

Analogna elektronska kola

Analogna elektronska kola

Konsultacije:

ponedeljak, utorak, petak 12-13h kabinet 336

najbolje da se najavite preko e-mail adrese srdjan.djordjevic@elfak.ni.ac.rs

Materijali sa predavanja kao i sva obaveštenja biće objavljena na platformi msteams i na sajtu: leda.elfak.ni.ac.rs/education

Sadržaj predmeta Analogni elektronski kola su najznačajnije primene linearnih integriranih kola. Akcenat u predmetu je stavljen na specifičnim tipovima linearnih integriranih kola koja se ne obrađuju unutar drugih predmeta. Neki od ovih tipova integriranih kola su:

- instrumentacioni pojačavači,
- naponski komparatori,
- operacioni pojačavači sa strujnom povratnom spregom,
- operacioni transkonduktanski pojačavači,
- Nortnovi pojačavači,
- širokopojasni pojačavači,
- Integrirani oscilatori i frekvencijski generatori,
- integrirani stabilizatori napona,
- PLL kola.

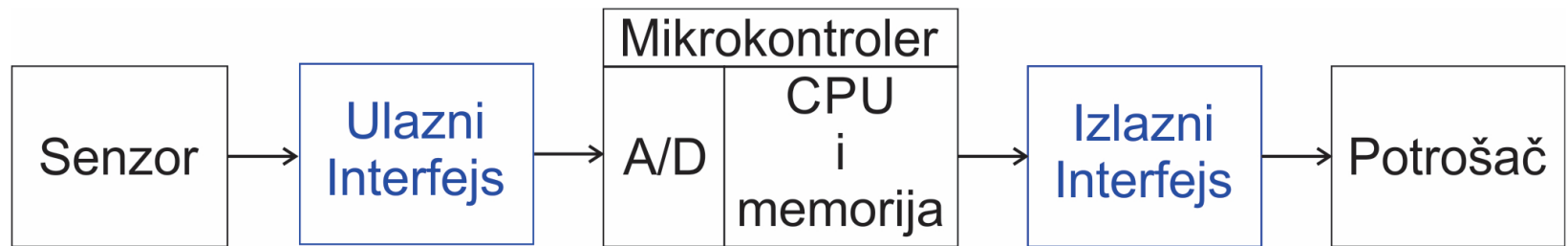
- **Cilj predmeta** je da studentima pruži osnovna znanja o načinu funkcionisanja specifičnih linearnih integrisanih kola na nivou blok šeme ili elektronske šeme, kao i da pruži uvid u najznačajnije primene konkretnog integrisanog kola.
- Poznavanje funkcionisanja i karakteristika integrisanih kola su znanja koja su neophodna za uspešno projektovanje kola i sistema koji imaju optimalne performansama u specifičnim primenama.

- Analogna elektronska kola
- Literatura:
 1. James M. Fiore, „Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits: Theory and Application Theory and Application“, 2020, ISBN 13: 978-1796856897.
 2. Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, „Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits“ Prentice Hall, 2001, ISBN 0130149918.
 3. D. Roy Choudhury, Shail B. Jain, “Linear Integrated Circuits“ New Age International, New Delhy, ISBN: 81-224-1470-2.
 4. Seminari, kataloški podaci i ostali materijali poznatih proizvođača integrisnaih kola (Texas Instruments, Analog devices).

Uvod

Zbog čega su bitna analogna kola ?

Analogna kola su neophodan deo sistem za akviziciju podataka, odnosno svuda gde se neka informacija obradjuje po prvi put.

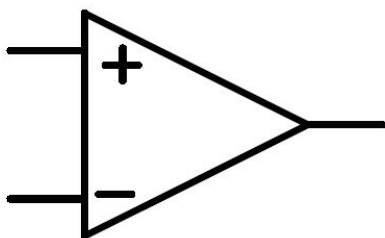


Analogna kola za kondicioniranje signala - obradu signala u oblik pogodan za A/D konverziju.

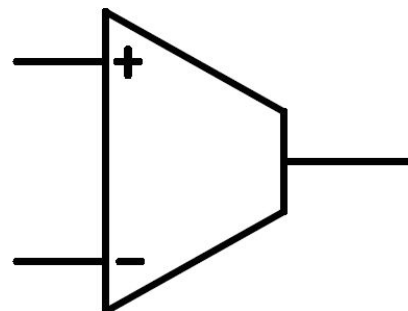
Analogna kola čija je funkcija:
1. Prilagođenje signala potrošaču
2 Izolacija između mikrokontrolera i visokonaponskih potrošača.

OPERACIONI POJAČAVAČ

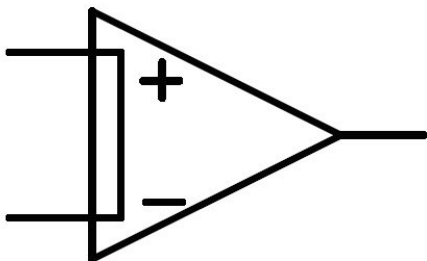
TIPOVI OPERACIONIH POJAČAVAČA



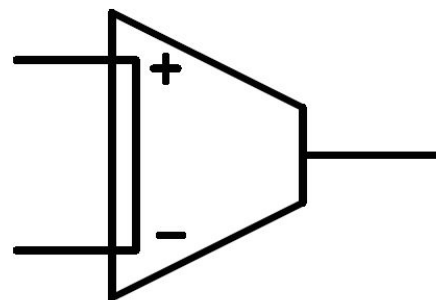
OPERACIONI NAPONSKI



TRANSKONDUKTANSNI

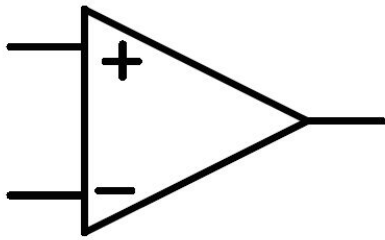


TRANSREZISTANSNI

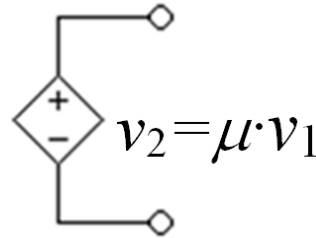
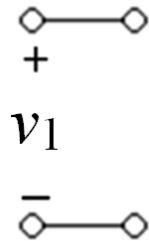


OPERACIONI STRUJNI

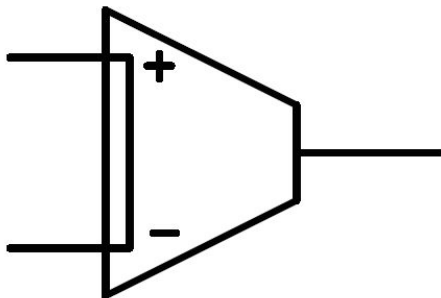
OPERACIONI POJAČAVAČ



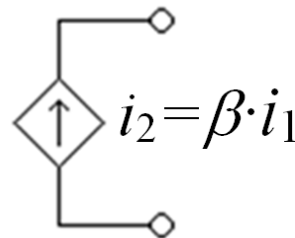
OPERACIONI NAPONSKI



Standardni operacioni pojačavač koji obavlja funkciju idealnog naponskog pojačavača (ulazna i izlazna otpornost imaju takve vrednosti da je pojačanje napona maksimalno, $R_{ul} \nearrow \infty$, $R_{iz} = 0$).

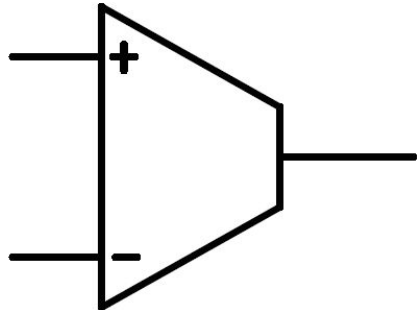


OPERACIONI STRUJNI

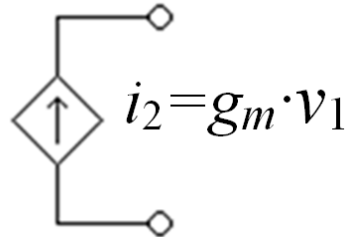
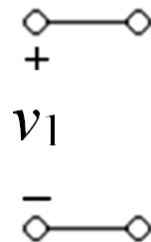


Operacioni strujni pojačavač obavlja funkciju idealnog strujnog pojačavača (ulazna i izlazna otpornost imaju takve vrednosti da je pojačanje struje maksimalno, $R_{ul} = 0$, $R_{iz} \nearrow \infty$).

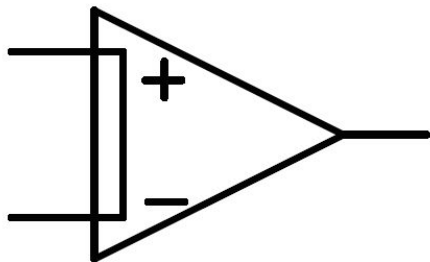
OPERACIONI POJAČAVAČ



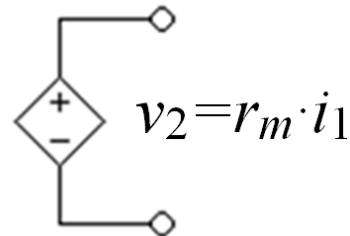
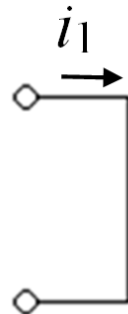
TRANSKONDUKTANSNI



Transkonduktanski operacioni pojačavač obavlja funkciju idealnog transkonduktanskog pojačavača ($R_{ul} \nearrow \infty$, $R_{iz} \nearrow \infty$).

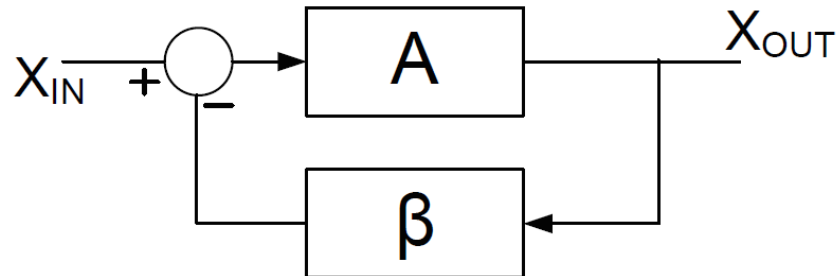


TRANSREZISTANSNI



Transrezistanski operacioni pojačavač koji obavlja funkciju idealnog transrezistanskog pojačavača ($R_{ul}=0$, $R_{iz} \nearrow \infty$).

