Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija
odsek NIŠ

Katedra za Informaciono-komunikacione tehnologije

ELEKTRONSKA MERNA INSTRUMENTACIJA - EMI

Prof. dr Zoran Veličković, dipl. inž. el.

2019/2020.

Prof. dr Zoran Veličković, dipl. inž. el.

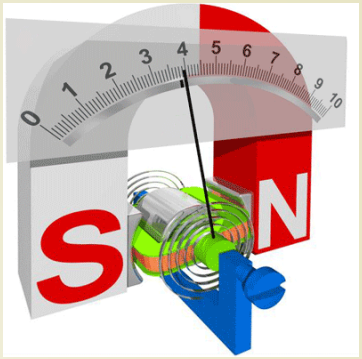
ELEKTRONSKA MERNA INSTRUMENTACIJA

ELEKTRONSKI MERNI INSTRUMENTI:
Ulazno kolo i merni pojačavač
(4)

Sadržaj

- **PODELA MERNIH INSTRUMENATA**
  - Električni merni instrumenti
  - Elektronski merni instrumenti
- **BLOK ŠEMA ELEKTRONSKI MERNIH INSTRUMENATA**
  - Blok šema analognog instr.
  - Blok šema digitalnog instr.
- **KARAKTERISTIKE MERNIH INSTR.**
  - Prednosti elektronskih instrumenata
  - Nedostaci elektronskih instrumenata
- **ULAZNO KOLA MERNOG INSTRUMENTA**
  - RC ulazno kolo
  - Kapacitivno kolo
- **MERNI POJAČAVAČI**
  - Negativna povratna sprega
  - Realni merni pojačavač
  - Propusni opseg mernih pojačavača, GB product
  - Kaskadni pojačavači
  - Operacioni pojačavač
  - Diferencijalni pojačavač
  - Instrumentacioni pojačavač
- **RAČUNSKE FUNKCIJE SA OP**
  - Integrator/Diferencijator sa OP
  - Sabirač sa OP
  - D/A konvertor realizovan sabiračem
  - Komparator sa OP

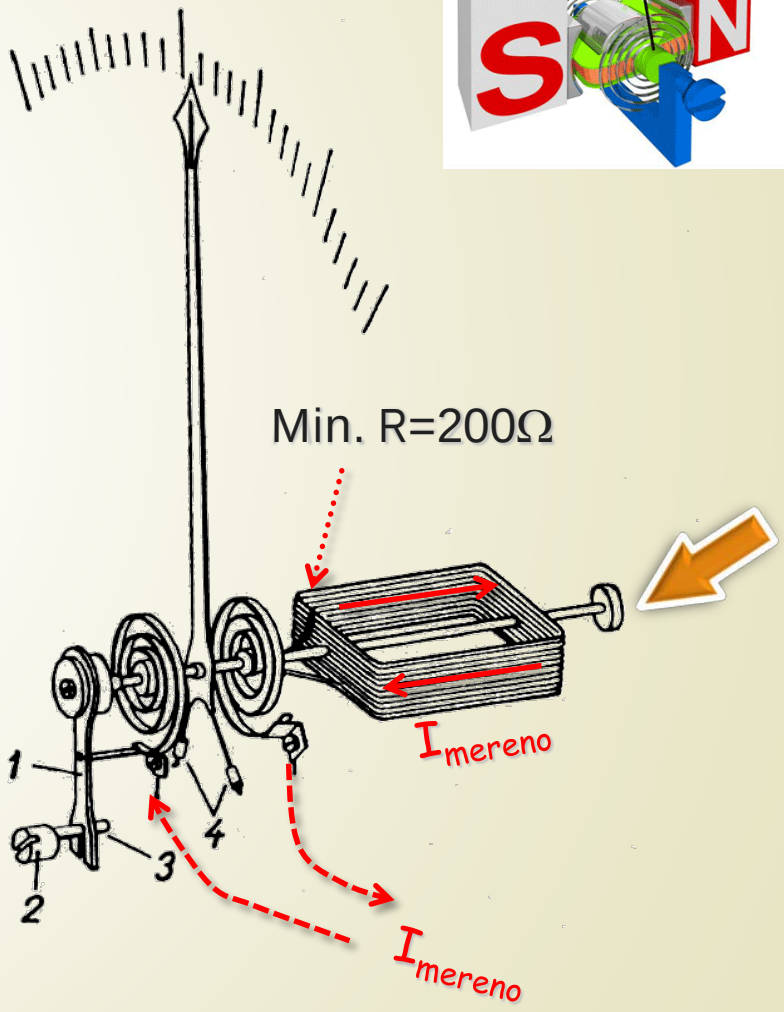
Električni merni instrumenti (1)



- **Električni merni instrumenti** su zasnovani na **MEHANIČKOM DEJSTVU** merene električne veličine (struje) na pokretni deo ovih instrumenta.
- Srce ovih instrumenata je **d'Arsonval**-ov element (**instrument sa kretnim kalemom**) koji se **NE MOŽE** konstruisati tako da bude osetljiviji od 50 mA na punoj skali instrumenta.
- Da bi se ovo merenje obavilo - zahteva se da mereni **SIGNAL POSEDUJE ODGOVARAJUĆU SNAGU**! Kolika neophodna snaga mernog signala?

$$U = RI = 200\Omega \cdot 50\mu A = 10mV$$

$$P = UI = 10mV \cdot 50\mu A = 0.5\mu W$$



Električni merni instrumenti (2)

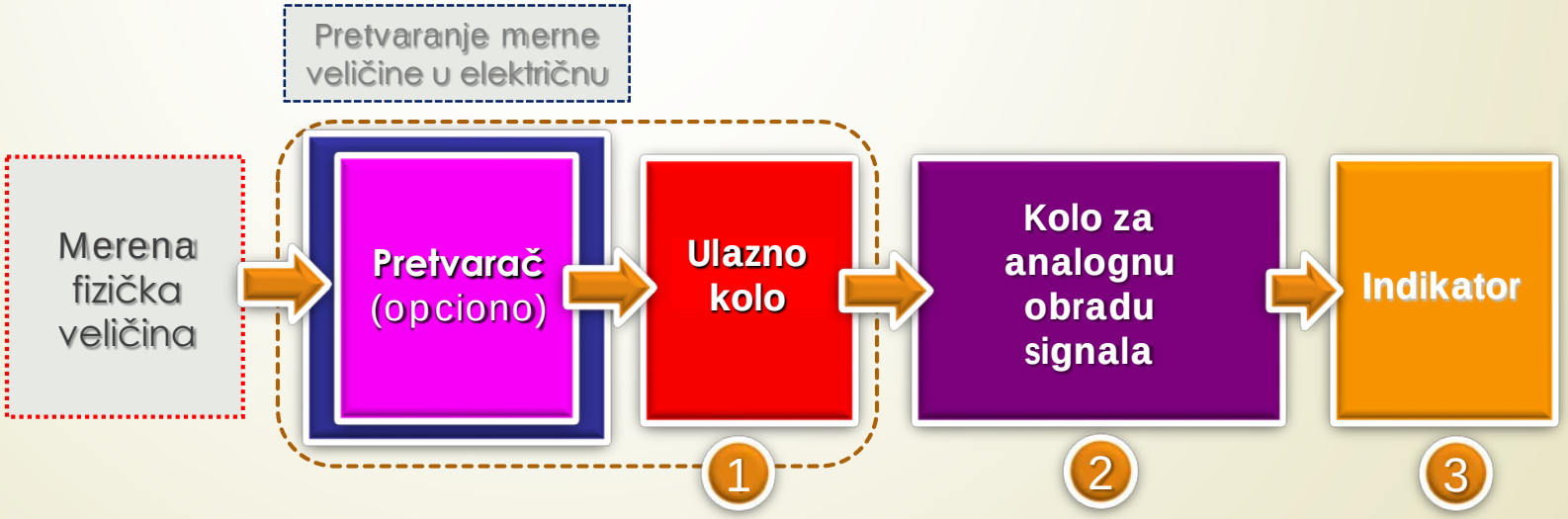
- Dakle, najosetljiviji **ELEKTRIČNI VOLTMETAR** koji se može konstruisati sa sa kretnim kalemom je **10 mV** na punoj skali!
- **KAKO** obezbediti merenje signala struje **MANJIH** od 50 μA?
- **POSLEDICA**: Za merenje manjih struja/napona potrebno je primeniti **POJAČAVAČ MERNOG SIGNALA**.
- U poslednjih 70 godina intezivno se radi na razvoju složenijih, elektronskih mernih instrumenata, čija je osnovna karakteristika postojanje **AKTIVNOG POJAČAVAČKOG SKLOPA**.
- **ANALOGNI ELEKTRIČNI INSTRUMENT** sa **AKTIVNIM POJAČAVAČEM** postao je **ELEKTRONSKI MERNI INSTRUMENT** velike osetljivosti.
- Jedini praktični **NEDOSTATAK** ovih instrumenata bilo je ugrađivanje dodatnog **IZVORA NAPAJANJA**, i u većini slučajeva, vezivanje za električnu mrežu.

