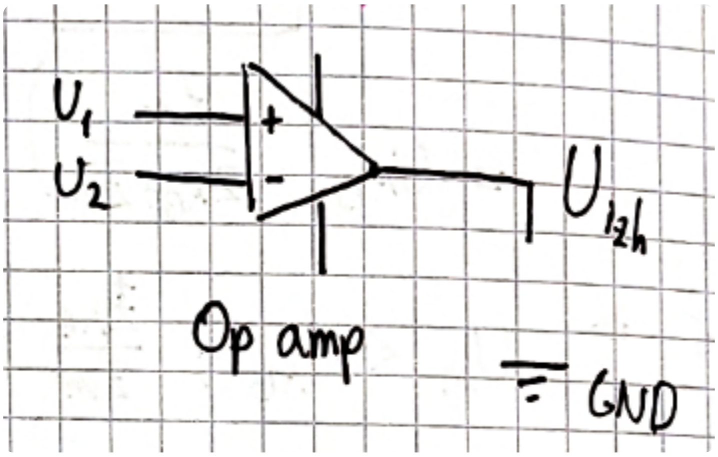
Operacijski ojačevalnik (Op amp)

Operacijski ojačevalnik je vezje, ki ojača šibke električne signale. Ima dva vhoda (en “inverting” U_1 in en “non-inverting” U_2) in en izhod U_{izh}. Njegov namen je, da ojača razliko napetosti na teh dveh vhodih. Iz strani pa ima še dva vhoda za napajanje. Shematično ga predstavimo takole:



Za prenosno funkcijo operacijskega ojačevalnika v grobem velja:

$$H = A_{DC} H_{LPF}$$

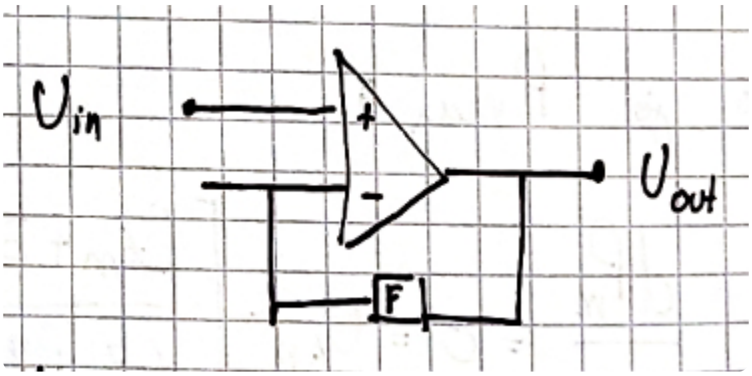
kjer je H_{LPF} prenosna funkcija low pass filtra. Napetost na izhodu U_{izh} dobimo preko formule:

$$U_{izh} = A_{DC}(U_1 - U_2)$$

kjer je A_{DC} t.i. **“open-loop gain”** operacijskega ojačevalnika. Termin open-loop tu pomeni, da imamo tu odsotnost kakršnekoli povratne zanke. A_{DC} je ponavadi zelo velik, recimo $A_{DC} \sim 10^6$. To pomeni, da že majhna razlika napetosti vodi v saturacijo in distorzijo signala (glej “clipping”), zato se pogosto uporablja zraven pe negativna povratna zanka ali pa celo pozitivna povratna zanka v primeru regeneracijskih vezji (beri več tukaj).

Negativna povratna zanka

Negativno povratno zanko ustvarimo tako, da povežemo izhod operacijskega ojačevalnika na invertirajoči vhod U_2 preko nekega upora F. Dobljenemu vezju pravimo tudi **“ne-invertirajoči ojačevalnik”**. Shematično prikazano zgleda takole:



Njegov faktor ojačanja oz. **gain** A, je pogojen z uporom F. Poglejmo:

$$A(U_{in} - FU_{out}) = U_{in}$$

$$AU_{in} = AFU_{out} + U_{out}$$

$$\Rightarrow H = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{A}{AF+1} = \frac{1}{F + \frac{1}{A}} \approx \frac{1}{F}$$

