



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za osnove elektrotehnike i električka mjeren



## 4. TEMA

# MJERNA SVOJSTVA ELEKTRIČNIH SIGNALA

Predmet “Mjerenja u elektrotehnici”  
Prof.dr.sc. Damir Ilić  
Zagreb, 2020.

# Teme cjeline

---

- Istosmjerni mjerni signali
- Izmjenični mjerni signali
- Izmjenični mjerni signali i odzivi instrumenata
- Mjerni signali i A/D pretvorba
- Prilagodba amplitude
- Mjerna pojačala
- Operacijska pojačala

# Uvod

---

- Naša ljudska osjetila ne mogu poslužiti za mjerenje električnih veličina i zbog toga smo razvili uređaje koji nam to omogućavaju
- U principu, da bi takav uređaj mogao dati prikaz veličine na izlazu, koji je nama razumljiv i prihvatljiv, na ulaz mu je potrebno privesti veličinu potrebnu za njegov rad – gotovo redovito je to **električni napon** ili **struja**
- Ukratko, govorimo o električnom signalu, a neka svojstva signala postaju mjerljivi parametri koji su nam interesantni, odnosno možemo reći da su to mjerna svojstva električnog signala
- Gruba podjela električkih signala
  - istosmjerni
  - istosmjerni pulsirajući
  - izmjenični
  - složeni

# Istosmjerni mjerni signali

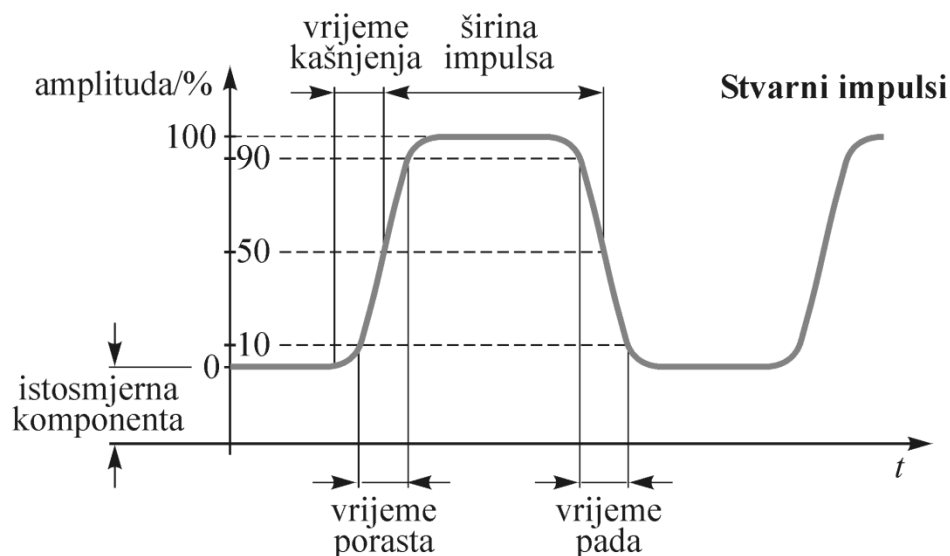
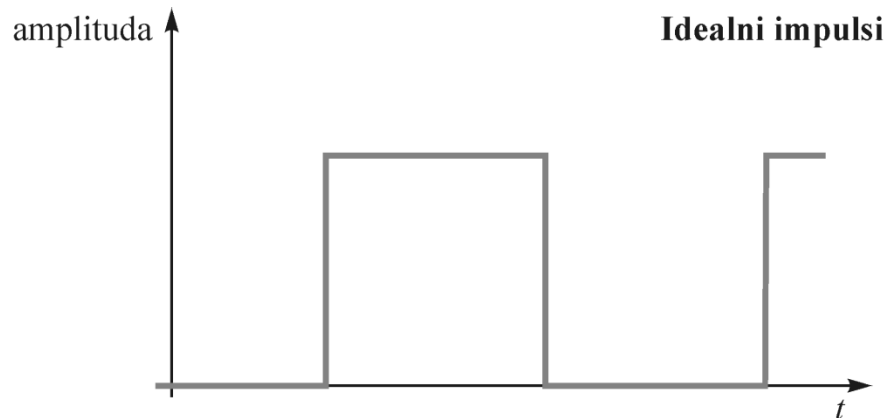
---

- Idealni istosmjerni signal je nepromjenjive amplitude i bez prisustva šuma (smetnje):
  - $U = U_{\text{DC}}$
- Realni istosmjerni signal i dalje ima stalnu istosmjernu komponentu, no pritom mu je superponirana neželjena smetnja stalne frekvencije:
  - $U = U_{\text{DC}} + U_{\text{m}} \sin(\omega t + \varphi)$
- Realni istosmjerni signal ima istosmjernu komponentu koja sporo linearno raste (i pada), i superponirana mu je neželjena smetnja stalne frekvencije:
  - $U = U_{\text{DC}}(t) + U_{\text{m}} \sin(\omega t + \varphi)$
- Realni istosmjerni signal ima istosmjernu komponentu koja sporo linearno raste (i pada), i superponiran mu je šum:
  - $U = U_{\text{DC}}(t) + U_{\text{m1}} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_{\text{m2}} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \dots$

# Istosmjerni pulsirajući mjerni signali

- Pod istosmjernim pulsirajućim signalom smatramo signal koji ne mijenja predznak, ali ne mora nužno biti nepromjenjivog iznosa

- Primjer: impuls određenog trajanja i amplitude



# Istosmjerni pulsirajući mjerni signali

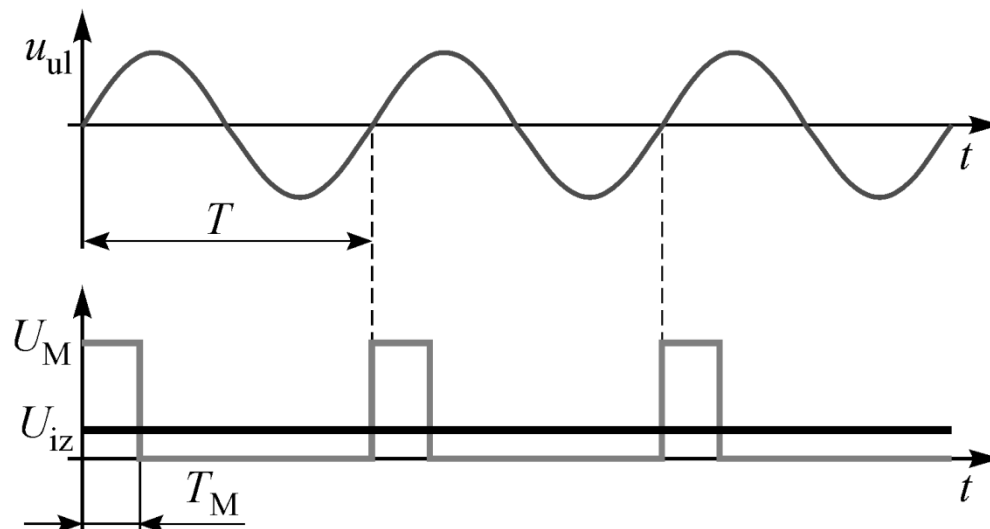
- Primjer: **srednja vrijednost** niza impulsa amplitude  $U_M$ , trajanja  $T_M$  i periode ponavljanja  $T$ :

