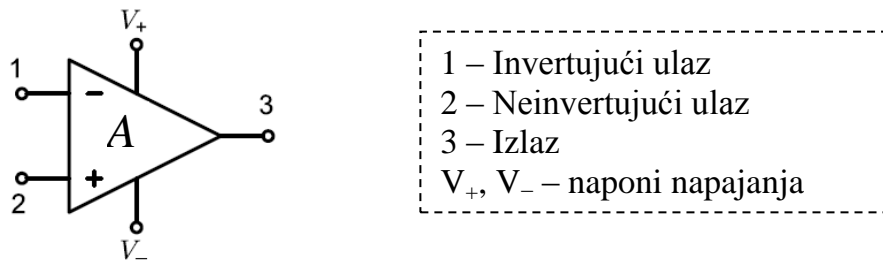


## 11. Operacioni pojačavač

Radi povećanja naponskog pojačanja, često se pojačavački stepeni povezuju na red (u kaskadu). Naponsko pojačanje takvog pojačavača je proizvod naponskih pojačanja pojedinačnih stepena i može biti vrlo veliko. U elektronici se takav pojačavač, koji ima veliko naponsko pojačanje, naziva *operacioni pojačavač*. Naziv je dobio po tome što je primenom takvog pojačavača moguće realizovati neke matematičke operacije između ulaznih napona.

Dakle, operacioni pojačavač ima veliko naponsko pojačanje. U praksi se često, zbog jednostavnijeg proračuna, koristi pojam idealnog operacionog pojačavača. Takav pojačavač ima beskonačno veliko naponsko pojačanje,  $A = \frac{V_i}{V_u} = \frac{V_3}{V_2 - V_1} \rightarrow \infty$ , beskonačno veliku ulaznu otpornost,  $R_i \rightarrow \infty$ , i beskonačno malu izlaznu otpornost,  $R_l \rightarrow 0$ . Operacioni pojačavač po pravilu ima diferencijalni ulaz, jer je ulazni (prvi) pojačavački stepen diferencijalni pojačavač.



*Simbol operacionog pojačavača*

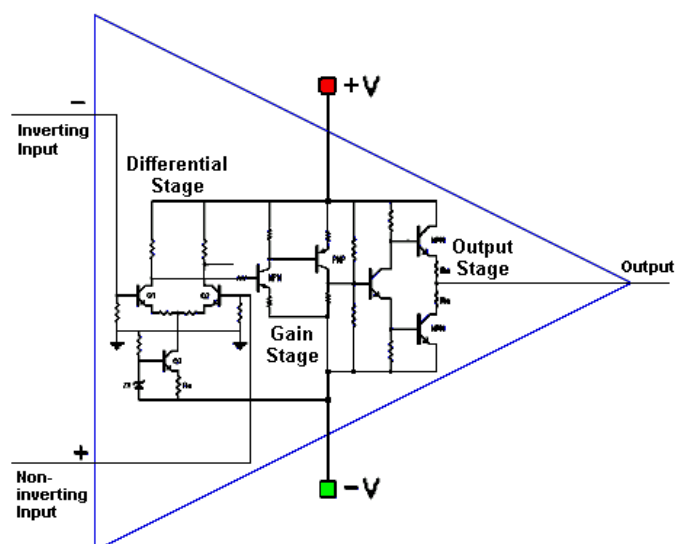
Idealni operacioni pojačavač ima jednu interesantnu osobinu. S obzirom da na njegovom izlazu mora postojati konačan napon, uvek nešto malo manji od napona napajanja, a da mu je naponsko pojačanje beskonačno veliko, napon između ulaznih krajeva mora biti jednak nuli. Dakle, *napon između ulaznih priključaka je jednak nuli ali između njih ne teče nikakva struja*. Ako je jedan od ulaznih priključaka vezan na masu, potencijal drugog ulaznog priključka je takođe nula, pa se kaže da je on na *virtuelnoj masi*.

Svi operacioni pojačavači imaju u osnovi istu trostepenu strukturu:

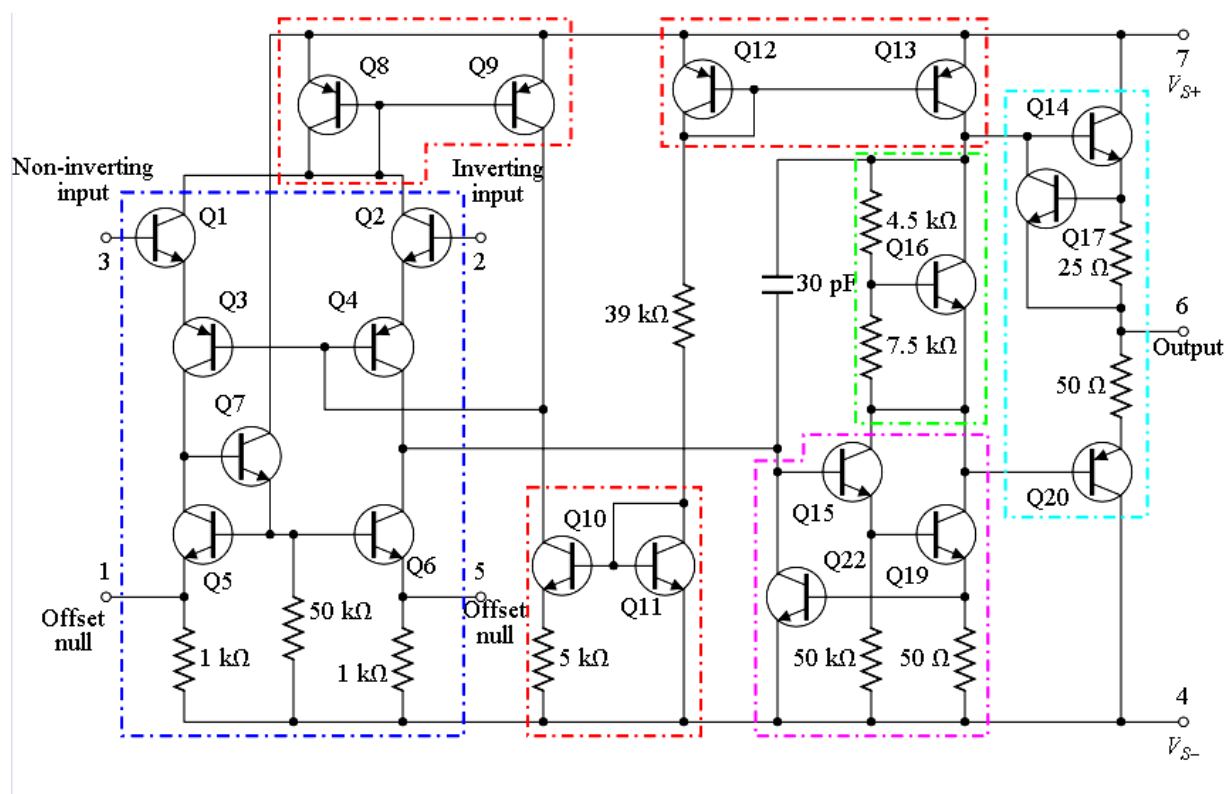
- Ulazni stepen – diferencijalni pojačavač. Obezbeđuje pojačanje razlike ulaznih signala, potiskivanje signala srednje vrednosti i visoku ulaznu impedansu.
- Pojačavački stepen. Obezbeđuje veliko naponsko/strujno pojačanje.
- Izlazni stepen. Obezbeđuje dodatno pojačanje snage, malu izlaznu impedansu, zaštitu od kratkog spoja i ograničavanje izlazne struje.

