

PRAKTIKUM IZ OSNOVA ELEKTRONIKE
PROF. SMJEROVI

Vježba 8.

OPERACIJSKO POJAČALO

ZADACI

1. Operacijsko pojačalo

- a) Proučite shemu sklopa s integriranim operacijskim pojačalom. Priključite sklop na 220 V. Nacrtajte shemu **svakog pojedinog sklopa** kojeg spojite u narednim zadacima.
- b) Spojite sklop da radi kao **invertirano pojačalo**. U tu svrhu dovedite signal iz generatora pravokutnih signala frekvencije 1 kHz na gornji ulaz pojačala preko $10\text{ k}\Omega$, a donji ulaz pojačala spojite preko $10\text{ k}\Omega$ na masu. U povratnoj vezi priključite pojedine otpore. Snimite oblike i amplitude ulaznog i izlaznih signala. Izračunajte pojačanje sklopa i usporedite ga s teorijskim vrijednostima (uz pretpostavku da je pojačanje bez povratne veze puno veće od 1).
- c) Spojite sklop da radi kao **neinvertirano pojačalo**. U tu svrhu dovedite signal iz generatora pravokutnih signala frekvencije 1 kHz na donji ulaz pojačala preko $10\text{ k}\Omega$, a gornji ulaz pojačala spojite preko $10\text{ k}\Omega$ na masu. U povratnoj vezi priključite pojedine otpore. Snimite oblike i amplitude ulaznog i izlaznih signala. Izračunajte pojačanje sklopa i usporedite ga s teorijskim vrijednostima (uz pretpostavku da je pojačanje bez povratne veze puno veće od 1).
- d) Spojite sklop da radi kao **integrator**. U tu svrhu dovedite pravokutni signal frekvencije 500 Hz na gornji ulaz preko $100\text{ k}\Omega$ a donji ulaz spojite preko $100\text{ k}\Omega$ na masu. U povratnoj vezi priključite predviđene kapacitete (po potrebi paralelno dodajte pojedine otpore). Snimite oblike dobivenih signala, usporedite ih s ulaznim. Odredite uvjete za dobar rad sklopa.
- e) Spojite sklop da radi kao **derivator**. U tu svrhu dovedite pravokutni signal frekvencije 500 Hz na gornji ulaz preko 50 nF , a donji ulaz spojite preko $100\text{ k}\Omega$ na masu. U povratnoj vezi priključite odgovarajuće otpore (po potrebi paralelno dodajte pojedine kapacitete). Snimite oblike dobivenih signala, usporedite ih s ulaznim. Odredite uvjete za dobar rad sklopa.

Napomena: prema potrebi se u povratnoj vezi mogu uključiti vanjska otporna i/ili kondenzatorska dekada.

2. Filteri s aktivnim elementima

- a) Ostvarite aktivni **niskopropusni filter** tako da na gornji ulaz diferencijalnog pojačala, preko otpornika od $10\text{ k}\Omega$ dovedete sinusoidalni signal amplitude 100 mV , a u povratnoj vezi paralelno otporu $100\text{ k}\Omega$ priključite kondenzator od 1 nF . Donji ulaz spojite preko $100\text{ k}\Omega$ na masu. Izmjerite pomoću osciloskopa frekventnu karakteristiku sklopa. Izvedite izraz za pojačanje takvog sklopa i usporedite ga s dobivenim rezultatima. Diskutirajte izmjerene rezultate.
- b) Ostvarite aktivni **visokopropusni filter** tako da na gornji ulaz diferencijalnog pojačala, preko serijskog spoja otpornika od $330\text{ k}\Omega$ i kondenzatora od 1.5 nF dovedete sinusoidalni signal amplitude 1 V , a u povratnoj vezi stavite otpor od $100\text{ k}\Omega$. Donji ulaz spojite preko $100\text{ k}\Omega$ na masu. Izmjerite pomoću osciloskopa frekventnu karakteristiku sklopa. Izvedite izraz za pojačanje takvog sklopa i usporedite ga s dobivenim rezultatima. Diskutirajte izmjerene rezultate.

1. PASIVNI RC I CR FILTERI

U elektroničkim se uređajima, osim željenog signala, često javljaju i neželjena pobuđenja ili oscilacije. Takve signale nazivamo *šumovi* ili *smetnje*. Oni mogu biti posljedica raznih učinaka: nestabilnosti napona napajanja, utjecaja vanjskih smetnji, nedovoljno dobro izvedenog jednog dijela sklopa . . . , pa čak i intrinzičnog šuma pojedinih elektroničkih komponenti.