Elektronski merni instrumenti

- Obzirom da se većina merenja u elektronici zasniva na **MERENJU NAPONA**, ako nije posebno naglašeno, uglavnom se govori o **VOLTMETRIMA**.
- **VELIKA ULAZNA IMPEDANSA** voltmetara (uz to jednaka za sve naponske merne opsege) je **OSNOVNA PREDNOST** elektronskih instrumentata.
- Za elektronske instrumente je karakteristična **IZUZETNO VELIKA OSETLJIVOST** u **ŠIROKOM FREKVENCIJSKOM OPSEGU**.
- Karakteristična je veoma **MALA GREŠKA MERENJA** (tako da se čak koriste kao etaloni električnih veličina).
- Kod najvećeg broja elektronskih instrumenata postoji **IZLAZNI SIGNAL** sa mernom informacijom u **DIGITALNOM OBLIKU**, kada se nazivaju **DIGITALNI MERNI INSTRUMENTI**.
- Ovo daje **POSEBNU POGODNOST** kod primene u **RAČUNARSKIM** (automatizovanim) obradama rezultata merenja (ovu pogodnost analogni instrumenti ne poseduju).

Blok šema elektronski mernih instrumenata

- **ČETIRI** osnovna sklopa (elektronska kola) **ELEKTRONSKIH MERNIH INSTRUMENATA** su:
  1. **ULAZNO** KOLO
  2. KOLO ZA **ANALOGNU OBRADU** SIGNALA
  3. KOLO **MERNOG INDIKATORA**
  4. **IZVOR NAPAJNJA** ELEKTRONSKIH KOMPONENTI (**nije prikazan** na slici ali se svakako podrazumeva).



Podela mernih instrumenata

- Osnovna **PODELA ELEKTRONSKIH** mernih instrumenata je na:

Analogne

Digitalne

- **ANALOGNI MERNI INSTRUMENTI** se karakterišu pokazivanjem (ili izlazom signala) koji je **KONTINUALNA FUNKCIJA** merene veličine.
- **ANALOGNI POKAZIVAČ** ovu funkciju ostvaruje **SKALOM i KAZALJKOM**, tako da je merna veličina proporcionalna **OTKLONU KAZALJKE**.
- **DIGITALNI MERNI INSTRUMENTI** datiraju od 1953. godine i karakterišu se time što im je pokazivanje (ili izlazni signal) dat u **NUMERIČKOM OBLIKU** - dakle brojevima.
- Kako su merne veličine obično **ANALOGNOG TIPA**, digitalni merni instrumenti moraju izvršiti njihovu **KVANTIZACIJU**, tj. pretvoriti ih iz **ANALOGNOG** u **DIGITALNI** oblik (ovaj proces se naziva **A/D KONVERZIJA**).

Prednosti elektronskih instrumenata (1)

- **ČITLJIVOST INDIKATORA**: **JEDNOZNAČNOST** očitavanja podrazumeva da **SVAKI KORISNIK** rezultata merenja operiše sa istim brojem značajnih cifara.
- **TAČNOST**: digitalni multimetri niže klase **TAČNIJI SU** od analognih univerzalnih mernih instrumenata približno istih cena za oko **10 PUTA**, tj. greške merenja su reda 0,1 % u odnosu na 1 %.
  - Tačnost je zavisna od **PERIODIKE KALIBRACIJE**.
- **RAZLAGANJE** (REZOLUCIJA) je sposobnost mernog instrumenta da razlikuje dve bliske vrednosti. Tako da je skok sa 5½ na 8½ cifara kod digitalnih multimetara, istovremeno znači da se kod merenja jednosmernog napona **RAZLAGANJE** spustilo sa 1 mV na **10 nV**.
- **BRZINA OČITAVANJA**: je **BRZINA SMENJIVANJA REZUL**tata merenja na displeju i izražava se kao broj očitavanja u sekundi.

Prednosti elektronskih instrumenata (2)

- **BRZINA UZORKOVANJA** zavisi od **BROJA CIFARA**, to znači da brzina očitavanja zavisi od razlaganja – rezolucije, pa se sa **SMANJENJEM RAZLAGANJA POVEĆAVA BRZINA OČITAVANJA**.
- **BROJ CIFARA I PREMAŠENJE OPSEGA** se kod digitalnih multimetara često koristi za klasifikaciju u skladu sa **BROJEM PUNIH** (celih) **CIFARA** koje se **MAKSIMALNO PRIKAZUJU** na indikatoru.
- **POUZDANOST DIGITALNIH INSTRUMENATA** - pri **DIGITALNOM MERENJU** merni podatak je sadržan u:
  - **FREKVENCIJI** mernih **IMPULSA**, u
  - **VREMENSKOM INTERVALU** ili
  - **BINARNOM BROJU**.
- **PRILAGOĐENOST RAČUNARU** je osobina digitalnih instrumenata koja im obezbeđuje mesto u svim složenim mernim zadacima, u realizaciji **ETALONA ELEKTRIČNIH VELIČINA.**

Brzina očitavanja nasuprot rezoluciji

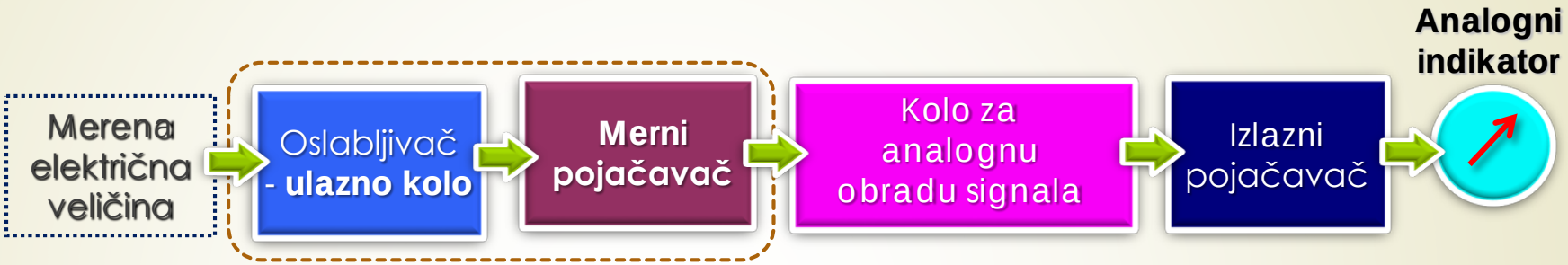
BRZINA UZORKOVANJA (Vreme integraclje)	BRZINA OČITAVANJA Broj očitavanja/s	REZOLUCIJA NA MERNOM OPSEGU 1V	BROJ PUNIH CIFARA
500 ns	100 000	100 mV	4½
1ms	50 000	10 mV	5½
10 ms	6 000	1 mV	6½
1 mS	60	100 nV	7½
10 ms	6	10 nV	8½

½ - podrazumeva samo 0 ili 1(izuzetno i 2)

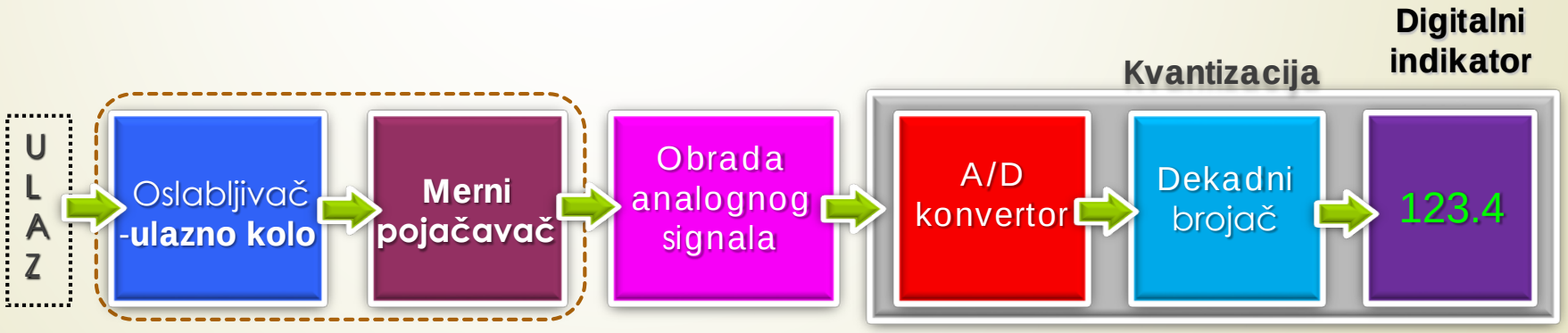
Nedostaci elektronskih instrumenata

- **NEPREGLEDNOST ISTOVREMENOG PRAĆENJA** većeg broja digitalnih instrumenata spada u osnovne **NEDOSTATKE** digitalnih mernih instrumenata.
- **VISOKA CENA** u odnosu na analogne instrumente je bio ali je i dalje **NEDOSTATAK** digitalnih instrumenata.
- **NEPREGLEDNOST OČITAVANJA** je izražena kod digitalnih instrumenata kada se rezultati merenja prikazuju sa 5½ i **VIŠE DIGITA**.
- Merenje sa **VELIKIM BROJEM DIGITA** namenjeno je **AUTOMATIZOVANIM MERENJIMA** i računarskoj obradi podataka.
- **SLOŽENO ODRŽAVANJE I OPRAVKA** - digitalni instrumenti zahtevaju češću kalibraciju u odnosu na analogne merne instrumnte.