OPERACIONI POJAČAVAČ

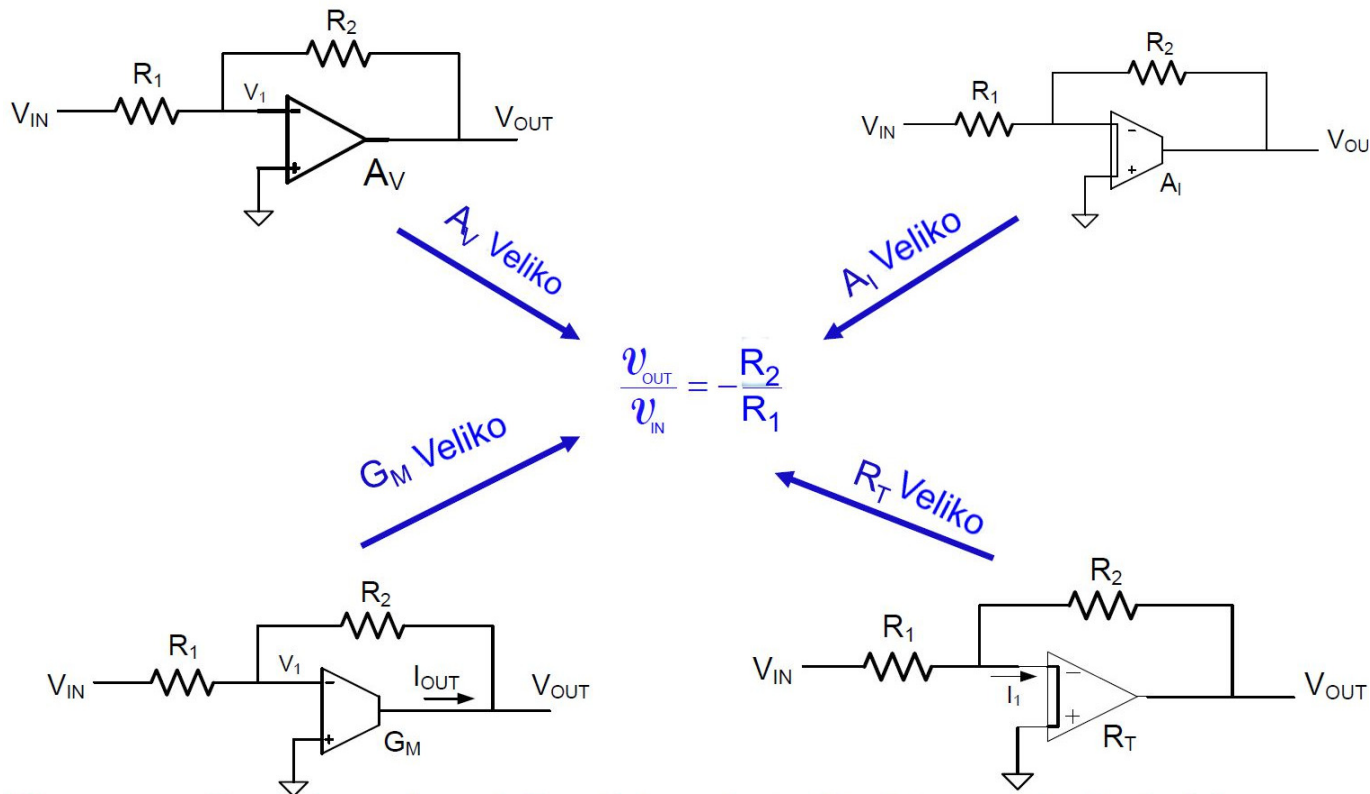


$$A_F = \frac{X_{OUT}}{X_{IN}} = \frac{A}{1+A\beta} \stackrel{A \rightarrow \infty}{\approx} \frac{1}{\beta}$$

ULAZNE I IZLAZNE VELIČINE		TIP POJAČAVAČA
X_{in}	X_{out}	A
V	V	NAPONSKI
V	I	TRANSKONDUKTANSNI
I	V	TRANSREZISTANSNI
I	I	STRUJNI

OPERACIONI POJAČAVAČ

Invertujući pojačavač realizovan sa četiri različita tipa operacionih pojačavača daje istu vrednost pojačanja koja ne zavisi od karakteristika pojačavača (pojačanje osnovnog pojačavača, ulazna otpornost, izlazna otpornost) niti od otpornosti potrošača.



OPERACIONI POJAČAVAČ

Koje su karakteristike bitne za operacioni pojačavač ?

$$A_r = \frac{1}{1 + A \cdot \beta} \approx \frac{1}{\beta}$$

VRLO VELIKO POJAČANJE !

1. Pojačanje A_r ne zavisi od varijacija u pojačanju osnovnog pojačavača A . Ovo je bitno jer su varijacije mnogo veće u poluprovodničkim komponentama.
2. Nelinearnosti osnovnog pojačavača imaju zanemariv uticaj na ukupno pojačanje A_r .
3. Propusni opseg pojačavača sa povratnom spregom, A_r , je znatno veći od propusnog opsega osnovnog pojačavača A .

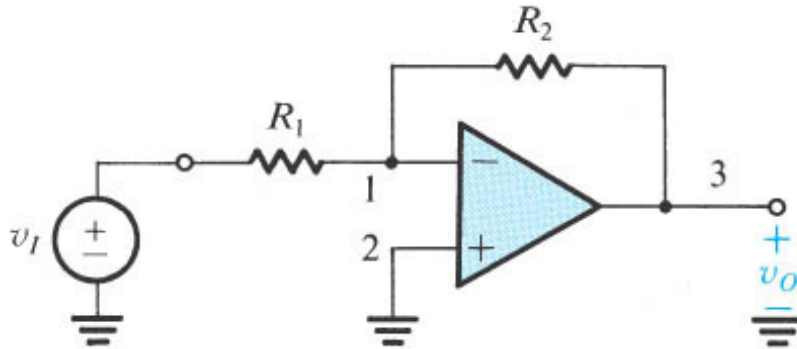
OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Sadržaj

Karakteristike realnog operacionog pojačavača

- a. Uticaj konačnog pojačanja
- b. Propusni opseg
- c. Ulazna naponska razdešenost
- d. Struje polarizacije i ulazna strujna razdešenost
- e. Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala
- f. Faktor potiskivanja napona napajanja
- g. Ulazna otpornost
- h. Izlazna otpornost
- i. Maksimalna brzina odziva (Slew rate)
- j. Maksimalni izlazni napon
- k. Maksimalna izlazna struja

Uticaj konačnog pojačanja u otvorenoj petlji na inverujući pojačavač



$\alpha \cdot v_{in}$ Komponenta signala koja se direktno prenosi od ulaza do ulaza osnovog pojačavača.

$\beta \cdot v_o$ Komponenta signala koja se prenosi od izlaza do ulaza osnovog pojačavača.

$$v_{12} = \alpha \cdot v_{in} + \beta \cdot v_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{in} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_o$$

$$v_o = -A \cdot v_{12}$$

$$\alpha = \left. \frac{v_{12}}{v_{in}} \right|_{v_o = 0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

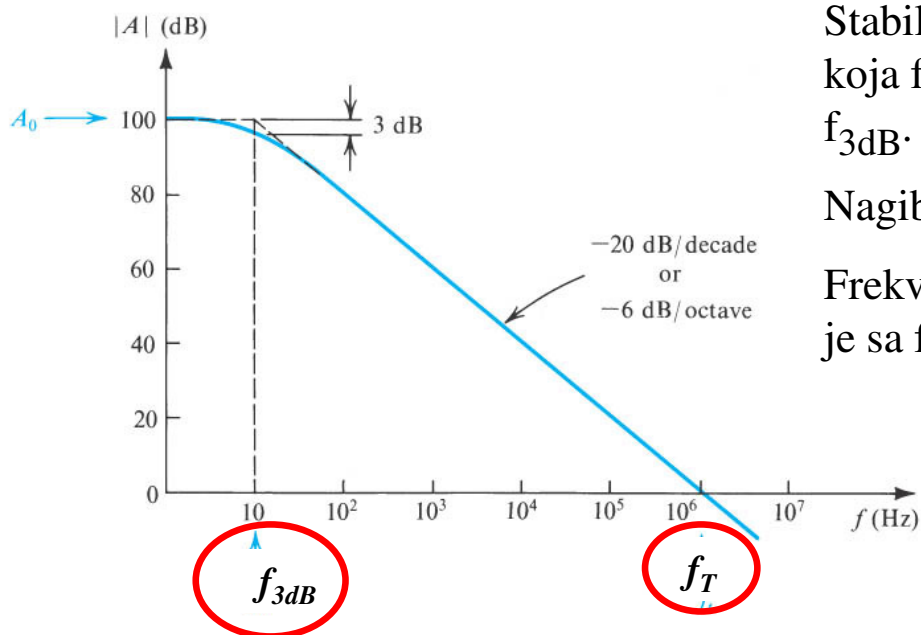
$$\beta = \left. \frac{v_{12}}{v_o} \right|_{v_{in} = 0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_r = \frac{v_o}{v_g} = \frac{-A_0 \cdot \alpha}{1 + A_0 \cdot \beta} = \frac{-A_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + A_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Efekat konačnog propusnog opsega

Realna amplitudska amplitudska karakteristika operacionog pojačavača 741



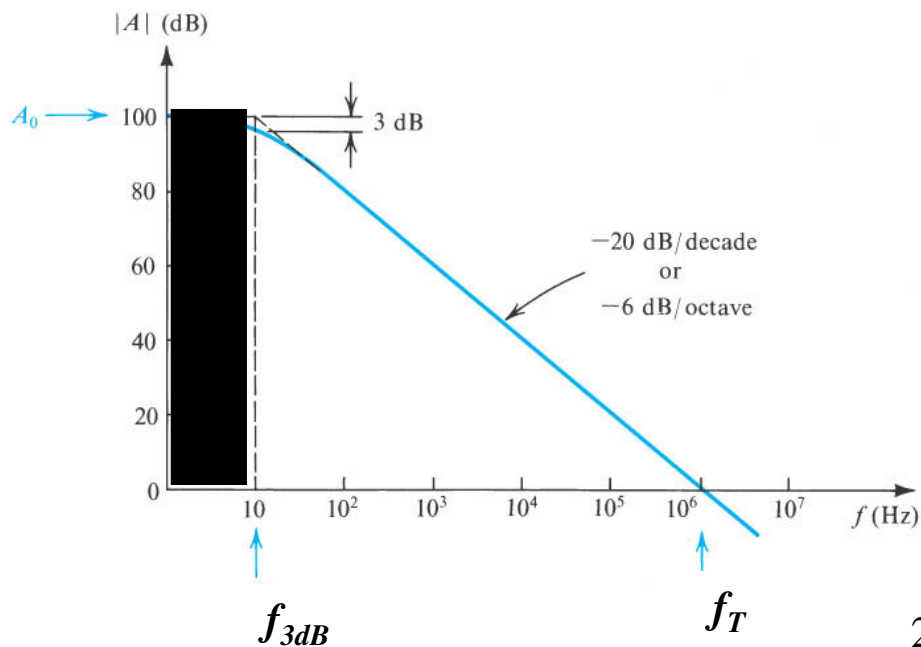
Stabilnost se postiže internom kompenzacijom koja formira jedan dominantan pol na frekvenciji f_{3dB} .