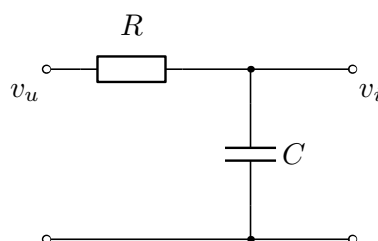
Dio takvih smetnji može se eliminirati kvalitetnim uzemljenjem ili metalnim oklopom (Faradayev kavez!). Međutim, u primjeni u većini slučajeva želimo imati kontrolu nad područjem frekvencija koje želimo eliminirati i/ili propustiti. Takve sklopove nazivamo *filteri*, i ovisno o frekventnoj karakteristici, ih dijelimo na:

- niskopropusni filter (*low pass filter*)
- visokopropusni filter (*high pass filter*)
- pojasno propusni filter (*band pass filter*)
- pojasno nepropusni filter (*band reject filter*)
- uskopojasni (rezonantni) filter (*narrow band filter*)

1.1 Niskopropusni RC filter

Niskopropusni i visokopropusni filteri s pasivnim komponentama odgovaraju sklopovima za integriranje i deriviranje s pasivnim elementima. Razlika je u tome što kod filtera odziv sklopa, tj. njegovo pojačanje, promatramo za **sinusoidalnu** pobudu.

Niskopropusnom filteru odgovara RC krug za integriranje (sl.1).



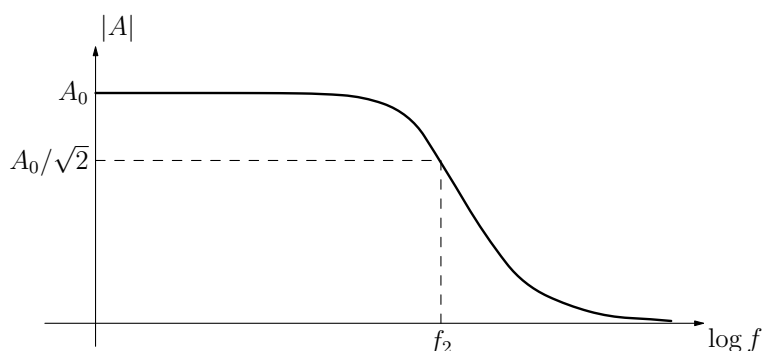
Slika 1.

Njegovo pojačanje dano je izrazom:

$$A = \frac{v_i}{v_u} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_2}}, \quad |A| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_2)^2}}, \quad (1)$$

gdje smo definirali $f_2 = 1/2\pi RC$. Primjećujemo da je za niže frekvencije ($f \ll f_2$) pojačanje praktički konstantno. Kako frekvencija raste, član f/f_2 u izrazu za $|A|$ počinje prevladavati i pojačanje se smanjuje. Na vrlo visokim frekvencijama ($f \gg f_2$) pojačanje postaje zanemarivo.

Iz frekventne karakteristike ovog sklopa, prikazane na slici sl.2, jasno je zašto govorimo o niskopropusnom filteru: sinusoidalne signale frekvencije $f < f_2$ sklop propušta, dok signale frekvencije $f > f_2$ kondenzator uzemljuje.



Slika 2.

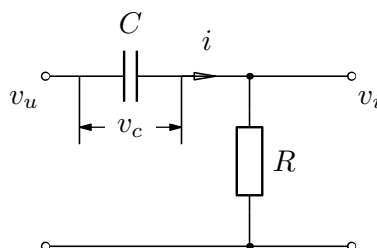
Gornja granična frekvencija niskopropusnog filtera po dogovoru se definira kao frekvencija na kojoj pojačanje padne za faktor $\sqrt{2}$ u odnosu na ravni dio (vidi sliku). Za naš RC filter, ta je frekvencija, prema tome, jednaka $f_2 = 1/2\pi RC$.

