



Mladim ljudima bih preporučio –
stalno se usavršavajte u struci i
prije ili kasnije vaše će vam znanje
omogućiti da ga i primijenite.

Pri tome – čuvajte svoj integritet i
radite samo ono što vam vaša
savjest dozvoljava.



SENZORI I MJERNI PRETVARAČI





- ♦ Mjerne informacije imaju veliki značaj u naučnim i tehničkim disciplinama jer sadrže kvantitativne vrijednosti pomoću kojih se procjenjuju stanja objekta istraživanja.
- ♦ Moderna mjerenja baziraju se uglavnom na pretvaranju fizičkih veličina u električni signal.
- ♦ Pojačanje i obrada električnog signala, daljinski prenos i očitavanje rezultata su usavršeni, a uz to se postiže visok metrološki kvalitet u pogledu tačnosti, osjetljivosti i pouzdanosti mjerenja.
- ♦ Pretvaranje mehaničkih, hemijskih, biloških i procesnih veličina u električni signal vrši se pomoću različitih davača, pretvarača, transdjusera, transmitera i dr.
- ♦ U novije vreme za ove uređaje ustalio se termin senzor, što je koincidiralo sa razvojem materijala i tehnologija, primjenom mikromehanike i visokog stepena integracije komponenata, te velikim mogućnostima u obradi informacija pomoću sredstava mikroelektronike.



MJERENJE I AUTOMATSKO UPRAVLJANJE

- ♦ Merenje u automatskom upravljanju ima prvorazredni značaj, jer se za dobijanje neophodnih informacija o procesima koji se odvijaju u upravljanoj objektu koriste razni mjerni uređaji.
- ♦ Sve veća primjena računara i strožija ekonomska i tehnološka ograničenja koja se postavljaju na upravljani proces predstavljaju aktuelne izazove za konstrukciju savremenijih i tačnijih sredstava za merenje fizičkih veličina relevantnih za upravljanje.

Kad možete izmjeriti ono o čemu govorite i izraziti to numerički vi tada znate nešto o tome. Kad to o čemu govorite ne možete izmjeriti, ne možete to predstaviti numerički, vaše znanje o tome je oskudno i nepotuno, to je početak znanja, vi ste se tek u mislima primakli naučnom saznanju. Prema tome, ako nauka jeste mjerenje tada bez metrologije nema nauke.

William Thomson (Lord Kelvin) 1886g.

OBJEKAT UPRAVLJANJA	TEMPERATURA	PROTOK	NIVO	PRITISAK	PARAMETRI MATERIJALA	OSTALE VELIČINE	CENA INFORMACIJE U % CENE SAU
ELEKTRANE	46,3	12,9	5,7	24,2	5,0	5,9	33
HEMIJSKA POSTROJENJA	41,0	13,6	12,6	20,3	2,9	9,6	39
GRADSKJE TOPLANE	69,0	2,0	2,7	8,8	2,8	14,7	9
POLJOPRIVR. OBJEKTI	16,7	10,5	16,2	3,2	5,5	47,9	38
KOMADNA PROIZVODNJA	9,0	4,0	4,0	4,0	6,0	63,0	10

Tabela 7.1. Mjerenje tipičnih veličina u pojedinim oblastima upravljanja



- ♦ Mjerni uređaji u upravljanju primjenjuju se na tri funkcionalno različita načina.
- ♦ **Prvi način** podrazumijeva primjenu specifičnih instrumenata za merenje fizičkih veličina s ciljem utvrđivanja njihovih vrijednosti u standardnim jedinicama. Ovaj način, zapravo, određuje uobičajenu primjenu mjernih uređaja uopšte.
- ♦ U upravljanju, ovaj način primjenjuje se u kontroli kvaliteta sirovina, proizvodnje i kontroli gotovih proizvoda.



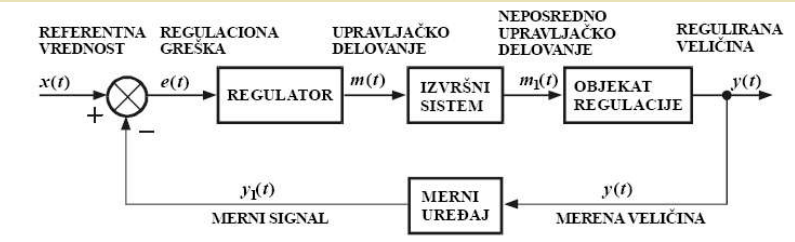
- ♦ **Drugi način** je primjena mernih uređaja u funkciji nadgledanja (monitoringa). Instrumenti sa takvom funkcijom daju informaciju koja čovjeku-operatoru omogućava da preduzme odgovarajuću upravljačku akciju.



