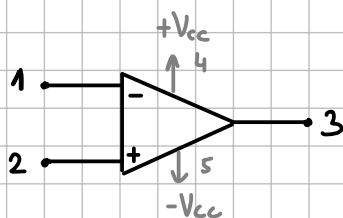
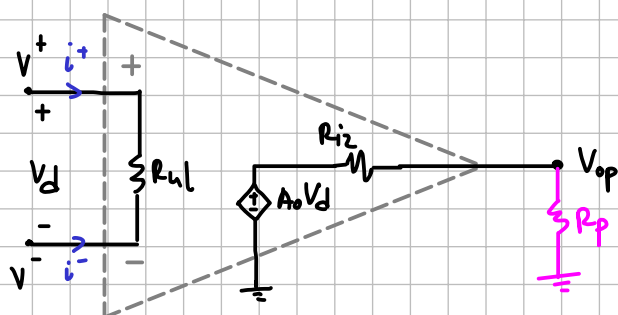


Кола са операционим појачавачима



- 1) Инвертујући прикључак
- 2) Неинвертујући прикључак
- 3) Излазни прикључак
- 4) Позитивно напајање
- 5) Негативно напајање

Реални операциони појачавач:



$$R_{ul} < \infty \quad (\approx 4 \Omega)$$

$$R_{i2} > 0 \quad (\approx \Omega)$$

$$A_0 < \infty \quad (\approx 10^5)$$

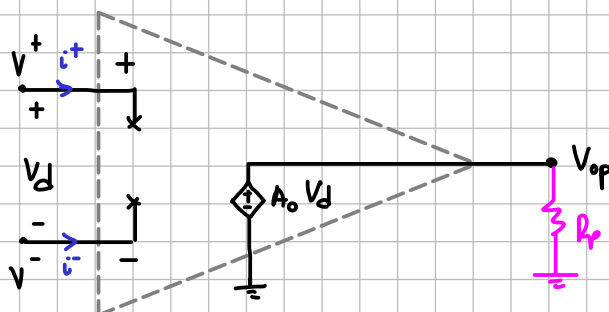
$$V_d = V^+ - V^-$$

$$i^+ = -i^- = \frac{V_d}{R_{ul}}$$

$$V_{op} = \frac{R_p}{R_{i2} + R_p} \cdot A_0 \cdot V_d$$

Напон на излазу зависи од оптерећења

Идеални операциони појачавач:



$$R_{ul} \rightarrow \infty$$

$$R_{i2} = 0 \Omega$$

$$A_0 \rightarrow \infty \Rightarrow V_d = \frac{V_{op}}{A_0} \Rightarrow 0 \Rightarrow V^+ = V^-$$

$$i^+ = -i^- = 0$$

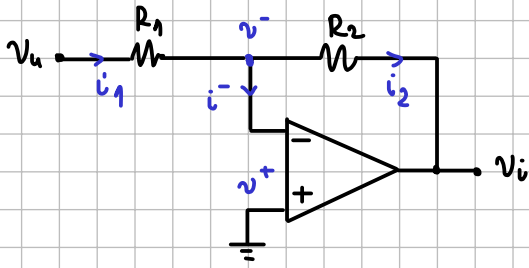
Ако постоји негативна повратна спрега

$$V_{op} = A_0 \cdot V_d$$

Напон на излазу не зависи од оптерећења - излаз ОП-а се понаша као идеални напонски генератор (не пишемо једначине по М.П.Ч. за излаз ОП-а)

Основне конфигурације:

1. Инвертујући појачавач



$$i_1 = i^- + i_2$$

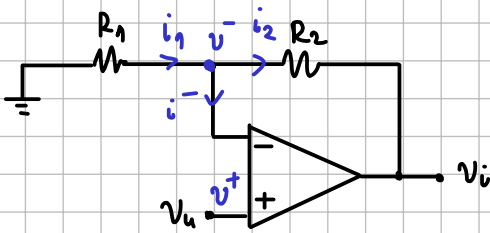
$$i^- = 0 \Rightarrow i_1 = i_2$$

$$\frac{v_u - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_i}{R_2}$$

$$v^- = v^+ = 0 \Rightarrow \frac{v_u}{R_1} = \frac{-v_i}{R_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{v_i}{v_u} = -\frac{R_2}{R_1}}$$