Blok šeme analognog/digitalnog el. instrumenta



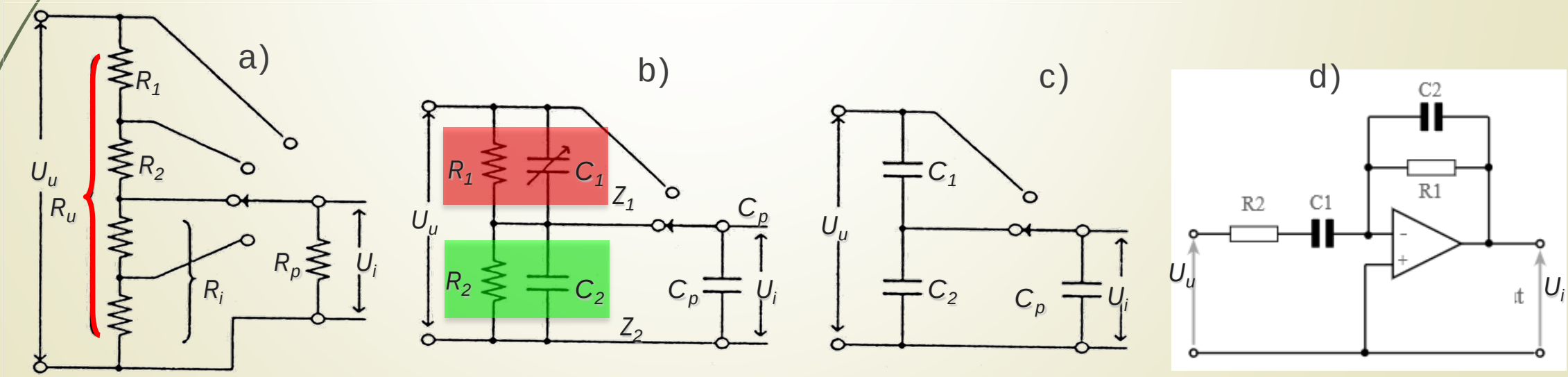
Blok šema **ANALOGNOG** elektronskog mernog instrumenta



Blok šema **DIGITALNOG** elektronskog mernog instrumenta

Ulazno kolo mernog instrumenta

- Po Vašem mišljenju, koji je **ZADATAK** ULAZNOG KOLA?
- U primeni je nekoliko tipova ulaznih kola:
  - **a)** **OTPORNO**, (otporni razdelnik) za **JEDNOSMERNI** napon (a).
  - **b)** **OTPORNO-KAPACITIVNO – RC kolo**, za **NAIZMENIČNI** napon do 1MHz (b).
  - **c)** **KAPACITIVNO**, za **NAIZMENIČNI** napon preko 1MHz (c).
  - **d)** **Sa AKTIVNIM KOMPONENTAMA**, za **VRLO TAČNA** merenja (više na kraju današnjeg predavanja).



RC ulazno kolo

- **OTPORNO-KAPACITIVNO** ulazno kolo *b)* omogućava da izlazni napon **NE ZAVISI** od frekvencije (zašto je to važno?)

$$a = \frac{U_u}{U_i} = \frac{\overline{Z_1}+\overline{Z_2}}{\overline{Z_2}} = 1 + \frac{R_1(1+j\omega C_1 R_1)}{R_2(1+j\omega C_2 R_2)}$$

- Uslov **SKRAĆIVANJA** - nezavisnosti od frekvencije je:

$$(1 + j\omega C_1 R_1) = (1 + j\omega C_2 R_2)$$

$$a = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

- Svodi se na **IZJEDNAČAVANJE** vremenskih konstanti:

$$C_1 R_1 = C_2 R_2$$

$$\tau_1 = \tau_2$$

- Primetite: Kondenzator C_1 je **PROMENLJIV** (zašto)!

Merni pojačavači

- Osnovna uloga mernog pojačavača je da **POJAČA MERNU VELIČINU** do **POTREBNOG NIVOA** za kvalitetno merenje.
- Takođe, merni pojačavači **PRILAGOĐAVAJU IMPEDANSE** mernog kola i mernog instrumenta.
- **UNUTRAŠNJA OTPORNOST INSTRUMENTA**, odnosno, sopstvena potrošnja **NE SME** imati uticaja na mernu veličinu.
- Kod primene mernih pojačavača mora se voditi računa kako o **POJAČANJU SISTEMA**, tako i o uticaju mernog pojačavača na **FAZU MERNOG SIGNALA**.
- Kod merenja električne energije vrlo je bitno očuvati korektan **FAZNI STAV** između merenih veličina napona i struje kako se ne bi pojavila **DODATNA GREŠKA** prouzrokovana ovim efektom.
- **FAZNA GREŠKA** od **1^0** može izazvati relativnu grešku u merenju enegrije - snage od **3%** što je sa stanovišta **KLASE TAČNOSTI** brojila nedopustivo (za domaćinstvo dozvoljena je klasa 2).

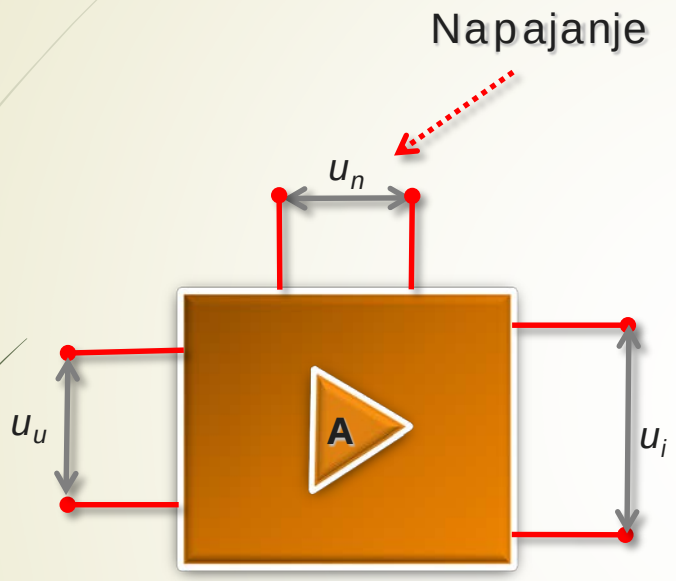
Pojačanje mernog pojačavača – statička k-ka

- **NAPONSKO POJAČANJE POJAČAVAČA** se definiše kao količnik izlaznog i ulaznog napona (ili kao recipročna vrednost slabljenja):

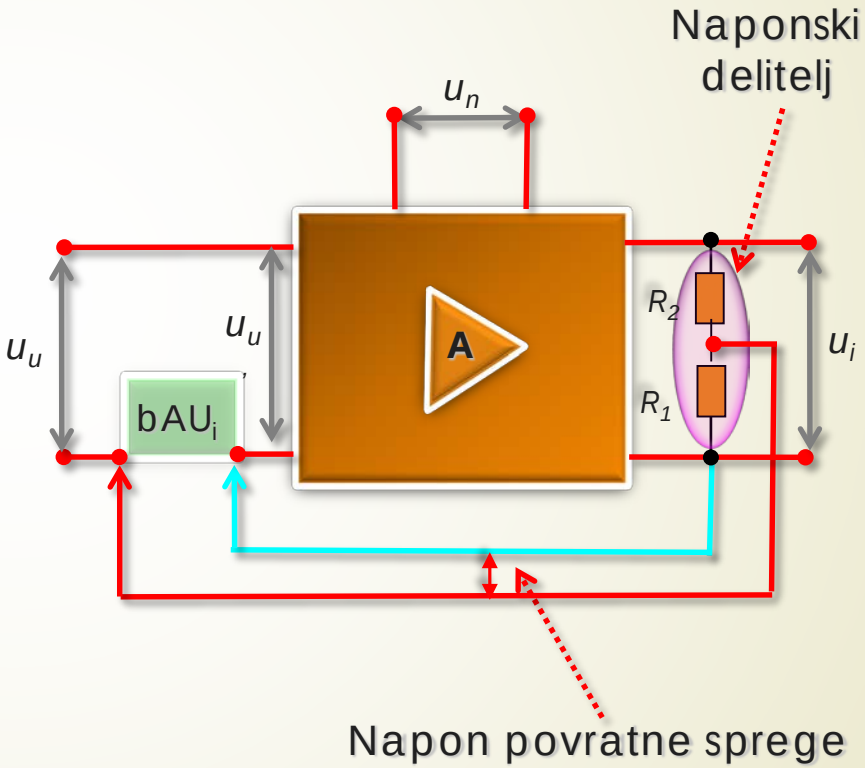
$$A = \frac{U_i}{U_u}, \qquad A[dB] = 20log_{10}A \qquad U_i = AU_u$$

- Na pojačanje **REALNOG MERNOG POJAČAVAČA** znatno utiču:
  - Promene u **NAPAJANJU**;
  - Promene u **TEMEPERATURI** okoline ;
  - **STARENJE** komponenti.
- Osnovni način za **SMANJENJE OVIH UTICAJA** na merni pojačavač JE **NEGATIVNA POVRATNA SPREGA**.
- Kod elektronskih pojačavača sa negativnom povratnom spregom **DEO IZLAZNOG NAPONA** se preko naponskog delitelja **VRAĆA NA ULAZ** pojačavača sa **SUPROTNIM ZNAKOM**.

Negativna povratna sprega (1)



Pojačavač kao četvoropol



A - pojačanje pojačavača

Ako je $\beta A \gg 1$, $A' = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$

Negativna povratna sprega (2)

$$U_i = AU_u' = \frac{A}{1+\beta A}U_u = A'U_u$$

$$\beta A \gg 1, \qquad A' = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

- Pojačanje mernog pojačavača sa **NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM** A' zavisi samo od **VREDNOSTI OPTORNIKA** na izlazu pojačavača koji čine razdelnik napona (R_1 i R_2).
- Pod ovim uslovima pojačanje ovog mernog pojačavača **NE ZAVISI OD SAMOG POJAČANJA** operacionog pojačavača koje je podložno varijacijama.
- **OTPORNIKE** možemo vrlo **PRECIZNO IZABRATI** kako bi postigli željeno pojačanje uz zadovoljavanje potrebnog odstupanja.
- **OSNOVNI NEDOSTATAK** ovih pojačavača je **SMANJENJE POJAČANJA** sistema za puta ali se dobija na STABILNOSTI pojačanja, bez čega njihova primena u mernim kolima nebi bila moguća.