$$U = U_M; \text{ za } 0 \leq t < T_M$$

$$U = 0; \text{ za } T_M \leq t < T$$

$$U_{sr} = U_{iz} = (U_M T_M) / T$$

- Za  $T_M = 0$  i  $U_{sr} = 0$
- Za  $T_M = T$  vrijedi  $U_{sr} = U_M$



# Izmjenični mjerni signali - osnovno

- Izmjenične veličine mijenjaju predznak, a opisuju ih:
  - amplituda i frekvencija
  - elektrolitička srednja vrijednost i efektivna vrijednost
  - omjerni faktori: faktor oblika i tjemeni faktor
- Elektrolitička srednja vrijednost: srednja vrijednost punovalno ispravljene veličine

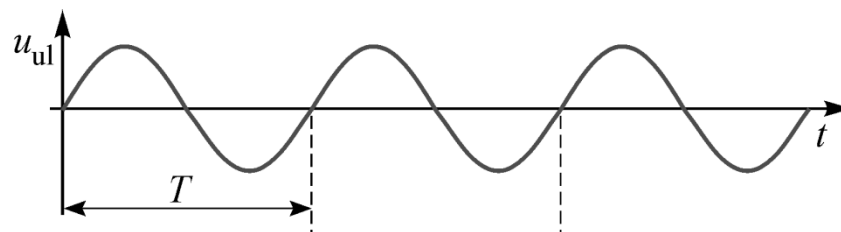
$$I_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = 0 \quad \Rightarrow \quad I_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$$

- Efektivna vrijednost: odgovara vrijednosti istosmjerne struje (napona) istog toplinskog učinka

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad \Rightarrow \quad I$$

# Izmjenični mjerni signali - osnovno

- Amplituda (tjemena vrijednost): najveća trenutna vrijednost veličine (npr. za napon  $U_m$ , za struju  $I_m$ )
- Frekvencija izmjeničnog signala:  $f$
- Perioda izmjeničnog signala:  $T = 1 / f$
- Idealni izmjenični signal ima stalnu amplitudu i frekvenciju:
  - $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin(2\pi f t + \varphi) = U_m \sin((2\pi t)/T + \varphi)$
- Kod realnog izmjeničnog signala i amplituda i frekvencija su vremenski ovisne veličine, odnosno ponešto se mijenjaju





# Izmjenični mjerni signali - osnovno

□ **Faktor oblika:**  $\xi = \frac{I}{I_{sr}}$

$$\xi_{\sin} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

$$\xi_{tr} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{3}}}{\frac{I_m}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15$$

$$\xi_{pr} = \frac{I_m}{I_m} = 1,00$$

□ **Tjemeni faktor:**  $\sigma = \frac{I_m}{I}$

$$\sigma_{\sin} = \frac{I_m}{\frac{I_m}{\sqrt{2}}} = 1,41$$

$$\sigma_{tr} = \frac{I_m}{\frac{I_m}{\sqrt{3}}} = 1,73$$

$$\sigma_{pr} = \frac{I_m}{I_m} = 1,00$$

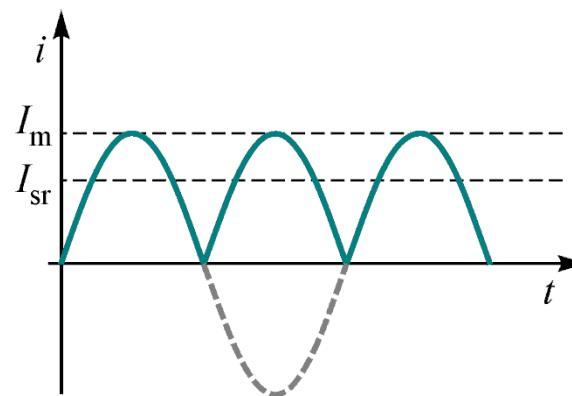
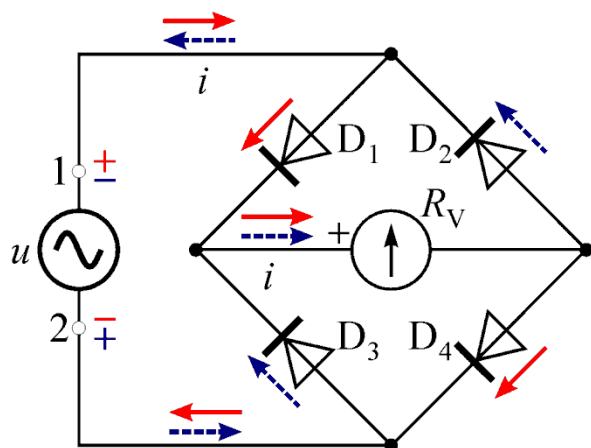
**sin ... sinusni**

**tr ... trokutasti**

**pr ... pravokutni**

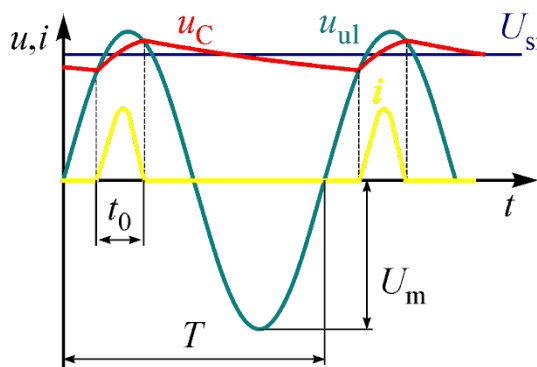
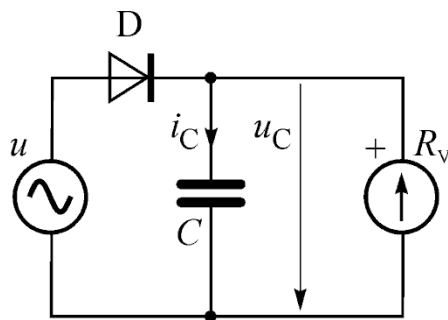
# Izmjenični mjerni signali - osnovno