2. Неинвертујући појачавач



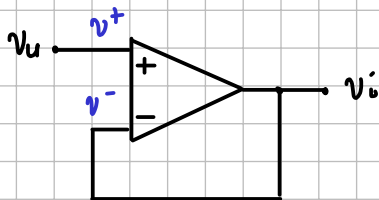
$$i_1 = i^- + i_2 = i_2$$

$$\frac{-v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_i}{R_2}$$

$$v^- = v^+ = v_u \Rightarrow -\frac{v_u}{R_1} = \frac{v_u - v_i}{R_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{v_i}{v_u} = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

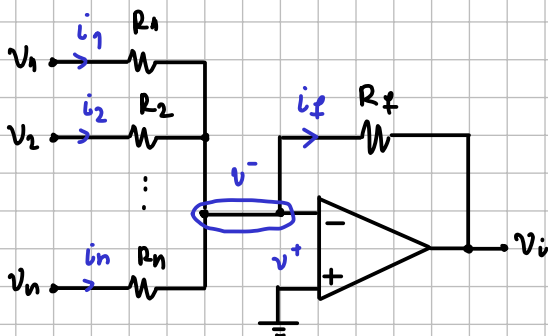
3. Јединични појачавач:



$$v_i = v^- = v^+ = v_u$$

$$\boxed{A_n = \frac{v_i}{v_u} = 1 \quad v_i = v_u}$$

4. Коло сабирача:



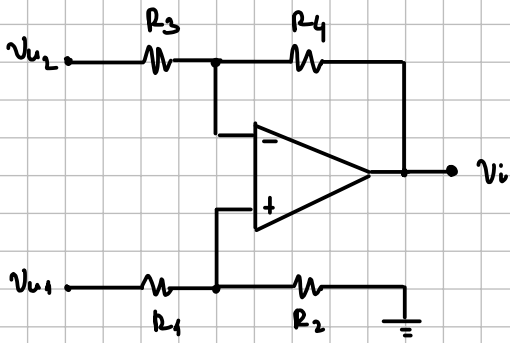
$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = i_f$$

$$v^- = v^+ = 0$$

$$\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n} = -\frac{v_i}{R_f} \quad / \cdot (-R_f)$$

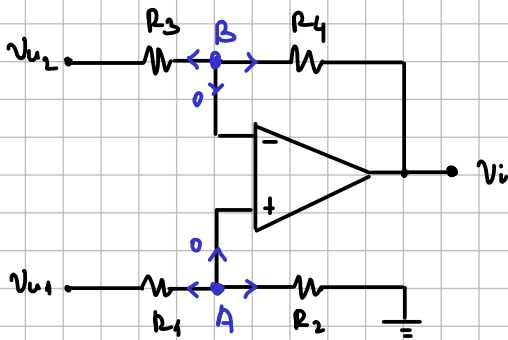
$$\Rightarrow \boxed{v_i = -\frac{R_f}{R_1} \cdot v_1 - \frac{R_f}{R_2} \cdot v_2 - \dots - \frac{R_f}{R_n} \cdot v_n}$$

1. Одредити зависност излазног напона v_i од улазних напона v_{u1} и v_{u2} .



$$v_i(v_{u1}, v_{u2}) = ?$$

I Метода потенцијала чворова:



$$A: \frac{v_A - v_{u1}}{R_1} + \frac{v_A}{R_2} = 0$$

$$B: \frac{v_B - v_{u2}}{R_3} + \frac{v_B - v_i}{R_4} = 0$$

$$OP: v_A = v_B$$

$$A: \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot v_A - \frac{1}{R_1} v_{u1} = 0$$

$$B: \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \cdot v_A - \frac{1}{R_3} v_{u2} - \frac{1}{R_4} v_i = 0$$

$$A: v_A = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot v_{u1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{u1}$$

