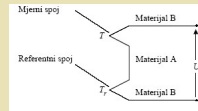


## ◆ SENZORI - NASTAVAK

### 2.5. Termoelektrički senzorski elementi (Termoparovi)

• Thomas Johann SEEBECK (1821) istraživao elektromagnetske pojave u kolima s bizmutom i bakrom, bizmutom i antimonom i otkrio pojavu termoelektromotorne sile.

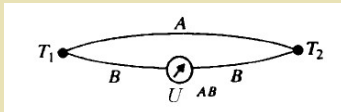


$T$  – temperatura koju treba mjeriti;  
 $T_r$  – referentna (poznata) temperatura;  
 $U$  – termoelektromotorna sila.

$$U = a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 + \dots = U^{AB} - U_r^{AB}; \Delta T = T - T_r$$

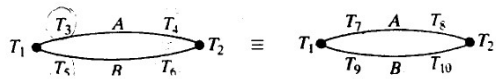
$a_1, a_2, a_3, \dots$  - konstante zavisne od osobina materijala A i B.

• Prethodna šema može se prikazati kao ( $T_1 = T$ ;  $T_2 = T_r$ ):

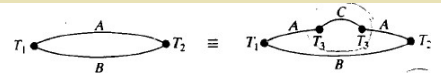


Zakoni termoparova

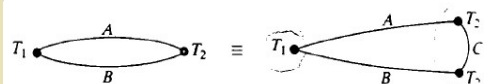
1. **Zakon:** Termoelektromotorna sila termopara zavisi samo od temperatura spojeva, tj. nezavisna je od temperature spojnih žica.



2. **Zakon:** Ako se umetne treći metal (C) u A ili u B, i ako su oba nova spoja na jednakoj temperaturi ( $T_3$ ) termoelektromotorna sila se ne mijenja. To znači da se u kolo može uključiti mjerni uređaj napona (voltmetar) i da on ne utiče na tačnost mjerenja.



3. **Zakon:** Ako su dva nova spoja AC i CB na jednakoj temperaturi (bilo  $T_1$  ili  $T_2$ ) termoelektromotorna sila se ne mijenja. To znači da se mjerni spojevi, žice A i B mogu lemiti s trećim metalom, odnosno da se na mjerne spojeve može priključiti mierni uređaj napona, odnosno pojačalo.



4. **Zakon:** Ovaj zakon naziva se zakonom međumetala (engl. law of intermediate metals). Omogućuje, na primjer, određivanje iznosa termoelektromotorne sile termopara bakar-željezo (AB) ako su poznate termoelektromotorne sile termoparova bakar-konstantan (AC) i konstantan željezo (CB).

$$T_1 \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ B \end{matrix} T_2 \equiv T_1 \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ C \end{matrix} T_2 + T_1 \begin{matrix} C \\ \text{---} \\ B \end{matrix} T_2$$

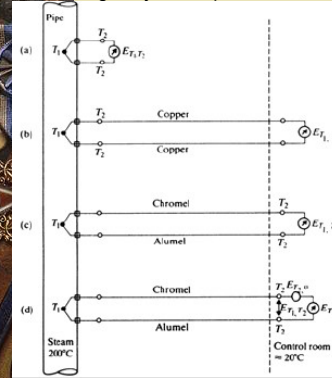
5. **Zakon:** Ovaj se zakon naziva zakonom međutemperatura (engl. law of intermediate temperatures). Daje mogućnost ugradnje produžnih vodova.

$$T_1 \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ B \end{matrix} T_2 \equiv T_1 \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ B \end{matrix} T_3 + T_3 \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ B \end{matrix} T_2$$

$$U_{1,2} = U_{1,3} + U_{3,2}$$

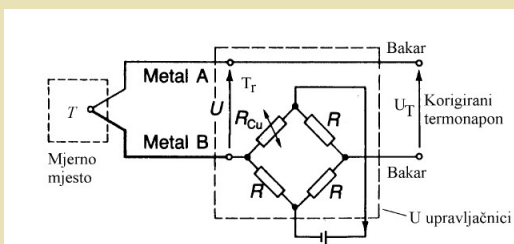
### Osnovni spojevi termoparova

#### Ugradnja termopara:

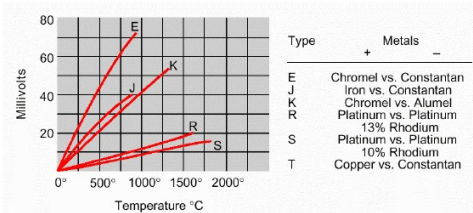


- Oklapanje i zaštita (mehanička i hemijska) termoparova
- Referentna temperatura T2 mora biti konstantna.
- U praksi se često koristi kompenzacijski most s otporničkim senzorom temperature, koji kompenzira promjene referentne temperature (d), tj. mjeri ET2,0 =>

Šema spajanja termopara s kompenzacijskim mostom:



### Tipovi termoparova:



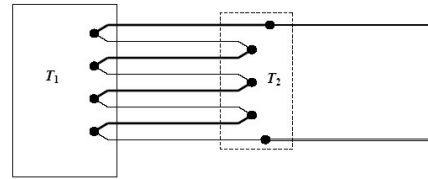
THERMOCOUPLE TEMPERATURE vs. VOLTAGE GRAPH

### Jednačine termoparova (polinomski oblik):

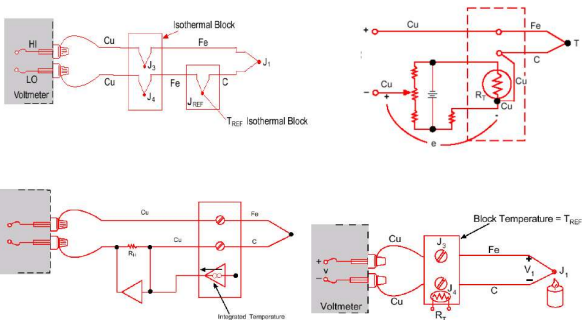
|       | TYPE E<br>Nickel-10% Chromium(+)<br>Versus<br>Constantan(-) | TYPE J<br>Iron(+)<br>Versus<br>Constantan(-)        | TYPE K<br>Nickel-10% Chromium(+)<br>Versus<br>Nickel-Silic(-)<br>(Aluminum Silicon) | TYPE R<br>Platinum-13% Rhodium(+)<br>Versus<br>Platinum(-) | TYPE S<br>Platinum-10% Rhodium(+)<br>Versus<br>Platinum(-) | TYPE T<br>Copper(+)<br>Versus<br>Constantan(-)         |
|-------|---|---|---|--|--|--|
| $a_0$ | -100°C to 1000°C<br>± 0.5°C<br>9th order<br>0.104967246     | 0°C to 760°C<br>± 0.1°C<br>5th order<br>-0.64868252 | 0°C to 1372°C<br>± 0.7°C<br>8th order<br>0.22958402                                 | 0°C to 1000°C<br>± 0.5°C<br>8th order<br>0.283632917       | 0°C to 1750°C<br>± 1°C<br>9th order<br>0.927763167         | -160°C to 400°C<br>± 0.3°C<br>7th order<br>6.100860910 |
| $a_1$ | 17189.45262   | 19873.14503   | 24152.10500   | 173075.491   | 169526.5150  | 25727.94369  |
| $a_2$ | 266280.0860   | -318814.8363  | 47233.2018  | -4840341.27  | -3168893.94  | -76734.8209  |
| $a_3$ | 12655339.5  | 1166199.76  | 2210340.62  | 1.90602E + 10  | 8090738693   | 3825595.61   |
| $a_4$ | -448703084.6  | -326917591.4  | -650653914.9  | -4.82704E + 12   | -1.63562E + 12   | -3247486589  |
| $a_5$ | 1.10896E + 10   | 2018441914  | 4.8306E + 10  | 7.62919E + 14  | 1.88027E + 14  | 6.27688E + 11  |
| $a_6$ | -1.76807E + 11  |   | -1.18452E + 12  | -7.20626E + 16   | -1.37241E + 16   | -2.56190E + 13   |
| $a_7$ | 1.71802E + 12   |   | 1.38680E + 13   | 3.71496E + 18  | 6.17501E + 17  | 3.94077E + 14  |
| $a_8$ | -9.19278E + 12  |   | -6.33708E + 13  | -8.03104E + 19   | -1.66106E + 19   |  |
| $a_9$ | 2.0612E + 13  |   |   | 1.69535E + 20  |  |  |

TEMPERATURE CONVERSION EQUATION:  $T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$   
 NESTED POLYNOMIAL FORM:  $T = a_0 + x(a_1 + x(a_2 + x(a_3 + \dots x(a_n + a_{n+1}x))))$  (5th order)  
 where x is in Volts, T is in °C

### Povećanje osjetljivosti mjerenja temperature (Thermopiles):



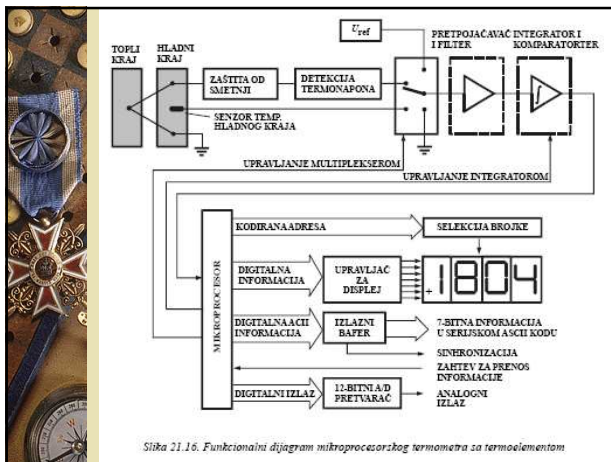
### Termopar



### Povezivanje termoelementa sa mikroprocesorom.

Termoelementi se priključuju na računar preko PC kartice na kojoj se nalaze kola za kondicioniranje signala, selektor kanala i A/D konvertor (slika). U računar su podaci o temperaturi analiziraju, čuvaju i po potrebi prikazuju tabelarno ili na odgovarajućim dijagramima, generišu kompenzacioni, alarmni i upravljački signali.





### Prednosti termoelemenata kao senzora temperature su:

- ♦ **rad bez vanjskog izvora energije** jer se radi o aktivnom senzoru;
- ♦ **jednostavna i kompaktna konstrukcija**, velika mogućnost ugradnje;
- ♦ **širok temperaturni opseg mjerenja** (od  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $4\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- ♦ **visoka tačnost** ( $\pm 1 - 2, 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili  $\pm 0, 25 - 0,75\%$  mjernog opsega za standardne izvedbe, odnosno  $\pm 0, 5 - 1, 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili  $\pm 0, 1 - 0,4\%$  mjernog opsega za specijalne izvedbe).

### Nedostaci termoelemenata su sledeći:

- ♦ **nizak nivo izlaznog signala** (najviše do  $100\text{mV}$ );
- ♦ **mala osjetljivost** ( $10 - 70\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ), zbog čega je veoma otežano mjerenje malih temperaturnih razlika;
- ♦ **potrebna stalna referentna temperatura ili kompenzacija**;
- ♦ **nelinearna statička karakteristika**;
- ♦ **osjetljivost na hemijsko djelovanje radne okoline**;
- ♦ **pojava parazitenih termoelektričnih napona**, koji su rezultat nehomogenosti materijala od kojeg je napravljen termoelement

### Praktične preporuke za smanjenje grešaka mjerenja pomoću termoelementa:

- ♦ termoelement ne smije biti na direktnom plamenu niti u njegovoj neposrednoj blizini zbog agresivnog djelovanja gasova i čestica u okolini plamena;
- ♦ za tela sa raspodijeljenom vrijednošću temperature termoelement treba ugraditi u zoni srednje vrijednosti temperature jer on mjeri temperaturu u jednoj tački;
- ♦ poželjno je da se termoelement locira na vidnom i dostupnom mjestu radi lakše inspekcije i eventualne zamjene;
- ♦ tijelo termoelementa u cjelosti treba da se nalazi u mjernom mediju;
- ♦ svi kontakti moraju biti čisti i čvrsti kako bi prelazni otpor kontakata bio što manji;
- ♦ priključni vodovi ne smiju biti u blizini visokonaponskih energetske vodova zbog elektromagnetne indukcije.