Nagib amplitudske karakteristiek je -20dB/dec.

Frekvencija na kojoj je pojačanje 0 dB označena je sa f_T .

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Efekat konačnog propusnog opsega



$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s / \omega_{3dB}} = \frac{A_0}{1 + j\omega / \omega_{3dB}}$$

$$A(j\omega) \approx \frac{A_0 \omega_{3dB}}{j\omega} \quad \text{for } \omega \gg \omega_{3dB}$$

$$|A(j\omega)| \approx \frac{A_0 \omega_{3dB}}{\omega} \quad \text{for } \omega \gg \omega_{3dB}$$

$$20 \log(|A(j\omega)|) = 0 \quad \text{for } \omega_1 = A_0 \omega_{3dB}$$

$f_T = \omega_1 / 2\pi$, *frekvencija jediničnog pojačanja ili*
Proizvod pojačanje propusni opseg (GB)

$$GB = A_0 \omega_{3dB} = \omega_T$$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Efekat konačnog propusnog opsega

- U kolu sa negativnom povratnom spregom dobija se:

$$A_r = \frac{A}{1-A \cdot B} = \frac{\frac{A_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_g}}}{1-\frac{A_0 \cdot B}{1+j\frac{\omega}{\omega_g}}} = \frac{A_0}{1-A_0 B} \cdot \frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_g \cdot (1-A_0 B)}}$$
$$\omega_r = \omega_g (1 + AB) \quad A_r = \frac{A_0}{(1 + AB)}$$

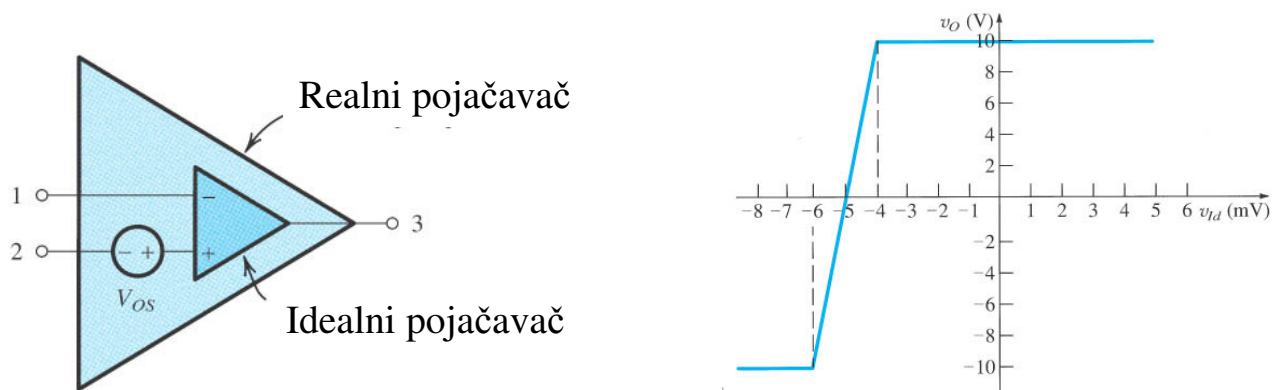
- **Proizvod jednosmernog pojačanja i granične frekvencije ostaje stalan i jednak je frekvenciji jediničnog pojačanja.**

$$GB = A_0 \cdot \omega_{3dB} = A_r \cdot \omega_r$$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazna naponska razdešenost (naponski ofset)

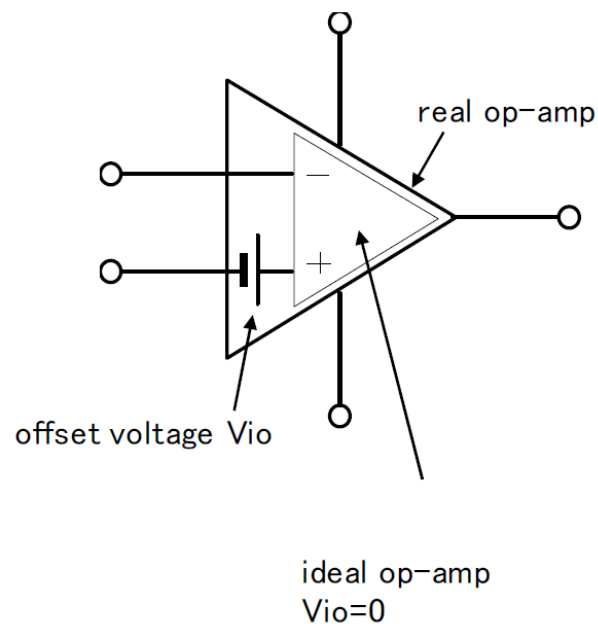
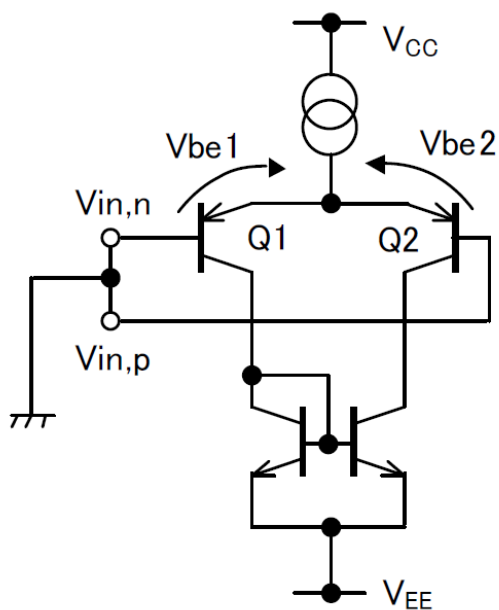
- **Definicija:** Napon koji treba dovesti između ulaznih priključaka tako da napon na izlazu bude jednak nuli.
- **Uzrok:** Ovaj nedostak je posledica nepodešenosti ulaznog pojačavača, odnosno neuparenosti tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Kada se ulazi kratkospoje napon na izlazu nije jednak nuli.
- **Tipična vrednost:** $1\text{mV} < V_{OS} < 5\text{mV}$.
- **Modeliranje:** Naponski ofset modelira se jednosmernim generatorom na invertujućem ili neinvertujućem ulazu.



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazna naponska razdešenost (naponski ofset)

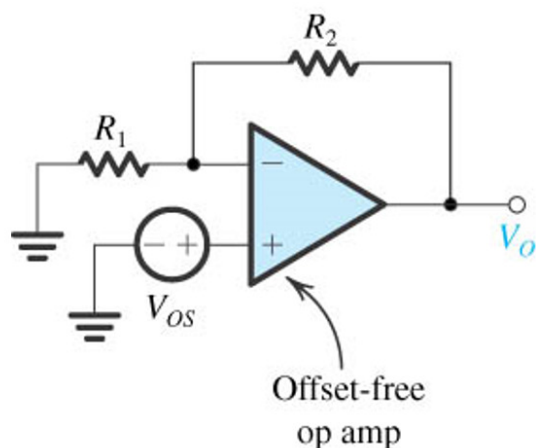
- Naponski ofset jednak je razlici napona na emitorskih spojeva tranzistora u diferencijalnom paru: $V_{io} = V_{be1} - V_{be2}$



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazna naponska razdešenost (naponski ofset)

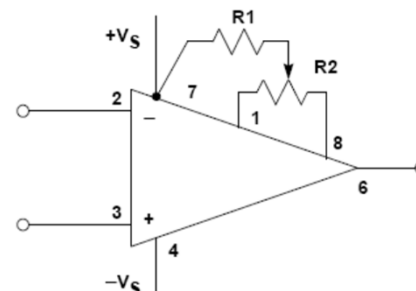
Ofset utiče na oba ulaza operacionog pojačavača istovremeno.



$$V_O = V_{OS} \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right]$$

Kompenzacija ofseta

OP177/AD707 OFFSET ADJUSTMENT PINS

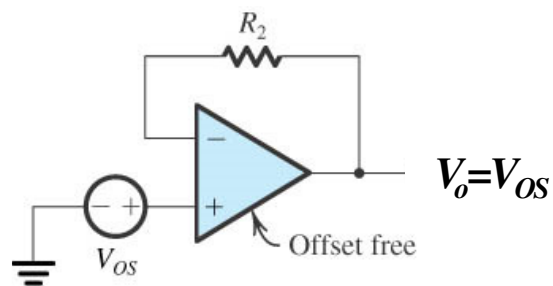


- R1 = 10kΩ, R2 = 2kΩ, OFFSET ADJUST RANGE = 200μV
- R1 = 0, R1 = 20kΩ, OFFSET ADJUST RANGE = 3mV

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazna naponska razdešenost (naponski ofset)

- Naponski ofset menja se usled:
 - promene temperature
 - varijacija napona napajanja
 - promene srednje vrednosti signala



(b)

Naponski ofset se menja sa promenom temperature, zbog različitog stepena neuparenosti komponenti na različitim temperaturama. Ova pojava se kvantitativno izražava kao **temperaturni drift naponskog ofseta** $\Delta V_{os}/T$ [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$].

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazna naponska razdešenost (naponski ofset)

Unutrašnja kompenzacija

Unutrašnja kompenzacija se primenjuje kada postoje na čipu priključci za podešavanje ofseta.

Podešavanje se obavlja se tako što se:

- Implementira željeno kolo
- Ulazni priključak kola poveže sa referentnim
- Podešava potenciometar dok se na izlazu ne dobije nulta vrednost napona.

Napon se meri veoma osetljivim voltmetrom.

Praksa je da se podešavanje ofseta obavlja nakon što je kolo radilo nekoliko sati.