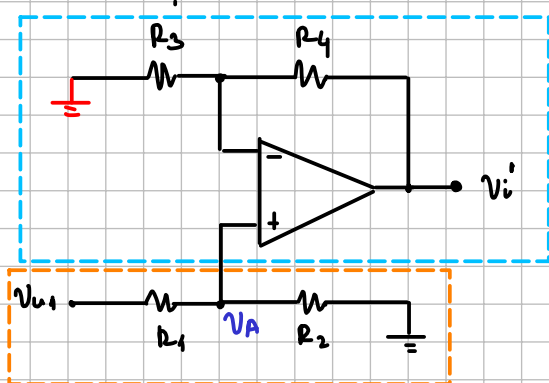
$$B: v_i = R_4 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \cdot v_A - \frac{R_4}{R_3} v_{u2}$$

$$v_i = R_4 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{u1} - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_{u2}$$

$$v_i = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{u1} - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_{u2}$$

II Суперпозиција:

1° v_{u1} - ON, v_{u2} - OFF



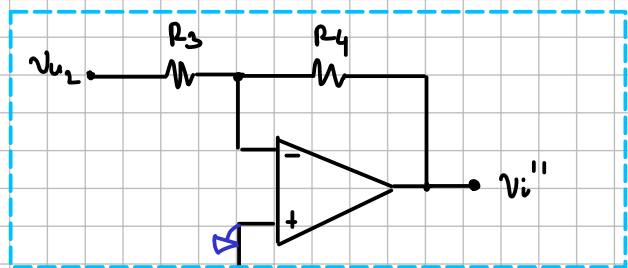
неинвертујући појачавач

$$v_i' = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot v_A$$

$$v_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{u1}$$

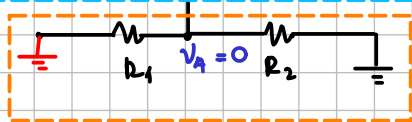
$$\Rightarrow v_i' = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{u1}$$

2° $v_{u1} - \text{OFF}$, $v_{u2} - \text{ON}$



инвертујући појачавач

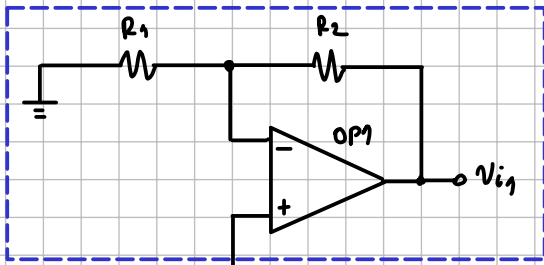
$$v_i'' = -\frac{R_4}{R_3} \cdot v_{u2}$$



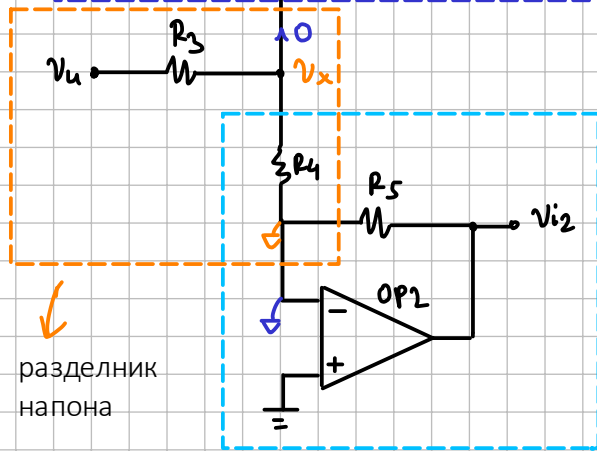
↳ паралелна веза отпорника кроз коју не тече струја, нема пада напона и "+" прикључак је практично везан за масу.

$$v_i = v_i' + v_i'' = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{u1} - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_{u2}$$

2. Одредити зависност излазних напона v_{i1} и v_{i2} од улазног напона v_u .



неинвертујући $\Rightarrow v_{i1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_x$