Propusni opseg m.p. – dinamička karakteristika

- **KOMPLEKSNA FUNKCIJA PRENOSA** je odnos amplituda ulaznog i izlaznog signala **U FUNKCIJI UČESTANOSTI** i može se prikazati u kompleksnom obliku:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

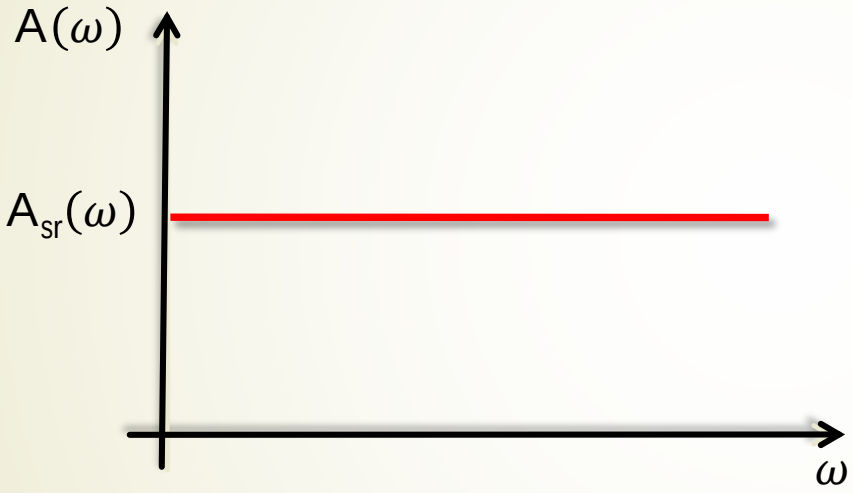
- Moduo kompleksne funkcije prenosa opisuje **POJAČANJE**, odnosno **SLABLJENJE** (promenu osetljivosti sa učestanošću) i naziva se **AMPLITUDSKA KARAKTERISTIKA**.

$$|H(j\omega)| = \mathrm{A}(j\omega) = \left|\frac{X_{ul}(j\omega)}{X_{iz}(j\omega)}\right|, \qquad H(j\omega) = 20log_{10}|H(j\omega)|$$

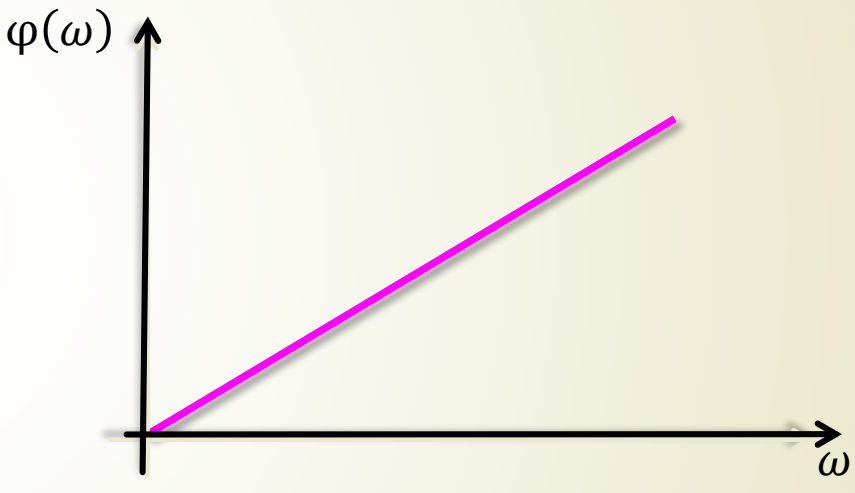
- **KOMPLEKSNA FUNKCIJA** prenosa određena je i FAZNIM UGLOM φ na sledeći način:

$$\varphi(\omega) = tan^{-1}\left|\frac{I_m(j\omega)}{R_e(j\omega)}\right|$$

Idealne karakteristike mernog pojačavača



AMPLITUDSKA karakteristika
IDEALNOG pojačavača



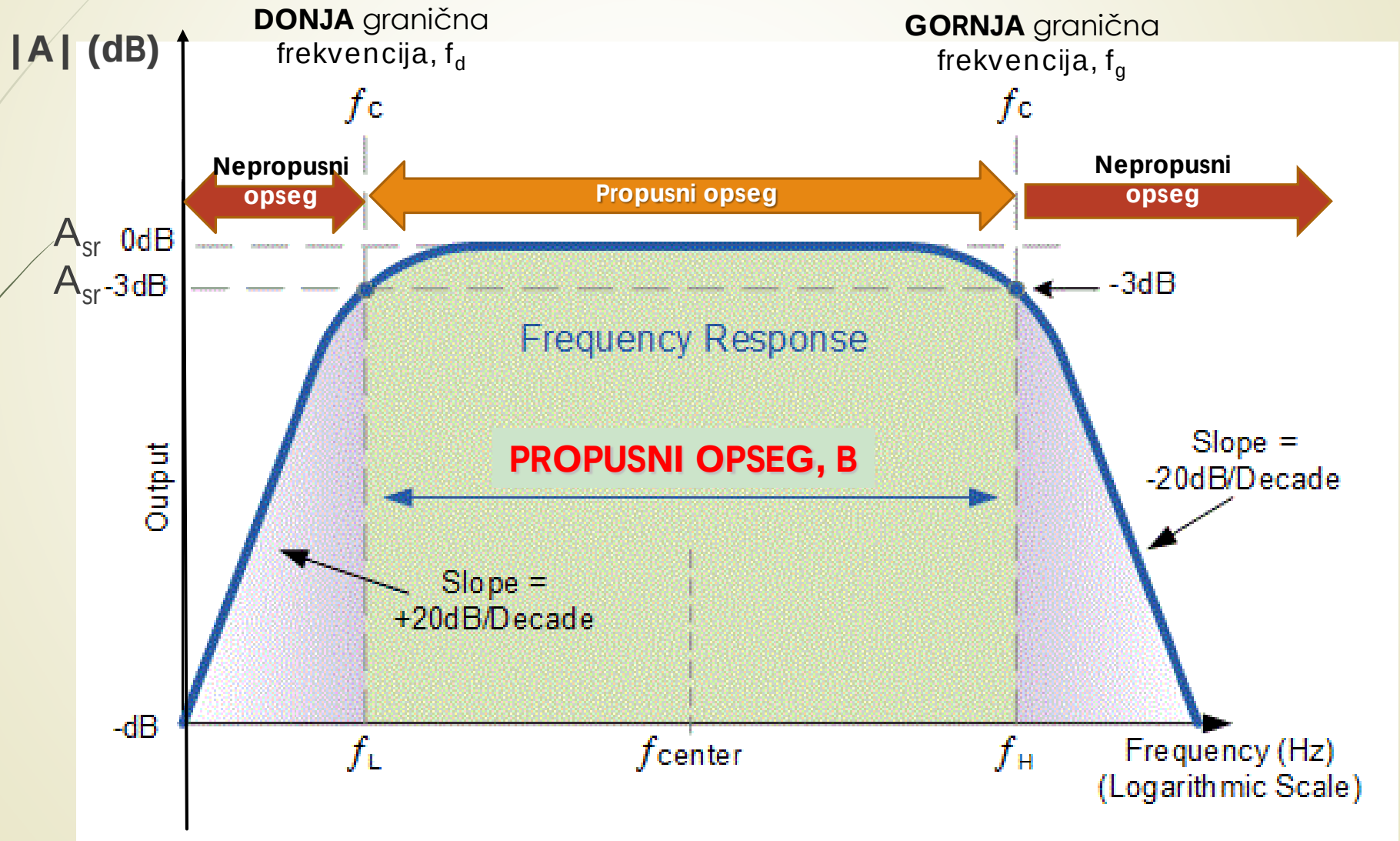
FAZNA karakteristika
IDEALNOG pojačavača

$$\omega = 2\pi f$$

Realni merni pojačavač

- **REALNI MERNI POJAČAVAČI** imaju pojačanje definisano amplitudskom karakteristikom ali samo do neke **GRANIČNE UČESTANOSTI**.
- Zbog toga se definiše **OPSEG FREKVENCIJA** u kojima pojačavač ima zadovoljavajuće karakteristike.
- Ovaj opseg frekvencija se naziva **PROPUSNI OPSEG** pojačavača.
- **PROPUSNI OPSEG** pojačavača je određen graničnim učestanostima na kojima pojačanje opada za 3dB.
- Merni pojačavači se koriste **SAMO U OVOM OPSEGU** jer tada greška (amplitudska i fazna) ima **PRIHVATLJIVU** veličinu.
- Laboratorijska vežba 1 obrađuje ovu tematiku.
- Na sledećoj slici je prikazana amplitudska karakteristika **REALNOG** mernog pojačavača.

