

# Osnovni sklopovi s operacijskim pojačalima s primjerom praktičnog pH metra

|| M. Kovačić\*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
Sveučilišta u Zagrebu

Zavod za polimerno inženjerstvo i  
organsku kemijsku tehnologiju  
Savska cesta 16/II, 10 000 Zagreb

## Uvod

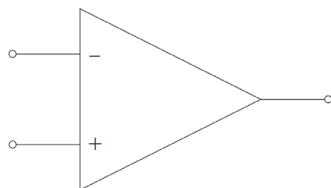
Poznavanje određenih osnova o elektroničkim sklopovima može biti korisno u svakodnevnom radu kemijskog inženjera. Takva znanja primjerice mogu olakšati identifikaciju i otklanjanje kvarova u instrumentaciji i opremi, pomoći u racionalizaciji troškova za opremanje laboratorija te pomoći u razumijevanju kako instrument ili uređaj proizvodi željeni učinak. Općenito tijekom obrazovanja kemijski inženjeri susreću se s osnovama elektrotehnike u određenim kolegijima, međutim ne na dovoljnoj razini za bolje poznavanje principa rada uređaja, što su primijetili i drugi autori.<sup>1</sup> U ovom radu prezentirani su jednostavni praktični sklopovi uz primjer sklopa praktičnog i jednostavnog pH metra. Koliko je poznato autoru, posljednji radovi koji su obradili elektronički aspekt instrumentacije u "Kemiji u industriji" su radovi Ivana Piljca i Mihaela Tkalčeca, "Primjena operacijskih pojačala u elektro-kemijskoj instrumentaciji" te "Elektrokemijski instrumenti na bazi operacijskih pojačala" iz 1971.

## Osnovni sklopovi s operacijskim pojačalima

Osnovni aktivni elektronički element gotovo svih instrumenata je operacijsko pojačalo, integrirani krug kojeg karakterizira pojačanje širokog područja frekvencija te mogućnost ostvarenja velikih naponskih pojačanja. Područje frekvencija najčešće seže od istosmjernog signala (0 Hz) do visokofrekventnih izmjeničnih signala (10<sup>6</sup> Hz). Naponsko pojačanje,  $A_v$ , definiramo kao omjer amplitude napona izlaznog i ulaznog signala.

$$A_v = \frac{u_{izl}}{u_{ul}} \quad (1)$$

Operacijska pojačala krasi najčešće dva ulaza za signal, odnosno invertirajući i neinvertirajući te jedan izlaz. Shematski se prikazuje kao trokut s ulazima i izlazom.

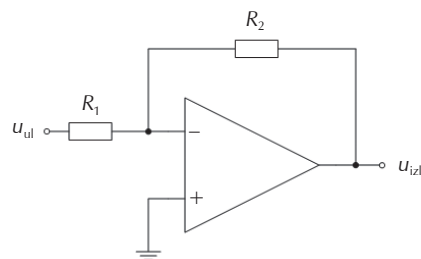


Slika 1 – Shematski prikaz operacijskog pojačala. Invertirajući ulaz označen je s "-", neinvertirajući ulaz s "+" dok se na vrhu trokuta nalazi izlaz

Spajanjem izlaza i ulaza operacijskog pojačala nastaje povratna veza, koja može biti pozitivna ili negativna, ovisno o tome zbraja li se izlaz s ulazom ili se oduzima. U načelu negativna povratna veza ima stabilizirajući učinak na rad pojačala uz smanjenje pojačanja. Pri izvođenju sklopova s operacijskim pojačalima pretpostavljamo idealno ponašanje, što je u većini slučajeva više nego zadovoljavajuća aproksimacija. Idealno pojačalo ima značajke beskonačnog pojačanja otvorene petlje, beskonačan ulazni otpor i gornju graničnu frekvenciju, dok je izlazni otpor jednak nuli.<sup>2</sup> Operacijska pojačala napajaju se najčešće unipolarnim ili bipolarnim napajanjima napona do  $\pm 18$  V.

