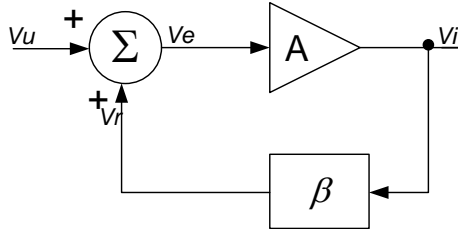


## Vježba 6

### Negativna povratna sprega

Na Slici 1 je dat primjer pojačavača sa povratnom spregom. Treba odrediti čemu je jednako pojačanje u slučaju negativne povratne sprege.

Sa Slike 1 vidimo da je izlaz pojačavača vezan sa ulazom, pa rezultujuće pojačanje neće biti  $A$  već se dobija sljedećim postupkom.



Slika 1

Pojačanje je definisano kao odnos izlaznog i ulaznog napona:

$$A_r = \frac{V_i}{V_u}$$

Dakle, potrebno je izraziti izlazni napon preko ulaznog. Sa šeme, prateći smjerove strelica, pišemo:

$$V_e = V_u + V_r$$

$$V_i = AV_e$$

$$\left. \begin{array}{l} V_i = A(V_u + V_r) \\ V_r = \beta V_i \end{array} \right\} \Rightarrow V_i = A(V_u + \beta V_i)$$

$$V_i = AV_u + A\beta V_i$$

$$V_i - A\beta V_i = AV_u$$

$$V_i(1 - A\beta) = AV_u$$

$$V_i = \frac{AV_u}{1 - A\beta}$$

Pa je sada pojačanje pojačavača sa povratnom spregom sa Slike 1:

$$A_r = \frac{V_i}{V_u} = \frac{\frac{AV_u}{1 - A\beta}}{V_u} = \frac{AV_u}{V_u(1 - A\beta)}$$

$$A_r = \frac{A}{1 - A\beta}$$

- Kad je  $|1 - A\beta| > 1$ , odnosno kad je ekvivalentno pojačanje manje od pojačanja pojačavača bez sprege, kaže se da je uspostavljena negativna povratna sprega. Negativna povratna sprega se dobija podešavanjem pojačanja  $\beta$  tako da zadovoljava:

$$A\beta = |A\beta|e^{j\pi} = -|A\beta|$$

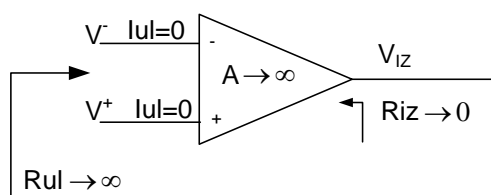
kako bi bilo  $|1 - A\beta| > 1$ . Pojačanje pojačavača sa Slike 1 u slučaju kada je uspostavljena negativna povratna sprega će biti:

$$A_r = \frac{A}{1 + |A\beta|}$$

- Kad je  $|1 - A\beta| < 1$ , pojačanje sa spregom je veće nego bez nje. Sprega takvog tipa naziva se pozitivna povratna sprega;
- Specijalan slučaj prethodnog je  $|1 - A\beta| = 0$ . Tada je rezultatno pojačanje teorijski beskonačno (praktično pojačanje mora imati konačnu vrijednost). U tom slučaju, izlazni napon postoji bez prisustva ulaznog.
- Ukoliko je  $|A\beta|$  mnogo veće od 1  $\rightarrow$  jaka negativna povratna sprega:

$$A_r \approx \frac{A}{|A\beta|} = \frac{1}{|\beta|} = const$$

## Operacioni pojačavači (OP)



Slika 1: Principialna šema operacionog pojačavača

Kod operacionog pojačavača ulazi su  $V^-$  - invertujući ulaz i  $V^+$  - neinvertujući ulaz, njihova razlika je  $V_d = V^+ - V^-$ .