- ♦ Na primjer, u tehnološkom postrojenju razvoj hemijske reakcije indicira se mjerenjem temperature i pritiska u više tačaka, što omogućava operatoru da preduzme adekvatnu upravljačku akciju: promjenu napona napajanja na električnom grijaču, promjenu dotoka vode za hlađenje, promjenu pozicije regulacionog ventila, ili neku drugu akciju.



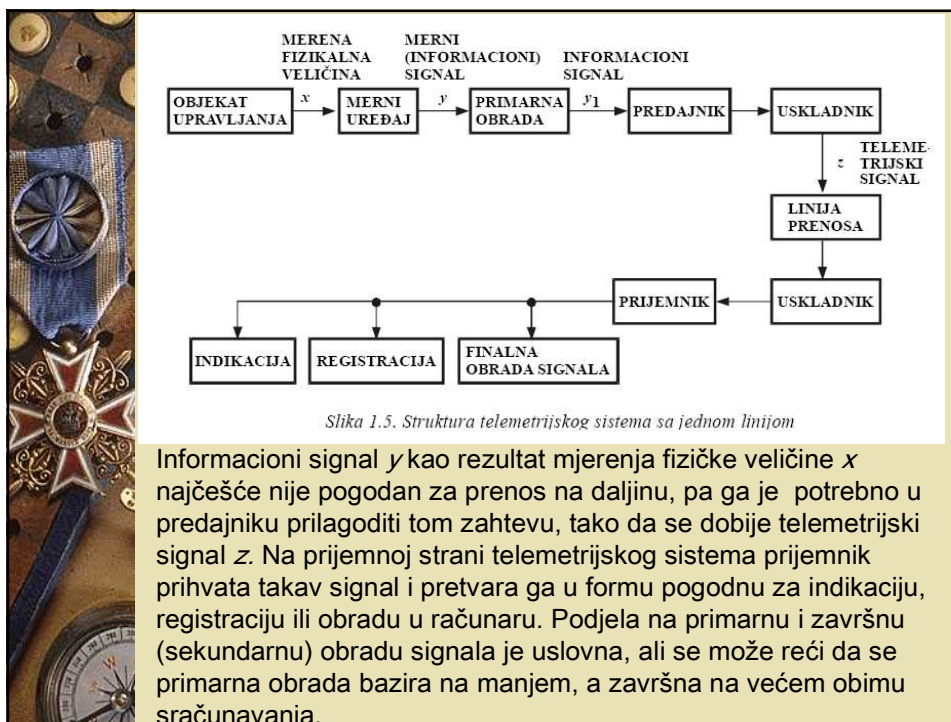
Treći način odnosi se na primjenu mjernih uređaja koji su sastavni deo sistema automatskog upravljanja. Struktura sistema automatskog upravljanja može biti različita.



- ♦ Na slici je prikazana je strukturna blok-šema jednokonturnog regulacionog kola sa negativnom povratnom spregom. Ovakav sistem automatske regulacije održava željeno kretanje regulisanog objekta, odnosno stabilizuje regulisanu veličinu $y(t)$ u skladu sa zadatom (referentnom) vrijednošću $x(t)$. Mjerni uređaj mjeri trenutnu vrijednost regulisane veličine $y(t)$, a rezultat u formi mjernog signala $y_1(t)$ dolazi na komparator, gde se poredi sa referentnom vrednošću. Rezultat komparacije je regulaciona greška $e(t)=x(t)-y_1(t)$. U zavisnosti od veličine greške, regulator na izlazu generiše manipulativni signal $m(t)$, koji deluje na objekat kako bi se ostvarila jednakost $y(t)=x(t)$. Pošto je izlazni sigal $m(t)$ iz regulatora male snage, potreban je izvršni sistem. Zahvaljujući velikom energetsom pojačanju, izvršni sistem na svom izlazu daje signal $m_1(t)$ za neposrednu promjenu toka energije ili materijala na objektu u smislu da $e(t) \rightarrow 0$.