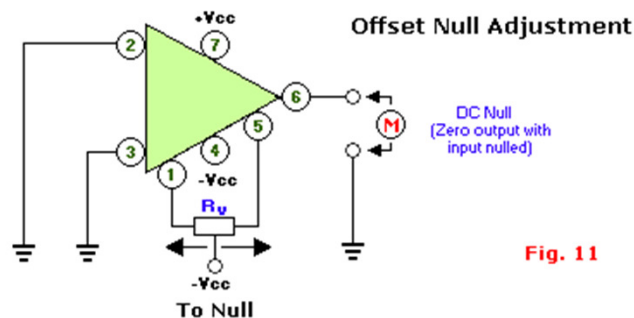
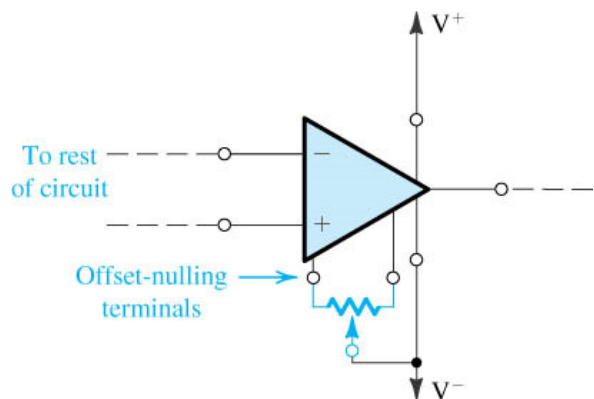


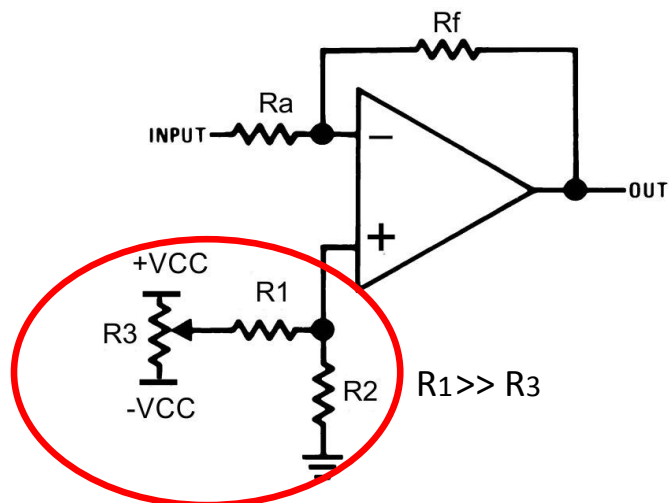
Fig. 11

Note: Both inputs grounded as shown above implies that V_{in} is zero and that each input has a DC resistance path to ground. The actual resistance depends on the application.

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

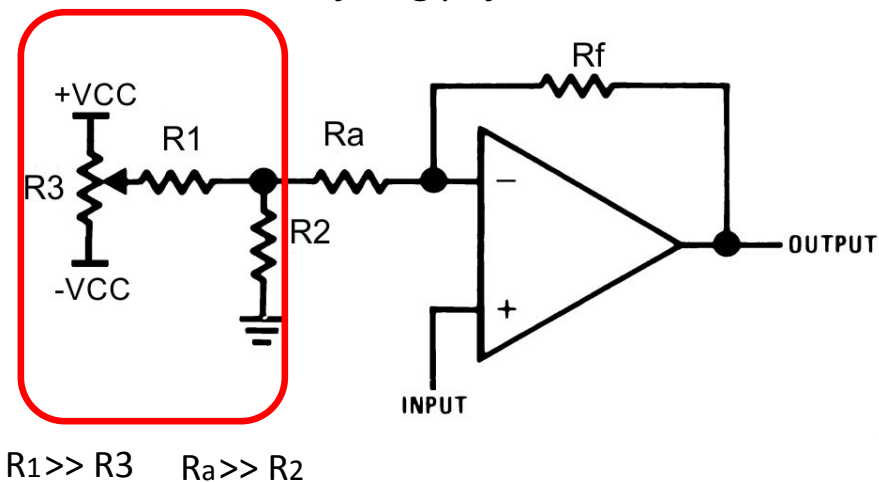
Ulazna naponska razdešenost (naponski ofset) – Spoljašnja kompenzacija

Spoljašnja kompenzacija
Invertujućeg pojačavača



$$V_{out} \approx -\frac{R_f}{R_a} \cdot V_{in} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{ref}$$

Spoljašnja kompenzacija
neinvertujućeg pojačavača



$$V_{out} \approx \left(1 + \frac{R_f}{R_a}\right) \cdot V_{in} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{ref}$$

Otpornost R1 treba da bude mnogo veća od otpornosti potencimetra R3, da nebi ekvivalentna otpornost celog potkola zavisila od položaja potencimetra. Kod neinvertujućeg pojačavača R2 treba da ima malu vrednost (desetak oma) da bi ekvivalentan Tevenenov generator potkola za kompenzaciju bio što približniji idealnom naponskog generatoru. Na taj način se sprečava uticaj potkola za kompenzaciju na pojačanje signala.

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazne struje polarizacije i strujni ofset (strujna razdešenost na ulazu)

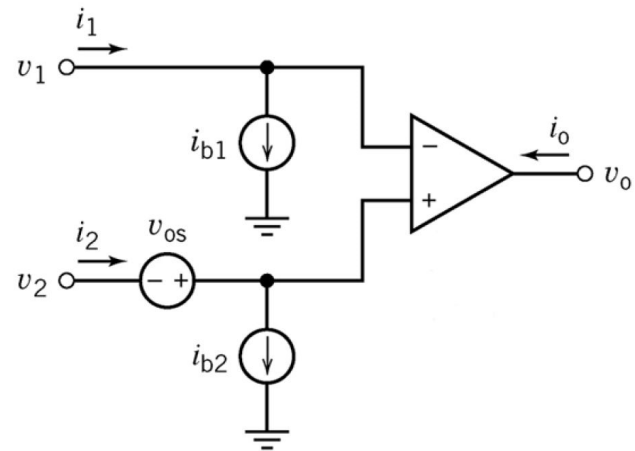
- **Definicija:** Struja razdešenosti na ulazu predstavlja razliku između ulaznih struja polarizacija, $I_{OS} = I_{B1} - I_{B2}$.
- **Uzrok:** Ulazne struje su jednosmerne struje polarizacije bipolarnih tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Ove struje su kod MOSFET operacionih pojačavača zanemarive. Strujni ofset nastaje zbog nemogućnosti izrade dva tranzistora sa identičnim karakteristikama.

- **Tipične vrednosti za bipolarni O.P.**

$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100 \text{ nA}$$

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \leq 10 \text{ nA}$$

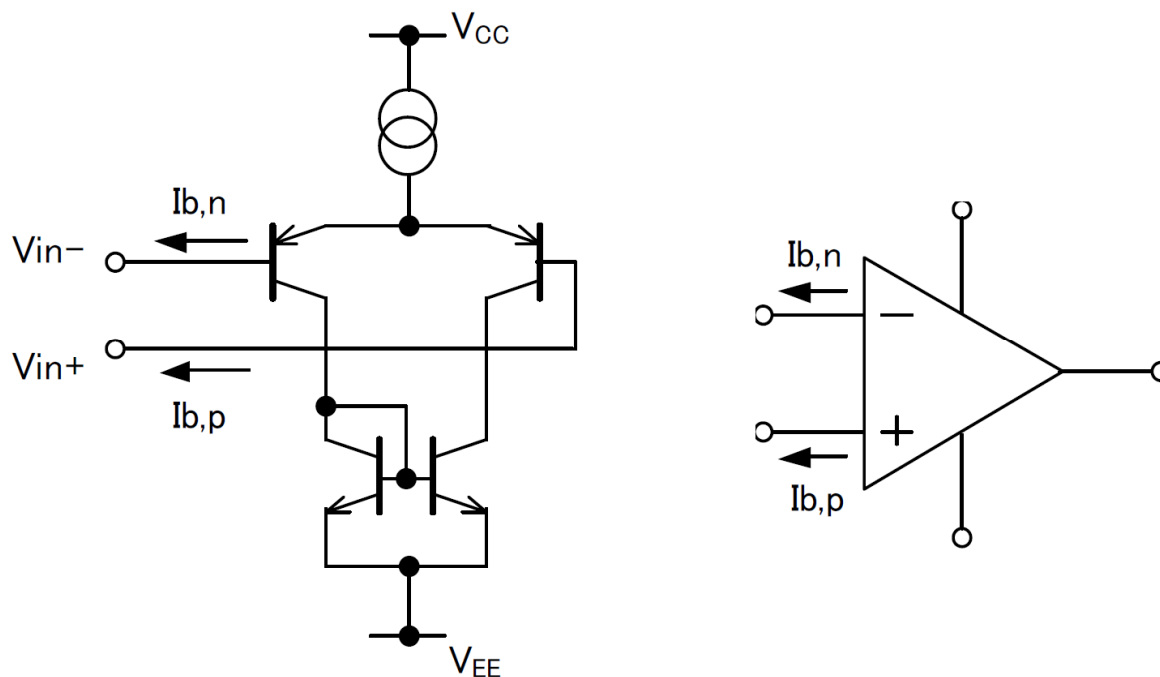
- **Modeliranje**



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazne struje polarizacije i strujni ofset (strujna razdešenost na ulazu)

▪ **Uzrok:** Ulazne struje su jednosmerne struje polarizacije bipolarnih tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Ove struje su kod MOSFET operacionih pojačavača zanemarive. Strujni ofset nastaje zbog nemogućnosti izrade dva tranzistora sa identičnim karakteristikama.



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazne struje polarizacije i strujni ofset (strujna razdešenost na ulazu)

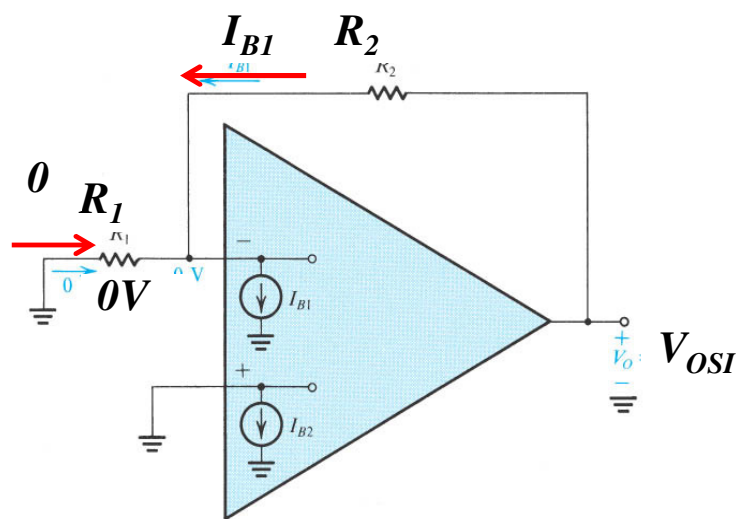
- Uticaj ulaznih struja polarizacije na izlazni napon invertujućeg pojačavača

$$V_{OSI} = I_{B1}R_2 \cong I_B R_2$$

Treba uočiti da velika ulazna otpornost zahteva veliku vrednost R_1 nakon čega je potrebno povećati i vrednost R_2 .