Operacioni pojačavač je integrisana komponenta koja pojačava razliku napona na njegovim ulazima i takav pojačani signal razlike prosleđuje na izlaz.

Tipične vrednosti pojačanja su  $A \approx 10^5 - 10^7$ , varijacija pojačanja je tipično reda veličine.



Oznaka i principna šema operacionog pojačavača



Funkcionalni dijagram operacionog pojačavača  $\mu A741$

Strujna ogledala za polarizaciju (**crveno**): ( $Q_8$  i  $Q_9$ ), ( $Q_{10}$  i  $Q_{11}$ ), ( $Q_{12}$  i  $Q_{13}$ ).

Diferencijalni pojačavač (**plavo**): ( $Q_1 - Q_7$ ) sa aktivnim opterećenjem i korekcijom ofseta

Pojačavački stepen (**magenta**): ( $Q_{15}$ ,  $Q_{19}$ ,  $Q_{22}$ )

Pomerač naponskog nivoa (**zeleno**):  $Q_{16}$

Izlazni stepen (**cijan**): ( $Q_{14}$ ,  $Q_{20}$ ) sa ograničavačem izlazne struje  $Q_{17}$

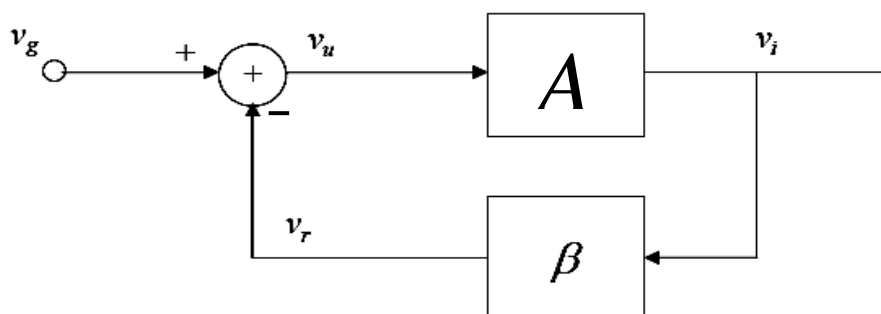
Osnovne osobine idealnog OP:

- Beskonačno velika ulazna otpornost (nema struje kroz ulazne priključke).
- Izlazna otpornost je jednaka nuli (izlaz predstavlja idealni naponski izvor).
- Beskonačno pojačanje u otvorenoj petlji (*open loop*).
- Beskonačni propusni opseg (*bandwidth*).

*Posledice:*

Napon i struja između ulaznih priključaka idealnog OP su nula ( $v_1 = v_2$ ), jer je  $v_u = v_2 - v_1 = \frac{v_i}{A} = 0$  (zbog beskonačno velikog pojačanja  $A$ ). Tipično se koristi u konfiguraciji sa povratnom spregom da bi se izlazni napon učinio nezavisnim od velike varijacije pojačanja OP.

- **Negativna povratna sprega (reakcija)**



Uobičajeno je  $\beta < 1$  i  $A \gg 1$ . Kako je  $v_u = v_g - v_r$ ,  $v_i = A \cdot v_u$  i  $v_r = \beta \cdot v_i$ , dobija se  $v_i = A v_u = A(v_g - v_r) = A(v_g - \beta \cdot v_i)$ . Rešavanjem po  $v_i$  dobijamo  $v_i(1 + \beta A) = A \cdot v_g$ , pa je pojačanje sistema sa negativnom reakcijom:

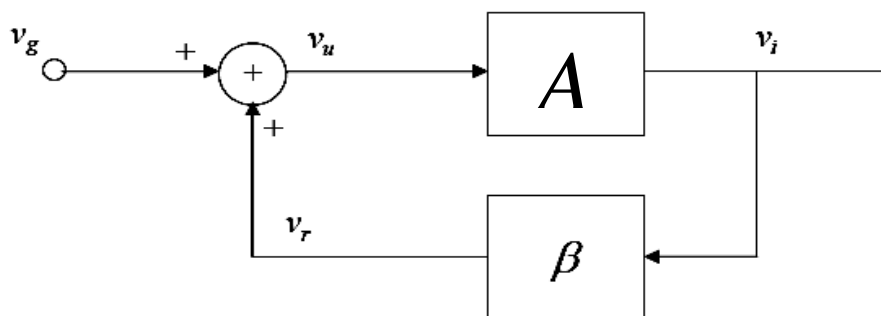
$$A_r = \frac{v_i}{v_g} = \frac{A}{1 + \beta A}, \text{ što je očigledno manje od pojačanja bez reakcije } (A_r < A).$$

Sistem sa negativnom povratnom spregom (NPS) je stabilan jer ima sposobnost autokorigovanja slučajnog poremećaja izlaznog napona. Ako iz bilo kog razloga, na primer zbog promene temperature, poraste izlazni napon  $v_i$ , porašće i napon reakcije  $v_r = \beta \cdot v_i$ , ali će se zato smanjiti napon na ulazu pojačavača  $v_u$ , jer je  $v_u = v_g - v_r = v_g - \beta v_i$ , pa će se posledično smanjiti i napon na izlazu pojačavača  $v_i = A \cdot v_u$  i poremećaj će se otkloniti, ili u najgorem slučaju toliko umanjiti da postane beznačajan. Ako se, pak, izlazni napon  $v_i$  slučajno smanji, smanjiće se i napon reakcije  $v_r$ , ali će zato porasti ulazni napon pojačavača  $v_u = v_g - v_r$ , pa će porasti i izlazni napon  $v_i$ .