### Radijacijsko mjerenje temperature

Zasniva se na razmjeni energije radijacijom između tijela :

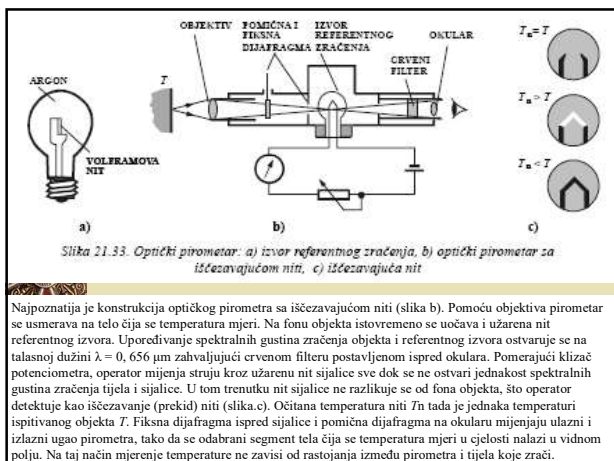
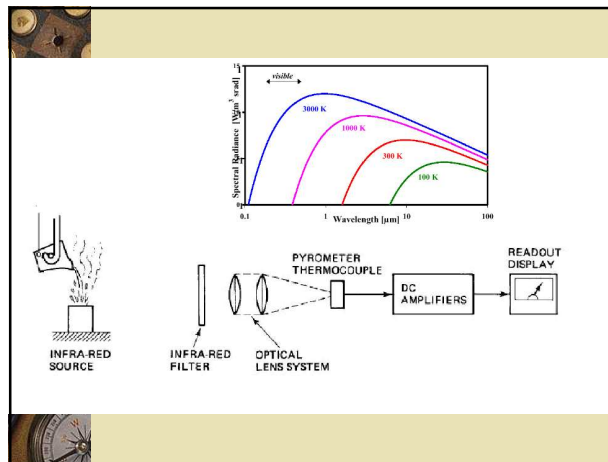
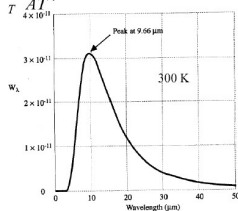
- Termokopler
- Bolometer

$$\text{Reflective radiation } \frac{dQ}{dt} = CT^m; 4 \leq m \leq 5.5$$

$$\text{Blackbody radiation } \frac{dQ}{dt} = T \frac{AT^4}{4 \times 10^{10}}$$

Wien's displacements law:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T[K]} [\mu\text{m}]$$



### OPTOELEKTRONSKI SENZORI

Optoelektronski senzori privlače pažnju mnogih istraživača i korisnika.

Razlog je u tome što se fizički osnov rada optoelektronskih senzora zasniva na promjeni parametara optičkog signala sa promjenom mjerene fizičke veličine. Zbog toga, za razliku od otporničkih, kapacitivnih, elektromagnetnih i pijezelektričnih senzora, optoelektronski senzori nemaju galvanske i magnetne veze, već samo optičke. U tom smislu optoelektronski senzori često se označavaju samo kao optički senzori.

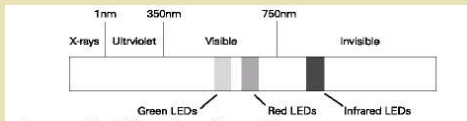
Zahvaljujući optičkom signalu postignuti su: galvansko razdvajanje, jednostavnije šeme priključivanja, kompatibilnost merenja i prenosa signala, zaštita od šumova, mogućnost mjerenja fizičkih veličina kako u oblasti malih tako i u oblasti velikih vrijednosti, standardizacija izlaznog signala, te visok kvalitet statičkih i dinamičkih karakteristika.

## Optički senzori

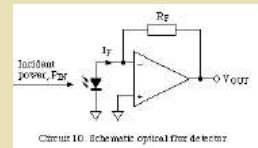
Zasnivaju se na nivou reflektovanog ili propuštenog svjetla.

Izvor svjetla je vještački, u području talasnih dužina za koje se proizvode LED (Light Emitting Diode)

Obično je to žuto-do-crveni dio spektra, ili blisko infracrveno područje



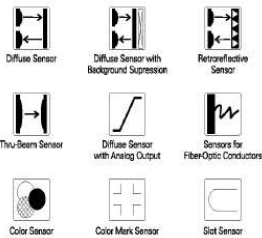
## Prijemni sklop



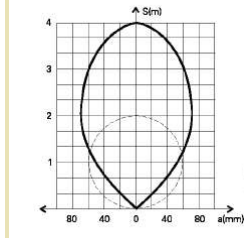
## Optički senzori

• Mogu se koristiti i kao binarni i analogni senzori

Nekoliko varijacija senzora:



Usmjeravanje pomoću sočiva

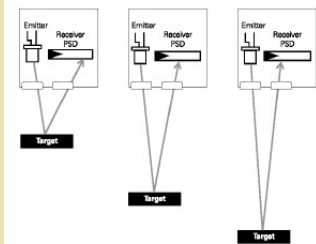


## Optički senzori

• Osjetljivi na reflektivnost površine

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Test Card (Matte White)          | 100% |
| White Paper                      | 80%  |
| Gray PVC                         | 57%  |
| Printed Newspaper                | 60%  |
| Lightly Colored Wood             | 73%  |
| Cork                             | 65%  |
| White Plastic                    | 70%  |
| Black Plastic                    | 22%  |
| Neoprene, Black                  | 20%  |
| Automobile Tires                 | 15%  |
| Aluminum, Untreated              | 200% |
| Aluminum, Black Anodized         | 150% |
| Aluminum, Matte (Brushed Finish) | 120% |
| Stainless Steel, Polished        | 230% |

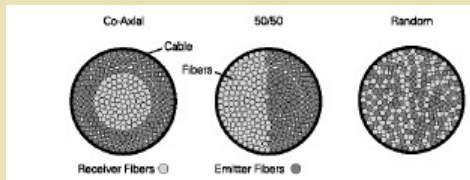
Za određivanje položaja: Triangulacija



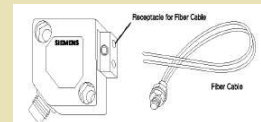
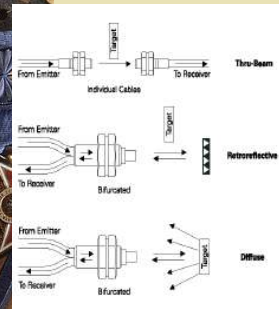


### Optički senzori

- Samo način prenošenja svjetla
- Infracrveno svjetlo: Staklena vlakna
- Vidljivo svjetlo: Polimerna vlakna

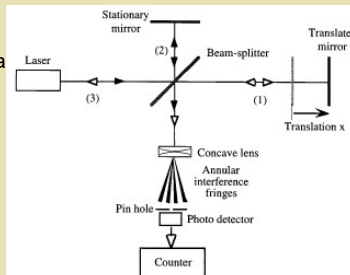


### Optički senzori



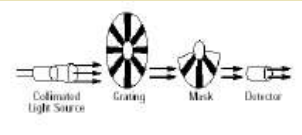
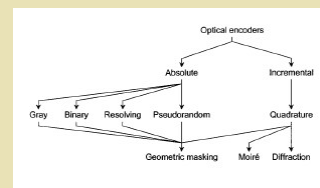
### Optički senzori

- Za vrlo veliku osjetljivost reda nanometara
- Michelsonov interferometar
- Zasniva se na interferenciji između direktne i reflektovane svjetlosti
- Tačnost zavisi o varijaciji talasne dužine svjetlosti
- Vlažnost vazduha
- Atmosferski pritisak
- Brzina kretanja instrumenta



### Optički senzori

- Optički koderi
- Gray kodirani
- Binarno kodirani
- Kvadraturni
- Pseudorandom



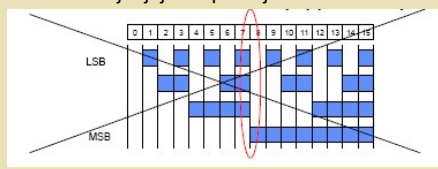
**Optički senzori**

**Inkrementalni enkoder** generiše impuls za svaki određeni inkrement ugla zakreta (za rotacioni koder) ili impuls za svaki inkrement linearnog pomjeraja. Ukupna pređena udaljenost određuje se brojanjem izlaznih impulsa.

**Apsolutni enkoder** ima određeni broj izlaznih kanala tako da svaki pojedini položaj može biti opisan jedinstvenim izlaznim kodom. Što je veća osjetljivost to je veći broj izlaznih kanala potreban

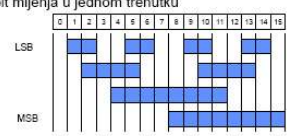
**Optički senzori**

Direktni binarni kod: ukoliko se svi bitovi istovremeno mijenjaju: treperenja




LSB  
MSB

Grey: samo se jedan bit mijenja u jednom trenutku

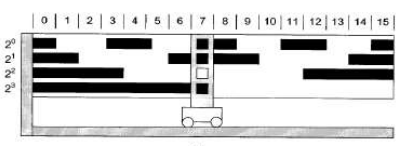


LSB  
MSB

Grey disk (8 bit)



**Optički senzori**



(a)

Gray 0 1 0 0  
Binary 0 1 1 1

$\oplus$  is a modulo-2 addition

(b)

Gray 0 1  
Binary 0 1

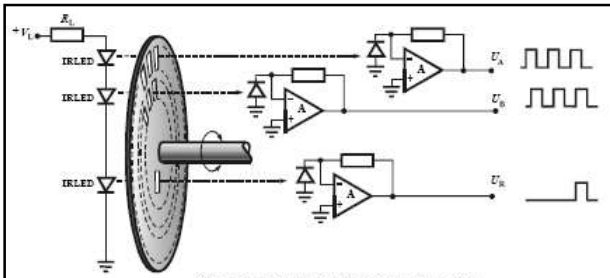
0 1  
0 1  
0 1

(c)

**Inkrementalni enkoder**

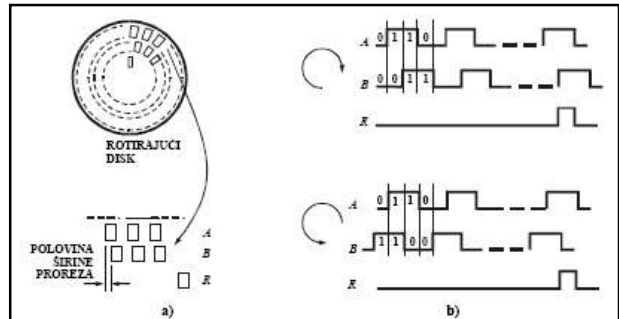
- Optoelektronski enkoder sastoji se od izvora svetlosti, od jednog diska sa dva niza proreza ravnomerno raspoređenih po obodu i odgovarajućih elektronskih kola za obradu signala sa prijemnika svetlosti. Izvori svetlosti najčešće su infracrvene LED diode, a kao prijemnici odgovarajuće fotodiode. Prolaz svetlosti kroz proreze prilikom zakretanja osovine detektuje se u fotiodiodi i generišu se pravougaoni impulsi (kvadratura enkodera). Na slici 15.23 detektori su fotonaponski elementi u režimu kratkog spoja. Broj impulsa proporcionalan je ostvarenom zakretanju.





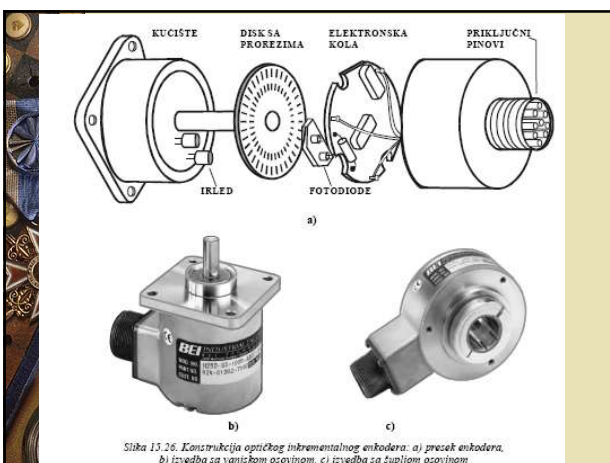
Slika 15.23. Inkrementalni optoelektronski senzor

Prerezi na unutrašnjoj stazi rotirajućeg diska pomjereni su za 1/2 širine u odnosu na prereze po obodu, pa impulsi fotoprijemnika na unutrašnjoj stazi kasne ili prednjače u zavisnosti od smjera rotacije (slika 15.24.a). Najveći diskovi imaju prečnik  $d=150$  mm i približno 5 000 prereza, tj. rezoluciju  $1 : 5\ 000$  ili  $\pm 4''$ .



Slika 15.24. Generiranje impulsa na enkoderu: a) disk sa dve staze, b) međusobni položaj impulsa za različite smerove rotacije

Fotoprijemnici koji su opremljeni električnim kolima za brojanje i prednjih i zadnjih ivica impulsa imaju dvaput bolju rezoluciju:  $\pm 2''$ . Kodni diskovi uspešno se primenjuju u numerički upravljanim alatnim mašinama i za mjerenje malih linearnih pomeraja veličine  $1\ \mu\text{m}$ , tako što se pomoću zupčanika linearno kretanje pretvara u ugaono.