Što je veća vrednost R_2 veći je uticaj strujne razdešenosti na izlazni napon,

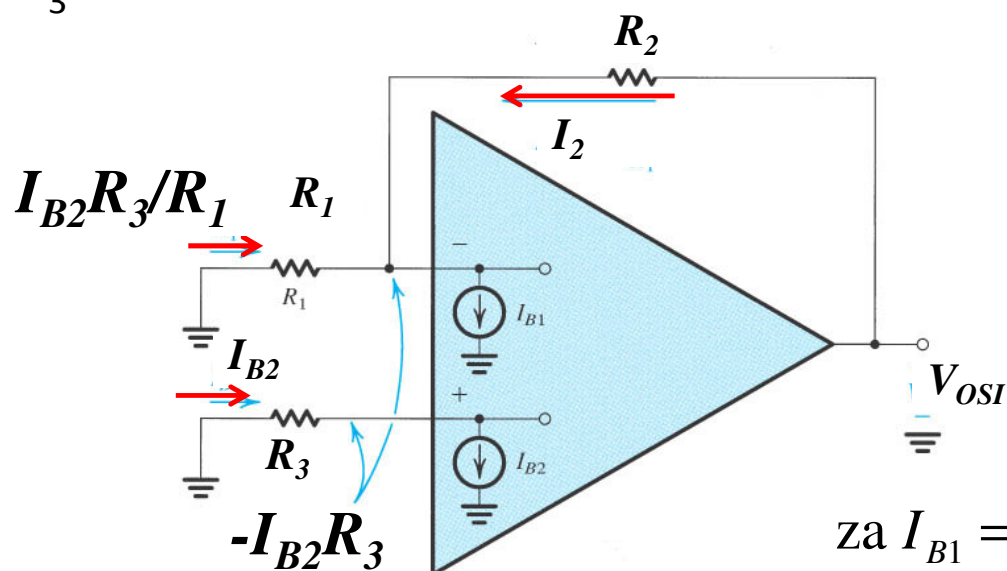
V_{OSI}



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazne struje polarizacije i strujni ofset (strujna razdešenost na ulazu)

Efekat strujnog ofseta može se umanjiti izborom odgovarajuće vrednosti otpornika R_3 .



$$I_2 = I_{B1} - I_{B2}R_3 / R_1$$

$$V_{OSI} = -I_{B2}R_3 + I_2R_2$$

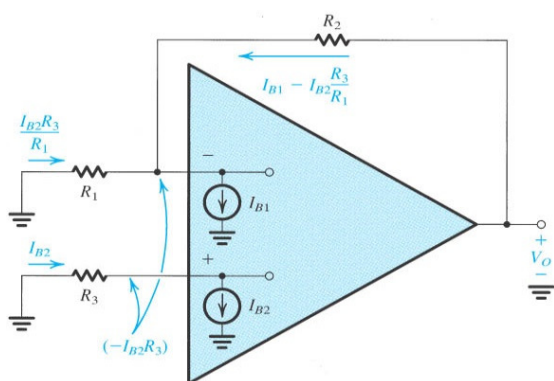
$$\text{za } I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

$$V_{OSI} = I_B [R_2 - R_3(1 + R_2 / R_1)]$$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazne struje polarizacije i strujni ofset (strujna razdešenost na ulazu)

Da bi se umanjio ofset struje potrebno je



$$R_3 = \frac{R_2}{1 + R_2 / R_1} = \frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2}$$

$$I_{B1} = I_B + I_{OS} / 2$$

$$I_{B2} = I_B - I_{OS} / 2$$

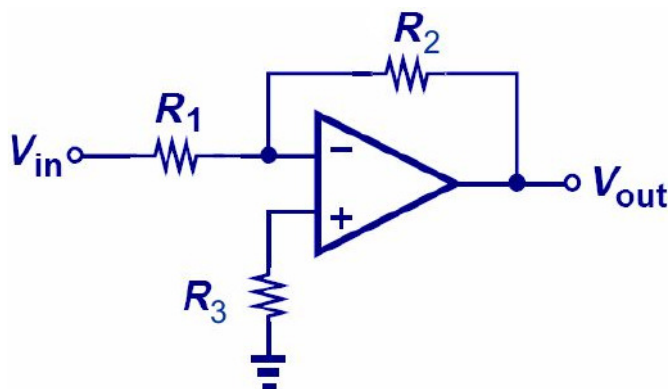
$$V_{OSI} = I_{OS} R_2$$

Izlazni napon pod dejstvo strujnog ofseta, V_{OSI} , umanjen je za red veličine s obzirom da je za toliko srednja vrednost struje polarizacije I_B veća od strujnog ofseta I_{OS} .

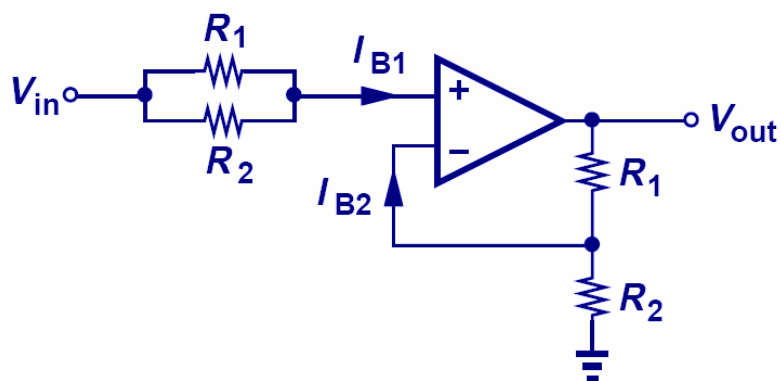
OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazne struje polarizacije i strujni ofset (strujna razdešenost na ulazu)

Da bi se umanjio uticaj struja polarizacije, otpornik koji se vezuje za neinvertujući ili invertujući ulaz treba da bude jednak DC ulaznoj otpornosti na drugom ulazu.



Potrebno je da $R_3 = R_1 \parallel R_2$



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala

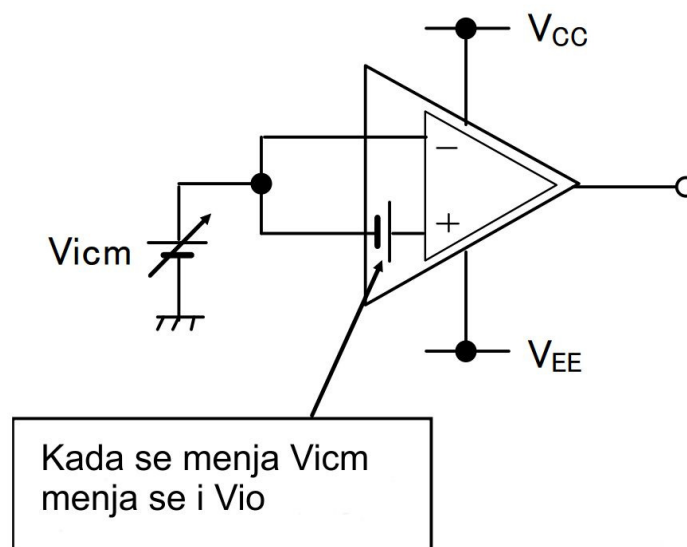
- **Definicija:** Faktor potiskivanja predstavlja odnos diferencijalnog pojačanja i pojačanja srednje vrednosti

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

- **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.



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Faktor potiskivanje napona napajanja (Power Supply Rejection Ratio – PSRR)

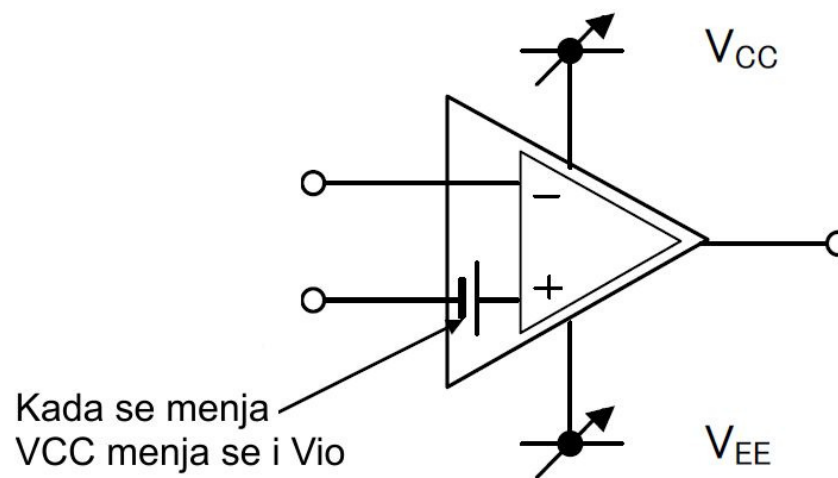
- **Definicija:** *Faktor potiskivanja napona napajanja* predstavlja odnos diferencijalnog pojačanja i naizmjeničnog pojačanja u odnosu na izvor napajanja A_p

$$PSRR = \frac{A_d}{A_p}$$

- **Značenje:** PSRR predstavlja odnos priraštaja napona napajanja i priraštaja ofseta napona koji je njime prouzrokovan.

$$PSRR = \frac{\Delta(V_{CC} - V_{EE})}{\Delta V_{io}}$$

- **Uzrok:** Usled promene napona napajanja menjaju se radne tačke ulaznog diferencijalnog para. Ova promena radnih tačaka odražava se na promenu naponskog ofseta.



Power Supply Rejection Ratio – PSRR

Signal čija je amplituda 10mV i frekvencija 100kHz pridodat je naponu napajanja ($V_s = 15V \pm 10mV$). Šum napona napajanja potisnut je sa 45dB PSRR na frekvenciji 100kHz ali se i pored toga pojavljuje na izlazu.