Ako je pojačanje OP beskonačno veliko otklanjanje slučajne fluktuacije izlaznog napona je potpuno, a kod realnih pojačavača poremećaj će oslabiti  $(1 + \beta A)$  puta.

Ako  $A \rightarrow \infty$  onda je  $\beta A \gg 1$ , pa se dobija  $A_r = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta} > 1$ . Pojačanje sistema sa povratnom spregom je učinjeno nezavisnim od promenljivog pojačanja osnovnog pojačavača, što je izuzetno pogodno u praksi.

- **Pozitivna povratna sprega (reakcija)**



Uobičajeno je  $\beta < 1$  i  $A \gg 1$ . Kako je  $v_u = v_g + v_r$ ,  $v_i = A \cdot v_u$  i  $v_r = \beta \cdot v_i$  dobija se  $v_i = A v_u = A(v_g + v_r) = A(v_g + \beta \cdot v_i)$ . Rešavanjem po  $v_i$  dobijamo  $v_i(1 - \beta A) = A \cdot v_g$ , pa je pojačanje sistema sa pozitivnom reakcijom:

$$A_r = \frac{v_i}{v_g} = \frac{A}{1 - \beta A}, \text{ što je za } 0 < \beta A < 1 \text{ veće od pojačanja bez reakcije } (A_r > A).$$

Sistem sa pozitivnom povratnom spregom (PPS) je nestabilan jer, nasuprot negativnoj spezi, poremećaj izlaznog napona se neprestano povećava do ulaska osnovnog pojačavača u saturaciju. Ako iz bilo kog razloga poraste izlazni napon  $v_i$ , porašće i napon reakcije  $v_r = \beta \cdot v_i$ , pa će porasti i napon na ulazu pojačavača  $v_u = v_g + v_r$ , što vodi daljem povećanju izlaznog napona,  $v_i = A \cdot v_u$ , pa se „začarani“ ciklus ponavlja do ulaska pojačavača u saturaciju.. PPS se mora izbeći kod pojačavača, jer vrlo brzo uvodi pojačavač u saturaciju, što automatski znači gubitak linearnosti pojačanja.

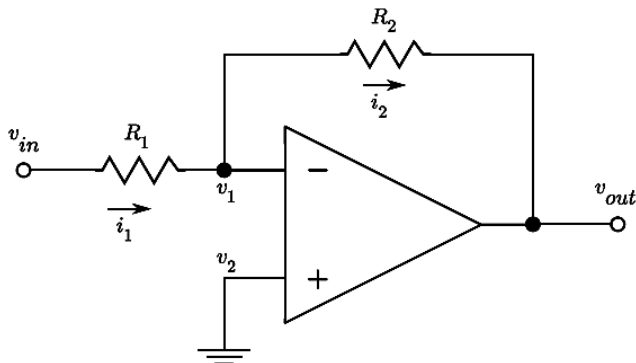
- **Pozitivna povratna sprega sa kružnim pojačanjem  $\beta A = 1$**

Za  $\beta A = 1$  dobija se granično stabilni slučaj. Koristi se za realizaciju oscilatora. Oscilatori nisu linearni pojačavači. Oscilatori generišu periodične signale na izlazu bez ikakve pobude (nema ulaznog signala  $v_g$ ). Naime, za  $\beta A = 1$  imenioc pojačanja sa

reakcijom  $A_r = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{v_i}{v_g}$  postaje 0 pa izlazni napon može postojati i bez ulaznog signala  $v_g$ , jer se dobija  $v_i = \infty \cdot 0$ .

Kod pojačavača postoji opasnost od samooscilovanja koje se obavezno mora sprečiti. U nekom sistemu mogu istovremeno postojati i pozitivna i negativna reakcija, ali ako sistem treba da radi kao linearni pojačavač, negativna reakcija mora biti „jača“.

- Invertujući pojačavač**



Kako je  $i_1 = i_2$ , jer je ulazna otpornost idealnog OP beskonačno velika, to je:

$$\frac{v_{in} - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_{out}}{R_2}.$$

Dalje je  $v_1 = v_2 = 0$ , jer zbog beskonačno velikog pojačanja napon između ulaznih priključaka idealnog OP teži nuli:

$$v_{out} = A(v_2 - v_1), \quad v_2 - v_1 = v_{out} / A = v_{out} / \infty = 0.$$

Konačno dobijamo  $\frac{v_{in}}{R_1} = \frac{-v_{out}}{R_2}$ , pa je

$$\text{pojačanje invertujućeg pojačavača } A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

➤ Analiza za OP sa konačnim pojačanjem o otvorenoj petlji  $A$ :

$v_{out} = A v_u = A(v_+ - v_-) = A(v_2 - v_1)$ ,  $v_+ = v_2 = 0$  jer je neinvertujući priključak OP vezan na masu.

$$v_1 = v_1|_{v_{in}, v_{out}=0} + v_1|_{v_{in}=0, v_{out}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} v_{in} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{out},$$

$$v_u = v_2 - v_1 = -v_1 = -\left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} v_{in} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{out}\right)$$