- Punovalno ispravljanje izmjeničnog signala  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  daje istosmjerni pulsirajući signal srednje vrijednosti:
  - $I_{sr} = 2I_m / \pi$
  - ako ovu vrijednost pomnožimo s faktorom oblika za sinusni valni oblik dobit ćemo vrijednost koja odgovara efektivnoj vrijednosti sinusnog valnog oblika:  $I_{sr} \cdot \pi / (2\sqrt{2}) = I_m / \sqrt{2} = I$



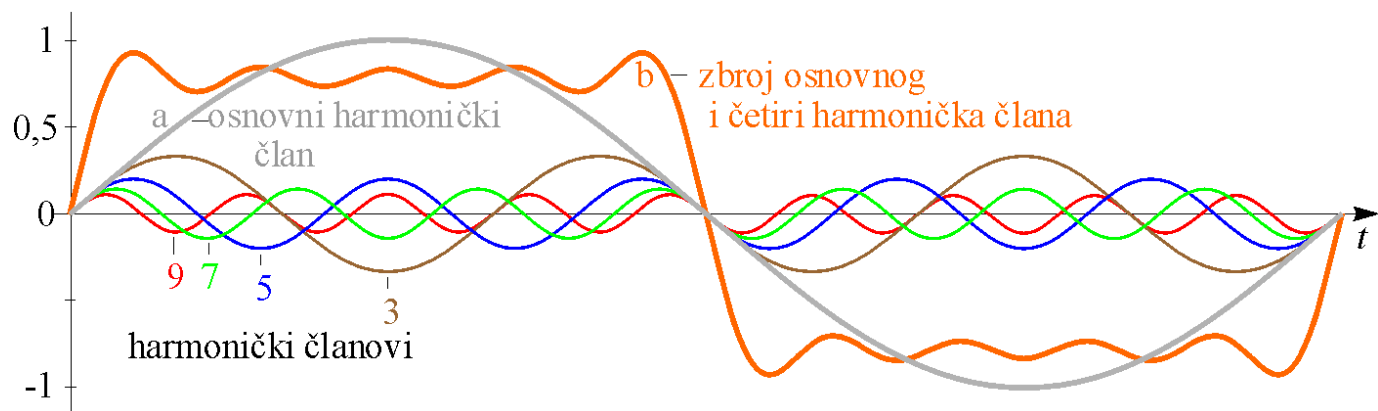
# Izmjenični mjerni signali - osnovno

- Tjemeno ispravljanje izmjeničnog signala  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  daje istosmjerni pulsirajući signal čija je srednja vrijednost:
  - $U_{sr} < U_m$  za realni  $R_V$
  - za  $R_V \rightarrow \infty$  vrijedi da  $U_{sr} \rightarrow U_m$
  - “valovitost” ispravljenog napona posljedica je punjenja kondenzatora (u kratkom trajanju  $t_0$ ) i pražnjenja kondenzatora (u dužem trajanju  $T - t_0$ )



# Izmjenični mjerni signali

- Bilo koji izmjenični signal možemo razložiti na harmonijske komponente, odnosno na sumu harmoničkih članova počevši od osnovnog harmonika
- U primjeru je prikazan signal
  - $u(t) = U_{m1}\sin(\omega t + \varphi_1) + U_{m3}\sin(3\omega t + \varphi_3) + U_{m5}\sin(5\omega t + \varphi_5) + U_{m7}\sin(7\omega t + \varphi_7) + U_{m9}\sin(9\omega t + \varphi_9)$
  - u ovom specijalnom slučaju je  $\varphi_1 = \varphi_3 = \varphi_5 = \varphi_7 = \varphi_9 = 0$
  - $u = U_{m1}\sin(\omega t) + U_{m3}\sin(3\omega t) + U_{m5}\sin(5\omega t) + U_{m7}\sin(7\omega t) + U_{m9}\sin(9\omega t)$



# Izmjenični mjerni signali

- ❑ Pretpostavimo da naš idealni signal sadrži samo osnovni (prvi, fundamentalni) harmonik  $u = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$ , dok su svi ostali viši harmonički članovi neželjena smetnja – takav je npr. dobar izvor izmjeničnog sinusnog napona
- ❑ U tom slučaju možemo definirati parametar koji opisuje omjer efektivne vrijednosti (RMS, *root mean square*) svih viših harmonika do  $n$ -tog u odnosu na efektivnu vrijednosti osnovnog ( $U_{ef1} = U_1$ )
- ❑ Taj se parametar naziva ukupno harmoničko izobličenje (THD, *total harmonic distortion*), i za naš promatrani slučaj poželjno je da bude što manje:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}$$

# Izmjenični mjerni signali i odzivi instrumenata

---

- Kod mjerenja izmjeničnih valnih oblika može nas zanimati:
  - (elektrolitička) srednja vrijednost: ponekad, radi jednostavnosti, govori se samo o srednjoj vrijednosti ispravljenog valnog oblika, koja je jednaka elektrolitičkoj srednjoj vrijednosti neispravljenog signala
  - efektivna vrijednost: to je vrijednost koja nas najčešće zanima
  - tjemena vrijednost
  - faktor oblika: omjer efektivne i srednje vrijednosti
  - tjemeni faktor: omjer tjemene i efektivne vrijednosti

# Izmjenični mjerni signali i odzivi instrumenata

- Kad se radi o efektivnoj vrijednosti, mjerni instrumenti mogu pokazivati (neovisno o tomu jesu li analogni ili digitalni):
  - umnožak (elektrolitičke) srednje vrijednosti signala i faktora oblika za čisti sinusni valni oblik,  $U = U_{sr} \cdot \xi_0$ , gdje je  $\xi_0 = \pi / (2\sqrt{2})$ ; kažemo da imaju odziv na srednju vrijednost (*average responding*), a točno pokazuju efektivnu vrijednost samo za čisti sinusni valni oblik, dok pogrešno mjere signale drugačijih valnih oblika (vidi prikaznicu 16.)
  - efektivnu vrijednost periodičkog signala – ponekad se takvi instrumenti komercijalno označavaju i kao TrueRMS (RMS ... Root Mean Square), čime se želi naglasiti da pokazuju efektivnu vrijednost signala neovisno o pripadnom faktoru oblika, koja se računa se kao korijen iz sume kvadrata efektivnih vrijednosti svih harmoničkih komponenata (nema istosmjerne komponente)
  - vrijednost signala računatu kao korijen iz sume kvadrata efektivnih vrijednosti svih harmoničkih komponenata i istosmjerne komponente - obično se kod digitalnih instrumenata takva mogućnost označava kao AC+DC