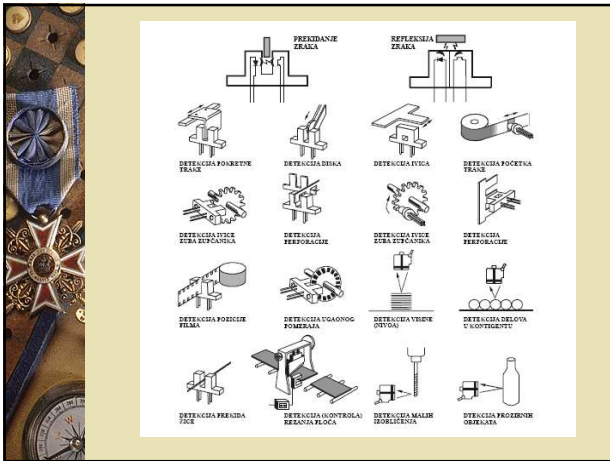


Slika 15.26. Konstrukcija optičkog inkrementalnog enkodera: a) presjek enkodera, b) izvedba sa vanjskom osovinom, c) izvedba sa tupijom osovinom

### Optički senzori

#### Optički koderi:

- Osjetljivi na vibracije i udare
- Rozete sa maskom su najčešće od stakla
- Zavisno o razlučljivosti, imaju ograničenje linearne/rotacione brzine
- Skupi su
- Elektronika za obradu signala može biti komplikovana



## 2.6. Elastični senzorski elementi

- Pri djelovanju sile na oprugu dolazi do izduženja ili sabijanja opruge, koje je proporcionalno sili.
- Na ovom principu temelje se elementi za pretvaranje sile u pomjeraj.
- Elastični senzorski elementi koriste se takođe za mjerenje:
  - ♦ momenta  $M = Fx$  ( $x$  – pomjeraj);
  - ♦ pritiska  $P = F / A$  ;
  - ♦ ubrzanja  $a = F / m$  ;
- Uz elastični senzorski element koriste se sekundarni elementi pomjeraja (mjerne trake) koji pretvaraju pomjeraj u električni signal.
- Pomjeraj može biti linearni ili ugaoni (zakret).

### Prenosna funkcija elastičnoga senzora sile

$k$  - konstanta elastičnosti [N/m];  
 $d$  - konstanta prigušenja [Ns/m]

- Jednacina ravnoteže sile:  

$$F - kx - d\dot{x} = m\ddot{x}$$
 odnosno:  

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F$$
- U stacionarnom stanju je:  

$$F = kx$$
- Za početne uslove  $\dot{x} = 0$  i  $\ddot{x} = 0$  L-transf. daje prenosnu funkciju:  

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}$$
 gdje su:  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ;  $\xi = \frac{d}{2\sqrt{km}}$ ;  
 $\frac{1}{k} = K$  - osjetljivost elementa.

(Korektno bi trebalo pisati:  $\Delta X(s)$  i  $\Delta F(s)$ ).

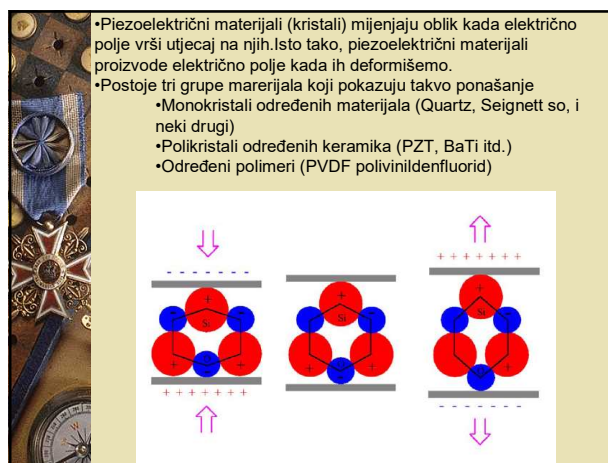
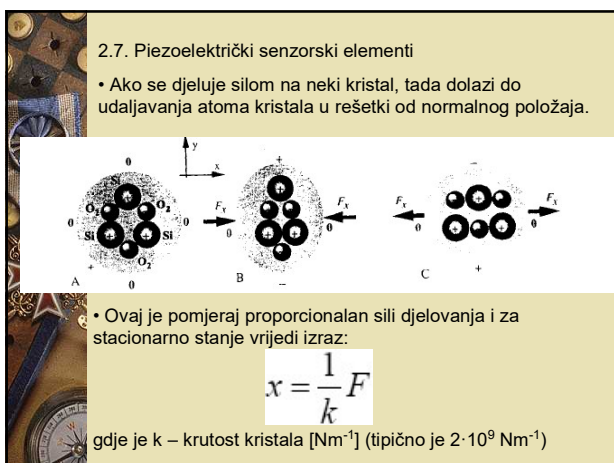
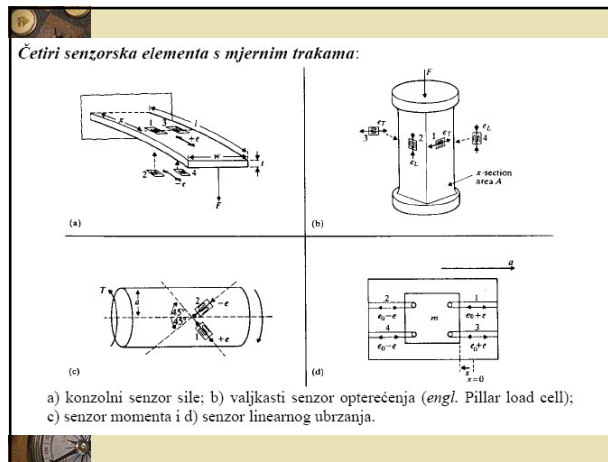
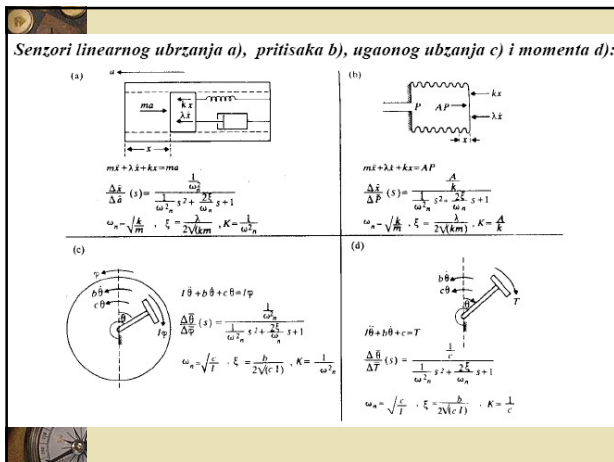
### Dinamički model elastičnog senzora linearnog ubrzanja:

$m\ddot{x} + \lambda\dot{x} + kx = ma$

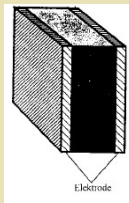
$$\frac{\Delta \ddot{x}}{\Delta \ddot{a}}(s) = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}$$

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ,  $\xi = \frac{\lambda}{2\sqrt{km}}$ ,  $K = \frac{1}{\omega_n^2}$

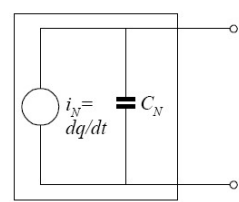
- “Seizmički” slog: masa  $m$  se pomjera po šini u smjeru ubrzanja bez trenja.
- Ako na kućište djeluje ubrzanje  $a$ , tada se masa  $m$  suprotstavlja inercijalnom silom iznosa  $ma$ .
- Dakle, pobudna sila na opružni slog je  $ma$ .
- Sličan se efekt javlja pri vožnji automobila: ubrzanje → pritisak na sjedište kočenje → pomjeraj naprijed
- Optimalni  $\xi \approx 0,7$ ; Vazduh ima tipično  $\xi = 0,1$  pa se koriste tečni ili elektromagnetski prigušivači.
- $\omega_n$  mora biti nekoliko puta veća od maksimalne frekvencije mjernoga signala  $\omega_{max}$  => za veliki  $\omega_n$  osjetljivost u stacionarnom stanju  $K$  je mala pa je potreban kompromis => rješenje primjena sekundarnih senzora.



- Dinamička zavisnost između  $x$  i  $F$  izražava se pr. funkcijom 2. reda:
 
$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1/k}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}; \quad (\text{tipično je } \omega_n \approx 60 \text{ do } 600 \text{ s}^{-1}, \zeta \approx 0.01)$$
- Deformacija rešetke piezoelektričkog kristala rezultira pojavom naelektris. proporcionalnoga deformaciji  $x$  (direktni piezoelektrički efekt):
 
$$q = Kx = \frac{K}{k} F = k_p F$$
 gdje je  $k_p$  - piezoelektrička konstanta (tzv. piezomodul).
- Za kvarc (kvarcni kristal,  $\text{SiO}_2$ ):  $k_p = 2.3 \cdot 10^{-12} \text{ [As/N]}$ .
- Za bariumtitanat (piezokeramika,  $\text{BaTiO}_3$ ):  $k_p = 250 \cdot 10^{-12} \text{ [As/N]}$ .  
(Nedostatak: piroelektrički efekt)
- Dakle, piezoelektrički kristal daje direktno električki izlaz i nije potreban dodatni sekundarni senzor pomjeraja.

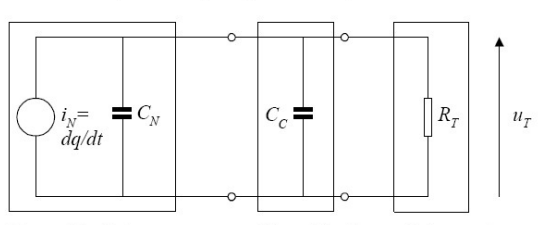
- Postoji i obrnuti (inverzni) efekt kristala:
  - Priključeni napon  $U$  na kristal izaziva mehaničko izduženje (deformaciju)  $x$  kristala:
 
$$x = k_p U \quad - \quad \text{inverzni piezoelektrički efekt}$$
 → važno za ultrazvučne pretvarace.
  - Da bi se mogla mjeriti količina elek., kristal se umeće između pločastih elektroda te se na taj način formira kondenzator kapaciteta:
 
$$C_N = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$
 gdje je:  $d$  - debljina kristala  
 $A$  - površina ploče kristala
 

Ekvivalentna šema piezoelektričkoga kristala



$$i_N = \frac{dq}{dt} = K \frac{dx}{dt}; \quad \frac{I_N(s)}{X(s)} = Ks$$

- Dakle, uz konstantnu silu  $F$  struja  $i_N$  bit će jednaka nuli.

- Ako se piezoelektrični senzor direktno spoji na čisti otpor  $R_T$  preko kabla, za koji se može pretpostaviti da je čisti kondenzator kapaciteta  $C_c$ , dobije se sistem prikazan na slici:
 

Piezoelektrični kristal      Kapacitivni vod      Opterećenje

- Prenosna funkcija izlaznog napona  $u_T$  u odnosu na struju  $i_N$  je:

$$\frac{U_T(s)}{I_N(s)} = \frac{R_T}{1 + R_T(C_N + C_C)s}$$

a u odnosu na mjerenu silu  $F$ :

$$\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{U_T(s)}{I_N(s)} \frac{I_N(s)}{X(s)} \frac{X(s)}{F(s)}$$

$$\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{R_T}{1 + R_T(C_N + C_C)s} Ks \frac{1/k}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}s + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \quad (A)$$

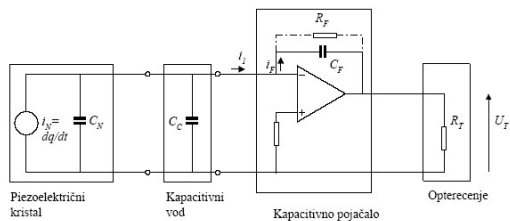
$$\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{k_p}{C_N + C_C} \frac{\tau s}{1 + \tau s} \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}; \quad k_p = \frac{K}{k}, \quad \tau = R_T(C_N + C_C)$$

- Dva su nedostatka ovog bazičnog mjernog sistema:

1. osjetljivost u stacionarnom stanju jednaka je:  $\frac{k_p}{C_N + C_C}$ , dakle, zavisna je od kapaciteta kabla, a time i o dužini i tipu kabla;
2. zbog člana  $\frac{\tau s}{1 + \tau s}$  ne mogu se mjeriti konstantne i sporopromjenljive sile.