1.2 Visokopropusni CR filter

Visokopropusnom filteru odgovara CR krug za deriviranje (sl.3). Njegovo pojačanje je :

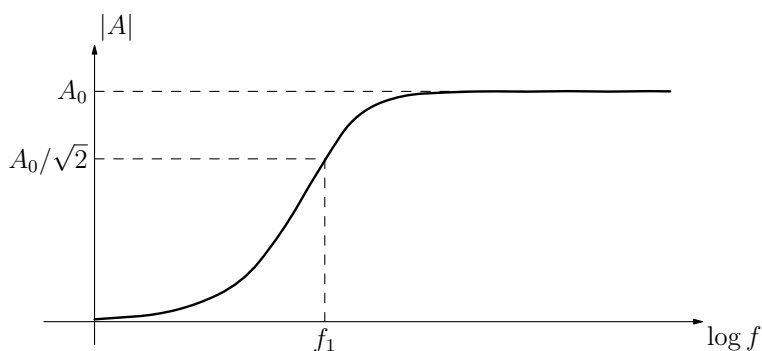
$$A = \frac{v_i}{v_u} = \frac{R}{R - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega RC}} = \frac{1}{1 - j \frac{f_1}{f}}, \quad |A| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_1/f)^2}}, \quad (2)$$

gdje je $f_1 = 1/2\pi RC$. Primjećujemo da je ovdje za niže frekvencije, $f \ll f_1$, pojačanje zanemarivo. Kako frekvencija raste, član f_1/f u izrazu za $|A|$ postaje sve manji i manji, te se pojačanje povećava. Na vrlo visokim frekvencijama ($f \gg f_1$) pojačanje je praktički konstantno.



Slika 3.

Iz frekventne karakteristike ovog sklopa, prikazane na slici sl.4, jasno je zašto govorimo o visokopropusnom filteru: sinusoidalne signale frekvencije $f < f_1$ kondenzator ne propušta, dok signale frekvencije $f > f_1$ propušta.



Slika 4.

Donja granična frekvencija visokopropusnog filtera po dogovoru se definira kao frekvencija na kojoj pojačanje padne za faktor $\sqrt{2}$ u odnosu na ravni dio (vidi sliku). Za naš CR filter, ta je frekvencija, prema tome, jednaka $f_1 = 1/2\pi RC$.

1.3 Pojasno propusni filter

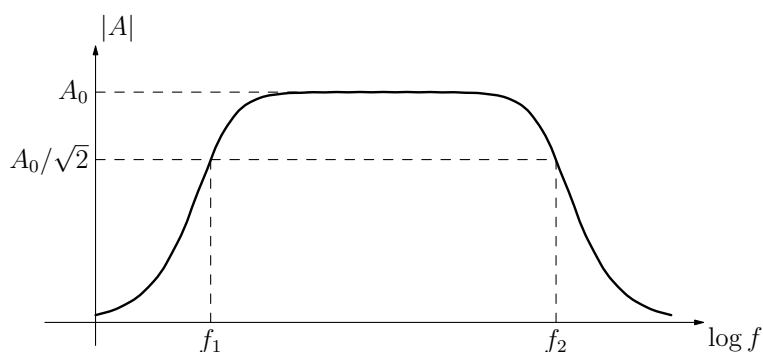
Kombinacijom niskopropusnog i visokopropusnog filtera dobivamo tzv. *pojasno propusni filter*. Npr. ukupno pojačanje serijski spojenih filtera s frekventnim

karakteristikama (1) i (2) (sl.2 i sl.4) iznosi:

$$A = A_{NP} \times A_{VP} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_2}} \times \frac{1}{1 - j \frac{f_1}{f}}, \quad |A| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_2)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (f_1/f)^2}}, \quad (3)$$

gdje su A_{NP} i A_{VP} pojačanja posebno niskopropusnog, odnosno visokopropusnog filtera. Ovdje treba napomenuti da se pojasno propusni filter ne može sastaviti samo tako da se serijski spoje RC i CR krug. Razlog tome leži u činjenici da bi CR krug opterećivao izlaz RC kruga, i time znatno promijenio ovisnost sveukupnog pojačanja o frekvenciji (provjerite!). Jedno od mogućih rješenja bilo bi da se između izlaza RC i ulaza CR kruga stavi sljedilo.

