinvertujućeg pojačavača ulazna otpornost se može približno odrediti kao količnik izlazne otpornosti operacionog pojačavača i funkcije reakcije.



$$i_x = \frac{v_x - A \cdot v_{ID}}{R_0} + \frac{v_x}{R_1 + R_2}$$

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_x = \beta \cdot v_x$$

$$\frac{1}{R_{out}} = \frac{i_x}{v_x} = \frac{1 + A\beta}{R_0} + \frac{1}{R_1 + R_2} \approx \frac{1 + A\beta}{R_0}$$