***Nerazumijevanje i nepoznavanje rada mjernih instrumenata može prouzročiti značajne pogreške!***

# Izmjenični mjerni signali i odzivi instrumenata

- Primjer: razmotrimo mjerni instrument koji pokazuje (elektrolitičku) srednju vrijednost pomnoženu s faktorom oblika za čisti sinusni valni oblik,  $\xi_0 = \pi / (2\sqrt{2})$
- Ako je na ulaz priključen signal  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  instrument će pokazati sljedeće:
  - $U_{\text{izmjereno}} = U_{\text{sr}} \cdot \xi_0 = U_{\text{sr}} \cdot \pi / (2\sqrt{2}) = (2U_m / \pi) \cdot \pi / (2\sqrt{2}) = U_m / \sqrt{2} = U$
  - to znači da pri mjerenju čistog sinusnog valnog oblika ne dolazi do pogreške pri pokazivanju efektivne vrijednosti
- Pri mjerenju nesinusne veličine faktora oblika  $\xi$  takvim instrumentom nastaje pogrješka

$$p_{\%} = \frac{\xi_0 - \xi}{\xi} 100\%$$

- Pri mjerenju trokutastog napona ( $\xi = 1,15$ ) slijedi  $p_{\%} = -3,8 \%$ , a pri mjerenju pravokutnog napona ( $\xi = 1$ ) slijedi  $p_{\%} = 11,1 \%$  !



# Mjerni signali i A/D pretvorba

---

- Do sada smo razmatrali kontinuirane vremenski promjenjive signale i odzive mjernih instrumenata na takve signale
- Analogno-digitalna (A/D) pretvorba je proces kojim se analogni signal pretvara u digitalni zapis
- U tu svrhu rabe se analogno-digitalni (A/D) pretvornici (eng. *analog-to-digital converters*), ili ADC, kojih ima više vrsta
- Dakako, postoje i digitalno-analogni pretvornici (eng. *digital-to-analog converters*) ili DAC
- Općenito govoreći, o karakteristikama ADC-a ovise i mogućnosti mjerenja, odnosno točnost mjernih rezultata

# Mjerni signali i A/D pretvorba

- Jedna od često primjenjivanih metoda, kojima se analogni signal pretvara u digitalni zapis, jest diskretizacija kontinuiranih (posebice periodičkih) signala u vremenskoj domeni
- Taj postupak nazivamo otipkavanje (tipkanje, uzorkovanje, eng. *sampling*) kojim se općenito **analogni signal  $x(t)$  pretvara u otipkani signal  $x_s(t)$** 
  - frekvencija otipkavanja (*sampling frequency*):  $f_s$ 
    - ponekad se naziva i učestalost otipkavanja, a obično se iskazuje u broju uzoraka po sekundi (odnosno *samples per second* ili skraćeno Sa/s) – uočite da “Sa” nije jedinica SI sustava
  - vrijeme između uzoraka, perioda otipkavanja (*sample period*):  $T_s$
  - broj prikupljenih uzoraka (*samples to read, number of sequential samples in a data record*):  $M$
  - broj izmjerenih perioda mjerenog signala:  $J$
  - trajanje otipkavanja (*sampling time*):  $T_R = M / f_s$
  - broj uzoraka po periodu mjerenog signala (*samples per period*):  $N_{Spp} = M / J$

# Mjerni signali i A/D pretvorba

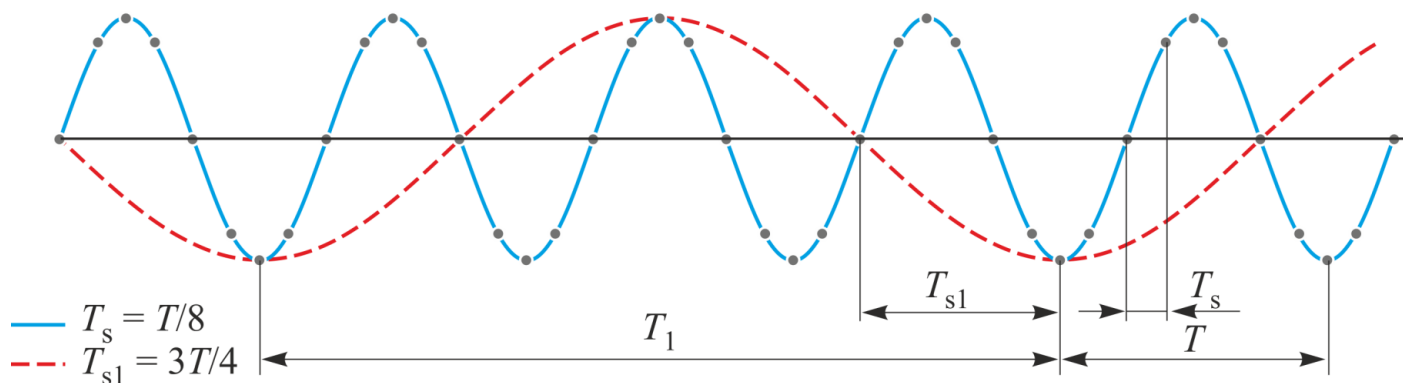
---

- Shannonov teorem otipkavanja:
  - vremenski kontinuiran signal  $x(t)$  s frekvencijama ne većim od  $f_{\max}$  može biti egzaktno rekonstruiran iz svojih uzoraka  $x_s(t)$  ako je otipkavanje provedeno frekvencijom  $f_s \geq 2f_{\max}$
  - minimalna frekvencija otipkavanja za koju je moguća rekonstrukcija signala iz njegovih uzoraka naziva se Nyquistova frekvencija
- Ako je frekvencijski spektar analognog signala velik (frekvencija najviše harmoničke komponente neka je  $f_{\max}$ ), a frekvencija otipkavanja  $f_s$  mala, nastaju preklapanja spektara
- Ova pojava naziva se **aliasing** (ili alias-efekt) i označava preklapanje spektara, odnosno preslikavanje (ili privid) frekvencija te uzrokuje izobličenje digitalnog signala

# Mjerni signali i A/D pretvorba

## □ Primjer:

- otipkavanje vremenski kontinuiranog signala  $u(t) = U_m \sin(\omega t) = U_m \sin(2\pi f t) = U_m \sin(2\pi t / T)$ , gdje je  $f$  frekvencija signala, a  $T$  perioda
- uzmimo za početak da se otipkavanje događa za vrijeme vrlo kratkog intervala te da su vrijednosti otipkanog signala  $u_s(t)$  predstavljene na donjoj slici točkama u diskretnim trenucima
- za  $T_s = T/8$  slijedi:  $u_0 = u_s(t=0)$ ,  $u_1 = u_s(t=T/8)$ ,  $u_2 = u_s(t=T/4)$ , ...,  $u_7 = u_s(t=7T/8)$