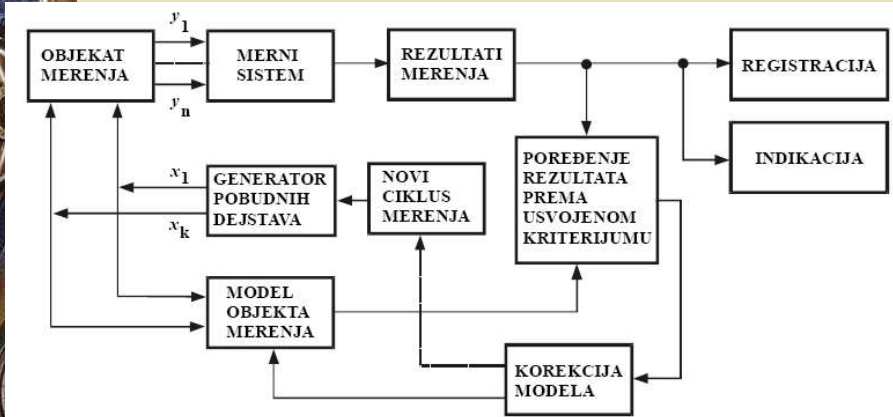
Telemetrijski sistemi

- ♦ Digitalna obrada informacija nalazi sve veću primjenu u raznim oblastima nauke i tehnike, a naročito u informaciono-mjernoj tehnici. Razlog je, u prvom redu, u brzini djelovanja digitalnih mjernih uređaja, koji se grade na bazi integralnih kola velikog ili srednjeg stepena integracije. Zahvaljujući tome oni imaju čitav niz prednosti u odnosu na analogne mjerne uređaje kada su u pitanju funkcionalnost, efikasnost, ekonomičnost, tačnost i pouzdanost. Primjena digitalnih mjernih uređaja u upravljanju prostorno razuđenim objektima ima dodatne prednosti koje su u vezi sa prenosom informacija na veća rastojanja. Po svojim funkcijama telemetrijski sistem (slika 1.5) identičan je lokalnom mjernom sistemu u funkciji monitoringa. Strukturne razlike uslovljene su potrebom prenosa informacija od objekta mjerenja (upravljanja) do udaljenog mjesta, gde se te informacije obrađuju (komandni centar).





- ♦ Mjerenje u tehnici upravljanja uključuje i sistem za obradu signala i informacija. U tom smislu aktuelni problemi mjerenja koji sadrže i informacijski aspekt privlače veliku pažnju naučne i stručne javnosti. Zahvaljujući primjeni računara u upravljanju složenim objektima, razvijaju se automatizovani informacijski sistemi, koji realizuju mjerenje stanja objekta, te obradu i registraciju mjernih informacija.
- ♦ Jedna od varijanti organizacije kompleksnih mjerenja prikazana je na slici



PITANJA

1. Kako se mjerni uređaji primjenjuju u procesu upravljanja?
2. U čemu se ogleda značaj mjernih uređaja u sistemima automatske regulacije sa negativnom povratnom spregom?
3. Objasnite strukturu jednokanalnog telemetrijskog sistema.

Pojmovi

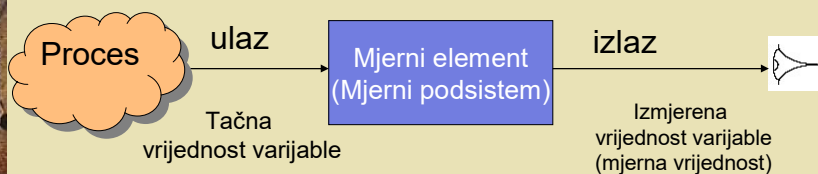
Pretvarači (*Transducers, Umformer*) => Pretvaraju jednu formu energije u drugu
Osjetnici (*sensors, Messgeber*) => Pretvaraju neku fizičku veličinu u električnu
Pokretački el. (*Actuators Stellglieder*) => Koristeći neku od formi energije obavljaju rad

binarni i analogni instrumenti se tretiraju odvojeno.

Industrijski uslovi

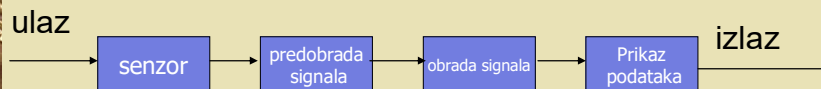
- temperaturni opseg komercijalni: (0°C do +70°C)
 industrijski (-40°C..+85°C)
 prošireni industrijski(-40°C..+125°C)
 vojni (-55°C..+125°C)
- mehanička otpornost (udar i vibracije) EN 60068
- zaštićeni protiv Elektro-Magnetskih (EM)-smetnji EN 55022, EN55024)
- ponekad zaštićeni od NEMP (Nuclear EM Pulse)
- zaštićeni od vode (IP67=potpuno zatvoreni, IP20 = normalni)
- laka montaža i zamjena
- robustni konektori
- napajani DC-strujom (24V= baterijsko napajanje, ponekad 48V=)

Senzori i mjerni elementi



Struktura mjernog elementa (mjernog podsistema)

Mjerni element sastoji se od tipično 4 elementa





1.Senzor

- izlaz ovog elementa, koji je u kontaktu sa procesom, zavisi od fizičke veličine koja se mjeri.

Primjeri:

Termopar; napon termopara (mV) zavisi od temperature;

Kod uređaja za mjerenje napreznja otpor senzora zavisi od mehaničkog napreznja.