инвертујући $\Rightarrow v_{i2} = -\frac{R_5}{R_4} \cdot v_x$

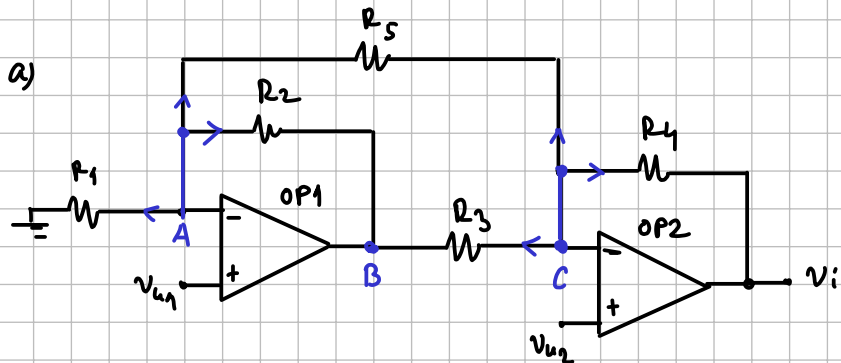
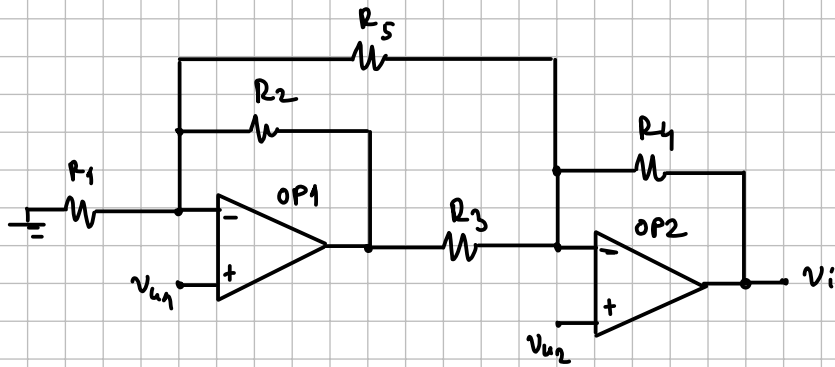
разделник
напона

$$v_x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot v_u \Rightarrow$$

$$v_{i1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot v_u$$

$$v_{i2} = -\frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot v_u = -\frac{R_5}{R_3 + R_4} \cdot v_u$$

3. a) Одредити зависност излазног напона v_i од улазних напона v_{u1} и v_{u2} .
 б) Одредити услов који морају испуњавати отпорности R_1, R_2, R_3 и R_4 да би се коло понашало као појачавач разлике, тј. тако да важи: $v_i = k(v_{u2} - v_{u1})$



OP1: $v_A = v_{u1}$

OP2: $v_C = v_{u2}$

A: $\frac{v_{u1}}{R_1} + \frac{v_{u1} - v_{u2}}{R_5} + \frac{v_{u1} - v_B}{R_2} = 0$

C: $\frac{v_{u2} - v_B}{R_3} + \frac{v_{u2} - v_{u1}}{R_5} + \frac{v_{u2} - v_i}{R_4} = 0$

За чвор В не пишемо једначану, пошто је везан за излаз ОП-а!

A: $v_B = \frac{R_2}{R_1} \cdot v_{u1} + \frac{R_2}{R_5} (v_{u1} - v_{u2}) + v_{u1} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5} + 1 \right) \cdot v_{u1} - \frac{R_2}{R_5} \cdot v_{u2}$

C: $v_i = \frac{R_4}{R_3} (v_{u2} - v_B) + \frac{R_4}{R_5} (v_{u2} - v_{u1}) + v_{u2}$

$$= -\frac{R_4}{R_3} \cdot v_B + \left(\frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_5} + 1 \right) v_{u2} - \frac{R_4}{R_5} \cdot v_{u1}$$

$$= -\frac{R_4}{R_3} \cdot \left[\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5} + 1 \right) \cdot v_{u1} - \frac{R_2}{R_5} \cdot v_{u2} \right] + \left(\frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_5} + 1 \right) \cdot v_{u2} - \frac{R_4}{R_5} v_{u1}$$

$$v_i = \left[-\frac{R_4}{R_3} \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5} + 1 \right) - \frac{R_4}{R_5} \right] \cdot v_{u1} + \left[\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_5} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_5} + 1 \right] \cdot v_{u2}$$

g) $v_i = k \cdot (v_{u2} - v_{u1})$

$v_i = k_1 \cdot v_{u1} + k_2 \cdot v_{u2} \Rightarrow \underline{\underline{k_2 = -k_1}} \Rightarrow v_i = -k_2 v_{u1} + k_2 v_{u2} = k_2 (v_{u2} - v_{u1}) \Rightarrow k = k_2$

$$\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_5} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_5} + 1 = \frac{R_4}{R_3} \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5} + 1 \right) + \frac{R_4}{R_5}$$