- Ovi se nedostaci mogu znatno zaobići uvođenjem kapacitivnog pojačala. Kapacitivno pojačalo je integrator koji daje izlaz proporcionalan  $\int i_N dt$

- Na taj način, za konstantnu silu sistem ne daje izlaz jednak nuli.



$$\begin{aligned} i_N + i_F &= 0 \\ i_F &= U_T s C_F \\ i_F &= \frac{dq_F}{dt} = C_F \frac{dU_T}{dt} \\ i_N &= -i_F = -C_F \frac{dU_T}{dt} \end{aligned} \quad (B)$$

- S obzirom da je pad napona kroz  $C_N$  i  $C_C$  približno jednak nuli, ne teče struja kroz  $C_N$  i  $C_C$ , pa je:

$$i_N = i_F = \frac{dq}{dt}$$

- Odakle je:

$$\frac{dq}{dt} = -C_F \frac{dU_T}{dt} \quad (C)$$

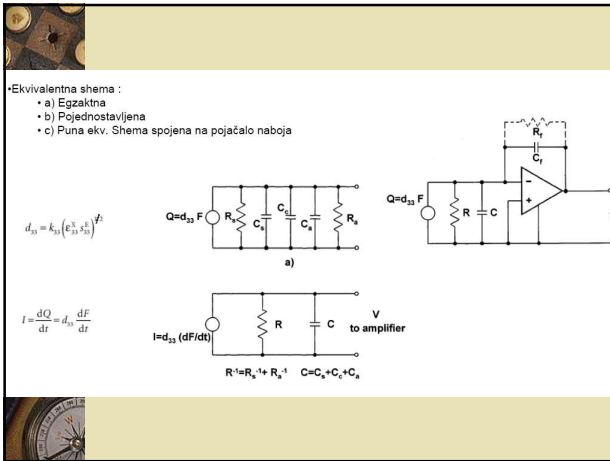
$$U_T = -\frac{1}{C_F} q - \text{prenosna karakteristika idealnoga kapacitivnog pojačala.}$$

- Iz jednadžbi (A), (B), (C) slijedi:

$$\frac{U_T(s)}{F(s)} = \frac{k_p}{C_F} \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}$$

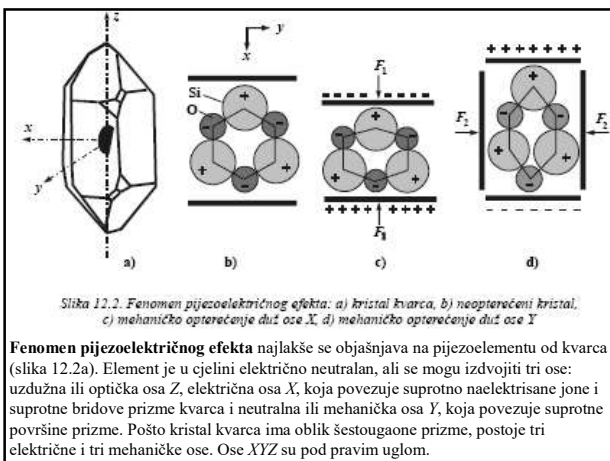
- Osjetljivost je sada:  $k_p/C_F$  - ne zavisni o kapacitetu kabla.





## Piezoelektrični Senzori

- Kvarcni pretvarači od navedenih materijala pokazuju svojstva koji opravdavaju njihovu široku upotrebu. Vrlo su stabilni, robustni i kompaktni.
- od velikog broja materijala danas u upotrebi, quartz je preferiran zbog:
  - Visoke čvrstoće, oko 100 MPa (~ 14 km dubine vode).
  - Temperature otpornosti ( do 500C).
  - Velike krutosti, visoke linearnosti i zanemarive histereze.
  - Ekstremno visoke otpornosti izolacije  $10^{14}$  Ohma, koja omogućuje niskofrekventna mjerenja oko 1 Hz



## Mjerenja na fluidima

Na fluidima, je moguće sprovesti slijedeća mjerenja:

- Protok
- Maseni protok
- Nivo
- Pritisak
- Provodljivost
- Ph Vrijednost (kiselost)
- Viskozitet
- Vlažnost (kod gasova)




## Mjerenje Protoka

**Protok** je količina sipkastog materijala, tečnosti ili gasa koja protokne kroz posmatrani poprečni presjek za jedinicu vremena.

Količina se izražava u jedinicama mase ili zapremine, pa se razlikuju:

a) Maseni protok:  $Q_m = dm/dt$  [kg/s]  
 b) Volumenski protok  $Q_v = dV/dt$  [m<sup>3</sup>/s]

Egzaktniji je maseni protok jer opisuje stvarnu količinu materije u kretanju. Volumenski protok zavisi od gustine, pritiska i temperature materije, te od lokalne gravitacije. Senzor protoka naziva se protokometrom ili protokomjerom.

**Odnos masenog i volumenskog protoka.**  
 Protok sipkastog materijala obavezno se izražava kao maseni, a protok tečnosti i gasova obično kao volumenski. Maseni i volumenski protok povezani su relacijom:  $Q_m = \rho Q_v = \rho \frac{dV}{dt}$ .

## Mjerenje Protoka

**Odnos brzine i protoka** proizilazi iz principa konzervacije mase, izražene poznatom jednačinom kontinuiteta:  $Q_m = \rho \int_S v dS$ ,

gdje je  $v$  [m/s] srednja brzina u posmatranom poprečnom presjeku. Jednačina (20.5) predstavlja osnovu brzinskog (kinematičkog) merenja protoka.

**Protok gasova.** Mjerenje protoka gasova zavisi od njihove temperature i pritiska. Zato se protok gasova izražava u odnosu na normalno stanje gasa, koje je definisano pritiskom  $p_n = 101325$  Pa i temperaturom  $T_n = 293, 15$  K, pri relativnoj vlažnosti  $\phi = 0\%$ , tako da je:

$$Q_m = \rho Q_v = \rho_n \frac{p T_n}{p_n T k} Q_v,$$

gdje se koeficijentom  $k$  koriguje neidealnost gasova pri visokim pritisicima.

## Mjerenje Protoka

**Protok sipkastog materijala** svodi se na merenje težine. U industrijskim procesima sipkasti materijali obično se prenose transportnim trakama, koje se kreću brzinom  $v$ . Dio trake (dužine  $l$ ) služi kao tas ispod kojeg je smješten senzor sile (težine), koji na svom izlazu daje maseni protok:  $Q_m = mv/l$  [kg/s].

**SENZORI VOLUMETRIJSKOG PROTOKA**  
 Volumetrijsko mjerenje protoka zasniva se na tretiranju volumena supstance koja protiče kroz posmatrani poprečni presjek na osnovu merenja nekog parametra. Mjerni parametar rezultat je međusobnog djelovanja toka fluida i tijela postavljeno u tok. Tijelo može biti fiksirano ili pokretno. Nepokretno telo je tzv. prigušnica, a mjerni parametar tada je diferencijalni pritisak. Oko 66% svih senzora protoka su ovoga tipa. Kod volumetrijskih senzora brzinskog tipa (elektromagnetni, ultrazvučni, vrtložni, senzori sa Doplerovim efektom) mjeri se srednja brzina fluida u poprečnom preseku  $S$ , a protok  $Q_v$  se dobija pomoću jednostavne jednačine:  $Q_v = vS$ .

### Mjerenje Protoka Senzori sa prigušnicom

**Prigušnica** mijenja odnos potencijalne i kinetičke energije, što uz poznatu geometriju, omogućava da se mjerenjem diferencijalnog pritiska na prigušnici jednoznačno odredi protok. Najviše se upotrebljava prigušnica u obliku prstena, koji se naziva dijafragma, zaslon ili merna blenda. Drugi oblici prigušnice su sapnica, Venturijeva sapnica i Venturijeva cijev.

Najjednostavnije; prepreka na kojoj će nastati razlika pritiska

- Blenda
- Mlaznica
- Venturijeva mlaznica
- Loša strana: Pad pritiska

Slika 20.1. Senzori protoka sa prigušnicom: a) standardne prigušnice, b) dio cevnovoda sa mernom blendom i dijagramom promene pritiska  $\Delta p$ .

### Mjerenje Protoka Senzori sa prigušnicom

**Princip mjerenja diferencijalnog pritiska** ilustrovan je na primjeru mjerne blende (slika 20.1b). Ispred i iza mjerne blende su otvori za priključivanje diferencijalnog manometra. Optimalni položaj otvora za  $p_1$  je u mirnom toku, a za  $p_2$  na mjestu suženja strujnica (vena contracta). U praksi se primjenjuju otvori uz samu mjernu blendu, izbušeni pod pravim ili oštrim uglom. Na osnovu zakona o očuvanju energije fluida prije i poslije mjerne blende, tj. primjenom Bernulijeve jednačine  $p + \rho v^2/2 + \rho gh = const$  za presjek 1 i presjek 2, dobija se da je:

$$Q_V = C \alpha \varepsilon d^2 \Delta p / \rho$$

$C = \pi\sqrt{2}/4$  bezdimenzionalna konstanta;  
 $\alpha = \mu\varepsilon / \sqrt{1 - (A_0/A_1)^2}$  koeficijent protoka;  
 $\mu = A_2/A_0$  koeficijent kontrakcije mlaza;  
 $\xi$  koeficijent brzine empirijskog karaktera, kojim se koriguje nepodudarnost lokacije otvora za merenje i preseka  $A_1$  i  $A_2$ ;  
 $\varepsilon$  koeficijent ekspanzije, koji je za nestišljive fluide jedan;  
 $d$  unutrašnji prečnik mjerne blende.

### Mjerenje Protoka

•Venturijeva mlaznica: najmanji pad pritiska

•Profil brzine u presjeku zavisi o Reynoldsovom broju

## Mjerenje Protoka

Generator vrtloga: U određenom području vrlo linearan

$$K = \frac{S^2}{(A \cdot \nu)}$$

$$Q = \frac{f}{K}$$

FIGURE 26.64 Example of vortex sensor

Pipe Reynolds Number

## Mjerenje Protoka

- Senzor sa “vrućom žicom” (Hot-Wire)
- Niska cijena i jednostavnost
- Linearizacija moguća
- Pozicioniranje kritično (Profil brzina!!)

(a)

(b)

(a)

(b)

## Mjerenje Protoka

- Senzor sa “vibrirajućom cijevi” odnosno na principu Coriolisove sile
- Velika tačnost
- Profil protoka je nebitan
- U protoku nema prepreka

FIGURE 28.81 Flow tube response to Coriolis acceleration.

Fluid Reactive Force (Inlet)

Fluid Reactive Force (Outlet)

Fluid Reactive Force (Inlet)

Fluid Reactive Force (Outlet)

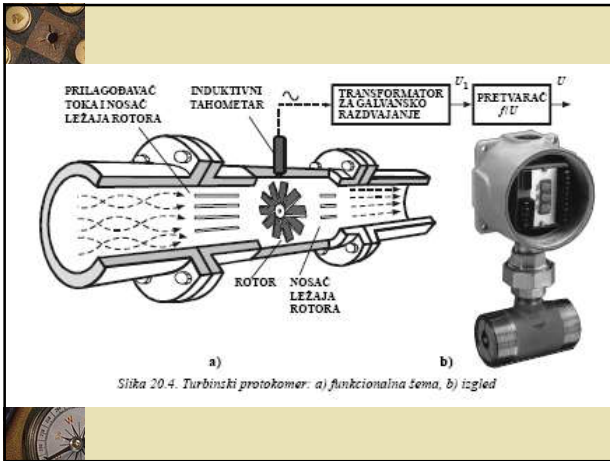
## Mjerenje Protoka

- Mjerači s rotacionim elementima
- Aksijalna turbina
- Vodeno kolo (Impeller)
- Voditi računa o profilu brzina

Source: Control Engineering

Source: Control Engineering

Other means:  
Magnetic-dynamic  
Ultra-sound



### Mjerenje Protoka

- Zapreminski mjeraci (Positive displacement)
- Osnovno svojstvo: Cjelokupni volumen je zahvaćen

### Mjerenje nivoa tečnosti

- Mjerenjem vremena preleta
- Pulsirajući laser
- Impulsi mikrotalasa
- Ultrazvučno
- Pomoću mjerenja pritiska
- Mjerenjem mase u rezervoaru
- Uronjivim ticalima

### Mjerenje nivoa tečnosti

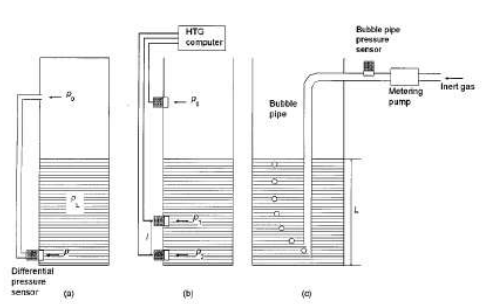
- Mjerenjem vremena preleta

| Principle  | Wave Velocity              | Avg. Carrier Frequency | Wavelength | Avg. Burst Time |
|------------|----------------------------|------------------------|------------|-----------------|
| Ultrasonic | 340 m s <sup>-1</sup>      | 50 kHz                 | 7 mm       | 1 ms            |
| Radar      | 300,000 km s <sup>-1</sup> | 10 GHz                 | 3 cm       | 1 ns            |
| Laser      | 300,000 km s <sup>-1</sup> | 300 THz                | 1 μm       | 1 ns            |