2. Elementi za predobradu-kondicioniranje signala

izlaz iz senzora pretvara u oblik pogodan za dalju obradu (obično jednosmjerni napon, struju ili frekvenciju)

Primjeri:

- mostni spoj koji pretvara promjenu impedanse u naponsku promjenu,
- pojačalo koje pojačava mV u V
- oscilator koji pretvara promjenu impedanse u napon promjenljive frekvencije

3. Element za obradu signala

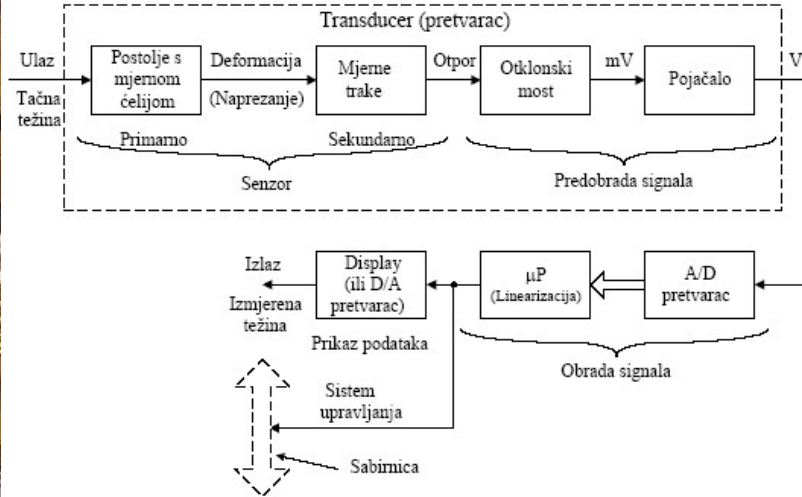
izlaz iz elementa za predobradu pretvara u oblik pogodan za prikaz ili dalje korišćenje

Primjeri:

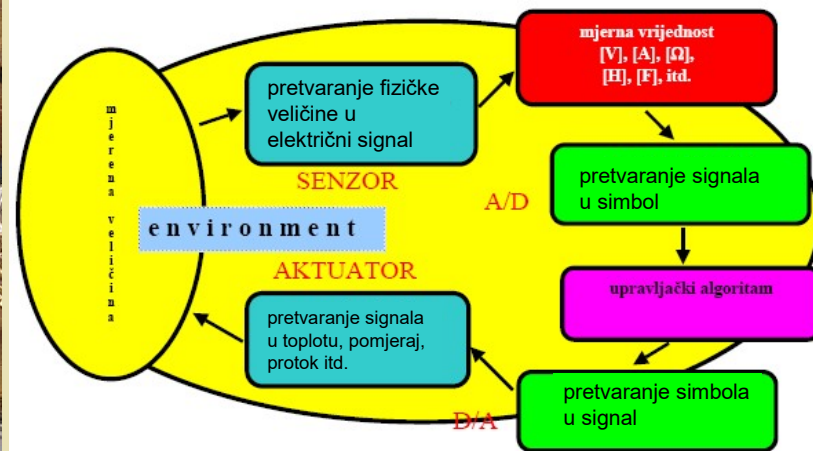
- A/D pretvarači za pretvaranje napona u digitalni oblik za ulaz u računar
- mikroprocesor koji izračunava mjerenu vrijednost na bazi ulaznih digitalnih podataka (npr. za računanje ukupne mase gasa na bazi protoka i gustine, korekcija nelinearnih senzora)



Podsistem za mjerenje težine



Uloga senzora u sistemima upravljanja





Podjela senzora

U literaturi se mogu naći razne podjele senzora, od vrlo jednostavnih do složenih. Najčešće se dijele po:

- mjernoj veličini
- specifikacijama karakteristika
- načinu detekcije
- tipu pretvaranja
- materijalu izrade
- području primjene



Tablica 1. *Klasifikacija senzora po mjernoj veličini.*

Mjerne veličine		Mjerne veličine	
Akustičke	Amplituda, faza i brzina vala, spektar	Optičke	Amplituda, faza i brzina vala, indeks refrakcije, emisija, refleksija
Biološke	Tip i koncentracija biomase	Mehaničke	Pozicija (linearna i kutna), ubrzanje, sila, naprezanje, tlak, masa, gustoća, moment tromosti, moment, brzina protoka, protok, čvrstoća, oblik, viskoznost
Kemijske	Koncentracije komponenata	Radijacijske	Tip, energija, intenzitet zračenja
Električne	Naboj, struja, potencijal, napon, amplituda i faza električkog polja, vodljivost i dr.	Toplinske	Temperatura, toplinski tok, specifična toplina, toplinska vodljivost
Magnetske	Amplituda i faza magnetskog polja, vodljivost i dr.		