Frekventna karakteristika takvog filtera, uz uvjet $f_1 < f_2$, dana je na sl.5. Očito, sklop dobro propušta samo signale frekvencija većih od f_1 i manjih od

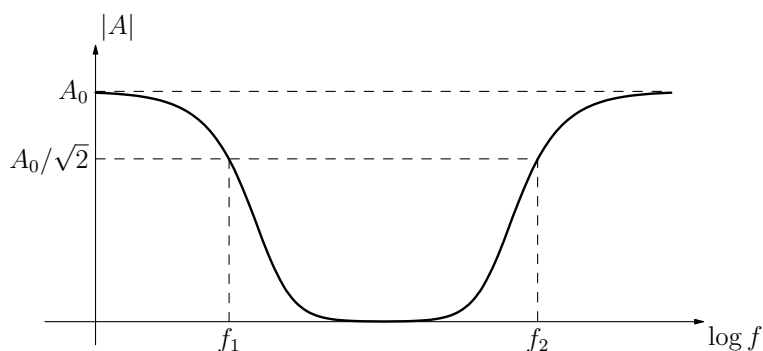


Slika 5.

f_2 . Zato se po dogovoru upravo frekvencije f_1 i f_2 uzimaju kao frekvencije koje određuju pojas propusnosti ovog filtera.

1.4 Pojasno nepropusni filter

Pojasno nepropusni filter po definiciji propušta sinusoidalni signal svih frekvencija osim određenog pojasa. Njegova frekventna karakteristika dana je na sl.6 i iz nje se vidi da se ovaj filter na neki način može shvatiti kao komplement pojasno propusnog filtera. Očito, sklop dobro propušta samo signale frekvencija manjih od f_1 i većih od f_2 . U tom smislu govorimo o pojasno nepropusnom filteru s frekventnim opsegom od f_1 do f_2 .

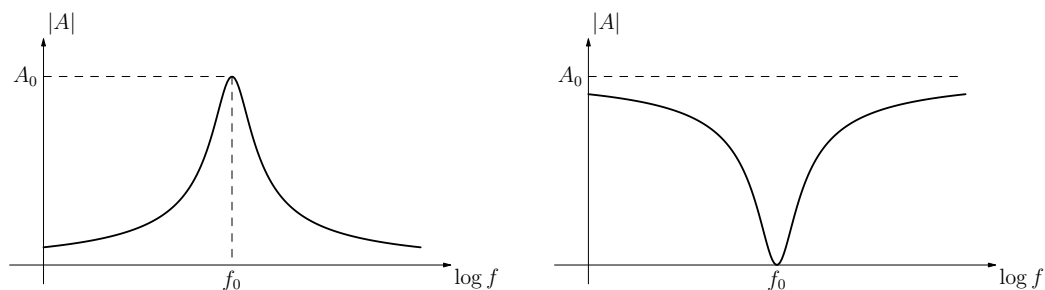


Slika 6.

Konstrukcija sklopa koji bi odgovarao pojasno nepropusnom filteru 'pati' od sličnih problema kao i sklop za pojasno propusni filter. Tako bi se, npr., ovaj filter naizgled mogao dobiti paralelnim spojem RC (nisko-) i CR (visokopropusnog) filtera. U praksi takav sklop neće funkcionirati, jer bi izlazi svakog filtra dodatno opterećivali jedan drugoga.

1.5 Uskopojasni filteri

Uskopojasni filteri su sklopovi koji propuštaju ili blokiraju usko područje frekvencija. Takvi se filteri nazivaju još i rezonantnim filterima, jer se propuštanje tj. blokiranje pojedinih frekvencija uglavnom vrši sa rezonantnim sklopovima. Tipičan takav sklop je RLC krug, koji možemo smatrati da predstavlja i uskopojasni filter s najvećom propusnošću na frekvenciji $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ (vidi sl.7 lijevo). Moguća su i druga rješenja, npr. pojasno propusni filter s $f_1 \approx f_2$ također će propuštati samo usko područje frekvencija.

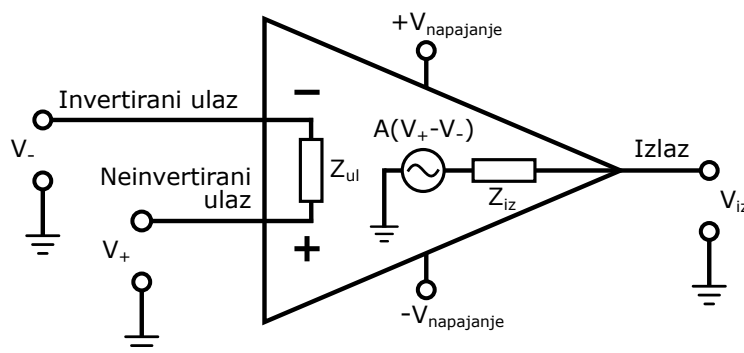


Slika 7.