Ukoliko se uspostavi negativna povratna sprega (veže izlaz OP sa “-” ulazom na neki način) važiće da je:

$$V_d = V^+ - V^- = 0 \Rightarrow V^+ = V^-.$$

Ulazna otpornost OP je beskonačno velika, pa nema struje u granama koje ulaze u OP:

Ukoliko se u zadatku dobije da je izlazni napon nekog operacionog pojačavača  $V_{iz} \geq V_{CC}$ , pri čemu je  $V_{CC}$  pozitivan napon napajanja tog operacionog pojačavača, znači da je došlo do pozitivnog zasićenja operacionog pojačavača i kao vrijednost izlaznog napona se uzima  $V_{iz} = V_{CC}$ . Takođe, ukoliko se dobije da je  $V_{iz} \leq -V_{CC}$ , pri čemu je  $-V_{CC}$  negativan napon napajanja tog operacionog pojačavača, znači da je došlo do negativnog zasićenja operacionog pojačavača i kao vrijednost izlaznog napona se uzima  $V_{iz} = -V_{CC}$ . Za sve rezultate  $-V_{CC} < V_{iz} < V_{CC}$ , zadržavamo dobijenu vrijednost za  $V_{iz}$ .

Prvo posmatramo različite tipove operacionih pojačavača:

### 1) Jedinični pojačavač:

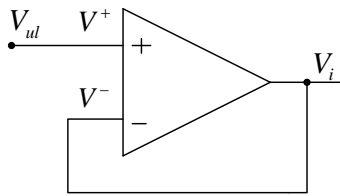
Šema jediničnog pojačavača data je na Slici 2. Kako je uspostavljena negativna povratna sprega, za ovaj pojačavač važi:

$$V^+ = V^-$$

Sa slike se vidi da je ulazni napon  $V_{ul}$  vezan za neinvertujući ulaz operacionog pojačavača, tj.  $V^+$ , pa se može napisati:

$$V^+ = V_{ul} \rightarrow V^- = V_{ul}$$

Kako je  $V^- = V_i$  (sa slike), to je  $V_{ul} = V_i$ , odnosno ulazni i izlazni naponi su jednaki.



Slika 2

### 2) Neinvertujući pojačavač:

Šema neinvertujućeg pojačavača je data na Slici 3. Zatvorena je negativna povratna sprega, pa je:

$$V^+ = V^-$$

Kako je  $V^+ = V_{ul}$ , važi i  $V^- = V_{ul}$ . Struja  $I$  je:

$$I = \frac{V^-}{R_2},$$

odnosno,

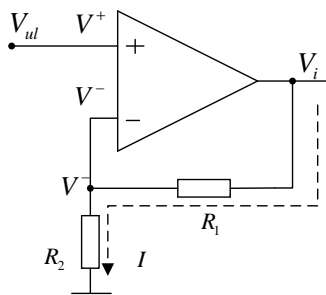
$$I = \frac{V_i - V^-}{R_1}.$$

Izjednačavanjem prethodne dvije jednačine, dobija se:

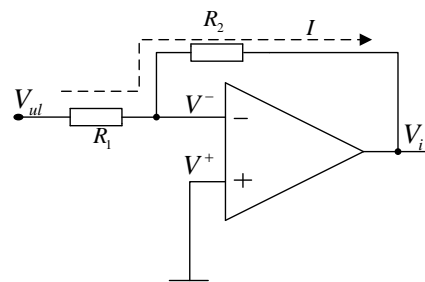
$$\begin{aligned} \frac{V^-}{R_2} = \frac{V_i - V^-}{R_1} &\rightarrow \frac{V_{ul}}{R_2} = \frac{V_i - V_{ul}}{R_1} \rightarrow \frac{V_{ul}}{R_2} = \frac{V_i}{R_1} - \frac{V_{ul}}{R_1} \\ V_{ul} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V_i}{R_1} &\rightarrow V_{ul} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} = \frac{V_i}{R_1} \rightarrow V_{ul} \frac{R_1 + R_2}{R_2} = V_i \end{aligned}$$