Tablica 2. *Klasifikacija senzora po specifikacijama karakteristika.*

Karakteristika	
Osjetljivost	Mjerno područje
Stabilnost (kratkoročna i dugoročna)	Rezolucija
Točnost	Selektivnost
Brzina odziva	Okolišni uvjeti
Opterećenje	Linearnost
Histereza	Zona neosjetljivosti
Životni vijek	Preciznost
Cijena, veličina, težina	itd.



Tablica 3. *Klasifikacija senzora po načinu detekcije.*

Način detekcije	
Biološki	Toplina, temperatura
Kemijski	Mehanički pomak ili val
Električni, magnetski ili elektromagnetski val	Radioaktivnost, zračenje



Tablica 4. *Klasifikacija senzora po tipu pretvorbe.*

Tip pretvorbe			
Fizikalni	Termoelektrički	Kemijski	Kemijska pretvorba
	Fotoelektrički		Fizikalna pretvorba
	Fotomagnetski		Elektrokemijska pretvorba
	Magnetoelektrički		Spektroskopija
	Elektromagnetski		
	Termoelastični	Biološki	Biokemijska pretvorba
	Elektroelastični		Fizikalna pretvorba
	Termomagnetski		Pojave na ispitnim organizmima
	Termooptički		Spektroskopija
	Fotoelastični		



Tablica 5. *Klasifikacija senzora po materijalu izradbe.*

Materijal izradbe senzora	
Neorganski	Organski
Vodič	Izolator
Poluvodič	Tekući plin
Biološki supstrat	Plasma itd.



Tablica 6: *Klasifikacija senzora po području primjene.*

Područje primjene	
Poljoprivreda	Automobili
Graditeljstvo	Kućanstvo
Elektroenergetika	Meteorologija, ekologija
Medicina	Zaštita i sigurnost
Proizvodnja	Informatika, telekomunikacije
Vojska	Pomorstvo
Znanstvena istraživanja	Rekreacija, igračke
Transport (isključeni automobili)	Svemirska istraživanja



Primjer: AKCELEROMETAR

mjerna veličina: ubrzanje (akceleracija)

specifikacija k-ka: osjetljivost, tačnost, preciznost, linearnost

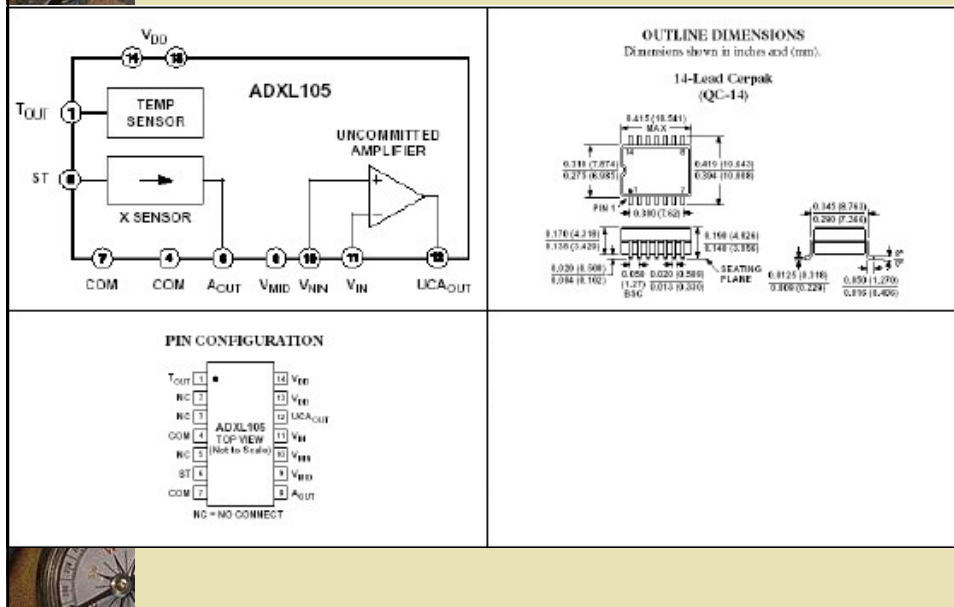
način detekcije: mehanički (pomjeraj)

tip pretvaranja: elastoelektrični

materijal izrada: neorganski izolator

područje primjene: automobili, brodovi, svemirski brodovi, naučna mjerenja

Primjer mikrosenzora: Mikroakcelerometar Analog Devices ADXL105



Konstrukcija i proizvodnja senzora

Konstrukcija i proizvodnja senzora se moraju spregnuto posmatrati. U proizvodnji senzora važnu ulogu imaju materijali:

- poluprovodnički materijali (na bazi Si tehnologije)
- metalni materijali (gdje ne mogu zadovoljiti poluprovodnički materijali, npr. zbog temperaturnog područja platina za precizna mjerenja temperature, bakar – berilijum za kvalitetne opruge)
- optička vlakna

U novije vrijeme se intezivno razvija područje mikromehanike Mikrosenzori i

MikroElektroMehaničkiSistemi (MEMS)



Opšti model mjernog elementa

Cilj automatskog upravljanja je da se održava kretanje upravljanog procesa unutar specificiranih granica, bez obzira na uticaje koji remete odvijanje procesa.