# Mjerni signali i A/D pretvorba

- Efektivnu vrijednost otipkanog signala računamo sljedećim izrazom:

$$U_n = \sqrt{\frac{u_0^2 + u_1^2 + \dots + u_{n-1}^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} u_i^2}$$

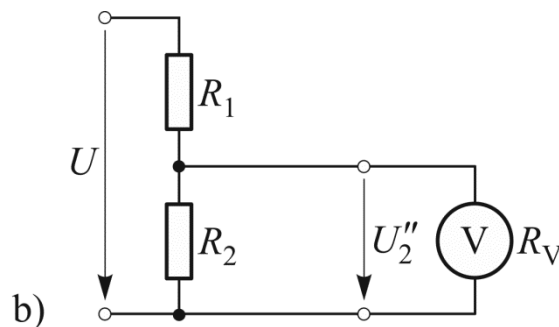
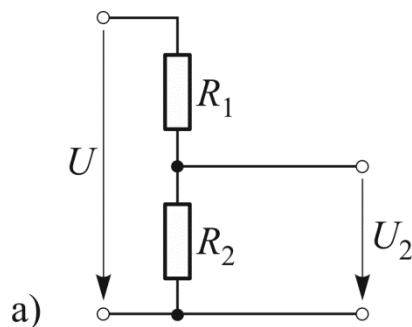
- Određivanje efektivne vrijednosti za prethodni primjer:

- efektivna vrijednost kontinuiranog signala  $u(t) = U_m \sin(2\pi t / T)$  uz  $U_m = 1 \text{ V}$  jest  $U = U_m / \sqrt{2} = 0,707107 \text{ V}$
- efektivna vrijednost otipkanog signala  $u_s(t)$  jest  $U_n = \sqrt{(4 \text{ V}^2 / 8)} = 0,707107 \text{ V}$

$t / T$	$u_i / \text{V}$	$(u_i)^2 / \text{V}^2$	
0	0,000000	0,000000	
0,125	0,707107	0,500000	
0,25	1,000000	1,000000	
0,375	0,707107	0,500000	
0,5	0,000000	0,000000	
0,625	-0,707107	0,500000	
0,75	-1,000000	1,000000	
0,875	-0,707107	0,500000	
	<b>0,000000</b>	<b>4,000000</b>	<b><math>\Sigma</math></b>

# Prilagodba amplitude

- ❑ Kad se radi o višim naponima, odnosno kad je potrebno prilagoditi amplitudu mjerenog signala ulaznom dijelu mjernog instrumenta ili mjernog sustava, koristi se **naponsko djelilo**
- ❑ Shematski prikaz kod istosmjerne struje



- ❑ Ako je djelilo 10:1, odnosno ako je  $U = 10U_2$ , tada je  $R_1 = 9R_2$
- ❑ Za shemu na slici a) vrijedi:

$$U_2 = (U R_2) / (R_1 + R_2)$$

- ❑ Otpor voltmetra označen je sa  $R_V$  (to nam je poznata veličina?)

# Prilagodba amplitude

- ❑ Pogreška koja nastaje zbog priključenja voltmetra (ako to ne uočimo i ne ispravimo)

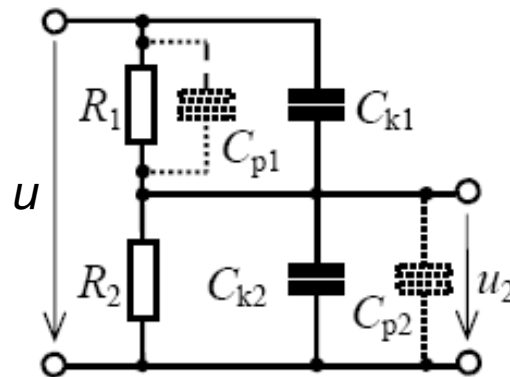
$$p_{\%} = \frac{\frac{R_2''}{R_1 + R_2''} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_2}{R_1 + R_2}} \cdot 100\%$$

$$p_{\%} = \frac{\left( \frac{R_V}{R_2 + R_V} - 1 \right)}{\left( 1 + \frac{R_2 R_V}{R_1 (R_2 + R_V)} \right)} \cdot 100\% \approx \left( \frac{R_V}{R_2 + R_V} - 1 \right) \cdot 100\%$$

- ❑ Kao što se može uočiti, ta je pogreška uvijek negativna, što znači da je ispravak pozitivan, odnosno izmjereni napon trebamo uvećati za taj iznos kako bismo otklonili utjecaj spajanja voltmetra u mjerni krug

# Prilagodba amplitude

- Shematski prikaz naponskog djelila kod izmjenične struje
- Uočiti postojanje kapaciteta  $C_{p1}$ ,  $C_{k1}$ ,  $C_{p2}$  i  $C_{k2}$  spojenih paralelno otporima  $R_1$  i  $R_2$



$$R_1(C_{k1} \parallel C_{p1}) = R_2(C_{k2} \parallel C_{p2})$$

- Neka je  $C_1 = C_{p1} \parallel C_{k1}$  i  $C_2 = C_{p2} \parallel C_{k2}$
- Digresija: jesu li to (ne)željeni kapaciteti ili namjerno dodani kapaciteti?



# Prilagodba amplitude

- U tom je slučaju omjer kompleksnih napona jednak:

$$\frac{\underline{u}_2}{\underline{u}} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} = \frac{R_2}{R_1 \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_1 C_1} + R_2}$$

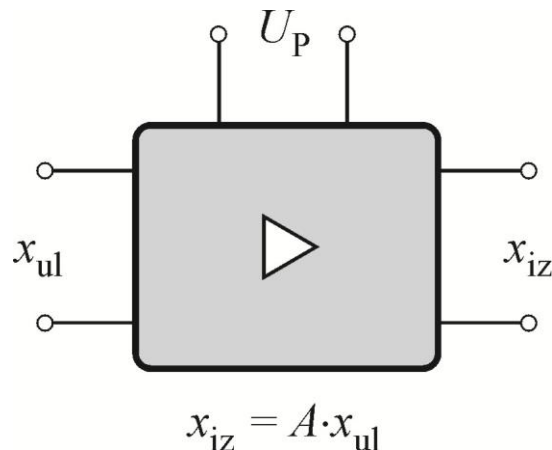
- Kada je zadovoljen uvjet  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  slijedi da je

$$\frac{\underline{u}_2}{\underline{u}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

odnosno, omjer kompleksnih napona nema frekvencijsku ovisnost pa kažemo da je djelilo **frekvencijski kompenzirano**, što znači da omjer dijeljenja ovisi samo o omjeru otpora i neće se promijeniti s promjenom frekvencije ulaznog napona