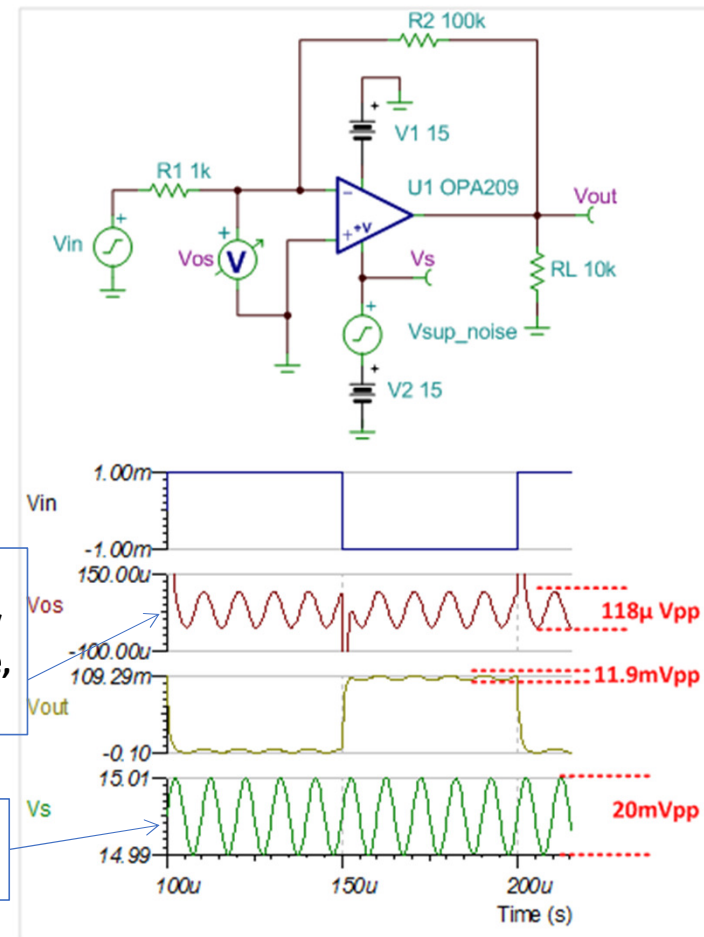
$$\Delta V_{out} = V_{os} \cdot G_{CL}$$

$$G_{CL} = \frac{R_2}{R_1} \quad V_{os} = \frac{V_s}{PSRR} = \frac{10mV}{178} = 59\mu V$$

$$\Delta V_{out} = \frac{V_s}{PSRR} \cdot \frac{R_2}{R_1} = 5,9 \text{ mV}$$

Input offset voltage caused by power supply noise, V_{os}

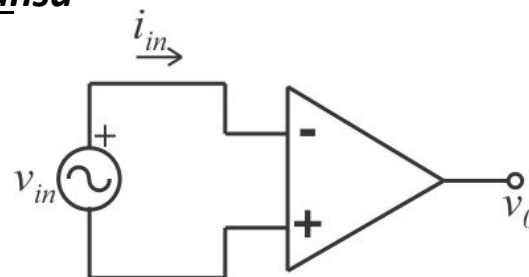
power supply noise, V_s



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

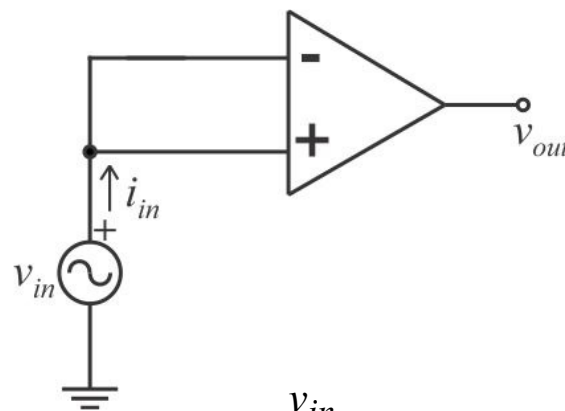
Ulazna impedansa

▪ **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.

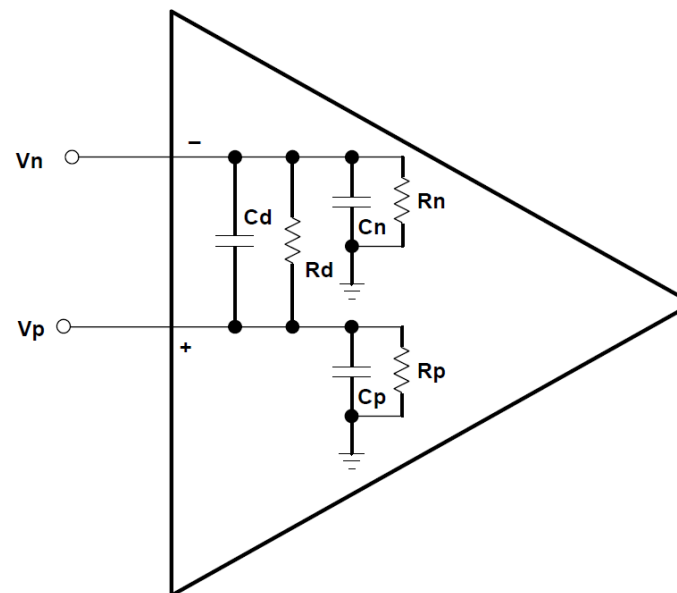


$$R_{ic} = \frac{v_{in}}{i_{CM}}$$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

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 umanjenje 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 katalozima navodi otpornost koja se vidi na jednom od priključaka kada je drugi kratkospojen. Ova otpornost je praktično jednaka diferencijalnoj otpornosti.



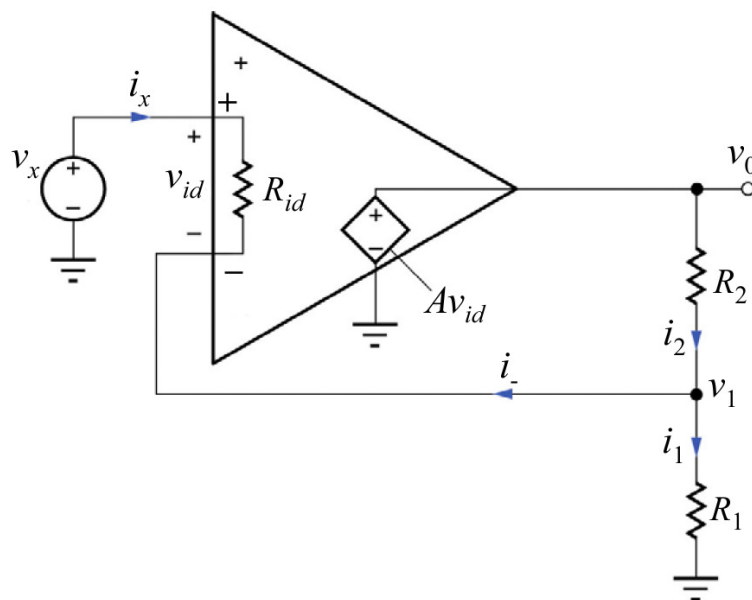
$$R_{id} = R_d \parallel (R_n + R_p)$$

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

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ulazna otpornost

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



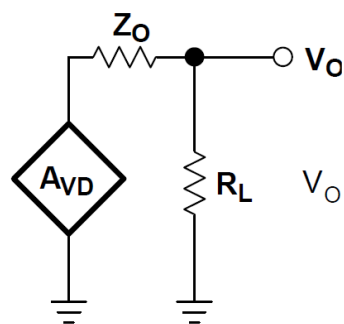
$$i_x = \frac{v_x - v_1}{R_{id}}$$
$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_0 = \beta \cdot v_0 = A \cdot \beta \cdot (v_x - v_1)$$
$$i_x = \frac{v_x - \frac{A \cdot \beta}{1 + A \cdot \beta} v_x}{R_{id}}$$

$$R_{in} = R_{id} (1 + A\beta)$$

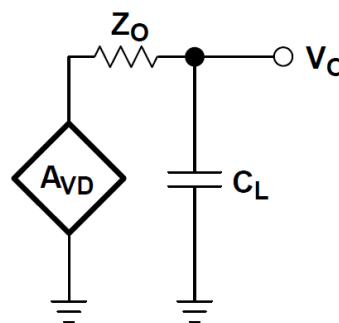
OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

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.



$$V_o = A \cdot V_{in} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$



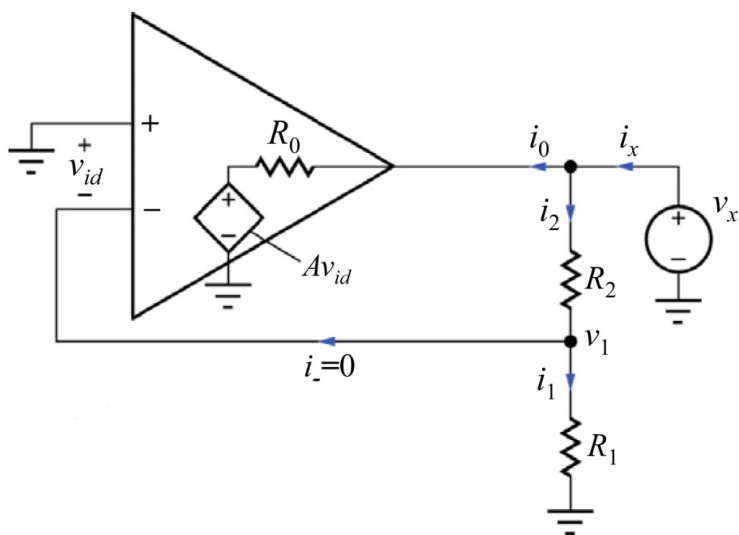
$$V_o = \frac{A \cdot V_{in}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

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

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Izlazna otpornost

- Pod dejstvom negativne povratne sprege izlazna otpornost se smanjuje. Za kolo invertujućeg ili neinvertujućeg pojačavača izlazna otpornost se može približno odrediti kao količnik izlazne otpornost O.P. i funkcije reakcije.



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

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

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

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

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

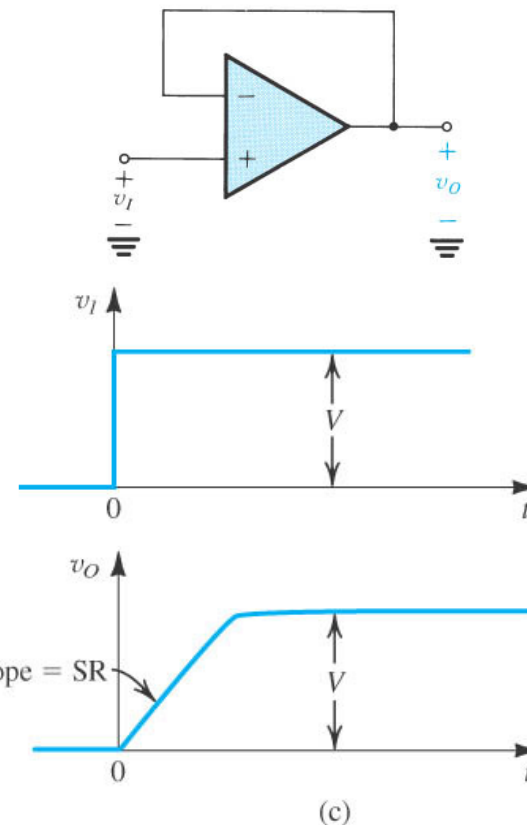
Maksimalna brzina odziva (Slew rate)

Definicija: Maksimalna moguća brzina promene izlaznog napona operacionog pojačavača u vremenu.