Informacije o promjenama upravljane veličine koje daje senzor, transdjuser ili mjerni pretvarač moraju da budu tačne, jer je jedino na osnovu takvih informacija moguće donositi odluke šta i kako raditi da bi cilj upravljanja bio dostignut. Zato se na rad informacionih sredstava postavljaju strogi zahtjevi, izraženi kroz tehničke karakteristike uređaja. Mnogobrojne karakteristike i njihovi pokazatelji koji postoje u praksi predstavljaju samo pojedine aspekte opšteg zahtjeva da izlaz iz senzora treba da je linearno proporcionalan promjenama regulisane veličine.



Opšti model mjernog elementa

Karakteristike mjernog elementa:

- statičke
- dinamičke
- statističke

Statičke i dinamičke karakteristike se mogu egzaktno kvantifikovati matematički ili grafički.

Statičke karakteristike

1.Mjerno područje (Range):

ulazno područje se specificira s minimalnom i maksimalnom vrijednošću mjerene veličine $I: I_{min} i I_{max}$

izlazno područje specificira se s minimalnom i maksimalnom vrijednošću izlazne veličine $O: O_{min} i O_{max}$



Primjer: termopar može imati ulazno područje 100-250°C, a izlazno 4-10 mV.

2. OPSEG (Span): maksimalna promjena na ulazu ili izlazu, tj.:

ulazni opseg $I_{\max} - I_{\min}$ ($20 \log (I_{\max} / I_{\min})$)

izlazni opseg $O_{\max} - O_{\min}$

za gornji primjer $I_{\max} - I_{\min} = 150^{\circ}\text{C}$

$O_{\max} - O_{\min} = 6 \text{ mV}$

Linearna statička karakteristika

$O_{\text{ideal}} = K \cdot I + a$

$$K = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad a = O_{\min} - K I_{\min}$$

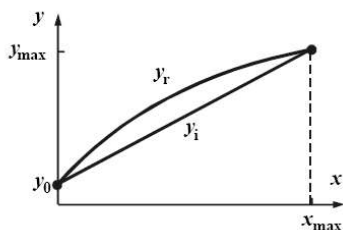


- ♦ **3. Linearnost.** To je podudarnost realne karakteristike y_r i idealne statičke karakteristike y_i .
- ♦ U zavisnosti od toga kojim inerpolicionim postupkom je određen idealni pravac, razlikuju se: nezavisna, nulta i terminalna linearnost.
- ♦ Najčešće se primenjuje terminalna linearnost, koja se računa kao:

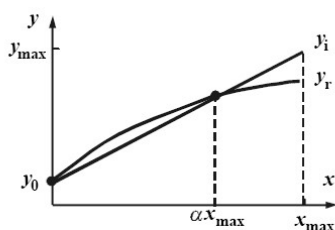
$$L = \frac{|y_r - y_i|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} 100\% ,$$

- ♦ gde je u brojiocu maksimalna razlika između stvarne i idealne statičke karakteristike.
- ♦ Linearnost, zapravo, pokazuje koliko je stvarna statička karakteristika nelinearna.

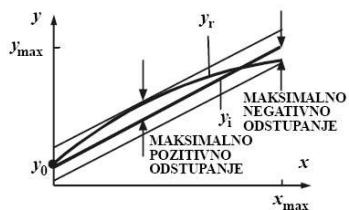
Metode interpolacije



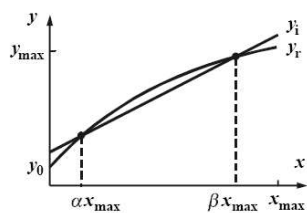
Idealni pravac interpolira se kroz krajnje (terminalne) tačke realne karakteristike. Ovakva interpolacija je jednostavna, ali je odstupanje terminalnog pravca y_i od realne krive y_r veliko.



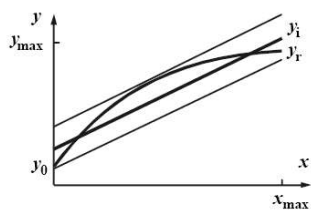
Idealni pravac prolazi kroz fiksiranu početnu tačku $x=0$ i tačku αx_{\max} , pri čemu je $0 < \alpha < 1$. Razlika između y_i i y_r manja je nego u prethodnom slučaju.