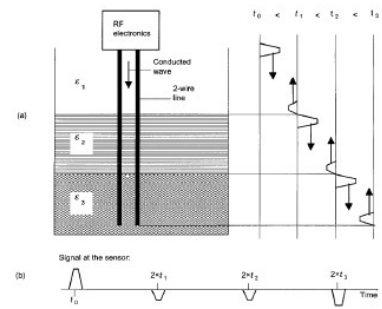
## Mjerenje nivoa tečnosti

- Mjerenjem pritiska na dnu tanka

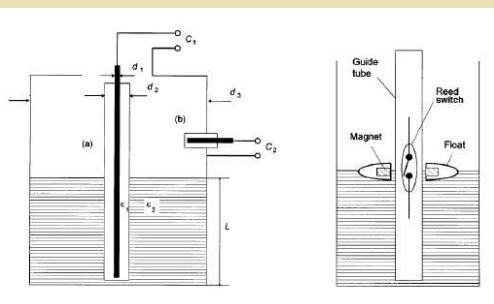


## Mjerenje nivoa tečnosti

- Uronjivim elektrodama
- Radiotalasom
- Kapacitivno

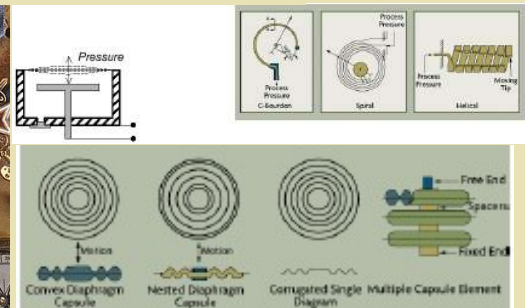


## Mjerenje nivoa tečnosti

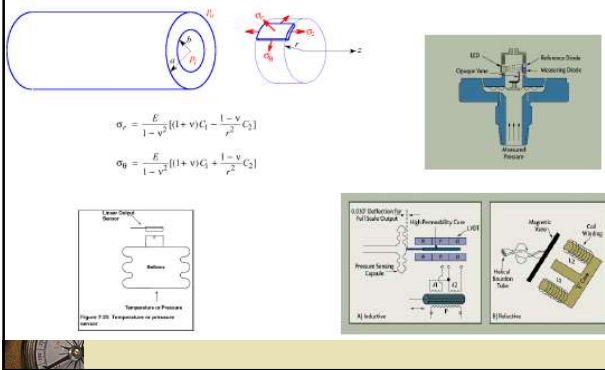


## Mjerenje pritiska

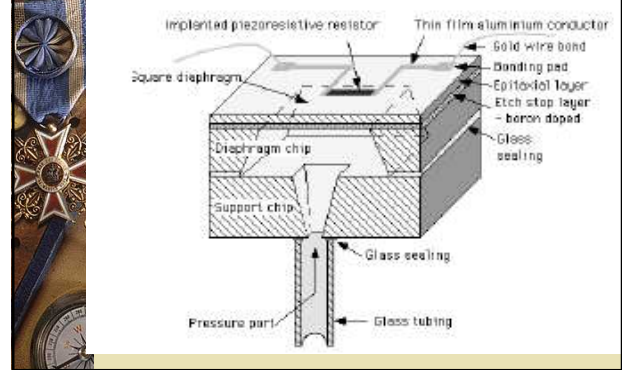
- Zasniva se na transformisanju pritiska u deformaciju
- Bourdonova cijev
- Kapacitivno
- Induktivno
- Magnetski
- Optički



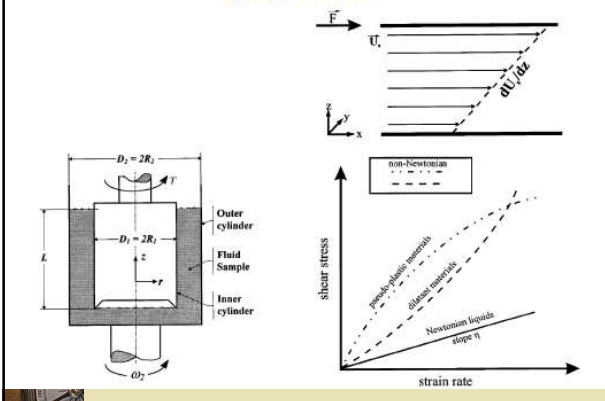
## Mjerenje pritiska



## Mjerenje pritiska



## Mjerenje Viskoznosti



## 2.8. Elektrohemijski senzori

- Ovi senzorski elementi spadaju u skup senzora za analizu tečnosti i gasova.
- Ovo su, dakle, senzori za analitičke podatke.
- Senzori za analitičke podatke sastavni su dio uređaja za analizu koji upravlja tehničkim procesom ili se ovi senzori zajedno s mjernim sklopovima (za obradu mjernih signala) koriste za nadzor pogona, proizvodnoga procesa ili za nadzor zagađenja okoline.
- U analizi rastvora koriste se senzori za:
  - ◆ pH-vrijednost;
  - ◆ sadržaj soli;
  - ◆ vlažnost vazduha.

U analizi gasova koriste se senzori zasnovani na:

- ♦ toplotnoj provodljivosti;
- ♦ magnetskome mjerenju kiseonika (paramagnetizmu kiseonika);
- ♦ jonizaciji plamena;
- ♦ infracrvenoj apsorpciji.

**2.8.1. pH-mjerenje**

- Pomoću pH-mjerenja određuje se kiselost (aciditet) odnosno baznost (alkalitet) vodenog rastvora.
- Područja primjene:
  - ♦ prehrambena industrija;
  - ♦ obrada vode za termoelektrane;
  - ♦ neutralizacija otpadnih voda.

• pH-vrijednost (*lat. potentia hydrogenii*) definiše se kao negativni dekadni logaritam koncentracije vodonikovih jona (ili  $H^+$  jona)  $C_H$

$$pH = -\log_{10} C_H^+ \quad (pH = -\log_{10} [H^+])$$

( $C_H^+$  se izražava u g-jonima/l).

• Iz zakona o djelovanju masa dobije se:

$$C_{H^+} \cdot C_{OH^-} = 10^{-14} \left[ \left( \frac{g-jon}{l} \right)^2 \right] \quad kod \ 25^\circ C$$

$C_{H^+}$  - koncentracija vodonikovih jona;  
 $C_{OH^-}$  - koncentracija hidroksilnih jona;

- U neutralnom rastvoru je:
 
$$C_{H^+} = C_{OH^-} = 10^{-7} \left[ \frac{g-jon}{l} \right]$$
- Dakle, pH-vrijednost neutralnog rastvora je 7 ( $pH = 7$ ). To je čista voda.
- Čista voda ima  $10^{-7}$  grama vodonikovih jona ( $H^+$ ) u jednom litru rastvora.

- Za kiseli rastvor je  $pH < 7$
- Za bazni rastvor je  $pH > 7$
- Područje praktične pH-skale je od  $pH \approx 0$  (jako kiselo) do  $pH \approx 14$  (jako bazno).

• Mjerna elektroda se za pogonska mjerenja u pravilu izvodi kao staklena elektroda i povezana je s mjernim rastvorom preko staklene membrane.

• S unutrašnje strane staklene membrane nalazi se referentni rastvor poznate pH vrijednosti (npr.  $pH = 7$ ), čiji se potencijal dobija pomoću odvodne elektrode.

• Pomoću referentne elektrode odvodi se potencijal mjernog rastvora.

• Na donjem kraju referentne elektrode zavarena je dijafragma koja predstavlja galvansku vezu s mjernim rastvorom.

- Razlika potencijala između mjernog rastvora i referentnog rastvora koja nastaje na obje granične ploče staklene membrane opisuje se Nemstovom jednačinom:

$$U = \frac{R\vartheta}{Fn} \ln \frac{C_{H^+}}{C_{H^+}^0}$$

- ♦  $R=8,3143$  [J/K] - univerzalna gasna konstanta
- ♦  $\vartheta$ [C] - temperatura;
- ♦  $F=96487$  [As/mol] - Faradajeva konstanta;
- ♦  $n$  - valenca (ovdje je  $n = 1$ );
- ♦  $C_{H^+}$  - koncentracija vodonikovih jona u mjernom rast.;
- ♦  $C_{H^+}^0$  - koncentracija vodonikovih jona u referentnom rast.

- Uvrštenjem konstanti dobije se (uz  $\ln x = 2.303 \log_{10} x$ ):

$$U = 54,2mV \frac{\vartheta}{273,15K} (\underbrace{\log C_{H^+}}_{-pH} - \underbrace{\log C_{H^+}^0}_{-pH_0})$$

odnosno

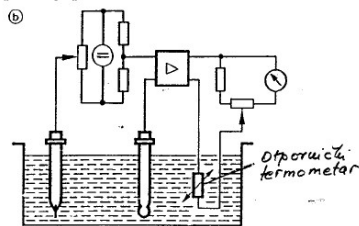
$$U = k_N(pH_0 - pH) \quad - \text{ Galvanijev napon}$$

gdje je:

$$k_N = \frac{R}{F} \vartheta \ln 10 = [54,2 + 0,20(\vartheta - 0^\circ C)] \text{ mV} - \text{ temperaturno zavisna Nemstova konstanta.}$$

Npr. za  $\vartheta = 25^\circ C$  je  $k_N = 59,2$  mV.

### Mjerno pojačalo:



mjerni spoj za mjerenje pH-vrijednosti (Hartmann & Braun)

- Zbog velikoga otpora staklene membrane mjerne elektrode (red veličine  $10 - 100M\Omega$ ) mjerna pojačala moraju imati relativno veliki ulazni otpor.
- Gornji potenciometar na slici služi za umjeravanje nul-tačke i prilagodjenje na pojedine mjerne elektrode.

- Osim toga, mora se uzeti u obzir i uticaj temperature. Za to se koristi temperaturno senzori uronjen u mjerni rastvor.
- Izlaz ovog senzora spojen je na mjerne sklopove radi korekcije uticaja temperature.

- U nekim izvedbama obje elektrode mogu biti u zajedničkom kućištu:

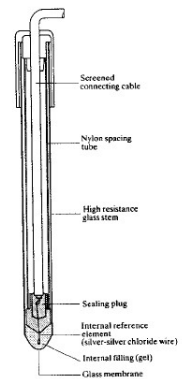


Table 1: Abbreviated table of standard reduction potentials

|   |                                  |         |
|---|----------------------------------|---------|
| $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow$                  | $\text{Na}(s)$                   | -2.71   |
| $\text{Zn}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow$               | $\text{Zn}(s)$                   | -0.76   |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow$               | $\text{Fe}(s)$                   | -0.44   |
| $\text{Cd}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow$               | $\text{Cd}(s)$                   | -0.40   |
| $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow$              | $\text{Pb}(s)$                   | -0.126  |
| $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$                 | $\text{H}_2(g)$                  | 0.000   |
| $\text{AgCl}(s) + \text{e}^- \rightarrow$               | $\text{Ag}(s) + \text{Cl}^-(g)$  | +0.222  |
| $\text{Hg}_2\text{Cl}_2(s) + 2\text{e}^- \rightarrow$   | $2\text{Cl}^-(g) + \text{Hg}(l)$ | +0.2676 |
| $\text{Cu}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$                 | $\text{Cu}(s)$                   | +0.337  |
| $\text{I}_2(s) + 2\text{e}^- \rightarrow$               | $2\text{I}^-(s)$                 | +0.535  |
| $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow$               | $\text{Fe}^{2+}(aq)$             | +0.771  |
| $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow$                  | $\text{Ag}(s)$                   | +0.799  |
| $\text{O}_2(g) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow$ | $2\text{H}_2\text{O}(l)$         | +1.23   |
| $\text{Cl}_2(g) + 2\text{e}^- \rightarrow$              | $2\text{Cl}^-(g)$                | +1.36   |

### Mjerenje vlažnosti gasova

### 3. TIPIČNI ELEMENTI ZA PREDOBRADU SIGNALA

- Elementi za predobradu (kondicioniranje) signala pretvaraju izlazni signal senzora u oblik prikladan za daljnju obradu (jednosmjerni napon, jednosmjernu struju ili frekvenciju).
- Najvažniji elementi za predobradu signala su:
  - ◆ Mjerni mostovi (engl. Deflection bridges) i
  - ◆ Pojačala (engl. Amplifiers)

#### 3.1 Mjerni mostovi

- Koriste se za pretvaranje izlaza iz otporničkih, kapacitivnih i induktivnih senzora u naponski signal.

#### Wheatstoneov most:

- Impedanse  $Z_1$  do  $Z_4$  mogu biti aktivne i reaktivne.
- Izlazni napon  $u_i$  zavisi od napona napajanja  $u_s$  prema sljedećem izrazu:
 
$$u_i = \left( \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} - \frac{Z_4}{Z_1 + Z_4} \right) u_s = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4} u_s$$
- Most će biti u ravnoteži ( $u_i = 0$ ) ako je:
 
$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad \text{odnosno} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$
- Ako se promijeni iznos bilo koje impedanse, most postaje neuravnotežen (**otklanja** se iz ravnotežnog stanja) i pojavljuje se izlazni napon različit od nule.