Propusni opseg mernih pojačavača



$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

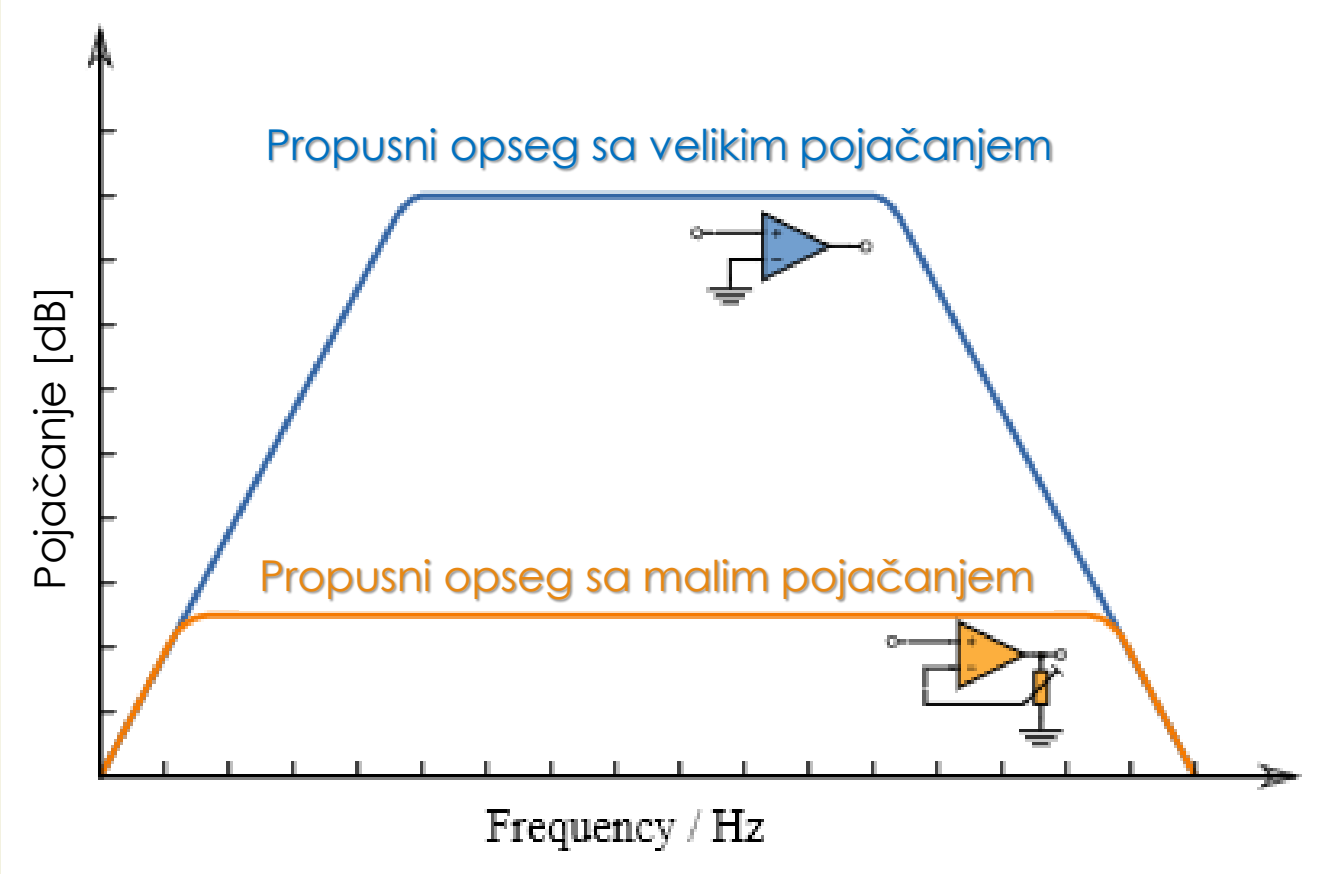
GB proizvod (1)

- Generalno se kod pojačavača definiše **GB PRODUKT** koji povezuje **POJAČANJE POJAČAVAČA G** (engl. *Gain*) i njegov **PROPUSNI OPSEG** (**B**):

$$F = G \cdot B \approx A \cdot f_g$$

- Za pojačavače, ovaj proizvod je **KONSTANTAN**, što znači da je on **OGRANIČAVAJUĆI FAKTOR** za **VELIKO POJAČANJE** u **ŠIROKOM** frekvencijskom opsegu.
- Zbog **GB PRODUKTA USKOPOJASNI POJAČAVAČI** mogu imati **VELIKO POJAČANJE** dok se **ŠIROKOPOJASNI POJAČAVAČI** izvode sa **MALIM POJAČANJEM**.
- Ako povećamo **POJAČANJE** pojačavačkog stepena to možemo uraditi samo na **ŠTETU PROPUSNOG OPSEGA, i OBRNUTO**!
- Problem većeg pojačanja kod širokopojasnih pojačavača se rešava **KASKADNIM POVEZIVANJEM** većeg broja pojačavačkih stepena sa relativno **MALIM POJAČANJEM**.

GB proizvod (2)



- Nešto više o značaju GB produkta možete naći na sledećoj Web adresi:

https://forum.allaboutcircuits.com/threads/op-amps-and-gain-bandwidth-product.43799/

Kaskadni pojačavači

- Sa druge strane, ovo ima utica na **SMANJENJE** gornje granične frekvencije u funkciji **BROJA POJAČAVAČKIH STEPENI** (n) prema sledećem izrazu:

$$f_{g,n} = f_g \cdot \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$$

- Da bi se što vernije prenela **POVORKA PRAVOUGAONIH IMPULSA**, neophodno je da pojačavači imaju **DOVOLJNO ŠIROK PROPUSNI OPSEG**.
- Kao primer možemo navesti da se za porast prednje ivice signala od **1ns** mora obezbediti propusni opseg od najmanje **350 MHz**!
- **DONJA GRANIČNA FREKVENCIJA** takođe ima značaja kod impulsnih signala sa **VELIKOM PERIODOM**, jer dolazi do izobličenja usled punjenja/pražnjenja kondenzatora. Povećanje donje granične frekvencije u zavisnosti od broja identičnih kaskadnih pojačavača (n) se izračunava:

$$f_{d,n} = \frac{f_d}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}}$$

- Da bi se ovaj efekat smanjio, potrebno je koristiti **VELIKU VREMENSKU KONSTANTU** sprežnog **RC kola**. (Zadatak)

Operacioni pojačavač (1)

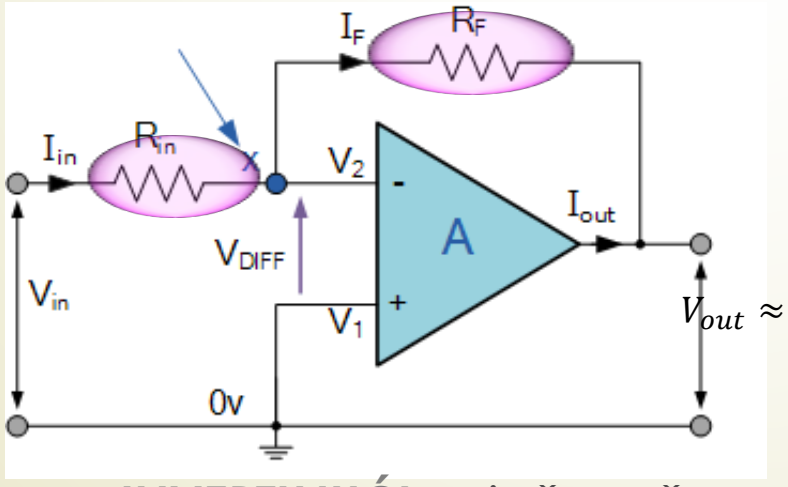
- **NEGATIVNOM POVRATNOM SPREGOM** se mogu ostvariti različiti FUNKCIJSKI **ODNOSI** između ulaznih i izlaznih veličina pojačavača i na taj način sprovesti različite **RAČUNSKE OPERACIJE**.
- Ovo se jednostavno ostvaruje **OPERACIONIM POJAČAVAČIMA** (OP), (kompletnim pojačavačkim kolima izrađenim u integrisanoj tehnici) uz dodavanje **SPOLJNIH - PASIVNIH KOMPONENTI**.
- Operacioni pojačavači koji se koriste u elektronskim mernim instrumentima imaju **EKSTREMNO VELIKO POJAČANJE** (reda 10^5), koje se u procesu analize može smatrati **BESKONAČNOM** vrednošću.
- **ULAZNA IMPEDANSA** je dovoljno **VISOKA** da se u praktičnoj upotrebi mernog instrumenta ne postavlja pitanje opterećenja merenog kola, i iznosi reda **MΩ**.
- **IZLAZNA IMPEDANSA** je dovoljno **NISKA** da se može smatrati **ZANEMARLJIVOM** u najvećem broju slučajeva (**x10 Ω**).

Operacioni pojačavač (2)

- U opštem obliku, izlazni napon **IDEALNOG** operacionog pojačavača je:

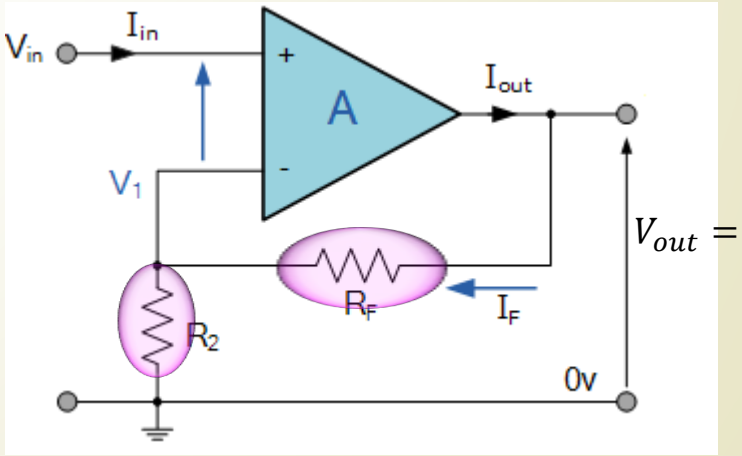
$$V_{out} = \frac{Z_{in} + Z_f}{Z_{in}} V_{in} = \left(1 + \frac{Z_f}{Z_{in}}\right) V_{in}$$