Osnovni praktični sklopovi s operacijskim pojačalima su invertirajuće pojačalo, neinvertirajuće pojačalo, naponsko slijedilo, sklop za zbrajanje, derivator te integrator. Vidljivo je iz samih naziva sklopova porijeklo naziva "operacijsko pojačalo" te su takvi sklopovi osnova analognih računala.

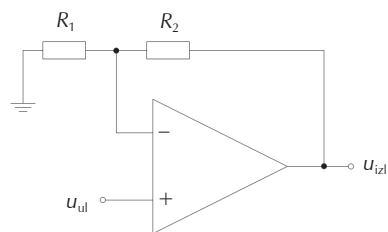
Invertirajuće pojačalo ima negativnu povratnu vezu preko otpornika  $R_2$ , pri čemu omjer otpornika  $R_2$  i  $R_1$  definira pojačanje sklopa. Napon ulaza,  $u_{ul}$ , dovodi se preko otpornika  $R_1$ . Napon izlaza,  $u_{izl}$ , obrnutog je polariteta u odnosu na ulaz.



Slika 2 – Invertirajuće pojačalo

$$u_{izl} = -\frac{R_2}{R_1} u_{ul} \quad (2)$$

Neinvertirajuće pojačalo, za razliku od invertirajućeg, ima uzemljeno dijelilo  $R_1 - R_2$ , dok se napon ulaza dovodi izravno u neinvertirajući (referentni) ulaz, stoga je polaritet napona izlaza istovjetan ulaznom.



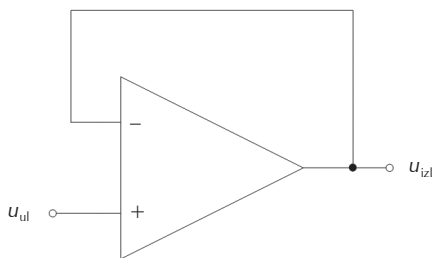
Slika 3 – Neinvertirajuće pojačalo

$$u_{izl} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_{ul} \quad (3)$$

\* Marin Kovačić  
e-pošta: mkovacic1@fkit.hr

Ulazna impedancija invertirajućeg pojačala jednaka je ulaznom omskom otporu, dok je ulazni otpor neinvertirajućeg pojačala jednak ulaznom otporu definiranom u specifikacijama proizvođača. Operacijska pojačala prilagođavaju napon izlaza kako bi napon invertirajućeg ulaza bio jednak neinvertirajućem. Iz navedenog proizlazi kako otpornici  $R_1$  i  $R_2$  invertirajućeg pojačala čine tzv. virtualnu masu, jer su praktične vrijednosti otpornika znatno manje od ulaznog otpora pojačala, stoga se ono zanemaruje.

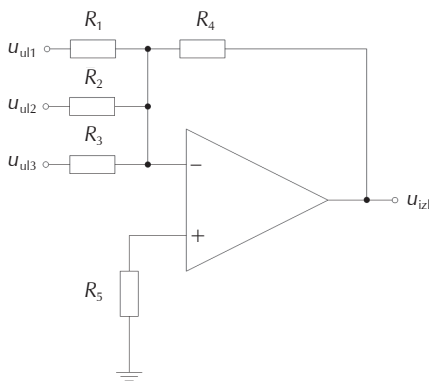
Operacijsko pojačalo spojeno kao naponsko slijedilo ima kratko spojen izlaz s invertirajućim ulazom pojačala, čime se na izlazu dobiva istovjetan napon kao na neinvertirajućem ulazu ( $u_{ul} = u_{izl}$ ). Upotrebljava se za izolaciju pojedinih krugova. Slijedila su važna u elektrokemijskoj instrumentaciji, primjerice u potenciostatima, pri čemu izoliraju referentnu elektrodu od ostatka sklopovlja instrumenta. Najčešće uzimamo kako su operacijska pojačala idealna i stoga izuzetno visokog ulaznog otpora, međutim u praksi određena struja teče kroz ulaze, što može dovesti do pogreške uslijed pada napona. Za slijedila najčešće se upotrebljavaju operacijska pojačala s ulaznim stupnjevima na bazi tranzistora s efektom polja koja imaju vrlo velike vrijednosti ulaznog otpora ( $10^9 - 10^{12} \Omega$ ).