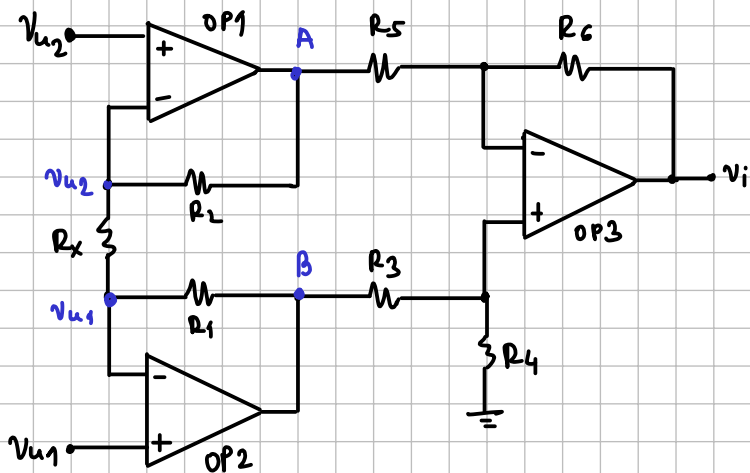
$$\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_5} + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_5} + 1 = \frac{R_4}{R_3} \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5} + 1 \right) + \frac{R_4}{R_5}$$

$$\frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_5} + \frac{R_4}{R_3} + 1 = \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_1} + \frac{R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_5} + \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} = 1$$

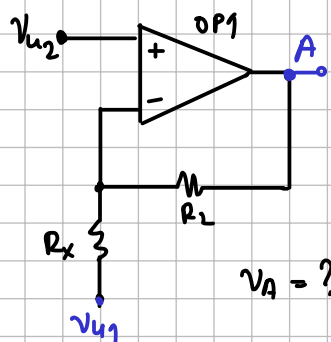
$$\Rightarrow R_1 R_3 = R_2 R_4$$

4. Одредити зависност излазног напона v_i од улазних напона v_{u1} и v_{u2} ако важи:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R, \quad R_x \neq R$$



①



Суперпозицијом се добија:

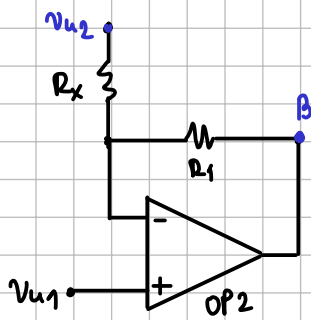
- ОП1 је инвертујући за први улазни напон
 - ОП1 је неинвертујући за други улазни напон
- напон у чвору А је збир напона који се добијају од инвертујућег и неинвертујућег појачвача.

$$v_A' = -\frac{R_2}{R_x} \cdot v_{u1} = -\frac{R}{R_x} \cdot v_{u1}$$

$$v_A'' = \left(1 + \frac{R_2}{R_x}\right) \cdot v_{u2} = \left(1 + \frac{R}{R_x}\right) \cdot v_{u2}$$

$$v_A = v_A' + v_A'' = -\frac{R}{R_x} v_{u1} + \left(1 + \frac{R}{R_x}\right) \cdot v_{u2}$$

②



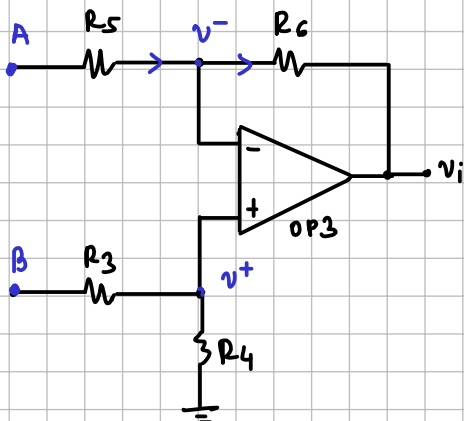
- ОП2 је неинвертујући за први улазни напон
- ОП2 је инвертујући за други улазни напон

$$v_B' = \left(1 + \frac{R_1}{R_x}\right) \cdot v_{u1} = \left(1 + \frac{R}{R_x}\right) \cdot v_{u1}$$

$$v_B'' = -\frac{R_1}{R_x} \cdot v_{u2} = -\frac{R}{R_x} \cdot v_{u2}$$

$$v_B = v_B' + v_B'' = \left(1 + \frac{R}{R_x}\right) \cdot v_{u1} - \frac{R}{R_x} \cdot v_{u2}$$