- Dakle, primenom **NEGATIVNE POVRATNE SPREGE** kod idealnog operacionog pojačavača, odnos izlaznog i ulaznog napona određuje se **KOMPONENTAMA POVRATNE SPREGE**, a **NE** karakteristikama samog operacionog pojačavača!



$$V_{out} \approx -\frac{R_f}{R_{in}} V_{in}$$

INVERTUJUĆI pojačavač



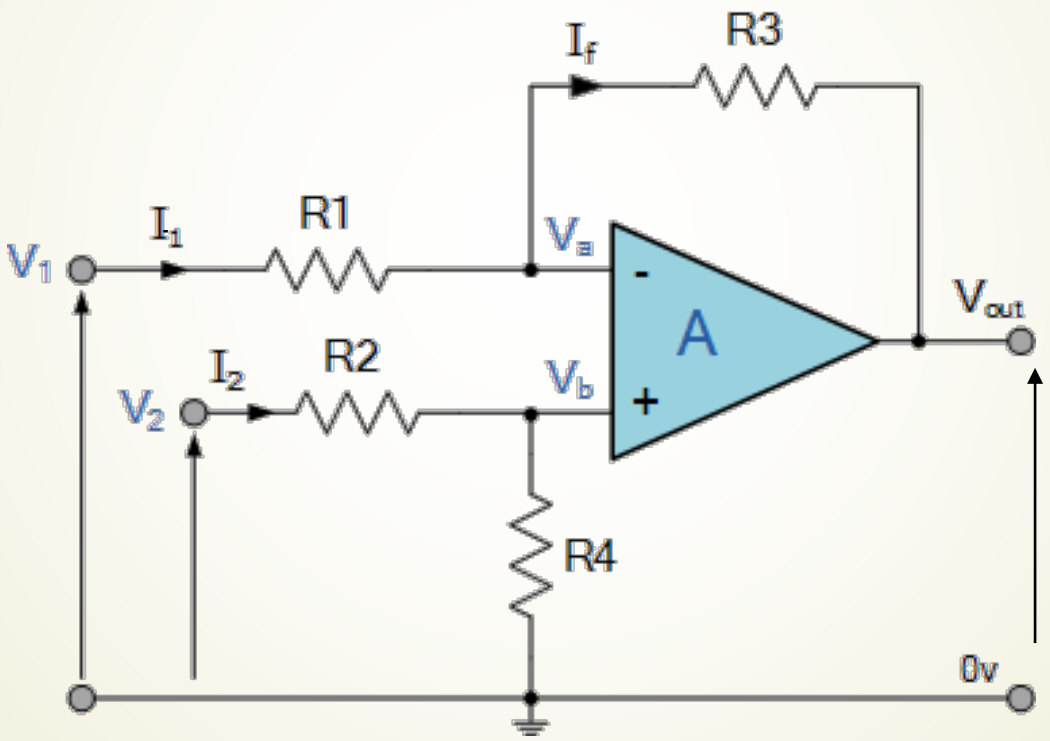
$$V_{out} = \frac{R_2 + R_f}{R_2} V_{in}$$

NEINVERTUJUĆI pojačavač

Diferencijalni pojačavač (1)

- Kod pojačanja **JEDNOSMERNOG NAPONA**, **DIREKTNO SPREGNUTI POJAČAVAČI** kod kojih se VIŠE STEPENI pojačanja **DIREKTNO VEZUJU** jedan za drugim, predstavljaju IDEALNO REŠENJE (posebno sa tačke gledišta donje granične frekvencije).
- Medutim, pojava **DRIFTA U ULAZNOM STEPENU**, koji se pojačava kroz svaki naredni pojačavački stepen direktno spregnutog pojačavača dovodi do njegovih nedopustivo velikih vrednosti na izlazu.
- Zbog toga se, umesto direktno spregnutih pojačavača, za pojačanje **JEDNOSMERNOG NAPONA** primenjuju **DIFERENCIJALNI POJAČAVAČI**.
- Osnovna karakteristika diferencijalnog pojačavača je da pojačava signale kada su u **PROTIVFAZI**, a slabi signale kada su u **FAZI**.
- Ovo ga čini nezamenjivim za pojačanje **JEDNOSMERNIH** ili **SPOROPROMENLJIVIH** signala u prisustvu smetnji.

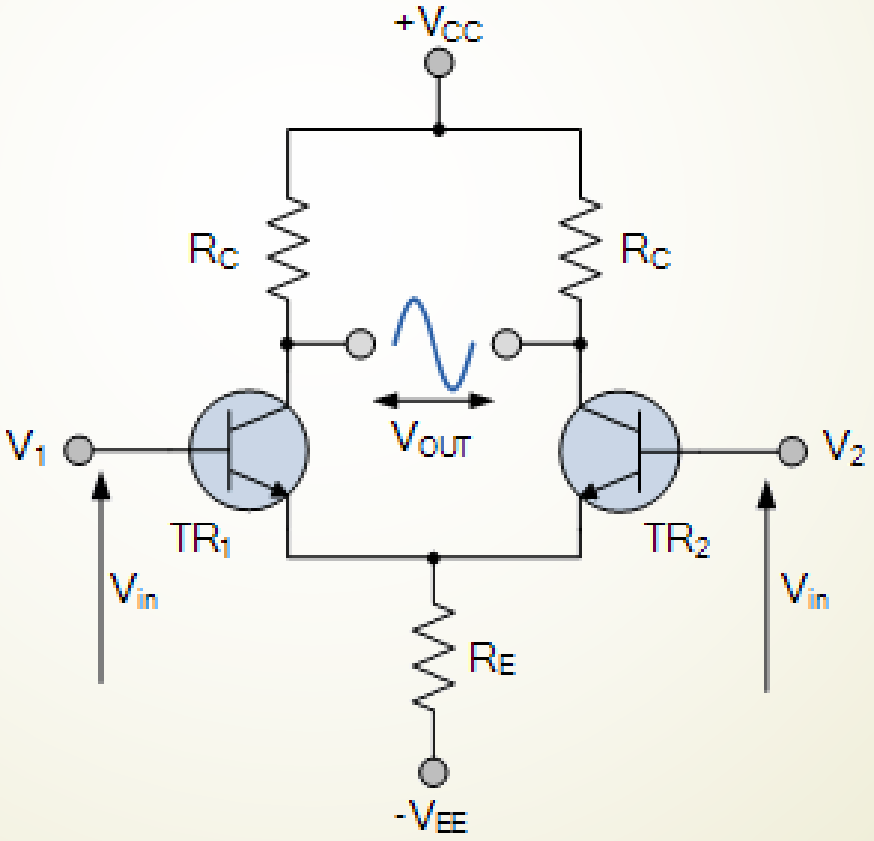
Diferencijalni pojačavač sa OP



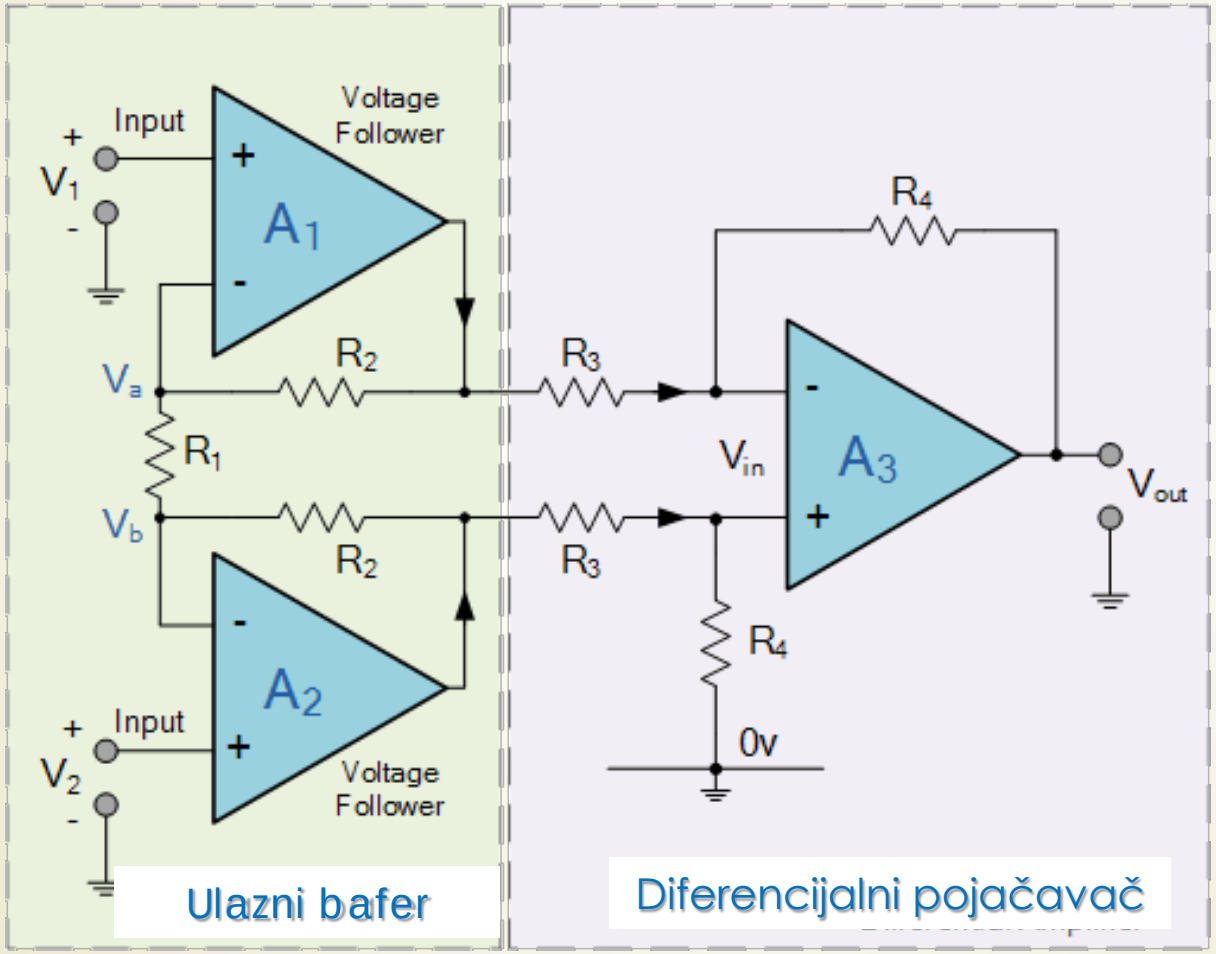
$$V_{out} = \frac{R_3}{R_1}(V_2 - V_1)$$