Slika 4 – Naponsko slijedilo

Dobra praksa predstavlja stavljanje slijedila prije invertirajućeg pojačala, čime se sprječava opterećenje prethodnog stupnja. Pri likom odabira operacijskog pojačala za naponsko slijedilo treba obratiti pozornost na specifikacije proizvođača, konkretno na stabilnost pojačala pri jediničnom pojačanju (eng. *unity-gain stability*).

Sklop za zbrajanje, odnosno zbrajalo, na izlazu daje sumu ulaznih napona kojima se može pridati određena težina putem otpora. Zbrajalo je pogodno za generiranje signala pobude u polarografiji izmjeničnom strujom.<sup>3</sup>

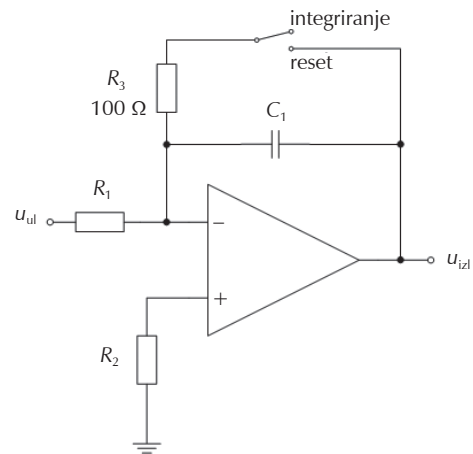


Slika 5 – Sklop za zbrajanje

$$u_{izl} = -R_4 \left( \frac{u_{ul1}}{R_1} + \frac{u_{ul2}}{R_2} + \frac{u_{ul3}}{R_3} \right) \quad (4)$$

Željeni broj ulaza je proizvoljan, pa broj članova jednadžbe treba proširiti ili smanjiti prema potrebi.

Zamjenom otpornika s kondenzatorom u povratnoj vezi dobiva se integrator, odnosno izlazni napon mijenja se u vremenu proporcionalno integralu ulaznog napona. Vremensku konstantu integratora određuje otpornik  $R_1$  te kondenzator  $C_1$ . Otpornici  $R_1$  i  $R_2$  su jednakih vrijednosti.

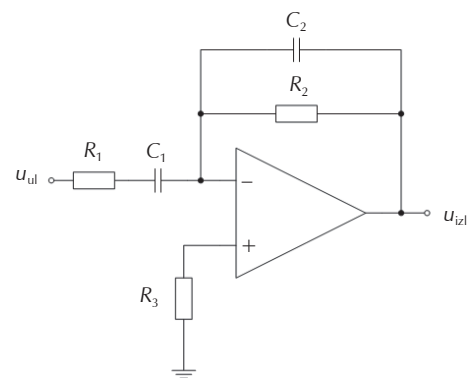


Slika 6 – Integrator

$$u_{izl} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t u_{ul} dt = -\int_0^t \frac{u_{ul}}{R_1 C_1} dt \quad (5)$$

Ponekad je potrebno resetirati integrator pomoću prekidača koji spoji stezaljke kondenzatora  $C_1$  preko otpornika  $R_3$ .

Napon izlaza derivatora jednak je derivaciji ulaznog signala. Zbog tog djelovanja derivator se ponaša kao svojevrsan visokopropusni filter, pri čemu impulsne promjene ulaznog signala rezultiraju naponskim šiljcima na izlazu, dok će konstantan ulazni signal dati napon izlaza jednak nuli.