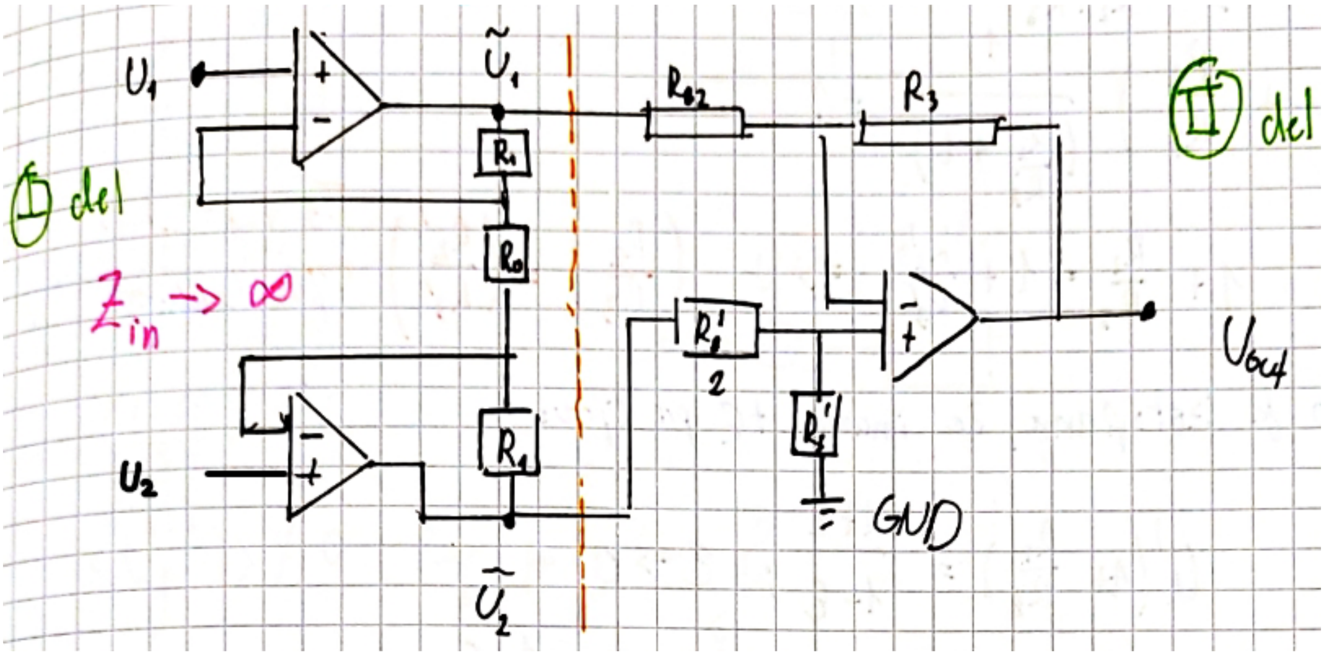
Tu smo upoštevali, da lahko zanemarimo en del ulomka, ker je A velik (po zgledu “open-loop” gain-a). Vidimo:

$$F = 1 \quad \Rightarrow \quad H = \frac{U_{out}}{U_{in}} = 1$$

To nam torej sledi vhodu, **brez da bi od signala črpalo moč**. Kot smo ugotovili v prejšnjem poglavju ima $Z_{in} \to \infty$.

Instrumentacijski ojačevalnik

Poglejmo si sedaj instrumentacijski ojačevalnik. Ta je sestavljen iz treh “buffer” ojačevalnikov, ki nam omogočijo, da ni treba enačiti impedanc, ko merimo nek signal. Pomaga nam tudi tako, da se z njim znebimo induktivnih motenj. Sestavljen je takole:



Poglejmo si najprej prvi del vezja označen z rimsko I. Če zapišemo Kirchoffov zakon, se mora ohranjati vsota:

$$\tilde{U}_1 + \tilde{U}_2 = U_1 + U_2$$

Lahko pišemo potem:

$$\frac{\tilde{U}_1 - U_1}{R_1} + \frac{U_2 - \tilde{U}_2}{R_1} = \frac{U_1 - U_2}{R_0}$$

$$\frac{(\tilde{U}_1 - \tilde{U}_2)(U_2 - U_1)}{R_1} R_1 = \frac{2(U_1 - U_2)}{R_0} R_1$$

$$(\tilde{U}_1 - \tilde{U}_2) = \left(2\frac{R_1}{R_0} + 1\right)(U_1 - U_2)$$

$$\Rightarrow \Delta\tilde{U} = \left(2\frac{R_1}{R_0} + 1\right)\Delta U$$

Poglejmo še drugi del vezja označen z rimsko II:

$$\frac{\tilde{U}_2 - U}{R_2'} = \frac{U}{R_3'} \quad \to \quad \frac{\tilde{U}_2}{R_2'} = U\left(\frac{1}{R_3'} + \frac{1}{R_2'}\right) = U\frac{R_2' + R_3'}{R_3' R_2'}$$

$$\Rightarrow U = \tilde{U}_2 \frac{R_3'}{R_2' + R_3'}$$

In še za drugo vejo vezja:

$$\frac{R_3}{R_2}\tilde{U}_1 - \frac{R_3}{R_2}U = U - U_{out}$$

In vstavimo, kar smo izračunali prej:

$$\Rightarrow U_{out} = -\frac{R_3}{R_2}\left[\tilde{U}_1 - \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\frac{R_3'}{R_2' + R_3'}\tilde{U}_2\right]$$

Sedaj pa: Želeli si bi, da bi bil pred-faktor pred $\tilde{U}_2$ enak 1:

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\frac{R_3'}{R_2' + R_3'} = 1$$

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\frac{1}{\frac{R_2'}{R_3'} + 1} = 1$$

$$1 + \frac{R_2}{R_3} = 1 + \frac{R_2'}{R_3'}$$

$$\Rightarrow \frac{R_2}{R_3} = \frac{R_2'}{R_3'}$$

Ta pogoj pa v praksi ne velja vedno! Poglejmo kolikšno je odstopanje, če imamo $+\varepsilon$ pri uporu:

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\frac{R_3'}{R_2' + R_3'} = \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \qquad \varepsilon \to 0$$

Takrat je:

$$U_{out} = -\frac{R_3}{R_2(1)}\left[\frac{\tilde{U}_1}{1-\varepsilon} - \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}\tilde{U}_2\right]\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon}$$

$$\Rightarrow U_{out} = -\frac{R_3}{R_2(1-\varepsilon)}\left[\Delta\tilde{U} - \varepsilon(\tilde{U}_1 + \tilde{U}_2)\right]$$

Vsoti $\tilde{U}_1 + \tilde{U}_2$ pravimo **common mode**. Sedaj lahko definiramo **Common Mode Rejection Ratio (CMRR)** kot:

$$\mathrm{CMMR} = \frac{A(U_1 - U_2)}{A(U_1 + U_2)}$$

Ta ima vrednost $\approx 10^6$ za zelo dober senzor. Običajno ga podamo v decibelih.