- Osjetljivost mosta po pojedinoj impedansi određuje se prema izrazima:

$$\frac{\partial u_i}{\partial Z_1} = \frac{Z_4}{(Z_1 + Z_4)^2} u_s; \quad \frac{\partial u_i}{\partial Z_2} = \frac{-Z_3}{(Z_2 + Z_3)^2} u_s;$$

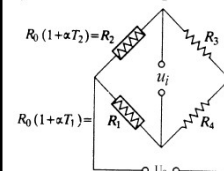
$$\frac{\partial u_i}{\partial Z_3} = \frac{Z_2}{(Z_2 + Z_3)^2} u_s; \quad \frac{\partial u_i}{\partial Z_4} = \frac{-Z_1}{(Z_1 + Z_4)^2} u_s;$$

- Iz ukupne osjetljivosti mosta dobije se zavisnost promjene izlaznog napona  $u_i$  od promjene impedansi mosta prema izrazu:

$$\frac{\delta u_i}{u_s} = \frac{Z_4 \delta Z_1 - Z_1 \delta Z_4}{(Z_1 + Z_4)^2} - \frac{Z_3 \delta Z_2 - Z_2 \delta Z_3}{(Z_2 + Z_3)^2}$$

### Primjeri senzora u mosnom spoju:

- Dva metalna otporna senzora (npr. PT-100) u mosnom spoju



- Most će biti u ravnoteži ako je  $R_2/R_1 = R_3/R_4$ , odnosno ako je  $T_1 = T_2$ , tj. mora biti  $R_2/R_0 = R_3/R_0$  odnosno  $R_3 = R_4$ , pa se može pisati:

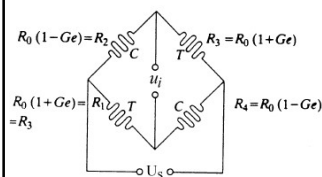
$$u_i = \left( \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_0} \frac{1}{1 + \alpha T_1}} - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_0} \frac{1}{1 + \alpha T_2}} \right) U_s$$

- Ako se izabere  $R_3 \gg R_0$  vrijedi aproksimacija:

$$u_i \approx \left( \frac{1 + \alpha T_1}{\frac{R_3}{R_0}} - \frac{1 + \alpha T_2}{\frac{R_3}{R_0}} \right) U_s = \frac{R_3}{R_0} U_s \alpha (T_1 - T_2)$$

- Dakle, izlazni napon mosta proporcionalan je razlici temperatura.

### 2) Četiri otpornička senzora deformacije u mosnom spoju

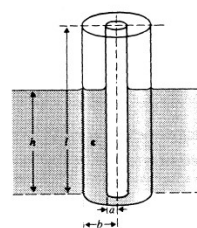


- Ovakav spoj otporničkih traka, montiranih na elastičnim elementima, koristi se za mjerenje sile, momenta, ubrzanja i pritiska.

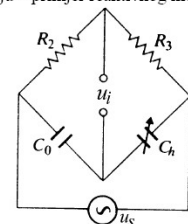
- Montiraju se tako da su dva suprotna senzora izložena opterećenju na pritisak ( $R_2$  i  $R_4$  na slici; engl. Compression) a druga dva opterećenju na istezanje ( $R_1$  i  $R_3$  na slici; - engl. Tension).

- Primjenom četiri senzorska elementa postiže se maksimalna osjetljivost mosta na opterećenje, a kompenzira se i utjecaj temperature na netočnost mjerenja.

### 3) Kapacitivno senzora nivoa u mosnom spoju – primjer reaktivnog mosta



$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} [l + (\epsilon - 1)h]$$



$$u_i = \left( \frac{1}{1 + \frac{C_0}{C_h}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) u_s$$

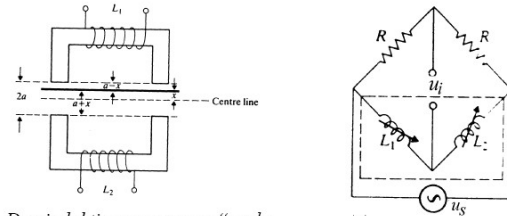
- Za  $h_{min}$  podesi se  $u_i = 0$ , odnosno  $C_0 = C_{hmin}(R_3/R_2)$ , pa se može pisati:

$$u_i = \left( \frac{1}{1 + \frac{C_{hmin} R_3}{C_h R_2}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) u_s$$

odnosno za  $R_3 \gg R_2$

$$u_i = \frac{R_2}{R_3} \left( \frac{C_{hmin}}{C_h} - 1 \right) u_s$$

#### 4) Mostni spoj s dva induktivna senzora u "push-pull" spoju

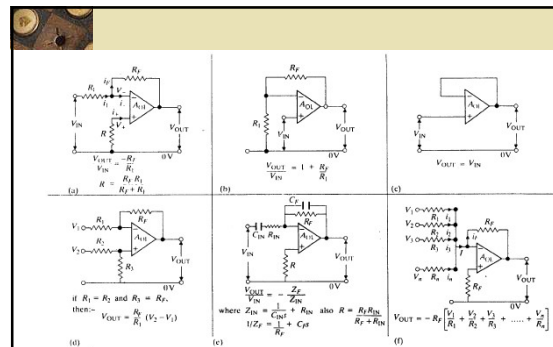


Dva induktivna senzora u "push-pull" spoju

$$L_1 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a-x)}; \quad L_2 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a+x)} \quad u_i = \left( \frac{L_1}{L_1 + L_2} - \frac{1}{2} \right) u_s = \frac{\alpha x}{2(1 + \alpha a)} u_s$$

### 3.2 Pojačavači

- Pojačavači su neophodna za pojačavanje signala malih vrijednosti na vrijednosti prikladne za dalju obradu.
- Osnovni element pojačala signala je integrisano operaciono pojačalo, koje se odlikuje visokim pojačanjem i izvodi se tako da može pojačavati signale u širokom rasponu frekvencija.
- Operacionom se pojačalu dodaje pasivna mreža koja određuje dinamička i statička svojstva pojačavača (vidi sljedeću sliku).



(a) invertirajuće ; (b) neinvertirajuće ; (c) naponsko (d) diferencijalno (e) A.C. pojačalo f) naponski sabirac

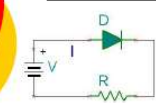
• Prenosne funkcije pojačala prikazanih na slici dobijene su uz pretpostavku idealnih karakteristika operacionih pojačala. Za postizanje zahtijevane tačnosti mjerenja, pri projektovanju pojačala potrebno je uzeti u obzir stvarne karakteristike operacionih pojačala (vidi sljedeću tablicu).

| Parametar                          | Idealno op. pojačalo | Tipično op. pojačalo    |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| D.C. pojačanje u otvorenoj petlji  | $\infty$             | 100 dB ( $10^5$ )       |
| Ulazna impedans                    | $\infty$             | 2 M $\Omega$            |
| Izlazna impedans                   | 0                    | 75 $\Omega$             |
| Ulazni napon mirovanja             | 0                    | 1 mV                    |
| Temperaturni koeficijent offšeta   | 0                    | 5 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C |
| Ulazna struja mirovanja            | 0                    | 80 nA                   |
| Frekv. područje (3dB)              | 0 do $\infty$        | 0 - 10 MHz              |
| Common mode rejection ratio (CMRR) | $\infty$             | 90 dB                   |

# ELEKTRONSKI ELEMENTI i SKLOPOVI

Analogna obrada električnih signala

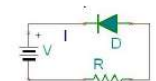
## Dioda - ispravljač



$$\text{Ako je } V > V_{pn}, \quad I = \frac{V - V_{pn}}{R}$$

$V_{pn} \sim 0.6$  V, za diodu od Si

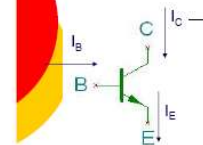
Direktna polarizacija, dioda provodi



$$\text{Ako je } V < V_{pn}, \quad I = 0$$

Inverzna polarizacija, dioda ne provodi

## TRANZISTOR – aktivni režim rada



B - baza, E - emitor, C - kolektor

$$I_E = I_B + I_C$$

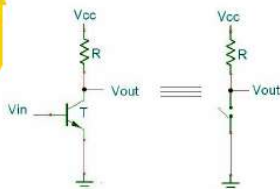
$$V_{BE} = 0.060 \log \left( \frac{I_C}{10^{-13}} \right) \quad \text{na } 27^{\circ}\text{C}$$

Pojačavačka funkcija!  $\Rightarrow$  mala promena struje  $I_B$  ima veliki uticaj na struje  $I_C$  and  $I_E$

Tranzistori su aktivne elektronska komponenta koja omogućuje pojačanje električnih signala. Pojačanje ulaznog signala (struja kroz bazu) je na račun energije koju daje izvor koji napaja tranzistor. Tranzistori se najčešće prave od Si, i mogu se klasifikovati u 3 kategorije:

- bipolarni
- FET (field effect transistor)
- MOS or CMOS

## TRANZISTOR – rad u zasićenju



Ako je ulazni napon  $V_{in}$  veći od granične vrednosti, tranzistor ulazi u zasićenje, a izlazni napon postaje  $V_{out} \approx 0$ . Ako je napon nedovoljan za pobudu, napon  $V_{out}$  postaje  $V_{out} = V_{CC}$ .

Granična vrednost ulaznog napona je jednaka naponu pn spoja ( $\approx 0.6$  V)

Tranzistor ne provodi kad je ulazni napon manji od 0.

Ova funkcija je osnova operacije svih digitalnih uređaja, uključujući računare.

## Tranzistori

- Silikonski bipolarni tranzistori (bipolarni pnp spoj) imaju veliko pojačanje, veliki propusni opseg, i koriste se kao analogni pojačavači.
- FET (field effect transistor) imaju veliku ulaznu impedansu, i koriste se kao pojačavači
- MOS FET (Metal Oxide Field Effect Transistor) se koriste za digitalne funkcije, posebno u računarima i mikroracunarima.
- CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) tranzistori zahtevaju malu pobudu (snagu), i koriste se najviše kao digitalni i analogni prekidači.

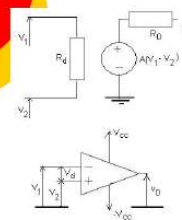
## IDEALNI / NEIDEALNI POJAČAVAČ

OPAMP

$$V_0 = AV_+ - AV_- = A(V_+ - V_-)$$

|           | POJAČANJE U OTVORENOJ POKRETNOSTI | PROPUSNI OPSEG | ULAZNA IMPEDANSA | IZLAZNA IMPEDANSA | ŠUM (uV/√Hz) ili μV/√Hz <sup>1/2</sup> | OMER FAKTOR POTREBNOG NAPOONA ZA IZlazNO SIGNALA (odnos pojačanja diferencijalnog signala (DMG) i pojačanja nepodudnog signala (CMG)) |
|-----------|-----------------------------------|----------------|------------------|-------------------|--|---|
| IDEALNI   | $\infty$                          | $\infty$       | $\infty$         | 0                 | 0                                      | $\infty$  |
| NEIDEALNI | $10^6$                            | 1 MHz          | 100 MΩ           | 100 Ω             | 1                                      | 100000  |

## IDEALNI OPERACIONI POJAČAVAČ

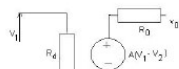


Operacioni pojačavač je jednosmerni diferencijalni pojačavač sa velikim pojačanjem koji se može predstaviti kao naponom kontrolisan strujni izvor. Na izlazu pojačavača je napon  $v_o$  koji je jednak proizvodu razlike napona  $v_d = v_1 - v_2$  i pojačanja  $A$ . U analizi idealnog operacionog pojačavača pojačanje i ulaznu impedansu smatramo beskonačnim, tj.,

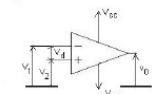
$$A = \infty \text{ i } Z_{ul} = R_d = \infty.$$

Jako pojednostavljena analiza idealnog operacionog pojačavača se može sprovesti koristeći dva jednostavna pravila:

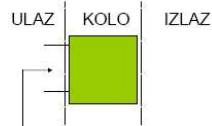
**Pravilo 1:** Kada operacioni pojačavač radi u linearnom režimu ulazni krajevi su na istom naponu, tj.  $v_d = 0$



**Pravilo 2:** U toku rada ulazna struja u pojačavač je  $I_{ul} = 0$ .



## ULAZNA IMPEDANSA

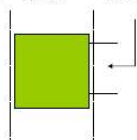


Impedansa merena između ulaznih terminala se definiše kao ulazna impedansa

ULAZNA IMPEDANSA TREBA DA BUDE ŠTO VEĆA DA BI STRUJA BILA ŠTO MANJA, I TAJ NAČIN MANJE REMETILA MERNU VELIČINU

## IZLAZNA IMPEDANSA

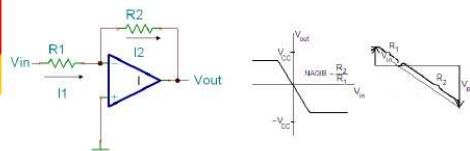
Ulaz Kolo Izlaz



Impedansa merena između izlaznih terminala se definiše kao izlazna impedansa

Izlazna impedansa treba da bude što je moguće manja da bi se energija maksimalno koristila za kola koja su povezana na izlazne terminale, a minimalno na rad samog uređaja

## POJAČAVAČKO KOLO ZA INVERTOVANJE



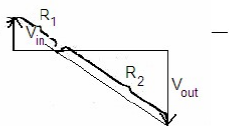
$$I_1 = I_2 = (V_m - V_c) / R_1 = - (V_{out} - V_c) / R_2$$

$$V_c = V_e = 0$$

$$V_{out} = (-R_2 / R_1) V_m$$



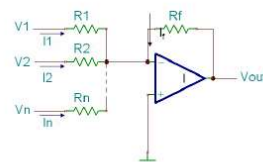
### KOLO ZA INVERTOVANJE



Naponska prenosna karakteristika invertora ima nagib određen odnosom otpornika u povratnoj sprezi i otpornika povezanog između ulaznog napona i invertovanog ulaza u pojačavač.