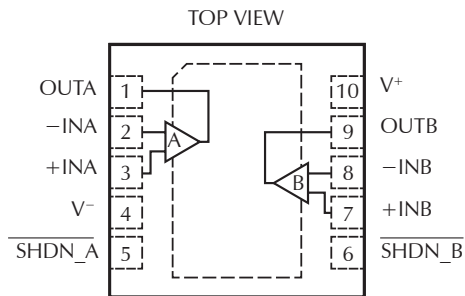
Slika 7 – Derivator

$$u_{izl}(t) = -C_1 R_2 \frac{du_{ul}(t)}{dt} \quad (6)$$

U idealnom slučaju derivator bi sadržavao isključivo kondenzator  $C_1$  i otpornik  $R_2$ , međutim radi se o nestabilnom krugu koji bi reagirao na neizbježan šum. Stoga se dodaju otpornik  $R_1$  i paralelno otporniku  $R_2$  kondenzator  $C_2$ . Time sklop ima integrirajuće djelovanje pri visokim frekvencijama koje nisu od interesa, čime se stabilizira derivator. Važno je dimenzionirati otpor  $R_1$  tako da bude znatno manji od  $R_2$ , isto tako i kondenzator  $C_2$  treba biti barem par redova veličine manji u odnosu na  $C_1$ .

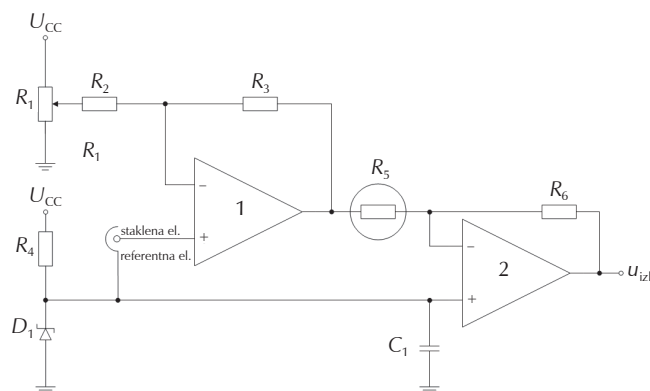
## Praktični pH metar

Na stranicama proizvođača analognih integriranih krugova Linear Technology prikazan je sklop jednostavnog pH metra.<sup>4</sup> Predloženi pH metar sastoji se od naponskog slijedila te invertirajućeg pojačala. Ulazna impedancija slijedila mora biti reda veličine barem  $10^{12} \Omega$ , zbog vrlo velike impedancije pH elektrode te proizvođač preporučuje vlastito LTC6078 precizno operacijsko pojačalo. Međutim LTC6078 nije dobavljen u domaćim trgovinama, stoga ga možemo probati zamijeniti primjerice s Intersilovim CA3240 operacijskim pojačalom. U oba slučaja, kako kod LTC6078 pa i CA3240, radi se o čipovima koji imaju integrirana dva pojedinačna operacijska pojačala.



Slika 8 – Shematski prikaz LTC6078 operacijskog pojačala s naznačena dva integrirana operacijska pojačala (izvor: Linear Technology)

Prilikom odabira operacijskog pojačala za pH metar važno je odabrati ono koje uz velik ulazni otpor ima i malu struju otklona (eng. *input bias current*). Impedancija tipične pH elektrode iznosi oko  $10^8 \Omega$ , pa prema Ohmovom zakonu možemo izračunati kako već pri ulaznoj struji otklona od  $10^{-9} \text{ A}$  imamo pogrešku od 100 mV, odnosno pogrešku od 1,7 jedinica pH.<sup>5</sup> Pogreška s CA3240 će u najgorem slučaju pri 25 °C iznositi 3 mV, odnosno 0,05 jedinica pH. Napon namještanja (eng. *input offset current*) CA3240 u odnosu na LTC6078 veći je gotovo 600 puta.<sup>6,7</sup> Napon namještanja može se kompenzirati putem potenciometra  $R_1$  otpora  $10^5 \Omega$  spojenog na pozitivan pol napajanja operacijskog pojačala te otpornika  $R_2$  i  $R_3$ , otpora  $2 \cdot 10^6 \Omega$  odnosno  $10^3 \Omega$ .<sup>8</sup> Možemo smatrati kako će CA3240 biti zadovoljavajuća zamjena preporučenom operacijskom pojačalu.



Slika 9 – Shema sklopa jednostavnog pH metra.  $U_{CC}$  predstavlja pozitivan pol izvora napajanja.