Pojačanje je definisano kao:  $A = \frac{V_i}{V_{ul}}$ , pa se dobija:

$$A = \frac{V_i}{V_{ul}} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$



Slika 3



Slika 4

### 3) Invertujući pojačavač:

Šema invertujućeg pojačavača je data na Slici 4. Zatvorena je negativna povratna sprega i važi:

$$V^+ = V^-$$

Kako je:  $V^+ = 0$  to je i  $V^- = 0$ . Struja  $I$  je definisana na sledeći način:

$$I = \frac{V_{ul} - V^-}{R_1} = \frac{V_{ul}}{R_1}, \text{ odnosno}$$

$$I = \frac{V^- - V_i}{R_2} = \frac{-V_i}{R_2}$$

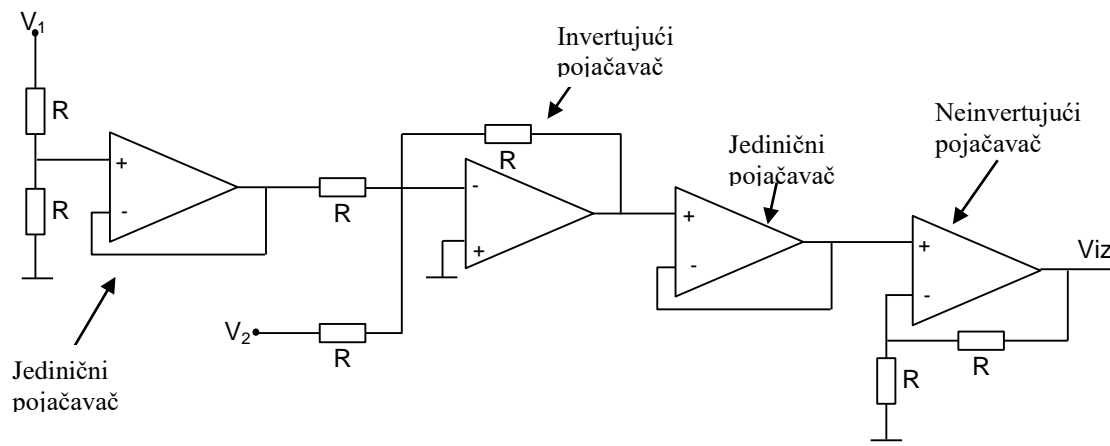
Izjednačavajući ova dva izraza za struju, dobija se:

$$\frac{V_{ul}}{R_1} = \frac{-V_i}{R_2}$$

Kako je pojačanje definisano kao  $A = \frac{V_i}{V_{ul}}$ , dobija se:

$$A = \frac{-R_2}{R_1}$$

**Zad. 1** Naći  $V_{iz}$  za datu šemu. Poznato je da je  $V_1 = 2V$ ,  $V_2 = 3V$ ,  $V_{CC} = 15V$ .



Slika 5

Rješenje:

Polazimo od lijeve strane, idemo ka desnoj i gledamo šta se prenosi na desnu stranu, šta je povezano sa desnom stranom.

Počinjemo od napona  $V_1$ , povezan je preko dva otpornika sa uzemljenjem, postoji razlika potencijala i proteći će struja. Kroz oba otpornika protiče ista struja jer u grani koja ulazi u “+” ulaz OP1 nema struje zbog beskonačno velike ulazne otpornosti OP. Dakle, sva struja nakon prolaska kroz gornji otpornik nastavlja donjim do uzemljenja. Označimo ovu struju sa  $I_1$  (Slika 6) i pišemo:

$$V_1 - RI_1 - RI_1 = 0$$

$$V_1 = RI_1 + RI_1$$

$$V_1 = 2RI_1$$

$$I_1 = \frac{V_1}{2R}$$

Struja  $I_1$  se ne prenosi u desni dio kola jer ne može proteći granom koja ulazi u “+” ulaz OP1, pa gledamo šta jeste povezano sa desnom stranom kola. Sa slike 6, zaključujemo da je to napon  $V_1^+$  koji ujedno predstavlja napon na “+” ulazu OP1. Lako ga izračunavamo polazeći od njega ka uzemljenju:

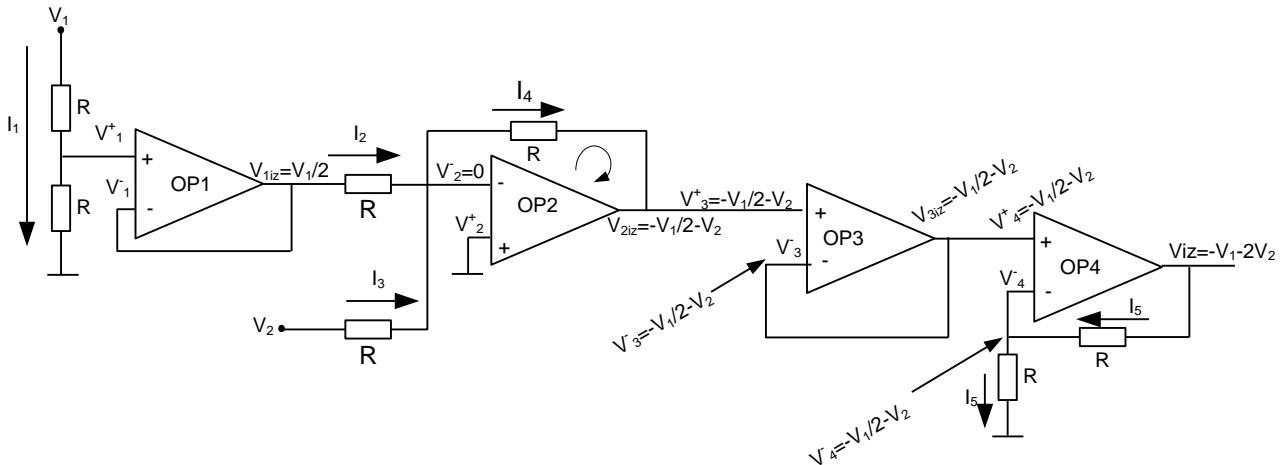
$$V_1^+ - RI_1 = 0$$

$$V_1^+ = RI_1$$

Struju  $I_1$  smo već izračunali, uvrstimo je i dobijamo:

$$V_1^+ = RI_1 = R \frac{V_1}{2R}$$

$$V_1^+ = \frac{V_1}{2}$$



**Slika 6**

Kod OP1, kao i kod svih ostalih OP u zadatku, vezana je negativna povratna sprega, pa važi da je:

$$V_1^- = V_1^+ = \frac{V_1}{2}.$$

U grani koja povezuje “-“ ulaz OP1 sa izlazom, nema struje, ni pada napona, ova grana kratko spaja “-“ ulaz ovog operacionog pojačavača sa izlazom, i napon  $V_1^-$  se nepromijenjen prenosi na izlaz:

$$V_{1iz} = \frac{V_1}{2} = \frac{2V}{2} = 1V \begin{cases} < V_{CC} = 15V \\ > -V_{CC} = -15V \end{cases}.$$

Nije došlo do zasićenja, uzimamo dobijeni rezultat.

Lako je zaključiti da OP1 predstavlja jedinični pojačavač.

Sada gledamo OP2.  $V_{1iz} = \frac{V_1}{2}$  je preko jednog otpornika povezan na “-“ ulaz OP2. Pogledamo “+“ ulaz OP2 i vidimo sa slike 6 da je vezan na uzemljenje, dakle:

$$V_2^+ = 0$$

Vezana je negativna povratna sprega (NPS) pa važi da je:

$$V_2^- = V_2^+ = 0$$

Vidimo da je sa jedne strane otpornika napon  $V_{1iz} = \frac{V_1}{2}$  a sa druge nula. Zaključujemo da će proteći struja, označavamo je sa  $I_2$  i pišemo:

$$\frac{V_1}{2} - RI_2 = 0$$

$$\frac{V_1}{2} = RI_2$$

$$I_2 = \frac{V_1}{2R}$$

Sada gledamo donju granu, idemo od  $V_2$ , ka nuli i pišemo:

$$V_2 - RI_3 = 0$$

$$V_2 = RI_3$$

$$I_3 = \frac{V_2}{R}$$

Struje  $I_2$  i  $I_3$  se spajaju kod „-“ ulaza OP2 i stvaraju novu struju  $I_4 = I_2 + I_3$  (je struja ne može ući u OP2), pa je:

$$I_4 = I_2 + I_3 = \frac{V_1}{2R} + \frac{V_2}{R}.$$

Krećući se od „-“ ulaza OP2, kao najbližeg poznatog napona, možemo odrediti napon  $V_{2iz}$ . Pišemo:

$$0 - RI_4 = V_{2iz}$$

$$V_{2iz} = -R \left( \frac{V_1}{2R} + \frac{V_2}{R} \right)$$

$$V_{2iz} = -R \frac{1}{R} \left( \frac{V_1}{2} + V_2 \right)$$

$$V_{2iz} = -\frac{V_1}{2} - V_2 = -\frac{2V}{2} - 3V = -4V \begin{cases} < V_{CC} = 15V \\ > -V_{CC} = -15V \end{cases}$$

Ni ovdje nije došlo do zasićenja OP i uzimamo dobijeni rezultat.

Napon  $V_{2iz}$  se bez ikakvih promjena prenosi na „+“ ulaz OP3, pa je:

$$V_3^+ = -\frac{V_1}{2} - V_2$$

Vezana je NPS i za OP3, pa će biti dalje:

$$V_3^- = V_3^+ = -\frac{V_1}{2} - V_2$$

Napon  $V_3^-$  se dalje granom koja kratko sapaja “-“ ulaz OP3 sa izlazom, bez promjena, prenosi na izlaz OP3, pa će biti:

$$V_{3iz} = V_3^- = -\frac{V_1}{2} - V_2 = -\frac{2V}{2} - 3V = -4V \begin{cases} < V_{CC} = 15V \\ > -V_{CC} = -15V \end{cases}$$

Sa slike 3 vidimo da se napon sa izlaza OP3 direktno vodi na “+“ ulaz OP4, pa je:

$$V_4^+ = V_{3iz} = -\frac{V_1}{2} - V_2.$$

I za OP4 je vezana NPS, pa važi:

$$V_4^- = V_4^+ = -\frac{V_1}{2} - V_2.$$

$V_4^-$  je preko otpornika povezan sa uzemljenjem, postoji razlika potencija i struja  $I_5$ . Idemo od  $V_4^-$  ka uzemljenju i pišemo:

$$-\frac{V_1}{2} - V_2 - RI_5 = 0$$

$$-\frac{V_1}{2} - V_2 = RI_5$$

$$I_5 = \frac{-\frac{V_1}{2} - V_2}{R}$$

Gledamo otkud je dotekla struja  $I_5$ . Iz “-“ ulaza OP4 nije mogla jer u grani koja ulazi u OP nema struje, zaključujemo da je dotekla od  $V_{iz}$ , kroz otpornik  $R$ . Idemo od  $V_{iz}$  ka prvom poznatom naponu ( $V_4^-$ ) i pišemo:

$$V_{iz} - RI_5 = -\frac{V_1}{2} - V_2$$

$$V_{iz} = -\frac{V_1}{2} - V_2 + RI_5$$

$$V_{iz} = -\frac{V_1}{2} - V_2 + R \frac{-\frac{V_1}{2} - V_2}{R}$$

$$V_{iz} = -V_1 - 2V_2 = -2V - 6V = -8V \begin{cases} < V_{CC} = 15V \\ > -V_{CC} = -15V \end{cases}$$

Nema zasićenja i uzimamo dobijeni rezultat kao rješenje zadatka.

**Napomena, primijetite da ni u jednoj grani koja ulazi u operacioni pojačavač nema struje.**