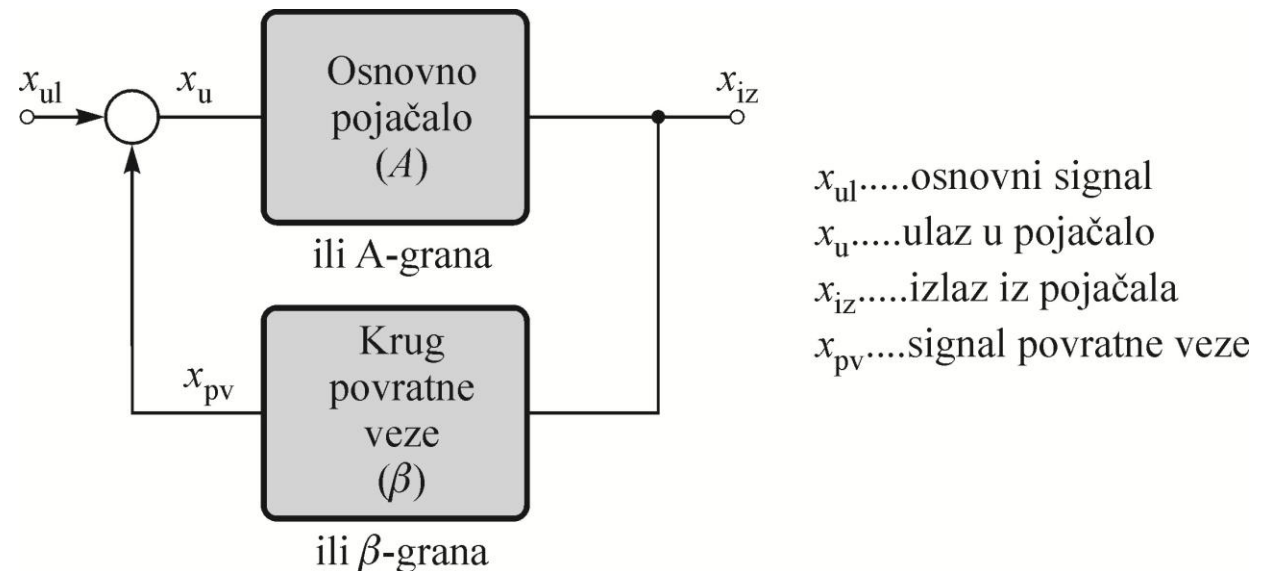
# Mjerna pojačala - općenito

- ❑ Zadaća je mjernih pojačala da pojačaju vrlo slabe struje i napone te omoguće njihovo određivanje pomoću mjernih instrumenata
- ❑ Općenito, snaga na izlazu pojačala višestruko je veća od snage na ulazu



# Mjerna pojačala - općenito

- ❑ Kod mjernih pojačala zahtijeva se stalan odnos između ulazne i izlazne veličine
- ❑ Općenito, pojačanje  $A$  ovisi o promjenama parametara elemenata, vanjskim utjecajima, naponu napajanja, itd.
- ❑ Negativna povratna veza (NPV) služi za stabiliziranje pojačanja

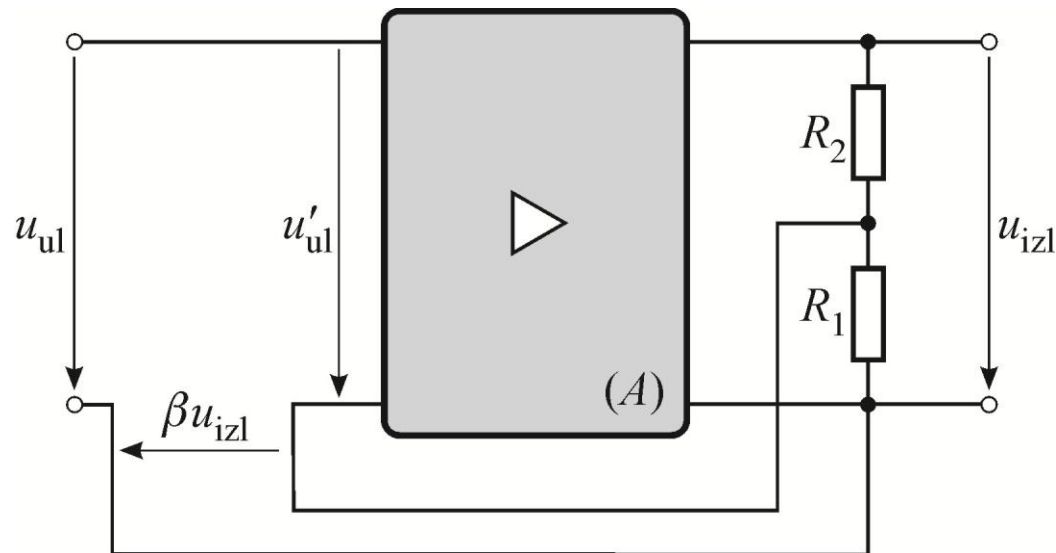


# Mjerna pojačala - općenito

- Uzmimo za primjer naponsku (serijsku) NPV kad je

$$u_{izl} \sim u_{ul}$$

- Vrijedi:



$$u_{izl} = u_{ul} \frac{A}{1 + \beta A} = u_{ul} A' \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad A' = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

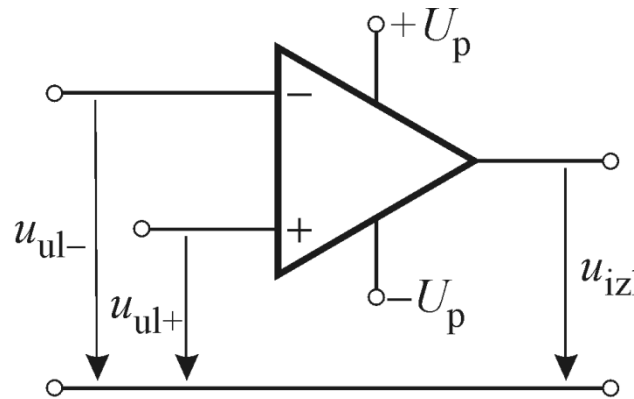
# Operacijska pojačala - općenito

---

- ❑ Gotovo redovito se za mjerna pojačala rabe operacijska pojačala izvedena u tehnici integriranih sklopova
- ❑ Svojstva idealnog:  $R_{ul} = \infty$ ,  $A_0 = \infty$ ,  $R_{izl} = 0$ ,  $f_g = \infty$
- ❑ Svojstva realnog:  $R_{ul} = (10^5 \text{ do } 10^{12}) \Omega$ ,  $A_0 = 10^6$   
 $R_{izl} = (25 \text{ do } 50) \Omega$ ,  $f_g = 10 \text{ Hz}$
- ❑ U analizama se, kao prva aproksimacija, realno pojačalo nadomješta idealnim, a da se pritom ne načini znatnija pogreška
- ❑ Pojam “virtualne ništice”