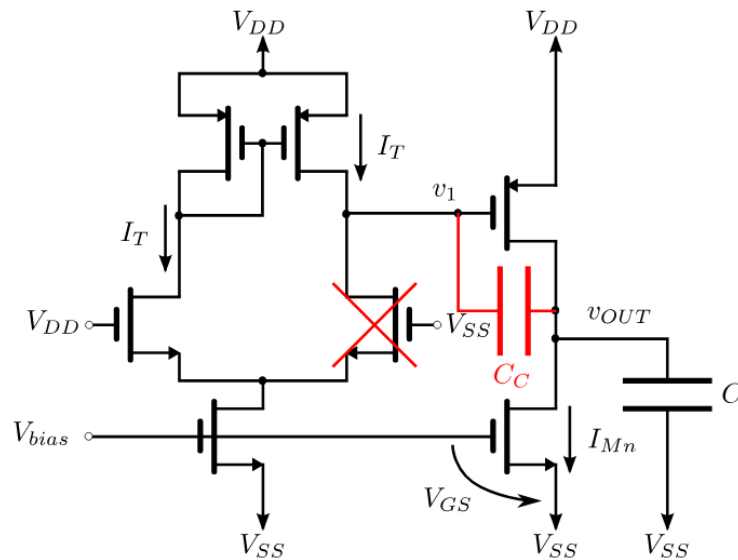
$$SR = \frac{dv_o}{dt} \quad [V/\mu s]$$

Uzrok: Nastaje usled ograničenih mogućnosti pojačavača da napuni ili isprazni internu kapacitivnost. Ova kapacitivnost se koristi za za podešavanje frekvencijskog odziva operacionog pojačavača.

Posledica: Ukoliko je u bilo kom trenutku brzina promene signala veća od SR javiće se nelinearna izobličenja.



Slew rate



▪ Prilikom analize Slew-Rate na ulazu se dovodi veliki signal da bi se pratile velike promene izlaznog signala. U tom slučaju jedan od dva tranzistora u diferencijalnom paru će u jednom trenutku preći iz aktivnog režima u zakočenje dok će kroz drugi (levi tranzistor proticati sva struja strujnog izvora I_T). Kapacitivnost C_C se tada puni maksimalnom brzinom koja iznosi:

$$SR = \max\left(\frac{dv_1}{dt}\right) = \frac{I_T}{C_c}$$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Maksimalna brzina odziva (*Slew rate*)

- Kada je ulazni signal sinusoidalnog talasnog oblika doći će do izobličenja ukoliko u bilo kom trenutku vremena brzina izlaznog signala premaši SR.
- Brzina odziva zavisi od frekvencije i od amplitude sinusoidalnog signala

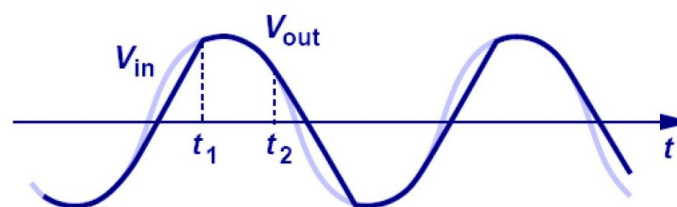
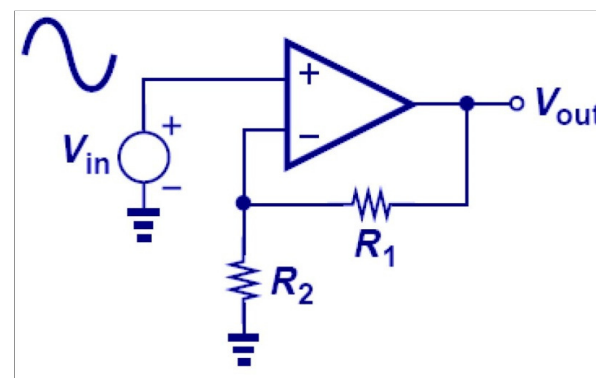
$$v_{in}(t) = V_{inm} \cdot \sin(\omega t)$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \omega \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{inm} \cos(\omega t) = \omega \cdot V_{outm} \cos(\omega t)$$

$$\left. \frac{dV_{out}}{dt} \right|_{\max} = V_{outm} \cdot \omega < SR$$

$$f_p = \frac{SR}{2\pi V_{outm}}$$

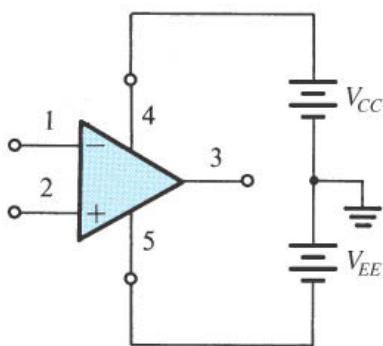
Propusni opseg za punu snagu



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Maksimalni napon na izlazu (Rated output voltage)

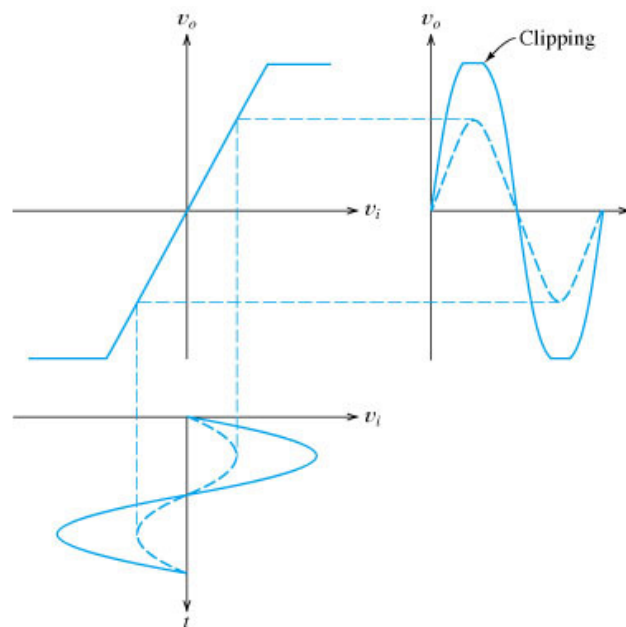
Izlazni signal uvek ima manju vrednost od pozitivnog ili negativnog napajanja



(b)

Ukoliko je $V_{CC} = \pm 15V$

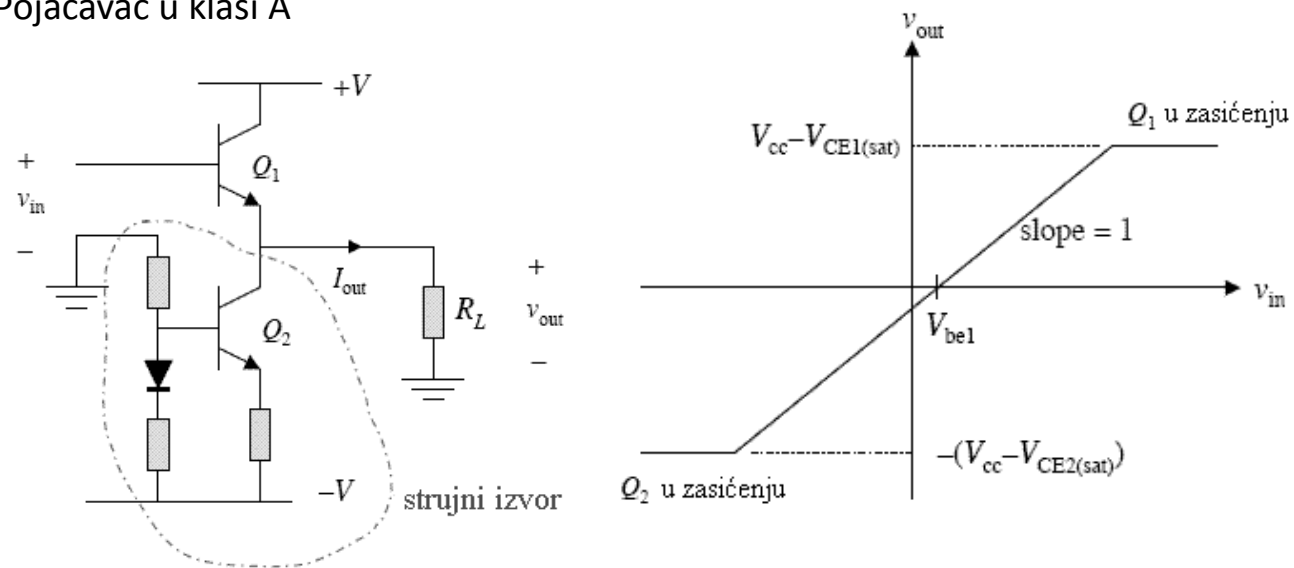
*Maksimalni napon na izlazu
je $\pm 13V$*



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Maksimalni napon na izlazu (Rated output voltage)

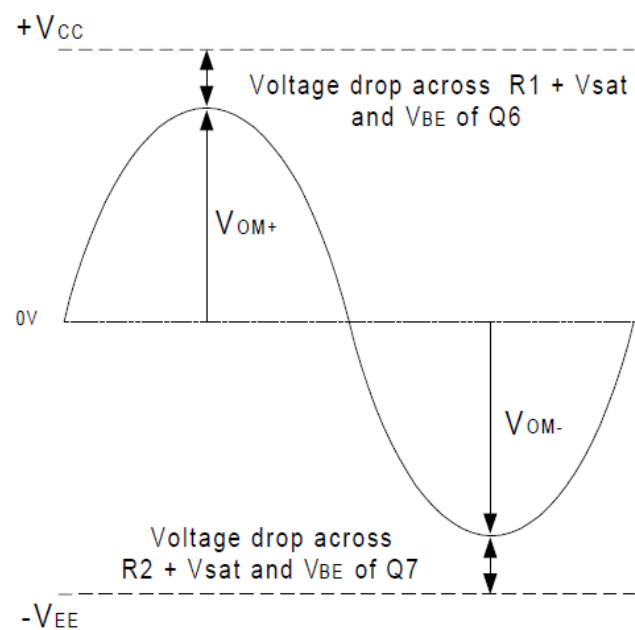
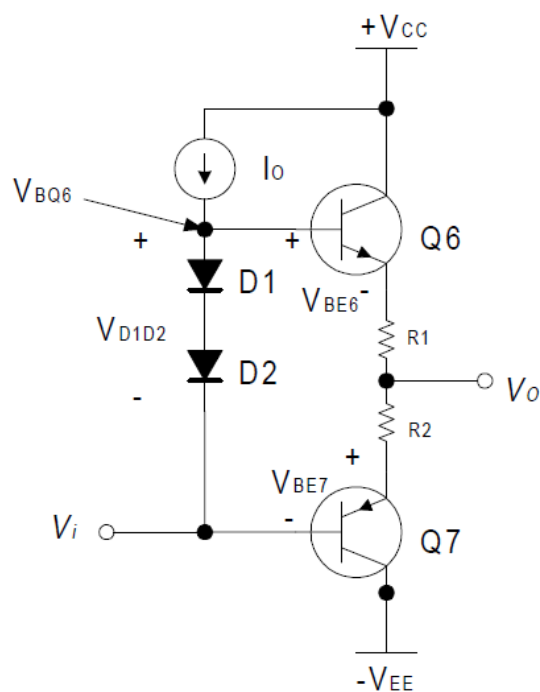
Pojačavač u klasi A