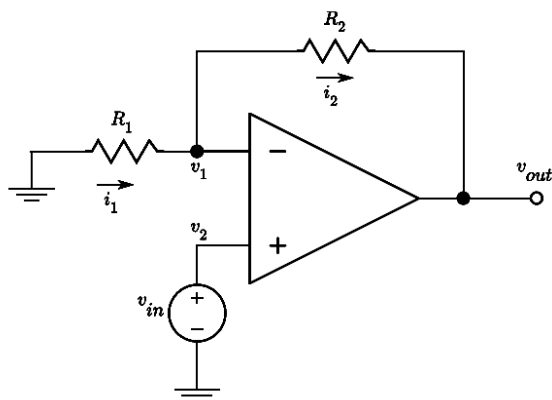
$$v_{out} = A v_u = -\left(\frac{A R_2}{R_2 + R_1} v_{in} + \frac{A R_1}{R_1 + R_2} v_{out}\right), \text{ pa se rešavanjem po } v_{out} \text{ dobija}$$

$$v_{out} \left(1 + \frac{A R_1}{R_1 + R_2}\right) = -\frac{A R_2}{R_2 + R_1} v_{in}. \text{ Sređivanjem se dobija } v_{out} \left(\frac{R_1 + R_2 + A R_1}{R_1 + R_2}\right) = -\frac{A R_2}{R_2 + R_1} v_{in}$$

Pojačanje u zatvorenoj petlji (sa reakcijom) je onda:

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{A R_2}{R_1 + R_2 + A R_1} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}}, \text{ što za } A \rightarrow \infty \text{ daje } A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

- Neinvertujući pojačavač**



Iz  $i_1 = i_2$ , jer je ulazna otpornost idealnog OP beskonačno velika,  $R_U \rightarrow \infty$ , sledi

$$\frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_{out}}{R_2}, \text{ što uz } v_2 = v_1 = v_{in}$$

daje:

$$\frac{-v_{in}}{R_1} = \frac{v_{in} - v_{out}}{R_2}. \text{ Nakon sređivanja dobija se:}$$

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

➤ Analiza primenom NPS:

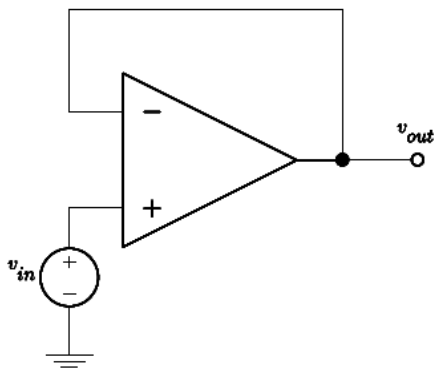
$$v_r = \beta v_{out} = v_1 \Big|_{v_{out}, v_{in}=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{out} \Rightarrow \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \text{ Napon reakcije se dovodi na}$$

invertujući (−) ulaz OP, pa je u pitanju negativna reakcija.

Pojačanje sistema sa reakcijom je onda:

$$A_r = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} \Bigg|_{A \rightarrow \infty} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

### • Razdvojni stepen (bafer – transformator impedanse)



Kako je za idealni OP  $v_+ = v_-$  sledi  $v_{out} = v_{in}$ , pa je

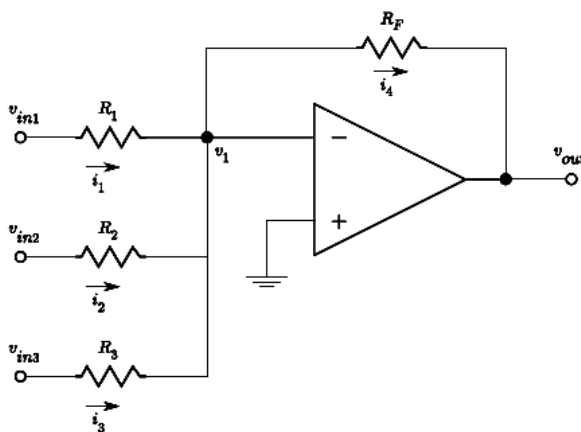
$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = 1 \text{ naponsko pojačanje sa reakcijom.}$$

Kolo se ponaša kao naponski pratilac (*voltage follower*).

Ulazna otpornost je beskonačno velika, a izlazna beskonačno mala. Koristi se kao bafer između pojačavačkih stepena, da spreči međusobni uticaj dva kaskadno povezana stepena.

Zapravo, kolo sprečava uticaj opterećenja na izvor, tako da potrošač ne opterećuje izvor. Ako je otpornost izvora veća ili približno jednaka otpornosti potrošača onda je bolje izvor i potrošač povezati preko bafera.

### • Sabirač



Analiza se odvija primenom principa superpozicije  $v_{out} = f(v_{in1}, v_{in2}, v_{in3})$ .

Za  $v_{in2} = 0$ ,  $v_{in3} = 0$  izlazni napon je:

$$v_{out(1)} = -i_1 R_F = -\frac{R_F}{R_1} v_{in1}.$$

Analogno, za  $v_{in1} = 0$  i  $v_{in3} = 0$ :

$$v_{out(2)} = -i_2 R_F = -\frac{R_F}{R_2} v_{in2}.$$

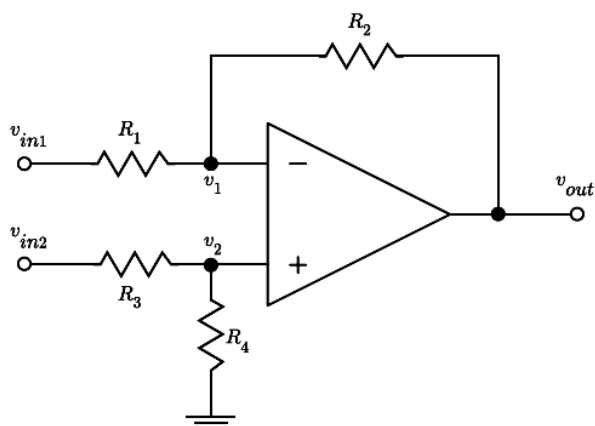
Za  $v_{in1} = 0$  i  $v_{in2} = 0$  izlazni napon je:

$$v_{out(3)} = -i_3 R_F = -\frac{R_F}{R_3} v_{in3}.$$

Ukupan izlazni napon je  $v_{out} = -\left(\frac{R_F}{R_1} v_{in1} + \frac{R_F}{R_2} v_{in2} + \frac{R_F}{R_3} v_{in3}\right)$ .

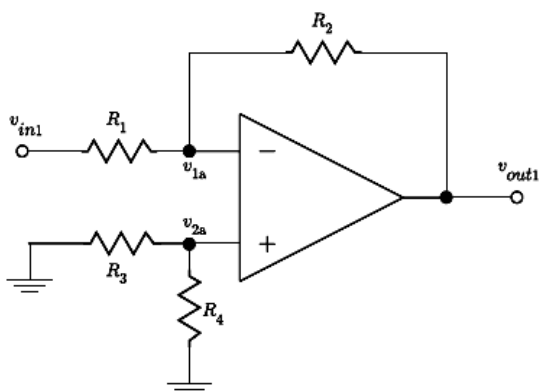
Kada je  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ , dobija se  $v_{out} = -\frac{R_F}{R} (v_{in1} + v_{in2} + v_{in3})$ .