# Operacijska pojačala - općenito

- ❑ Izlazni napon je linearna funkcija ulaznog napona u vrlo uskom području, a ograničen je naponom napajanja
- ❑ Primjer: uz  $U_p = 15 \text{ V}$  i  $A_0 = 10^5$  izlaz se linearno mijenja uz razliku ulaznih napona manju od  $150 \text{ } \mu\text{V}$



$$u_{izl} = A_0(u_{ul+} - u_{ul-})$$

# Operacijska pojačala - analiza realnog pojačala

- **Ulazna struja prednapona (eng. *input bias current*)** obično se definira kao prosječna struja ulaza:

$$I_B = \frac{1}{2} (|I_{B+}| + |I_{B-}|)$$

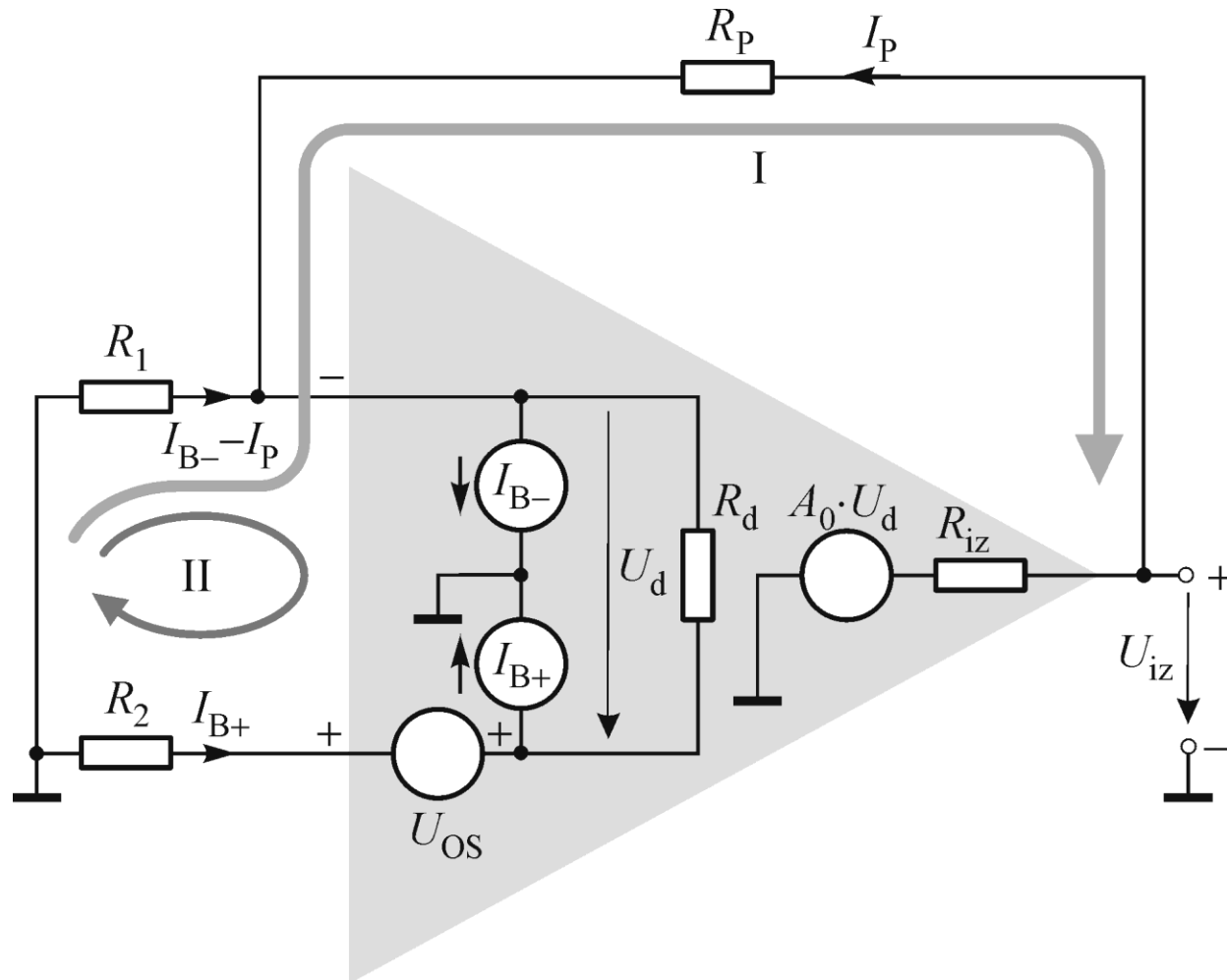
- **Ulazna struja namještanja (eng. *input offset current*)** obično se definira kao razlika struja ulaza:

$$I_{OS} = |I_{B+} - I_{B-}|$$

- **Izlazni napon namještanja (eng. *output offset voltage*)**, uz  $U_{ul} = 0$ , iznosi  $U_{izl} \approx I_B R_p$
- **Ulazni napon namještanja (eng. *input offset voltage*)**  $U_{OS}$  je napon koji se mora priključiti između ulaznih stezaljki da se postigne  $U_{izl} = 0$

# Operacijska pojačala - analiza realnog pojačala

## □ Nadomjesna shema





# Operacijska pojačala - analiza realnog pojačala

## □ Analiza

$$R_1(I_{B-} - I_P) - R_P I_P = -U_{izl} \quad (1)$$

$$R_1(I_{B-} - I_P) - R_2 I_{B+} = -U_{OS} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_P}{R_1 + R_P}$$

$$U_{izl} = U_{OS} \left( 1 + \frac{R_P}{R_1} \right) + R_P (I_{B-} - I_{B+})$$

- Gornji izraz znači da će postojati napon na izlazu pojačala i kad je ulazni napon jednak ničtici, što predstavlja problem kod mjerenja

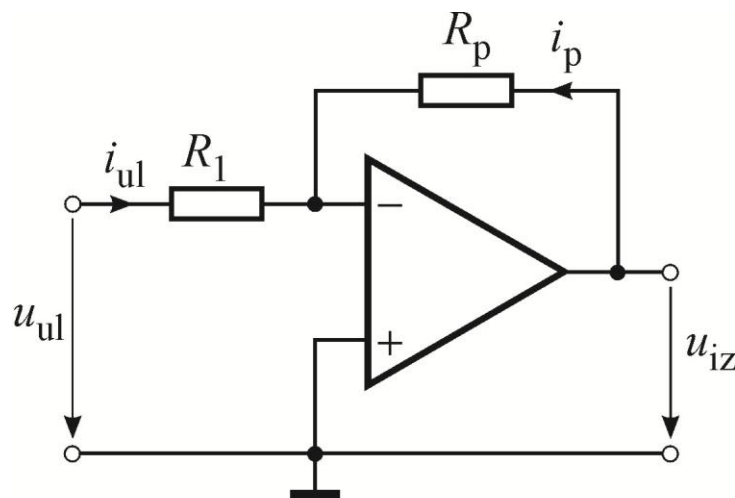
# Operacijska pojačala - invertirajuće pojačalo