Tranzistorski diferencijalni pojačavač

Na lab. vežbama se koristi kod elektronskog voltmetra



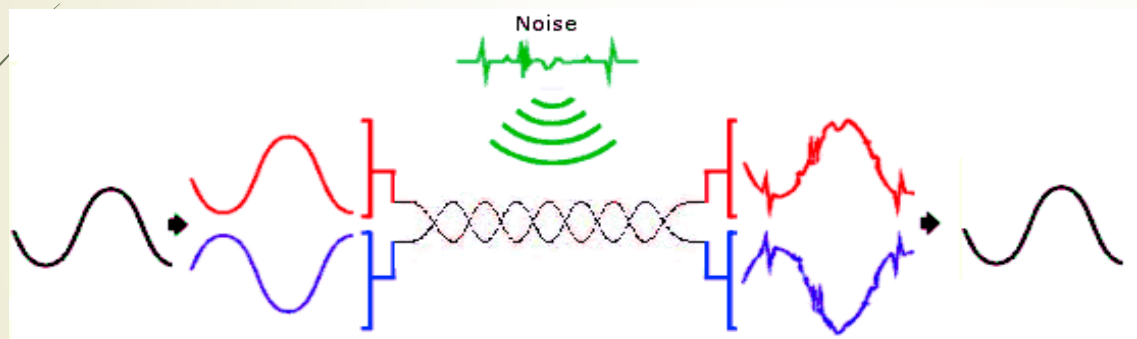
Instrumentacioni pojačavač sa OP



$$V_{out} = \left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_4}{R_3}(V_2 - V_1)$$

Faktor potiskivanja smetnji - CMRR

- Da bi se rešio problem **INTERFERENCIJE** i **DRIFTA**, u instrumentacionoj tehnici se koriste rešenja bazirana na **DIFERENCIJANOM POJAČAVAČU**.
- **CMRR** (engl. ***C**ommon **M**ode **R**ejection **R**ate*) je **FAKTOR POTISKIVANJA SMETNJI** koje istovremeno deluju na oba ulaza operacionog pojačavača.



$$CMRR[dB] = 20 \cdot log_{10} \frac{A_{dif}}{A_{zaj}}$$

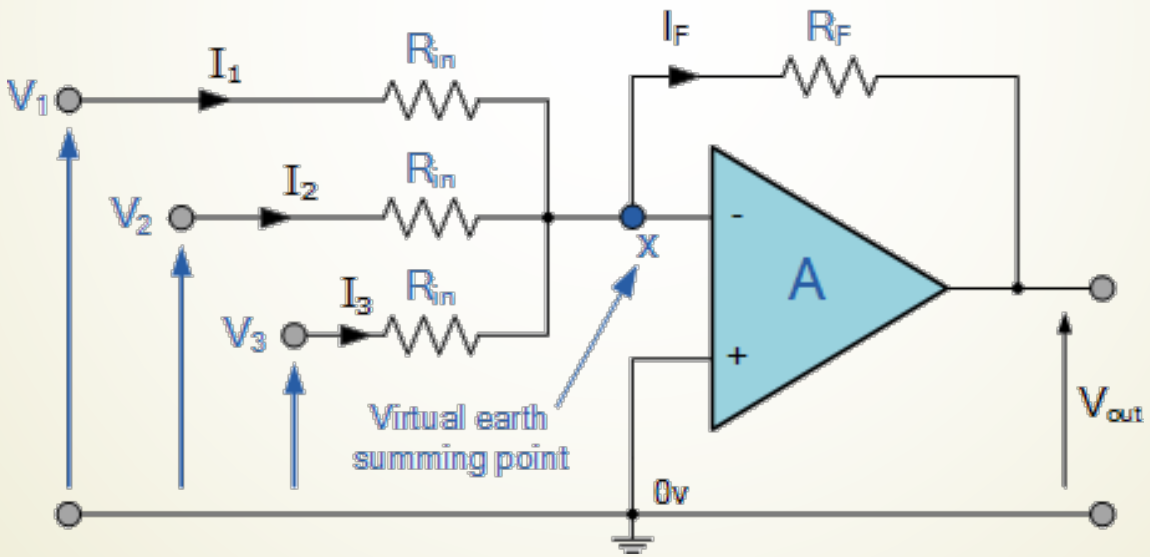
- Visoka vrednost **CMRR-a** se zahteva kada treba pojačati diferencijalni signal u okruženju sa smetnama koje deluju na oba ulaza.
- Idealni diferencijalni pojačavač ima **BESKONAČNO VELIKI CMRR**, ali on naravno nije dostižan u praksi.

Računske funkcije sa OP

- Da ponovimo, primenom **NEGATIVNE POVRATNE SPREGE** kod idealnog operacionog pojačavača, odnos izlaznog i ulaznog napona određuje se **KOMPONENTAMA POVRATNE SPREGE**, a **NE KARAKTERISTIKAMA** samog pojačavača.
- Pogodnim izborom **LINEARNIH** i **NELINEARNIH** komponenata Z_{in} i Z_f, moguće je realizovati veliki broj **RAČUNSKIH FUNKCIJA** za obradu analognog signala u kolima za **LINEARNU OBRADU** signala kao što su:
  - Sabirač,
  - Integrator i
  - Diferencijator,
- Kola za **NELINEANU OBRADU** signala, kao što su:
  - jednostrani i dvostrani ISPRAVLJAČI,
  - fazno osetljivi DETEKTORI,
  - LOGARITAMSKI i ANTILOGARITAMSKI pojačavači, itd. (Zadatak)

Sabirač sa OP

- **SABIRAČ** je **RAČUNSKA JEDINICA** koja ima izlazni napon jednak ZBIRU **DVA** ili **VIŠE** ulaznih napona pomnoženih sa proizvoljnom konstantom.

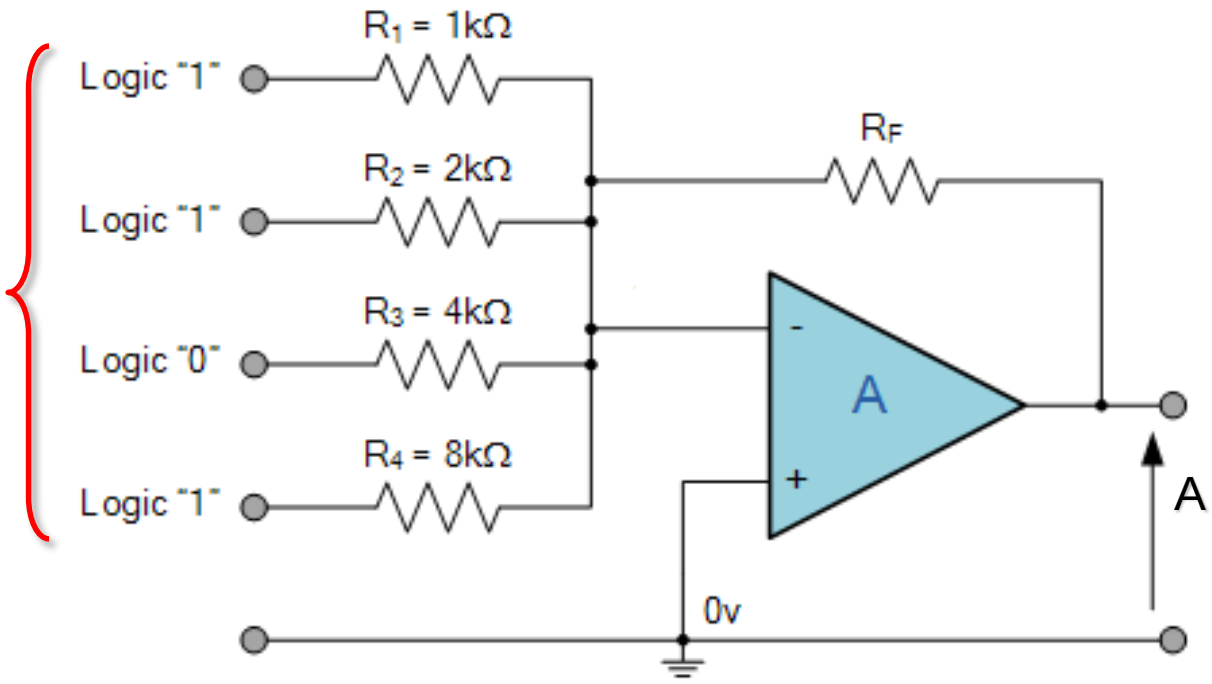


$$V_{out} = R_f\left(\frac{V_1}{R_{in}} + \frac{V_2}{R_{in}} + \frac{V_3}{R_{in}}\right)$$

D/A konvertor realizovan sabiračem

- **D/A KONVERTOR** načinjen pomoću savirača sa OP.
- D/A konvetor je zapravo sabirač više ulaznih napona koji su pomnoženi odgovarajućim **TEŽINSKIM KONSTANTAMA** (8/4/2/1).