- Diferencijalni pojačavač**



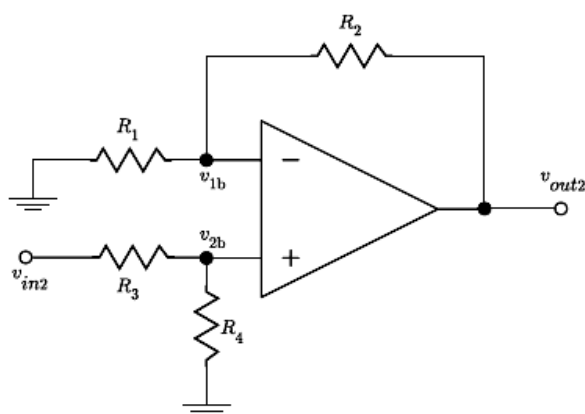
Pojačava razliku ulaznih signala i potiskuje njihovu zajedničku komponentu

Analiza primenom principa superpozicije,  $v_{out} = f(v_{in1}, v_{in2})$ .



Kada je  $v_{in2} = 0$  napon  $v_{2a} = 0$  pa se dobija invertujući pojačavač za koji je

$$v_{out1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{in1}.$$



Za  $v_{in1} = 0$ ,  $v_{2b} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{in2}$ , dobija se preko naponskog razdelnika koji čine otpornici  $R_3$  i  $R_4$ .

Analogno, otpornici  $R_1$  i  $R_2$  čine naponski razdelnik, pa je

$$v_{1b} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{out2}, \text{ sledi } v_{out2} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) v_{1b}.$$

Kako je  $v_{1b} = v_{2b}$ , to je

$$v_{out2} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) (\frac{R_4}{R_4 + R_3}) v_{in2}.$$

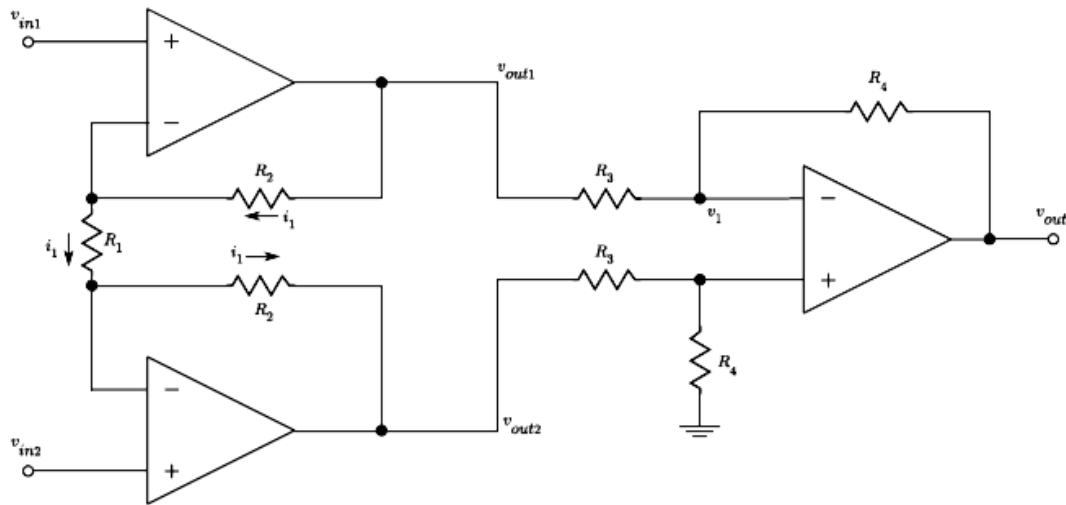
Superpozicijom konačno dobijamo:

$$v_{out} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) (\frac{R_4}{R_4 + R_3}) v_{in2} - \frac{R_2}{R_1} v_{in1}.$$

Ako za otpornike važi  $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$  sledi  $v_{out} = \frac{R_2}{R_1} (v_{in2} - v_{in1}) = A_d (v_{in2} - v_{in1})$ .

$A_d = \frac{R_2}{R_1}$  je diferencijalno pojačanje u zatvorenoj petlji.

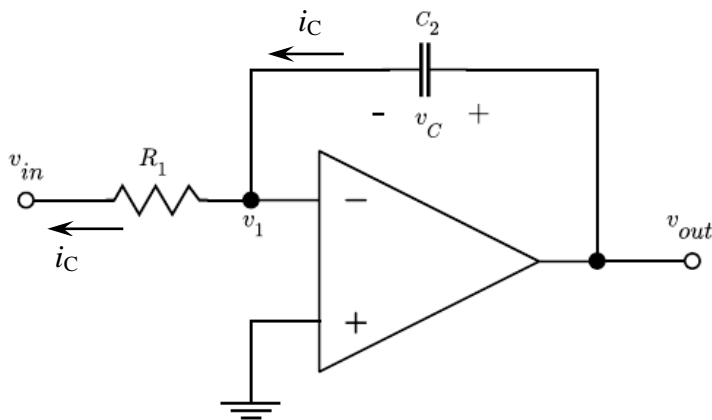
- Instrumentacioni pojačavač



$$i_1 = \frac{v_{in1} - v_{in2}}{R_1} \quad \text{ i } \quad v_{out1} = v_{in1} + i_1 R_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{in1} - \frac{R_2}{R_1} v_{in2} \quad \text{ uZ } \quad v_{out2} = v_{in2} - i_1 R_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{in2} - \frac{R_2}{R_1} v_{in1}$$

$$\text{daje } v_{out} = \frac{R_4}{R_3} (v_{out2} - v_{out1}). \quad \text{Zamenom sledi } v_{out} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (v_{in2} - v_{in1}) = A_d (v_{in2} - v_{in1}).$$

Ulazna impedansa teži beskonačnosti (ne opterećuje prethodni stepen ili izvore signala). Promenom otpornosti  $R_1$  može se menjati diferencijalno pojačanje  $A_d$  u zatvorenoj petlji.