Van aktivnog režima idealni operacioni pojačavač radi kao prekidač, sa dva moguća izlazna naponska nivoa približno jednaka naponima  $\pm V_{CC}$ .

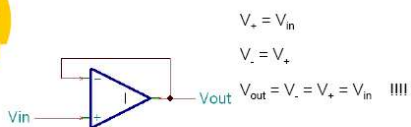
### POJAČAVAČ koji sabira



$$V_{OUT} = -R_f (V_1/R_1 + V_2/R_2 + \dots + V_n/R_n)$$

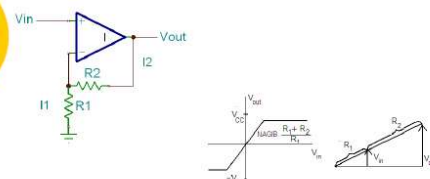
Ako je  $R_1=R_2=\dots=R_f$ , tada je  $V_{out} = -V_1 - V_2 - \dots - V_n$

### “VOLTAGE FOLLOWER”



Kolo za praćenje obezbeđuje da izlazni napon prati promene ulaznog napona u određenom opsegu. Osnovna primena kola za odvajanje pojačavačkog stepena od prethodnih elemenata ("buffer").

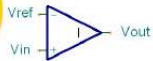
### “VOLTAGE FOLLOWER”



$$I_1 = V_1/R_1, I_1 = I_2 = (V_{out} - V_1)/R_2, V_{in} = V_1$$

$$V_{out} = (1 + R_2/R_1)V_{in}$$

## KOMPARATOR

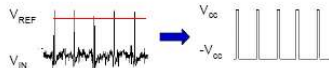


A (pojačanje je veliko)

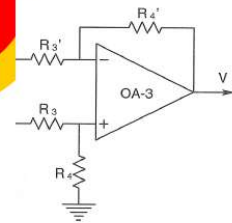
$$V_{out} = A(V_{in} - V_{ref})$$

Ako je  $V_{in} > V_{ref}$ , teorijski bi izlazni napon trebalo da bude  $V_{out} = +\infty$ , ali s obzirom da pojačavač ne može na svom izlazu da ima veći napon od napona napajanja dobijamo da je izlazni napon blizak naponu napajanja  $V_{out} = V_{cc}$

Ako je  $V_{in} < V_{ref}$ ,  $V_{out} = -V_{cc}$



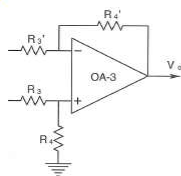
## DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ



Diferencijalni pojačavač treba da pojača razliku između dva signala, a da ne pojača tzv. zajednički signal koji postoji na diferencijalnim ulazima.

Diferencijalni pojačavač sa jednim operacionim pojačavačem.

Otpornici  $R_3$  i  $R_4$  moraju da budu "upareni" i treba da budu temperaturnski stabilni. Uobičajeno se koriste metal film otpornici sa tačnošću 0.5% ili 1%. Uparenost se odnosi na odnos  $R_3/R_4$  koji su povezani za neinvertovani tj. invertovani ulaz pojačavača.



$$v_5 = \frac{v_2 R_4}{R_3 + R_4}, \quad i = \frac{v_3 - v_5}{R_3} = \frac{v_3 - v_o}{R_4}$$

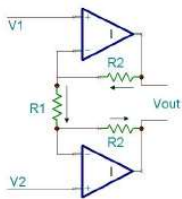
$$v_o = \frac{R_4}{R_3} (v_4 - v_3)$$

Ako ulazne tačke kratko spojimo ( $v_3 = v_4$ ), tada taj napon nazivamo zajednički napon  $v_5$  u odnosu na referentnu tačku, i označavamo sa CMV (*common mode voltage*).

Ako su ulazni naponi međusobno različiti,  $v_3 \neq v_4$ , tada je pojačanje razlike tih napona određeno odnosom otpora  $R_4/R_3$ . Ovaj odnos otpora se zove diferencijalno pojačanje, i označava sa DG (*differential gain*). Diferencijalni pojačavači pojačavaju i zajednički napon, a pojačanje zajedničkog napona CMV označavamo sa CMG (*common mode gain*). Definišemo faktor potiskivanja zajedničkog napona (CMRR - *common mode rejection ratio*) kao odnos pojačanja DG i CMG:

$$CMRR = \frac{DG}{CMG}, \quad CMRR[dB] = 20 \log CMRR$$

## INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ



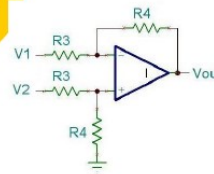
Dva operaciona pojačavača koja su povezana tako da svaki prati promene ulaznog napona (voltage follower)

$$I_1 = (V_1 - V_2)/R_1$$

$$I_2 = I_3 = I_1$$

$$V_{out} = (R_1 + 2R_2)(V_1 - V_2)/R_1 \\ = (V_1 - V_2)(1 + 2R_2/R_1)$$

## INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ



Diferencijalni pojačavač

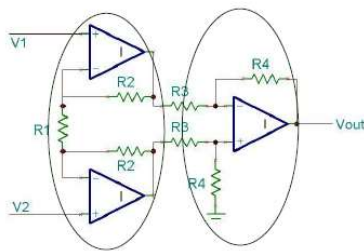
$$V_- = V_+ = V_2 R_4 / (R_3 + R_4)$$

$$(V_1 - V_-) / R_3 = (V_- - V_{out}) / R_4$$

Dobijamo da je

$$V_{out} = - (V_1 - V_2) R_4 / R_3$$

## INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ

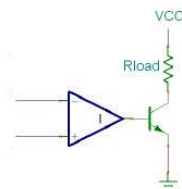


$$V_{OUT} = - (V_1 - V_2) (1 + 2R_2/R_1) (R_4/R_3)$$

Ukupno pojačanje je proizvod pojačanja prvog i drugog stepena

Primer primene OPAMP za upravljanje uređajem kod kojeg je potrebna veća snaga za pogon

(motor, zvučnik, i slično)



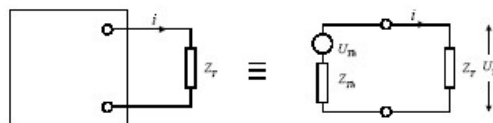
Mala izlazna struja je dovoljna da uključi tranzistor koji može ako je pravilno odabran da da struju koja je za nekoliko redova veličine veća od izlazne struje operacionog pojačavača

#### 4. OPTEREĆENJE, ŠUM I INTERFERENCIJA U MJERNIM SISTEMIMA

- Izlazni signal senzora najčešće je naponski ili strujni.
- Ulazne karakteristike elementa za predobradu moraju odgovarati izlaznim karakteristikama senzora, tj. element za predobradu signala ne smije uticati na karakteristike senzora, odnosno ne smije ga opterećivati.
- Za opis ponašanja napona i struje na spoju mjernog elementa i elementa za predobradu koriste se ekvivalentna električna kola za svaki od njih.

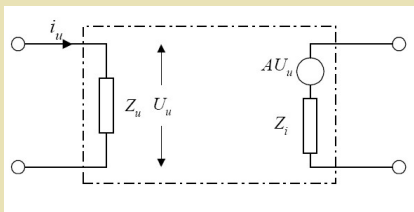
#### Teveninovo ekvivalentno kolo:

- Svaka električna mreža koja se sastoji od linearnih impedansi i naponskih izvora može se ekvivalentirati nadomjesnim električnim kolom sa jednim naponskim izvorom i impedansom spojenom u rednoj vezi sa njim.

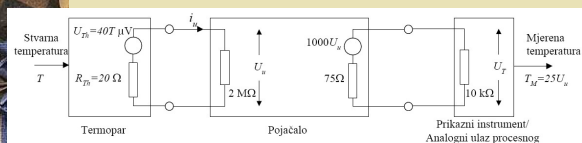


$$U_T = U_{Th} \frac{Z_T}{Z_{Th} + Z_T}; \quad Z_T \gg Z_{Th};$$

#### Teveninovo ekvivalentno kolo operacionog pojačavača



#### Ekvivalentna električna šema mjernog elementa temperature



- U ovom je primjeru pretpostavljeno da 1V napona  $U_T$  odgovara promjeni temperature od  $25^\circ\text{C}$ . Ovdje je:

$$U_u = 40 \cdot 10^{-6} T \frac{2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6 + 20}; \quad U_T = 1000U_u \frac{10^4}{10^4 + 75};$$

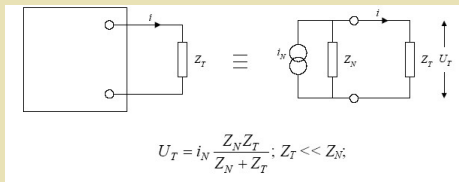
odakle slijedi:

$$T_M = \frac{2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6 + 20} \frac{10^4}{10^4 + 75} = 0.9925T.$$

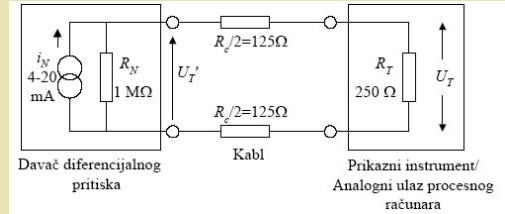
- Dakle, greška uslijed opterećenja iznosi  $-0.0075T$ .

### Nortonovo ekvivalentno kolo:

Svaka električna mreža koja se sastoji od linearnih impedansi i naponskih izvora može se ekvivalentirati električnim kolom s jednim strujnim izvorom i impedansom spojenom u paralelu s njim.

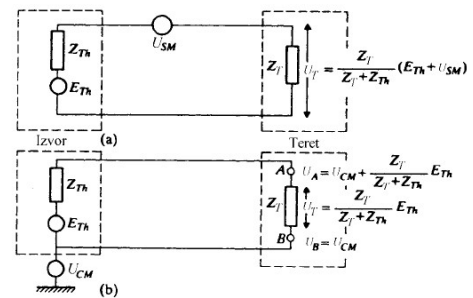


### Nortonovo ekvivalentno kolo za mjerni element diferencijalnog pritiska



- Prema slici je: 
$$U_T' = \frac{R_N(R_C + R_T)}{R_N + R_C + R_T} i_N,$$
- odnosno: 
$$U_T = \frac{R_N}{R_N + R_C + R_T} R_T i_N.$$
- Za navedene vrijednosti na slici dobije se:  $U_T = 0.995 R_T i_N;$
- Izlazni napon odstupa od željenog područja (1-5V) samo 0.05 %.

- U stvarnim realizacijama mjernih sistema osim Théveninovog naponskog izvora (ili Nortonovog strujnog izvora) obično se pojavljuju i
  - ♦ interferencijski napon (to je nepoželjni deterministički signal) i
  - ♦ napon šuma (to je nepoželjni slučajni signal).
- Na sljedećoj slici pod a) prikazana je tzv. serijska interferencija (engl. series mode interference) kod koje je interferencijski napon  $U_{SM}$  u serijskom spoju s mjernim naponskim signalom  $U_{Th}$ .
- Na slici b) prikazana je interferencija preko zajedničke tačke (engl. common mode interference) koja izaziva podizanje naponskog nivoa oba kola za interferencijski napon  $U_{CM}$  u odnosu na uzemljenje.



a) serijska interferencija; b) interferencija preko zajedničke tačke



#### 4.1 Izvori šuma

- Prema mjestu nastanka šum se u mjernim sistemima može podijeliti na unutrašnji šum (*engl. internal or inherent noise*) i na spoljašnji (interferencijski) šum.

Unutrašnji šum: • Pojavljuje se u većoj ili manjoj mjeri kod svakog mjernog senzora bez obzira kako kvalitetno je on izveden. Pitanje je procjene koliko taj šum utiče na tačnost mjerenja.