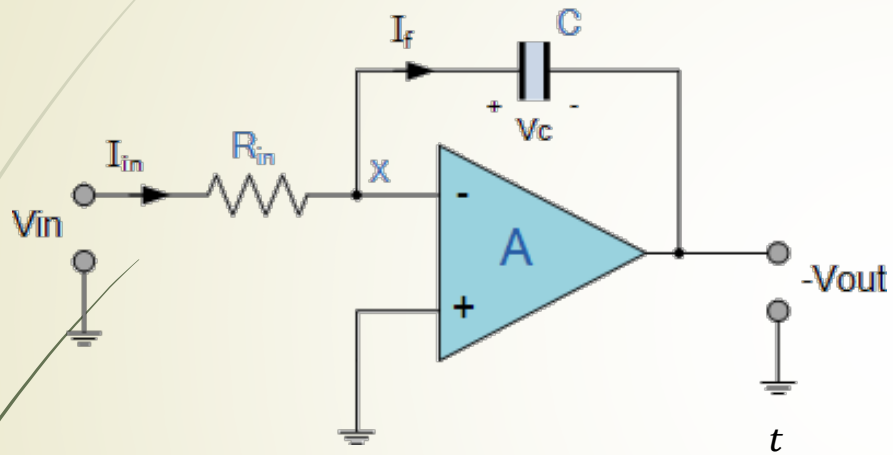
Digitalni ulazi
(4-bita)



Analogni izlaz
V_{out}

Integrator/Diferencijator sa OP

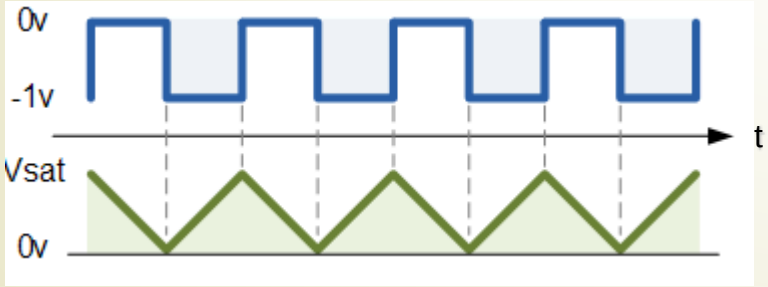
INTEGRATOR



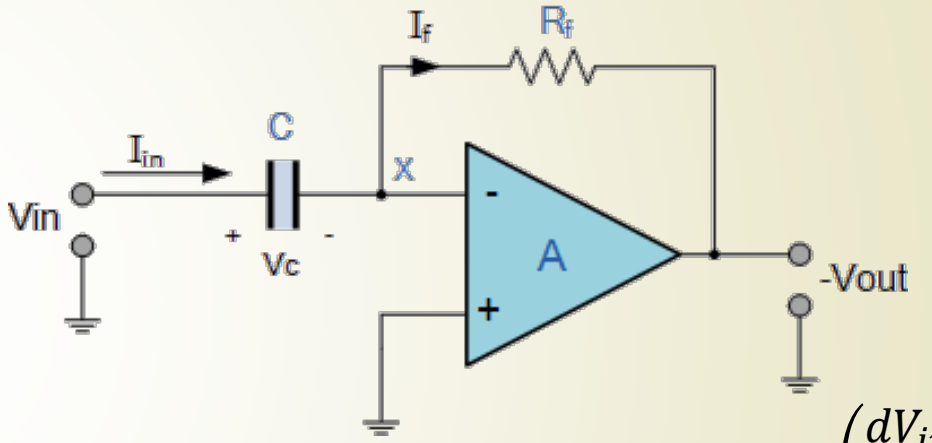
$$V_{out} = -\frac{1}{R_{in}C}\int_{o}^{t} V_{in}(t)\,\mathrm{dt}$$

Ulazni signali

Izlazni signali



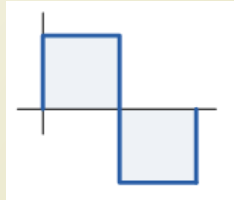
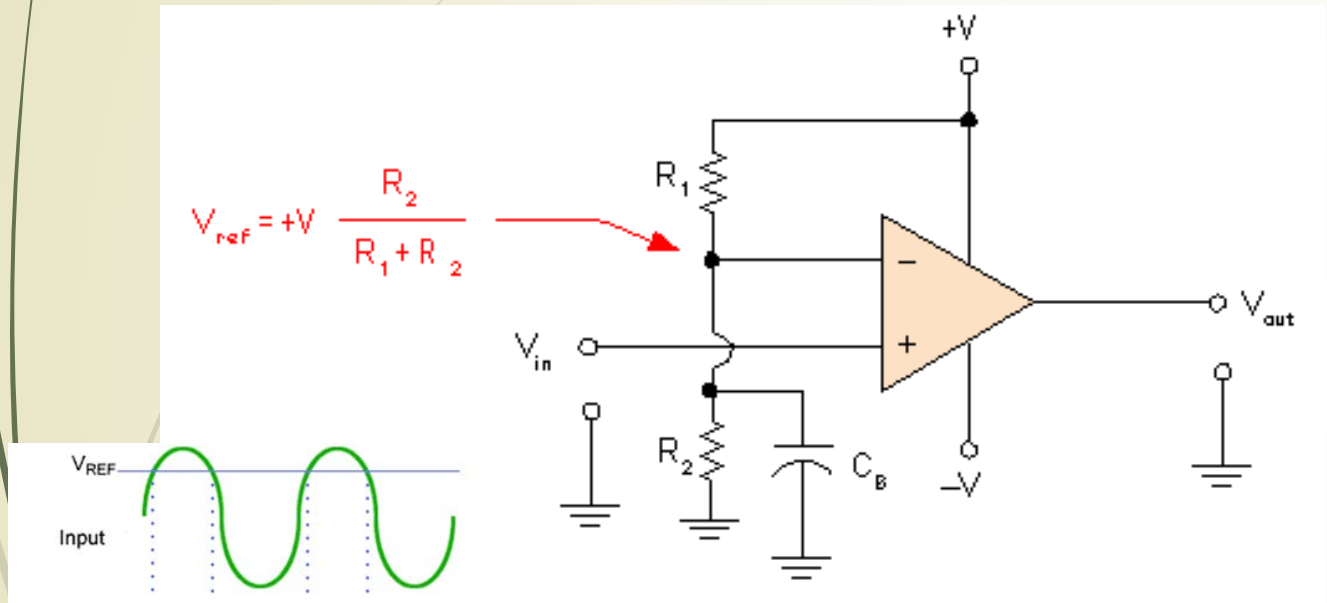
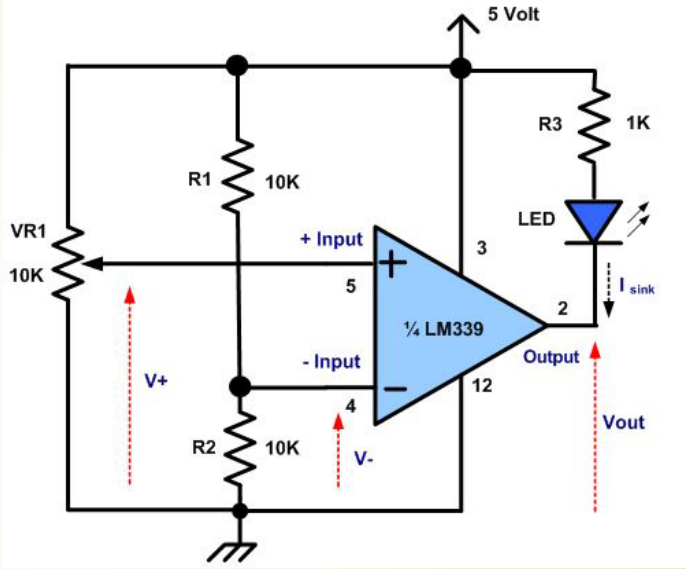
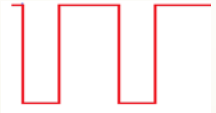
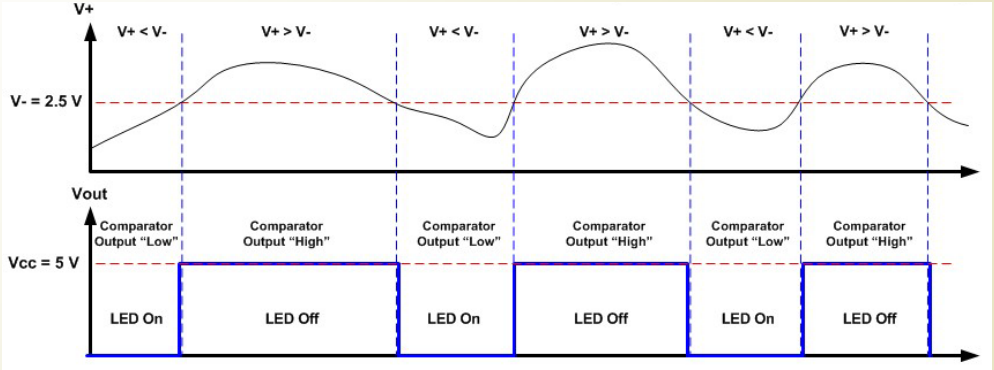
DIFERENCIJATOR



$$V_{out} = R_f C\left(\frac{dV_{in}(t)}{dt}\right)$$

Ulazni signali

Izlazni signali



Komparator* sa OP (1)