- Integrator

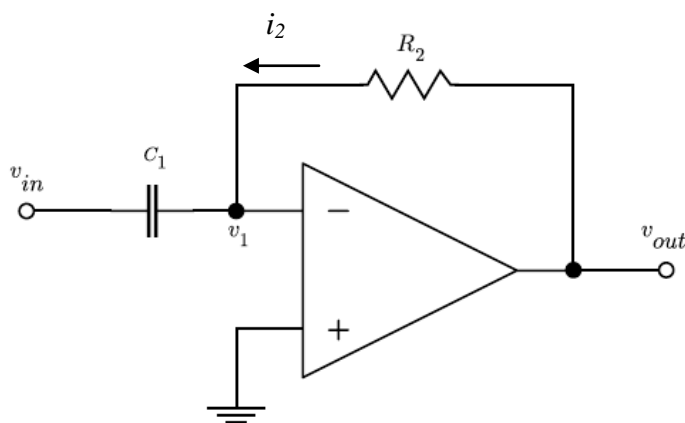
Kako je  $i_C(t) = C_2 \frac{dv_C(t)}{dt}$  i

$$i_C(t) = \frac{v_1 - v_{in}}{R_1} = -\frac{v_{in}}{R_1} \quad (\text{jer je}$$

$$v_1 = 0) \quad \text{sledi} \quad -\frac{v_{in}}{R_1} = C_2 \frac{dv_C(t)}{dt}.$$

Integracijom se dobija

$$v_{out} = v_c = v_c(0) - \frac{1}{R_1 C_2} \int_0^t v_{in}(t) dt.$$



- Diferencijator

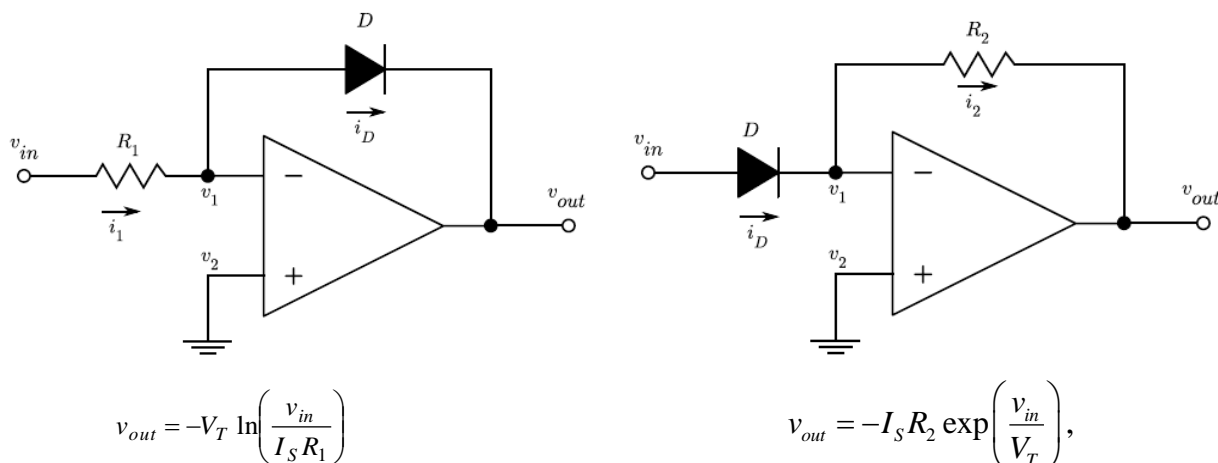
$$\text{Iz } i_2(t) = \frac{v_{out} - v_1}{R_2} = C_1 \frac{d}{dt} (v_1 - v_{in}) \quad \text{ i }$$

$$v_1 = 0 \quad \text{sledi} \quad \frac{v_{out}}{R_2} = -C_1 \frac{d}{dt} v_{in}, \quad \text{tj.}$$

$$v_{out} = -R_2 C_1 \frac{dv_{in}(t)}{dt}.$$



- Logaritamski i eksponencijalni pojačavač

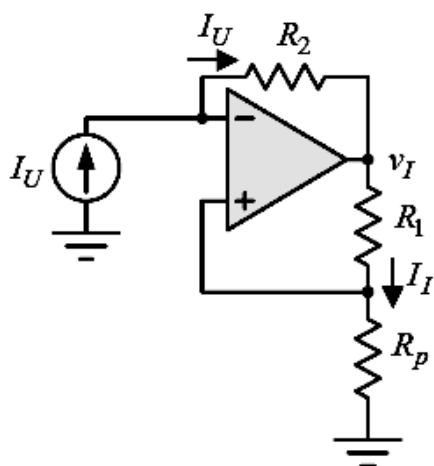
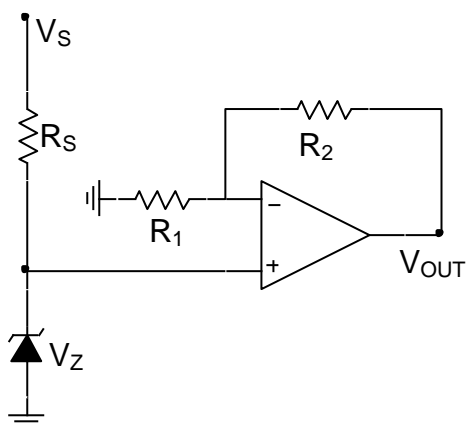


gde je  $i_D \approx I_S e^{v_D/V_T}$  struja kroz diodu pri direktnoj polarizaciji.