## □ Elementi za analizu:

- **Ulazni otpor**
- **Izlazni otpor**

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_1 + \frac{R_p}{A_0}$$

$$R_{izl} = \frac{u_{izl}}{i_{izl}} = \frac{R_{iz}}{\beta A_0}$$



$$u_{iz} = -\frac{R_p}{R_1} u_{ul}$$

# Operacijska pojačala - neinvertirajuće pojačalo

## □ Elementi za analizu:

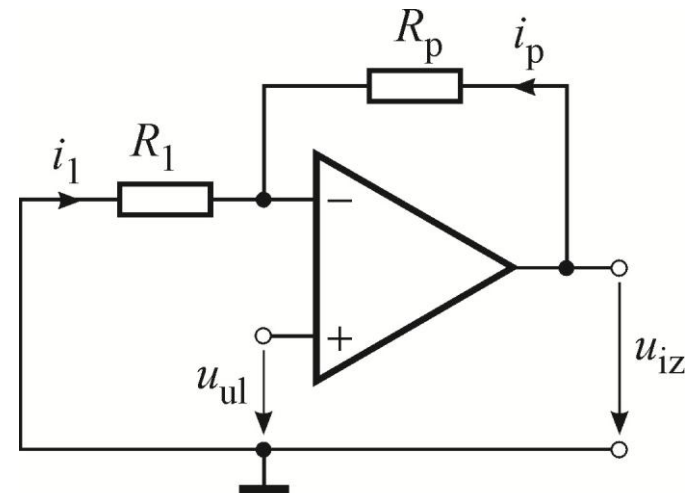
- Ulazni otpor
- Izlazni otpor

## □ Naponsko sljedilo:

- $R_1 = \infty$ ,  $R_p = 0$

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_d (1 + \beta A_0)$$

$$R_{izl} = \frac{u_{izl}}{i_{izl}} = \frac{R_{iz}}{\beta A_0}$$

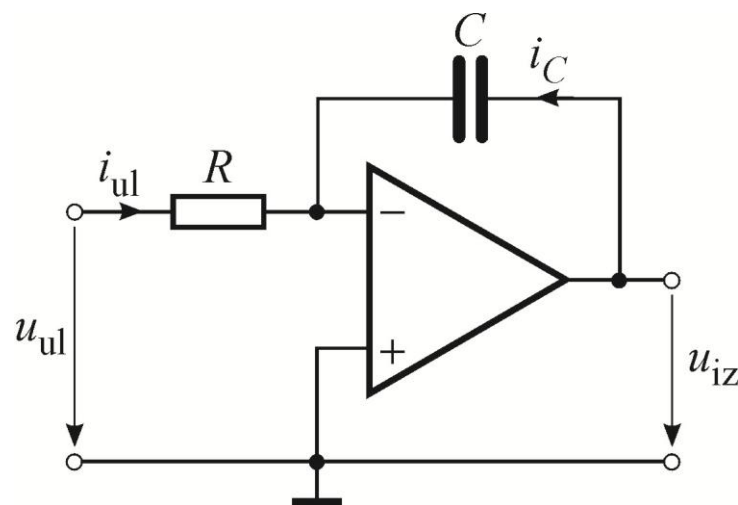


$$u_{iz} = \left(1 + \frac{R_p}{R_1}\right) u_{ul}$$

# Operacijska pojačala - integrirajuće pojačalo

## □ Elementi za analizu:

- Smanjenje klizanja izlaznog napona
- Frekvencijsko područje integracije
- Ovisnost valnog oblika o početnim uvjetima

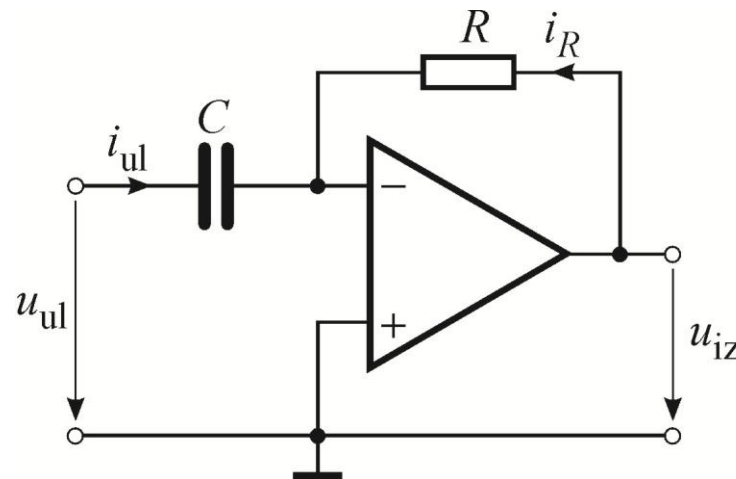


$$u_{iz} = - \frac{1}{RC} \int u_{ul} dt$$

# Operacijska pojačala - derivirajuće pojačalo

## □ Elementi za analizu:

- Smanjenje utjecaja smetnji
- Frekvencijsko područje derivacije
- Amplituda izlaznog napona



$$u_{iz} = -RC \frac{du_{ul}}{dt}$$

# Naponska djelila i operacijska pojačala

---

- ❑ Zašto smo analizirali prilagodbu amplitude signala?
- ❑ Zato što su to ulazni elementi npr. digitalnih multimetara te o njihovim svojstvima ovise i svojstva mjernih instrumenata
- ❑ Zato što kod analogno-digitalnog pretvornika (ADC-a) ne možemo digitalizirati bilo koju vrijednost napona, nego ona mora biti unutar njegovog dinamičkog opsega
- ❑ Ulazni otpor, frekvencijsko područje, osjetljivost, razlučivanje, maksimalna ulazna veličina, i dr. – sve su to parametri o kojima ovise rezultati mjerenja pa ih moramo dobro poznavati

# Zaključak

---

- **Upoznali smo mjerna svojstva električnih signala, i kod istosmjernih i kod izmjeničnih veličina**
- **Upoznali smo različite parametre o kojima ovise mjerni rezultati pa ih je stoga potrebno dobro razumjeti i poznavati**
- **I to nisu svi ...**