Otpornik  $R_4$  zajedno sa Zenerovom diodom  $D_1$  služi za pomicanje razine (eng. *level shift*) kako bi se moglo primijeniti unipolarno napajanje s baterijom napona 9 V za mjerenje čitavog područja pH. U kiselom mediju napon izlaza pH elektrode poprimit će pozitivne vrijednosti, dok će u lužnatom poprimiti negativne vrijednosti, pa se uz pomoć pomicanja razine izbjegava bipolarno napajanje. Proizvođač preporučuje upotrebu LT1634 preciznog izvora napona 1,25 V, međutim možemo precizan izvor zamijeniti jeftinijom Zenerovom diodom probojnog napona primjerice od 3,3 V. Vrijednost otpora  $R_4$  može biti primjerice 1000 ili 1500  $\Omega$  a uloga mu je osigurati dovoljnu struju kroz Zenerovu diodu kako bi probojni napon bio stabilan. Za Zenerove diode maksimalne disipacije 0,5 W potrebna struja za zadovoljavanje uvjeta stabilnosti najčešće iznosi oko 5 – 10 mA. Kondenzator  $C_1$  vrijednosti  $10^{-9} \text{ F}$  služi kao niskopropusni filtar za šum na ulazu pojačala 2. Temperaturna kompenzacija ostvaruje se pomoću invertirajućeg pojačala 2 s preciznim otpornikom  $R_5$ , odnosno osjetilom temperature tipa PT146 te otpornikom  $R_6$  vrijednosti  $10^3 \Omega$ . U praksi je češće osjetilo PT100, koje može zamijeniti PT146, pa bi u skladu s time otpornik  $R_6$  trebalo zamijeniti otpornikom vrijednosti  $10^2 \Omega$ . Ukoliko upotrebljavamo pH elektrodu s integriranim otporničkim osjetilom, potrebno je odabrati vrijednost otpornika koja će odgovarati otporu osjetila pri 25 °C. Elektroda se priključuje u pH metar tako da je njezina unutarnja referentna elektroda spojena na neinvertirajući ulaz pojačala "2" a Ag/AgCl žica staklene elektrode na neinvertirajući ulaz pojačala "1". Napon izlaza možemo očitati digitalnim multimetrom te pomoću jednadžbe, uz pretpostavku idealnog odziva pH elektrode, preračunati napon u pH.

$$u_{izl} = 3300 \text{ mV} + 59,2 \text{ mV} \cdot (\text{pH} - 7)$$

Naposljetku postoji nekolicina radova na temu izrade pH metara, primjerice rad Sieversa<sup>9</sup> te Warnera, Boehma i Poola.<sup>10</sup>

## Literatura

- O. A. Sadik, M. C. Cheung, Computer Simulation of Electronic Circuits Used in Chemical Instrumentation, J. Chem. Educ. **78** (5) (2001) 658, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ed078p658>.
- B. Carter, R. Mancini, Op Amps For Everyone. 3<sup>rd</sup> ed. Burlington: Newnes, 2009.
- I. Piljac, M. Tkalcic, Primjena operacijskih pojačala u elektrokemijskoj instrumentaciji, Kem. Ind. **11** (1971) 563.
- pH Probe Amplifier. URL: <http://www.linear.com/solutions/1191> (3. 2. 2015.).
- Process Electrodes and Probes (n.d.). Hanna instruments.
- CA 3240, CA3240A, Dual, 4.5 MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/Bipolar Output (2005.). Intersil.
- LTC6075/LTC6079, Micropower Precision, Dual/Quad CMOS Rail-to-Rail Input/Output Amplifiers (2005.). Linear Technology.
- Op Amp Circuit Collection, Application Note 3 (2002.). National Semiconductor.
- D. Sievers, An Inexpensive pH Meter, J. Chem. Educ. **58** (3) (1981) 281, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ed058p281>.
- B. D. Warner, G. Boehme, K. H. Pool, The Construction of Inexpensive Digital pH Meters, J. Chem. Educ. **59** (1) (1982) 65–66, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ed059p65>.