Idealni pravac prolazi kroz početnu tačku $x=0$ tako da su maksimalno pozitivno i maksimalno negativno odstupanje y_i od y_r po apsolutnoj vrednosti jednaki. Ovaj način može se tretirati kao poseban slučaj prethodnog.

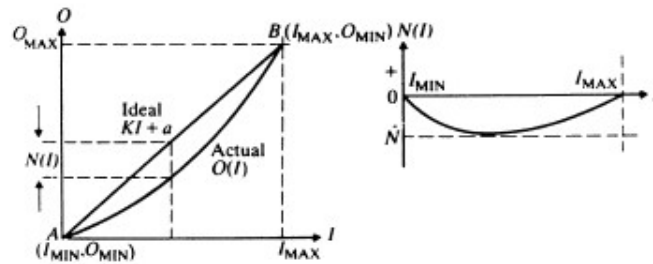


Idealni pravac prolazi kroz tačke αx_{\max} i βx_{\max} , pri čemu su $0 < \alpha, \beta < 1$ i $\alpha \neq \beta$, tako da odstupanje y_i od y_r bude što manje. Nedostatak ovog načina interpolacije je što tačka y_0 nije fiksirana.



Idealni pravac interpolira se tako da su pozitivna i negativna odstupanja y_i od y_r na celom opsegu po apsolutnoj vrednosti jednaka. Ovo je najbolji, ali za praktično merenje i najteži način interpolacije. Može se izvesti kao specijalni slučaj prethodnog načina.

Linearnost



$$O(I) = KI + a + N(I) \quad (*)$$

$$\hat{N} \hat{=} \text{maksimalna nelinearnost} \quad \hat{N}[\%] = \frac{\hat{N}}{O_{\text{MAX}} - O_{\text{MIN}}} \cdot 100$$

U mnogim se slučajevima $O(I)$ (a prema tome i $N(I)$) može izraziti u obliku polinoma (polinomski interpolacija, npr. termopar $E(T)$):

$$O(I) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + \dots + a_m I^m = \sum_{q=0}^{q=m} a_q I^q$$

4. Osjetljivost je odnos promjene *izlaza* (O) s obzirom na promjenu *ulaza* (I). Osjetljivost senzora određuje se za datu vrijednost mjerene veličine nakon dostignutog stacionarnog stanja kao odnos priraštaja izlazne veličine i priraštaja mjerene veličine:

$$\frac{dO}{dI} = K + \frac{dN}{dI}$$

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (**)$$

S obzirom da je statička karakteristika senzora linearna, osjetljivost je konstantna na cijelom opsegu, pa se može predstaviti kao odnos mjernog opsega na izlazu i mjernog opsega na ulazu. Osjetljivost je, kao što se vidi iz jednačine (**), jednaka nagibu statičke karakteristike. Na primjer, ako pritisak od 5 bar daje na izlazu iz senzora 10 mA, tada je osjetljivost 2 mA/bar .



5. Tačnost karakteriše sposobnost senzora da u referentnim radnim uslovima daje pokazivanja bliska stvarnoj vrijednosti mjerene veličine. Tačnost u potpunosti odražava svojstva senzora u pogledu grešaka mjerenja.

- ♦ Tačnost se izražava u odnosu na neku specificiranu vrijednost, najčešće u odnosu na mjerni opseg senzora. Ako je za senzor pritiska sa opsegom 0 – 10 bar deklarirana tačnost $\pm 1\%$, to znači da je maksimalna greška prilikom mjerenja bilo koje veličine unutar opsega 0, 1 bar . Takva greška, međutim, za mjerenu vrijednost od 1 bar iznosi 10% te vrijednosti. Zbog toga je važno da se opseg senzora odabere adekvatno očekivanim promjenama mjerene veličine, kako bi se što više očuvala tačnost senzora. Prema tome, ako se očekuje promjena pritiska 0 – 1 bar , tada nije uputno upotrebiti senzor sa opsegom 0 – 10 bar .



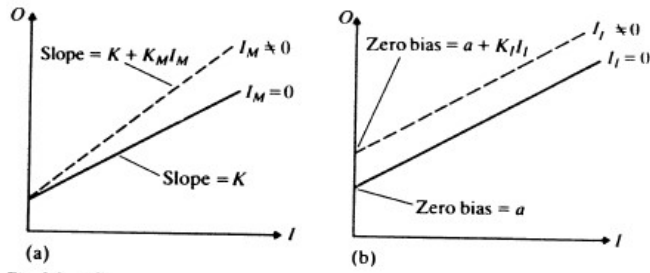
6. Ambijentalni uticaji

Izlaz O u opštem slučaju ne zavisi samo od ulaznog signala nego i od uticaja ambijenta (okoline), kao što su: atmosferski pritisak, relativna vlažnost, napon napajanja, temperatura okoline i dr.