- Primjera radi, unutrašnji mjerni šum pojavljuje se kod otporničkih i poluprovodničkih senzora kao posledica stohastičkog kretanja elektrona zavisno od radne temperature.
- Ovaj se šum naziva toplotni ili Johnsonov šum i ima svojstva bijelog šuma.

- Efektivna vrijednost napona šuma u frekvijskom području mjernog elementa određena je izrazom:

$$U_{RMS} = \sqrt{4k R \Delta f \Theta}$$

gdje je:

k - Boltzmannova konstanta,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K;

R - otpor mjernog senzora, [ $\Omega$ ];

$\Delta f$  - frekvijsko područje mjernog elementa, [Hz];

$\Theta$  - radna temperatura. [K].

**Primjer:** Za  $R = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $\Delta f = 1 \text{ MHz}$ ,  $\Theta = 300 \text{ K}$  dobije se  $U_{RMS} = 0,13 \text{ mV}$ , što je napon uporediv s malim mjernim signalima kao što su signali na mjernim trakama

#### Spoljašnji (interferencijski) šum:

- To je šum koji u mjerni sistem dolazi izvana.
- Najčešće susretani vanjski izvor šuma je naizmjenična energetska mreža (220 V, 50 Hz), koja u mjerni sistem unosi odgovarajući sinusni interferencijski signal.
- Jednosmjerna energetska mreža sama po sebi ne unosi šum u mjerni sistem, ali uklapanje i isklapanje sklopki u statičkim energetskim pretvaračima može unijeti velike smetnje u mjerni sistem.
- Vanjski izvori šuma u mjernom sistemu mogu biti i radiofrekvijski prenosnici, aparati za zavarivanje i elektooručne peći koje unose napon šuma frkvencije nekoliko MHz.

#### 4.2 Načini djelovanja vanjskih izvora šuma na mjerne sisteme

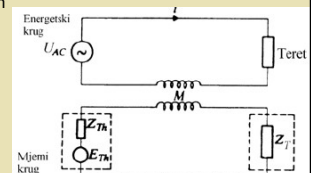
##### Induktivno djelovanje:

- Ako je mjerni krug u blizini naizmjeničnog energetskog električkog kola, može se pojaviti značajno međuinduktivno djelovanje između ta dva kola.

- Naizmjenična struja  $i$  u energetskom kolu indukuje u mjernom kolu serijski interferencijski napon

$$U_{SM} = M di/dt.$$

Primjer:



za  $M \approx 1 \mu\text{H}$  i  $di/dt \approx 103 \text{ A/s}$

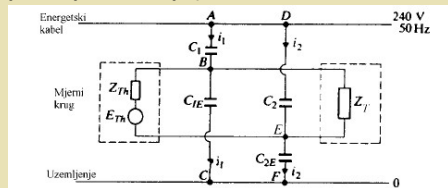
(tipično za motor snage 1 kW)

dobije se  $U_{SM} \approx 1 \text{ mV}$ .

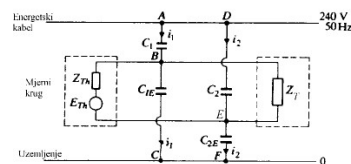
### Kapacitivno djelovanje:

- Kapacitivno (elektrostatičko) djelovanje pojavljuje se kada je mjerni krug u blizini energetskog voda.

Naime, između energetskog voda, uzemljivačkog voda i mjernog kruga može pojaviti kapacitivno djelovanje, kao što je prikazano na slici.



Ovi su kapaciteti raspodijeljeni po čitavoj dužini mjernog voda, ali se mogu ekvivalentirati odgovarajućim koncentrisanim kondenzatorima, kao što je prikazano na slici.



- Potencijali u tačkama B i E, zanemarujući za trenutak napon  $E_{Th}$ , iznose:

$$U_B = 240 \frac{C_1}{C_1 + C_{1E}}; \quad U_E = 240 \frac{C_2}{C_2 + C_{2E}}$$

- Kao posljedica kapacitivnog djelovanja pojavljuju se zajednički interferencijski napon  $U_{CM} = U_E$  i serijski interferencijski napon

$$U_{SM} = 240 \left( \frac{C_1}{C_1 + C_{1E}} - \frac{C_2}{C_2 + C_{2E}} \right)$$

### Višestruko uzemljenje:

- Pri objašnjavanju kapacitivnog djelovanja pretpostavljeno je da uzemljenje ima u svakoj tački potencijal 0 V.

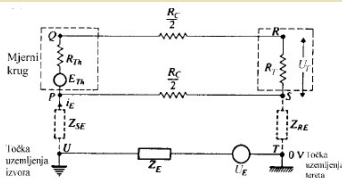
Međutim, energetski uređaji velikih snaga mogu prouzrokovati proticanje struje kroz uzemljenje što ima za posljedicu pojavu različitih potencijala u tačkama uzemljenja.

- Ako bi mjerni član bio potpuno odvojen od uzemljenja, ne bi bilo nikakvog djelovanja na njega.

U stvarnosti se može dogoditi da jedan član mjernog kruga ima konačan otpor prema jednoj tački uzemljenja a drugi prema nekoj drugoj, prostorno udaljenoj tački, koja je na različitom potencijalu od prve tačke.

Kao posljedica toga u mjernom se sistemu pojavljuju zajednički i serijski interferencijski naponi.

- Problem *višestrukog uzemljenja* ilustrovan je na sljedećoj slici:



- Na osnovi slike može se pisati:

$$i_E = \frac{U_E}{Z_E + Z_{SE} + (R_c / 2) + Z_{RE}};$$

$$U_{CM} = U_S = U_E \frac{Z_{RE}}{Z_E + Z_{SE} + (R_c / 2) + Z_{RE}};$$

$$U_{SM} = U_E \frac{R_c / 2}{Z_E + Z_{SE} + (R_c / 2) + Z_{RE}}$$

- U praksi se nastoji postići da su  $Z_{SE}$  i  $Z_{RE}$  što veći.

- To nije uvijek moguće ostvariti.

**Primjer:**

- Da se dobije što brži odziv jedan vrh termopara dodiruje oklop, koji je uronjen u metalnu posudu u kojoj se mjeri temperatura, a koja je uobičajeno uzemljena.
- Rezultat je mali otpor  $Z_{SE}$ , npr.  $Z_{SE} = 10 \Omega$ , Za  $R_E = 1 \Omega$ ,  $R_C/2 = 10 \Omega$ ,  $U_E = 1V$  i  $Z_{RE} = 106 \Omega$  dobije se  $U_{SM} \approx 10 \mu V$ .
- U slučaju da se tačka S spoji direktno na uzemljenje ( $Z_{RE} = 0 \Omega$ ) dobio bi se  $U_{SM} \approx 0.48 V$ .
- Dakle, ako se mjerni sistem mora uzemljiti, uzemljenje se smije izvesti samo na jednom kraju.

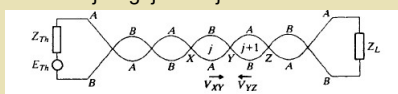
**4.3 Metode smanjenja djelovanja smetnji na mjerne sisteme**

**Fizičko udaljavanje:**

- Iznosi međuinuktiviteta i kapaciteta između energetske i mjernog kruga obrnuto su proporcionalni njihovoj udaljenosti, treba pri njihovom izvođenju nastojati postići što je moguće veću udaljenost.

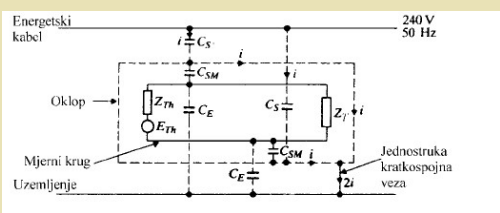
**Uplitanje mjernih vodova:**

- Najjednostavniji način smanjenja induktivnog interferencijskog djelovanja.

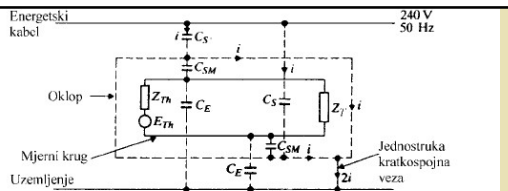


Dva provodnika A i B mjernog kruga međusobno se upletu tako da sve petlje imaju približno jednake površine.

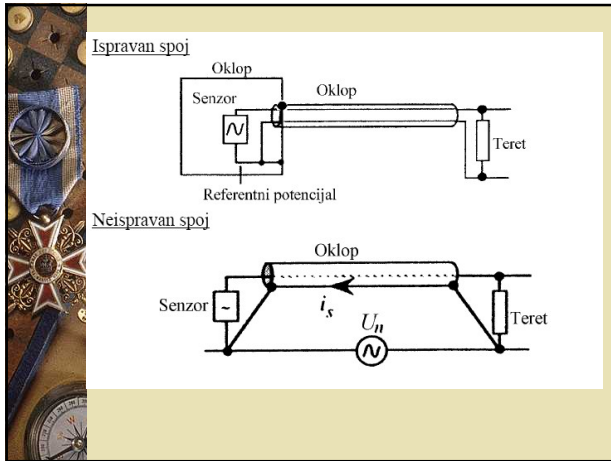
**Postavljanje plašta oko mjernih vodova**



- Oklapanjem mjernih vodova smanjuje se kapacitivno interferencijsko djelovanje na mjerni sistem.
- Metalni oklop (plašt) mora se uzemljiti, ali samo u jednoj tački, kako je prikazano na slici.
- Kao što se može vidjeti, nema direktnog spoja između mjernog kruga i oklopa; postoji samo visookomska kapacitivna veza preko kapaciteta  $C_{SM}$ .



- Oklop predstavlja niskoomski otpor za interferencijsku struju  $i$ , pa su struje kroz kapacitete  $C_{SM}$  i  $C_E$  male, što ima za posljedicu smanjenje zajedničkog interferencijskog napona  $U_{CM}$ , a serijski interferencijski napon jednak je nuli.
- U stvarnosti je mjerni senzor obično smješten u oklopljeno kućište, a za prenos signala koristi se oklopljeni (šimovani) kabl.
- Oklop kabla mora biti spojen na kućište senzora, ali ne smije biti spojen na drugom kraju.



- Ostale metode za smanjenje smetnji:**
- ◆ Korištenje diferencijalnih pojačala;
  - ◆ Filtriranje mjernih signala;
  - ◆ Usrednjavanje signala;
  - ◆ Korištenje medijan funkcije;
  - ◆ Modulacija;

- Binarno (off-on) mjerenje položaja**
- Binarni senzor (*binary sensor, Geber, "Initiator"*):
- ◆ Mikroprekidač (*micro-switch, Endschalter*)
    - +niska cijena, -trošenje, vibracije
  - ◆ Optički senzor (*optical sensor, Lichtschränke*)
    - +pouzdan, -osjetljiv na prašinu ili tečnosti
  - ◆ Magnetski senzor (*magnetic sensor, Näherungsschalter*)
    - +neosejtljiv na prašinu, -magnetska polja
  - ◆ Kapacitivni senzor ( *capacitance proximity sensor*)
    - +neosejtljiv na prašinu i magnetska polja,
    - +reaguje i na nemetalne predmete
  - ◆ Ultrazvučni senzor( *Ultrasonic sensor, Ultraschall Fuehler*)
    - +neosejtljiv na prašinu i laka zaprljanja
    - +reaguje na sve materijale,
    - +može detektovati i kroz sloj fluida
  - ◆ Pneumatska brana (pneumatic gate)
    - +neosejtljiv na povišenu temperaturu, magnetska i električna polja i snažnu radijaciju

- Analogno mjerenje položaja**
- Analogni senzor (*analogue sensor, Aufnehmer*):
- ◆ Potencijometar(*potentiometer, Schiebewiderstaende*)
    - +niska cijena,
    - -trošenje, vibracije, osjetljivost na zaprljanje, slaba linearnost
  - ◆ Optički senzor (*optical sensor, Lichtaufnehmer*)
    - +pouzdan, -osjetljiv na prašinu ili tekućine
  - ◆ Magnetski o senzor(*magnetic sensor, Näherungsfuehler*)
    - +neosejtljiv na prašinu, -magnetska polja
  - ◆ Kapacitivni senzor ( *capacitance proximity sensor*)
    - +neosejtljiv na prašinu i magnetska polja, +reagira i na nemetalne predmete
  - ◆ Balansirani transformator (LVDT)
    - +pouzdan, robustan, -uglavnom za male pomake
  - ◆ Grayov, inkrementalni i apsolutni koder položaja (Gray, incremental or absolute encoder)
    - +tačnost i linearnost, -komplicirana obrada signala, konačna razlučljivost
  - ◆ Tenzometarske trake (Strain gages, Dehnungsmessstreifen)
    - +pouzdana, -za vrlo male pomake
  - ◆ Piezo-električni (Piezoelectric)
    - -Za ekstremno male pomake, reda mikrona, -visoki unutrašnji otpor