Na sl.7 (desno) prikazana je frekventna karakteristika uskopojasnog nepropusnog filtera (komplement uskopojasnog propusnog filtera). Njegova glavna značajka je propuštanje praktički svih frekvencija, osim frekvencije f_0 , koju uzemljuje. U tom smislu, taj se filter naziva još i uskopojasno nepropusni filter. Konstrukcija takvih filtera se također sastoji od rezonantnih RLC krugova, a glavnu primjenu nalazi u osjetljivim instrumentima u kojima se želi izbjeći utjecaj vanjskih signala, najčešće poznatih frekvencija. Npr. kako bi se blokirala smetnja frekvencije 50 Hz, koja potječe od mrežnog napona, u razne mjerne instrumente, koji se koriste u eksperimentalnoj fizici, ugrađuju se uskopojasni nepropusni filteri upravo namješteni na frekvenciju 50 Hz.

1. OPERACIJSKA POJAČALA

Operacijska pojačala su elektronički sklopovi građeni od raznih kombinacija naponskih i strujnih pojačala, sljedila, diferencijalnih pojačala, kaskada i drugih elemenata, ali ih razmatramo kao "crne kutije" s dva ulaza: invertiranim (V_-) i neinvertiranim (V_+), te jednim izlazom ($V_{iz} = A_{OP}(V_+ - V_-)$). Karakteristike idealnog operacijskog pojačala su: veliko naponsko pojačanje ($A_{OP} \rightarrow \infty$), beskonačna ulazna ($Z_{ul} \rightarrow \infty$) i zanemarivo mala izlazna impedancija ($Z_{iz} = 0$), široki frekventni opseg, nulti fazni pomak i nepostojeći šum.



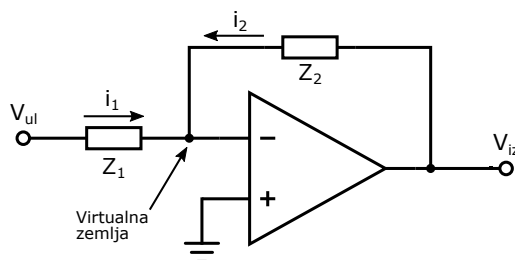
Slika 8. Operacijsko pojačalo

Pojačanje operacijskog pojačala toliko je veliko da i za mali ulazni napon, izlazni napon doseže napon napajanja $V_{napajanje}$ (izlazni napon ne može biti veći od napona napajanja); kaže se da dolazi do zasićenja (saturacije). Dodatni problem predstavlja to što je za realna operacijska pojačala teško u proizvodnji kontrolirati konačno pojačanje A_{OP} . Iz ovih razloga operacijska pojačala najčešće se koriste uz upotrebu negativne (izuzetno rijetko pozitivne) povratne veze koja onda u potpunosti određuje njegova prienosna svojstva. Ovdje ćemo proučiti upotrebu operacijskih pojačala u vidu pojačala, derivatora, integratora te niskopropusnih i visokopropusnih filtera.

Najjednostavniji je primjer tzv. **invertirano pojačalo**, čija se shema nalazi na slici 9. Njegovo pojačanje možemo odrediti ako shvatimo ulogu negativne povratne veze. Ona vraća izlazni signal nazad na ulaz i smanjuje ga sve dok razlika napona dva ulaza u operacijsko pojačalo nije skoro nula. Kada bi imali neku razliku napona na ulazima različitu od nule, na izlazu bi dobili veliki napon

(zbog velikog pojačanja operacijskog pojačala A_{OP}), koji bi se onda vratio nazad na ulaz i smanjio ga. Kako je pojačanje operacijskog pojačala veliko ($A_{OP} \rightarrow \infty$), onda nam je potrebna jako mala razlika potencijala dva ulaza, to jest možemo reći da razlike nema. Iz toga nam proizlazi da je napon na invertiranom ulazu jednak naponu na neinvertiranom ulazu, koji je uzemljen, odnosno nula, pa kažemo da imamo tzv. "virtualnu zemlju". Zbog toga znamo da je pad napona na Z_1 jednak ulaznom naponu V_{ul} , a pad napona na Z_2 izlaznom naponu V_{iz} . Nadalje, znamo da je ulazni otpor operacijskog pojačala jako velik pa možemo pretpostaviti da kroz njega ne teče struja; onda iz Kirchhoffovih zakona znamo da vrijedi $i_1 + i_2 = 0$. Ako to spojimo, možemo dobiti izraz za pojačanje invertiranog pojačala:

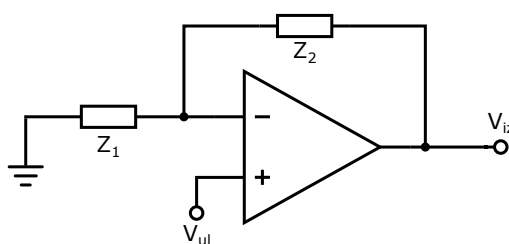
$$\begin{aligned} i_1 &= -i_2, \\ \frac{V_{ul}}{Z_1} &= -\frac{V_{iz}}{Z_2}, \\ A = \frac{V_{iz}}{V_{ul}} &= -\frac{Z_2}{Z_1}. \end{aligned} \quad (4)$$



Slika 9. Invertirano pojačalo

Sličnim razmatranjem za **neinvertirano pojačalo**, čija se shema nalazi na slici 10, dobijemo izraz za pojačanje:

$$A = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}. \quad (5)$$



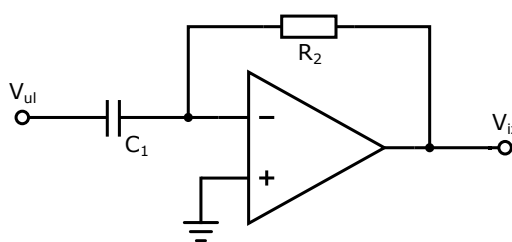
Slika 10. Neinvertirano pojačalo

Operacijsko pojačalo također možemo iskoristiti za deriviranje (slika 11) i integriranje (slika 12). Pogledajmo kakav nam izlazni signal daje **idealni derivator**. Primjećujemo da je idealni derivator oblik invertiranog pojačala sa $Z_1 = 1/j\omega C_1$ i $Z_2 = R_2$ (gdje je ω kružna frekvencija ulaznog signala). Kada to uvrstimo u formulu (4), dobijemo:

$$A_{Der} = \frac{V_{iz}}{V_{ul}} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{1/j\omega C_1}, \quad V_{iz} = -R_2 C_1 j\omega V_{ul}. \quad (6)$$

Dalje možemo iskoristiti "simboličku metodu" koja nam kaže da množenje s $j\omega$ zamijenimo s deriviranjem po vremenu, a dijeljenje s integriranjem po vremenu. Slijedi:

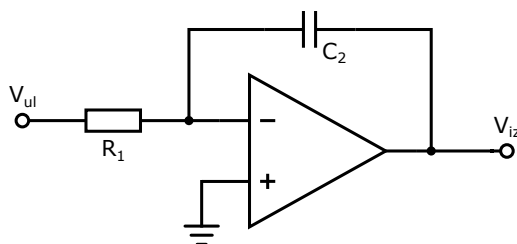
$$V_{iz} = -R_2 C_1 \frac{dV_{ul}}{dt}. \quad (7)$$



Slika 11. Idealni derivator

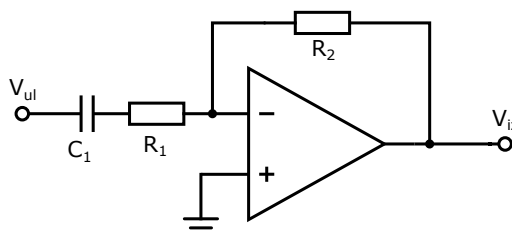
Istim postupkom za **idealni integrator** dobijemo:

$$V_{iz} = -\frac{1}{R_1 C_2 j\omega} V_{ul} = -\frac{1}{R_1 C_2} \int V_{ul} dt. \quad (8)$$

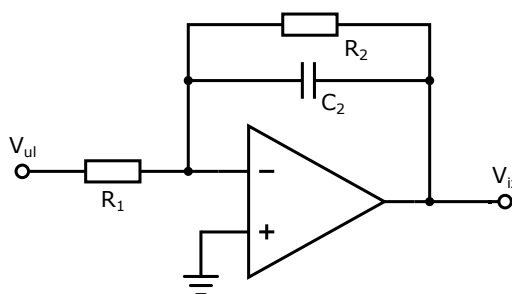


Slika 12. Idealni integrator

Operacijska pojačala možemo iskoristiti i za filtriranje i to u vidu **visokopropusnog** (slika 13) i **niskopropusnog filtera** (slika 14). Izrazi za njihovo pojačanje mogu se izvesti sličnim postupkom kao što smo napravili za derivator imajući na umu izraze za filtere (1) i (2).



Slika 13. Visokopropusni filter



Slika 14. Niskopropusni filter