- Izvor referentnog napona

$$V_+ = V_Z = V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OUT}$$

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_Z$$



- Strujni pojačavač

$$I_I = \frac{V_I}{R_1 + R_p}$$

$$v_+ = v_- = R_p I_I$$

$$v_I = v_- - R_2 I_U = R_p I_I - R_2 I_U$$

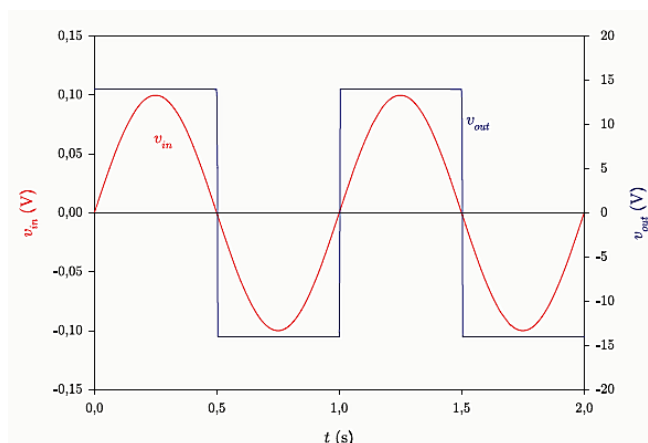
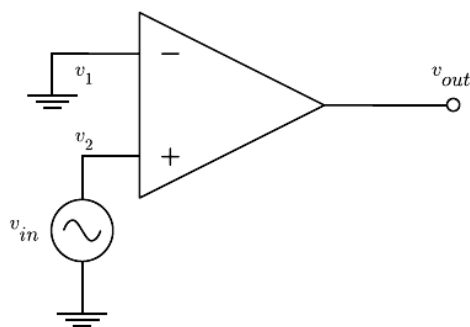
$$(R_1 + R_p) I_I = R_p I_I - R_2 I_U$$

$$A_I = \frac{I_I}{I_U} = -\frac{R_2}{R_1}$$

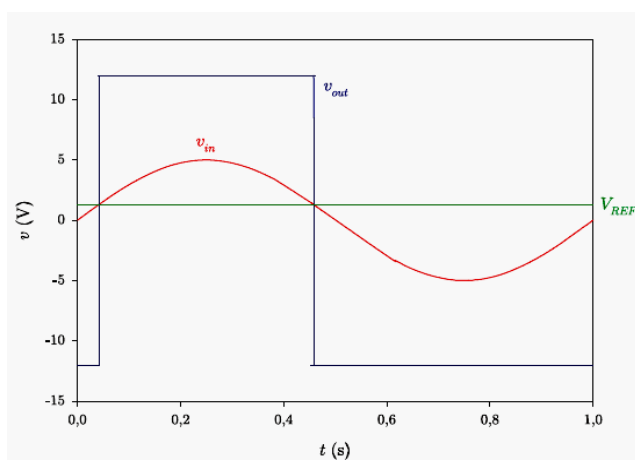
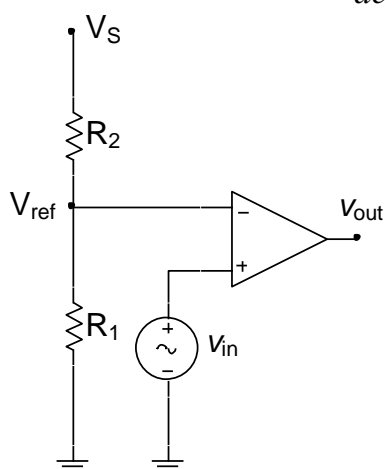
Napomena:

Zbog izuzetno velikog pojačanja u otvorenoj petlji, operacioni pojačavač se tipično koristi u konfiguracijama sa povratnom spregom. Sva prethodna kola koriste negativnu povratnu spregu, jer se deo izlaznog napona dovodi na invertujući (−) ulaz OP. Međutim OP se može koristiti i u konfiguracijama sa pozitivnom povratnom spregom i u otvorenoj petlji, ali tada nema funkciju pojačavača signala.

- Komparatori**



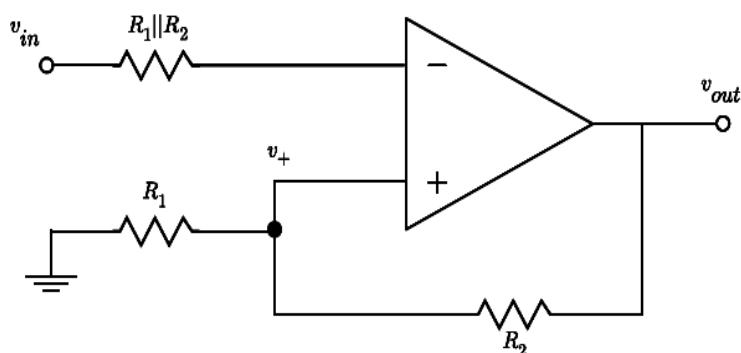
*detektor prolaska signala kroz nulu*



*detektor referentne vrednosti signala*

Zbog ogromnog pojačanja u otvorenoj petlji i pri najmanjoj razlici ulaznih napona operacioni pojačavač ulazi u zasićenje. Javlja se problem termičkog šuma i samooscilovanja izlaza kada su referentni napon  $V_{ref} = R_1 V_S / (R_1 + R_2)$  i ulazni napon  $v_{in}$  bliski.

- Šmitovo kolo – komparator sa histerezisom**

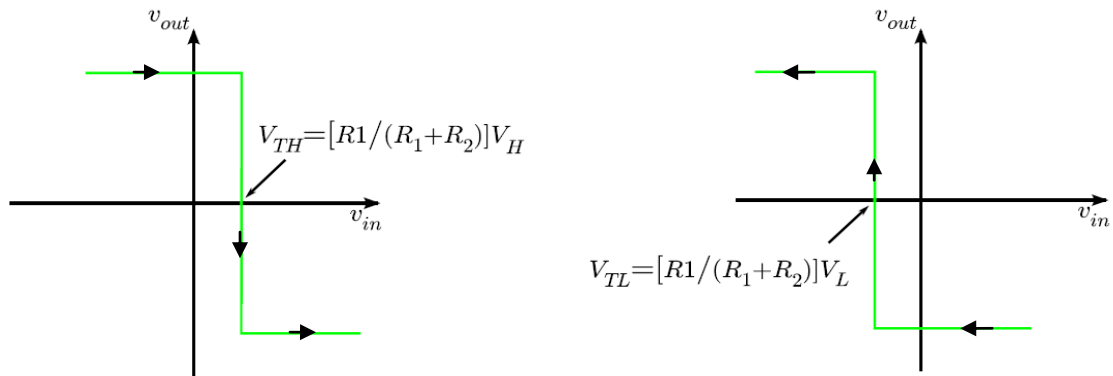


Napon neinvertujućeg ulaza

$$v_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{out}$$

Neka je ulazni napon  $v_{in}$  negativan i manji od napona  $v_+$ . Tada je na izlazu kola, zbog pozitivne povratne sprege ostvarene preko neinvertujućeg  $v_+$  ulaza OP, pozitivan napon saturacije  $v_{out} = V_H$  (nešto manji od

pozitivnog napona napajanja OP) – dijagram levo. Kada ulazni napon  $v_{in}$  rastući



premaši napon  $v_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_H$  na izlazu kola će biti negativni napon saturacije OP

$v_{out} = V_L$ . Prag pri kome izlaz menja vrednost sa visoke na nisku je  $V_{TH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_H$ .