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Maksimalni napon na izlazu (Rated output voltage)

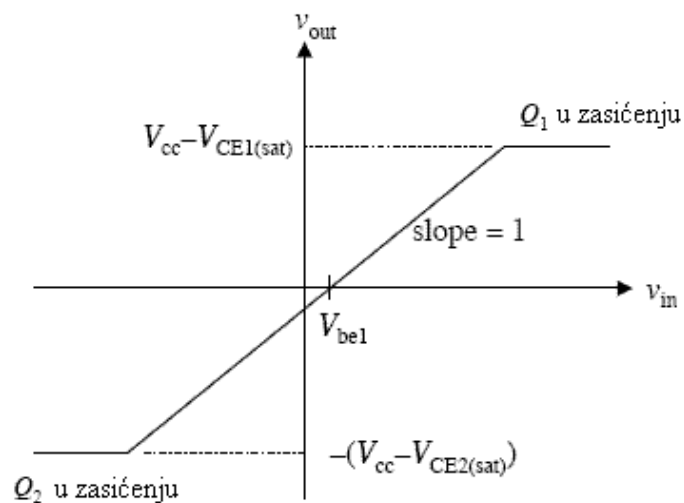
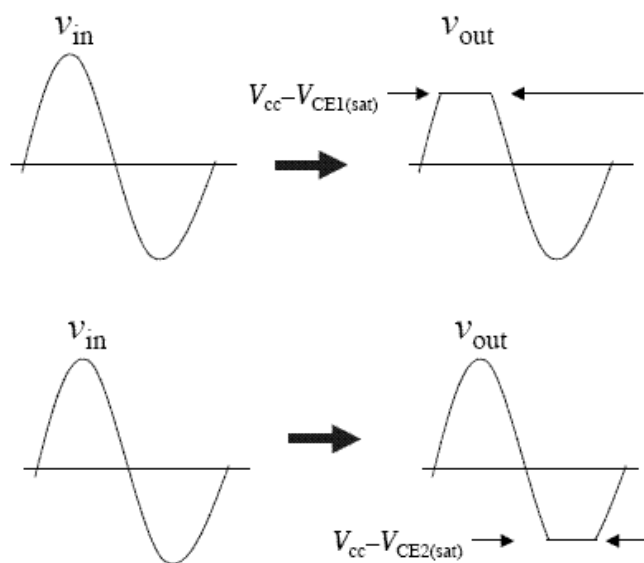
Pojačavač u klasi B



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Maksimalni napon na izlazu (Rated output voltage)

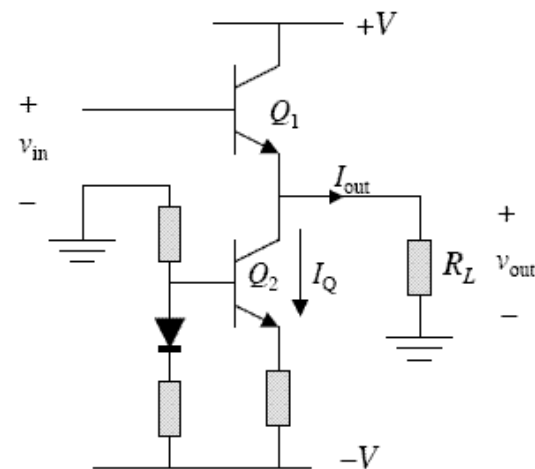
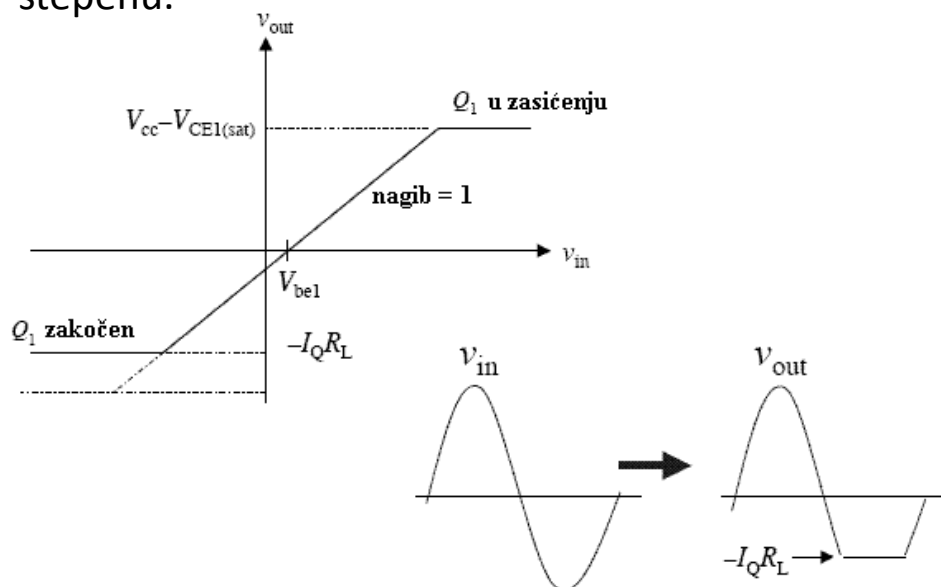
- Odsecanje izlaznog talasnog oblika usled prevelike amplitude ulaznog napona



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Maksimalna izlazna struja

Za vreme negativne poluperiode $I_{OUT} < 0$.
Tranzistor će se preći u zakočenje kada je $|I_{OUT}| = I_Q$
Pri čemu je: I_Q struja izvora konstantne struje;
 I_{OUT} struja tranzistora u izlaznom pojačavačkom stepenu.



OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Karakteristike realnog operacionog pojačavača:

Konačno pojačanje u otvorenoj petlji	→	$V_i=0; V_+=V_-$
Konačna ulazna otpornost	→	$I_i=0; V_i \neq f(R_s)$
Konačna izlazna otpornost	→	$V_o = f(R_L)$
Pojačanje srednje vrednosti signala	→	$A_{cm} \neq 0$
Konačan propusni opseg	→	<i>real f karakteristika.</i>

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

TIPIČNE VREDNOSTI PARAMETARA OPERACIONOG POJAČAVAČA

1. Pojačanje u otvorenoj petlji 10^5

2. Naponski ofset $1 \text{ mV} < V_{OS} < 5 \text{ mV}$

3. Ulazne struje polarzacije $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100 \text{ nA}$

4. Strujni ofset $I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \leq 10 \text{ nA}$

5. Potiskivanje promene napona napajanja $PSR = 20 \log \left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d} \right] \leq 90 \text{ dB}$

6. Brzina odziva (*Slew rate*) $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1 \text{ V}/\mu\text{s}$

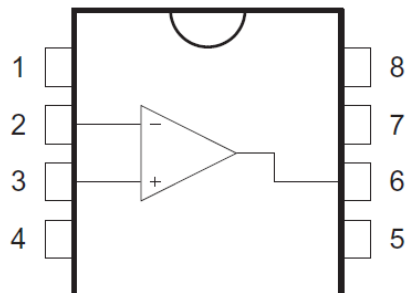
7. Maksimalni napon na izlazu $\pm |V_{CC} - 2V_{CES}|$

8. Maksimalna izlazna struja (strujno zasićenje) $\sim 10 \text{ mA}$

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA



**N
DIP8
(Plastic Package)**



- 1 - Offset null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 - V_{CC}^-
- 5 - Offset null 2
- 6 - Output
- 7 - V_{CC}^+
- 8 - N.C.

UA741

PURPOSE AMPLIFIER

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	UA741M	UA741I	UA741C	Unit
V_{CC}	Supply voltage	±22			V
V_{id}	Differential Input Voltage	±30			V
V_i	Input Voltage	±15			V
P_{tot}	Power Dissipation ¹⁾	500			mW
	Output Short-circuit Duration	Infinite			
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature (T_j) is not exceeded.

OGRANIČENJA OP

Kataloški podaci za operacioni pojačavač [741](#)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_S \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5 6	mV
I_{io}	Input Offset Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 70	nA
I_{ib}	Input Bias Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100 200	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain ($V_o = \pm 10V$, $R_L = 2k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_S \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	77 77	90		dB
I_{CC}	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.7	2.8 3.3	mA
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	± 12 ± 12			V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_S \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 70	90		dB
I_{OS}	Output short Circuit Current	10	25	40	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$				V
	$R_L = 10k\Omega$	12	14		
	$R_L = 2k\Omega$	10	13		
	$R_L = 10k\Omega$	12			
	$R_L = 2k\Omega$	10			
SR	Slew Rate $V_i = \pm 10V$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity Gain	0.25	0.5		V/ μs
t_r	Rise Time $V_i = \pm 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity Gain		0.3		μs
K_{ov}	Overshoot $V_i = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity Gain		5		%
R_i	Input Resistance	0.3	2		M Ω
GBP	Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $f = 100kHz$	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz$, $A_v = 20dB$, $R_L = 2k\Omega$, $V_o = 2V_{pp}$, $C_L = 100pF$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$		0.06		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz$, $R_S = 100\Omega$		23		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
ϕ_m	Phase Margin		50		Degrees

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Osnovna pitanja

1. **Različiti tipovi operacionih pojačavača. Zbog čega je bitno veliko pojačanje operacionog pojačavača u kolu sa negativnom povratnom spregom?**
2. **Amplitudska karakteristika operacionog pojačavača. Proizvod pojačanje propusni opseg.**
3. **Navesti najznačajnija ograničenja operacionog pojačavača i red veličina parametara koji ih opisuju.**

OGRANIČENJA OPERACIONIH POJAČAVAČA

Ostala ispitna pitanja

1. **Naponski ofset i postupci za njegovu kompenzaciju.**
2. **Struje polarizacije, strujni ofset i njihova kompenzacija.**
3. **Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala.**
4. **Faktor potiskivanja napona napajanja.**
5. **Maksimalna brzina odziva na velike signale, (definicija, uzrok, posledice).**
6. **Ulazna otpornost operacionog pojačavača i njen uticaj u kolima sa povratnom spregom.**
7. **Maksimalna struja i maksimalni izlazni napon na izlazu operacionog pojačavača.**