③



$$v^+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot v_B = \frac{1}{2} v_B$$

$$v^- = v^+$$

$$\frac{v_A - v^-}{R_5} = \frac{v^- - v_i}{R_6} \Rightarrow v_A - v^- = v^- - v_i$$

$$v_i = 2v^- - v_A = v_B - v_A$$

$$v_i = \left(1 + \frac{R}{R_x}\right) \cdot v_{u1} - \frac{R}{R_x} \cdot v_{u2} - \left(1 + \frac{R}{R_x}\right) \cdot v_{u2} + \frac{R}{R_x} \cdot v_{u1}$$

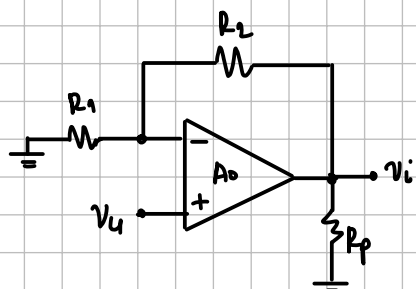
$$v_i = \left(1 + \frac{2R}{R_x}\right) v_{u1} - \left(1 + \frac{2R}{R_x}\right) \cdot v_{u2}$$

$$v_i = \left(1 + \frac{2R}{R_x}\right) \cdot (v_{u1} - v_{u2})$$

5. У колу је дат реални операциони појачавач са појачањем $a_0 = 60\text{dB}$, бесконачном улазном отпорношћу и нултом излазном отпорношћу.

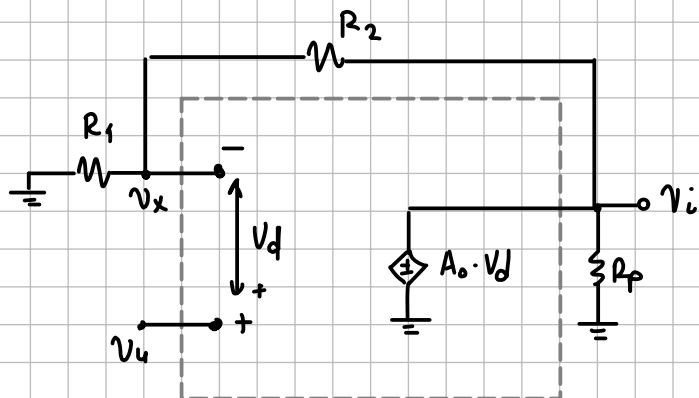
а) Одредити укупно напонско појачање: $A_n = v_i / v_u$

б) Упоредити резултат са случајем када би у колу био употребљен идеални ОП ($A_0 \rightarrow \infty$)



$$R_1 = 100\Omega \quad R_p = 50\Omega$$

$$R_2 = 10\text{k}\Omega$$



$$v_i = A_0 \cdot v_d \Rightarrow v_d = \frac{v_i}{A_0}$$

$$v_d = v_u - v_x$$

$$v_x = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_i$$

$$\Rightarrow \frac{v_i}{A_0} = v_u - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_i$$

$$v_u = \frac{v_i}{A_0} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_i = \left(\frac{1}{A_0} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot v_i$$

$$A_n = \frac{v_i}{v_u} = \frac{1}{\frac{1}{A_0} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$$a_0 = 20 \log A_0$$

$$\frac{a_0}{20} = \log A_0 \Rightarrow A_0 = 10^{\frac{a_0[\text{dB}]}{20}} = 10^{\frac{60}{20}} = 10^3 = 1000$$

$$\Rightarrow A_n = \frac{v_i}{v_u} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{10^2}{10^2 + 10^4}} \approx 91,73$$

δ) $A_{ni} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{10^4}{10^2} = 101 \Rightarrow A_n$ се смањило у односу на A_{ni} за $\approx 10\%$