Ako se sada ulazni napon smanjuje, do promene izlaznog stanja iz niskog u visoko dolazi kada napon na (–) ulazu postane manji od

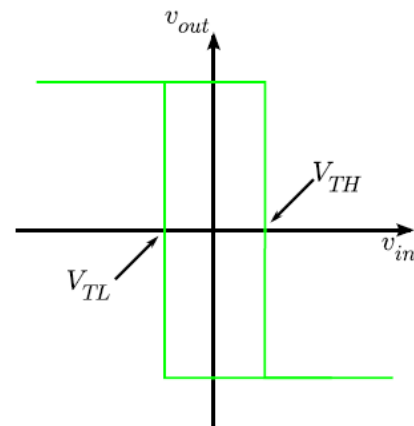
napona na (+) ulazu  $v_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_L$ . Prag pri kome

se dešava ova promena je  $V_{TL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_L$ , gde je  $V_L$

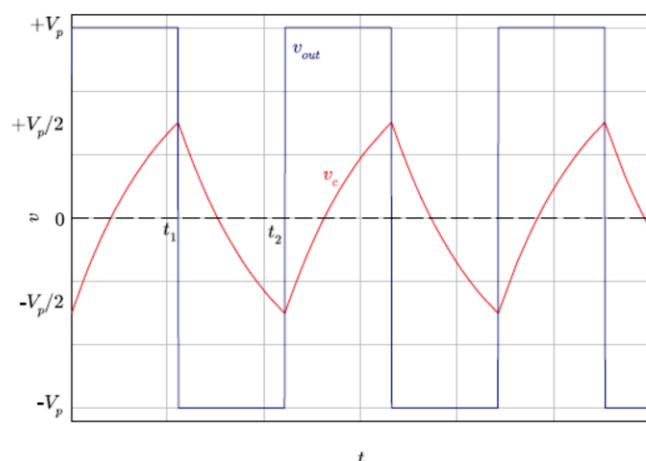
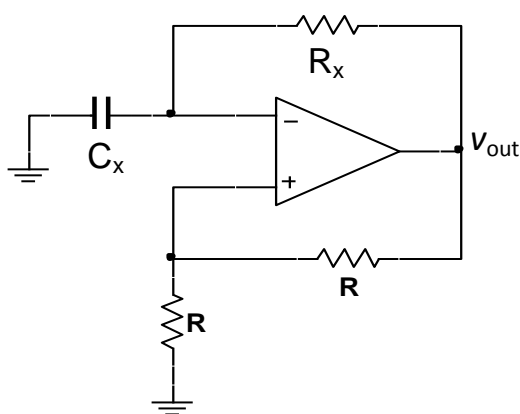
negativni napon saturacije OP (dijagram desno).

Kolo je bistabilni multivibrator jer ima dva stabilna stanja. Ako je u trenutku uključivanja  $v_{in} = 0$  izlaz je nedefinisan.

Napon histerezisa je  $V_h = V_{TH} - V_{TL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_H - V_L)$



### • Šmitov triger oscilator



Naponi zasićenja operacionog pojačavača  $V_H$  i  $V_L$  su vrlo bliski naponima napajanja i uobičajeno simetrični, pa je praktično  $V_H = V_P = +V_{CC}$  i  $V_L = -V_P = -V_{CC}$ .

Ako je  $v_{out} = +V_P$ , tada je napon na neinvertujućem (+) ulazu OP,  $v_+ = +V_P/2$ . Kondenzator  $C_x$  se puni preko otpornika  $R_x$  prema naponu  $V_P$ . Međutim, kada napon na kondenzatoru  $v_x$  (crvena linija), a to je istovremeno i napon na invertujućem (–)

ulazu OP rastući dostigne i blago prestigne napon na neinvertujućem (+) ulazu OP, napon na izlazu, zbog jake pozitivne povratne sprege, menja znak i postaje  $v_{out} = -V_p$ . Napon na neinvertujućem priključku OP sada postaje  $v_+ = -V_p/2$ . Kondenzator  $C_x$  se sada prazni preko otpornika  $R_x$  prema vrednosti  $-V_p$ . Kada napon na kondenzatoru prazneći se dostigne i prestigne vrednost  $-V_p/2$ , napon na (-) priključku OP postaje manji od napona na (+) priključku OP, pa izlaz menja stanje i postaje  $v_{out} = +V_p$ . Kondenzator  $C_x$  ponovo počinje da se puni ka naponu  $+V_p$  i opisani proces se ponavlja.

Ovo kolo naziva se relaksacioni oscilator, jer je perioda (odnosno učestanost) oscilacija određena punjenjem (opterećivanjem) i pražnjenjem (relaksacijom) kondenzatora. Da se podsetimo, trajanje prelaznog procesa opterećivanja odnosno rasterećivanja kondenzatora određuje vremenska konstanta  $\tau_x = R_x C_x$ .

- **Realni operacioni pojačavač**

- Ograničenja ulaznog i izlaznog napona.  
Maksimalni izlazni napon je manji od napona napajanja.
- Ograničenja ulazne i izlazne struje  
Određena su tehnološkim parametrima ulaznog i izlaznog kola.
- Konačno pojačanje u otvorenoj petlji
- Konačna ulazna i izlazna otpornost  
Ulazna otpornost je velika, ali konačna, a izlazna je mala, ali nije nula.
- Konačni propusni opseg  
Zbog kapacitivnosti unutar OP.
- Ulazni ofset napon i ulazna ofset struja  
Kada na ulazima OP nema signala, izlazni napon nije nula. Diferencijalni napon koji treba dovesti na ulaze OP da bi izlazni napon bio nula naziva se ulazni ofset napon. Koriste se posebna kola za kompenzaciju naponskog i strujnog ofseta.
- Efekti temperature  
Parametri OP se menjaju sa temperaturom.