Ako jednačina (*) vazi za standardne uslove neće važiti za izmijenjene uslove. Potrebno je izvršiti njenu modifikaciju kako bi se te promjene uzele u obzir.



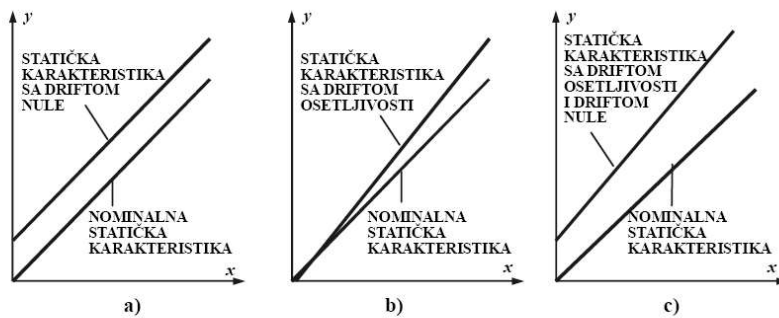
Postoje dva osnovna tipa ambijentalnog uticaja
 modifikovani ulaz I_M prouzrokuje linearnu promjenu osjetljivosti elemenata
 interferirajući ulaz I_i – nestabilnost očitavanja izlaza za nultu vrijednost ulaza



a) efekt modifikirajućeg ulaza b) efekt interferirajućeg ulaza

$$KI \rightarrow (K + K_M I_M)I$$

$$O = KI + a + N(I) \xrightarrow{a \rightarrow (a + K_i I_i)} O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_i I_i$$



Slika 8.3. Nestabilnost statičke karakteristike: a) drift nule, b) drift osjetljivosti, c) kombinovani drift

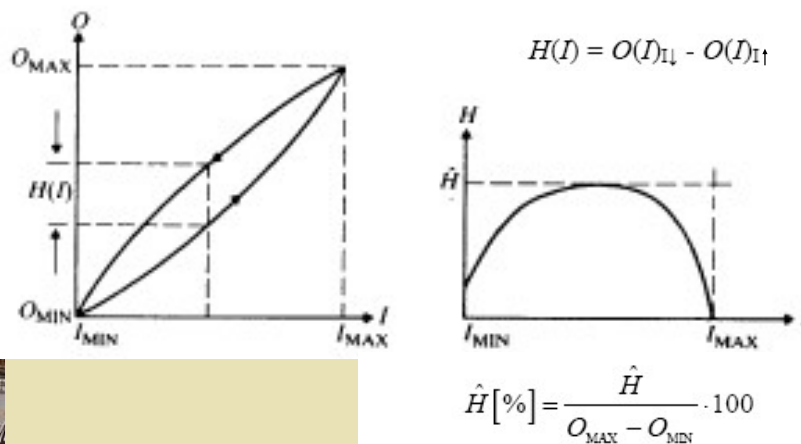




- ♦ **Osjetljivost na poremećaje** određuje uticaj vanjskih delovanja, prije svega temperature, na statičku karakteristiku senzora. Ovi uticaji najčešće se izražavaju kao drift nule i drift osjetljivosti.
- ♦ Drift je promjena (nestabilnost) statičke karakteristike i, uopšte, metroloških parametara senzora koji se nalazi u uobičajenim uslovima upotrebe, u toku dužeg vremenskog perioda. Obično se izražava u procentima opsega.
- ♦ Drift nule opisuje promjene (nestabilnosti) očitavanja izlaza za nultu vrijednost ulaznog signala koje nastaju delovanjem vanjskih faktora. Drift nule obično se izražava u jedinicama mjerene veličine po jedinici temperature, s obzirom da je temperatura dominantan vanjski uticaj. Efekt drifta nule odražava se na pomicanje statičke karakteristike duž ordinate (slika 8.3a).
- ♦ Drift osjetljivosti određuje vrijednost sa kojom se osjetljivost senzora mijenja u zavisnosti od vanjskih uticaja. Efekat drifta osjetljivosti odražava se kao promjena nagiba statičke karakteristike (slika 8.3b). Temperaturni drift osjetljivosti izražava se kao odnos jedinica izlaza i jedinica ulaza na temperaturnom intervalu 1 °C.
- ♦ Drift nule i drift osjetljivosti mogu delovati istovremeno, pa u tom slučaju statička karakteristika izgleda kao na slici 8.3c.

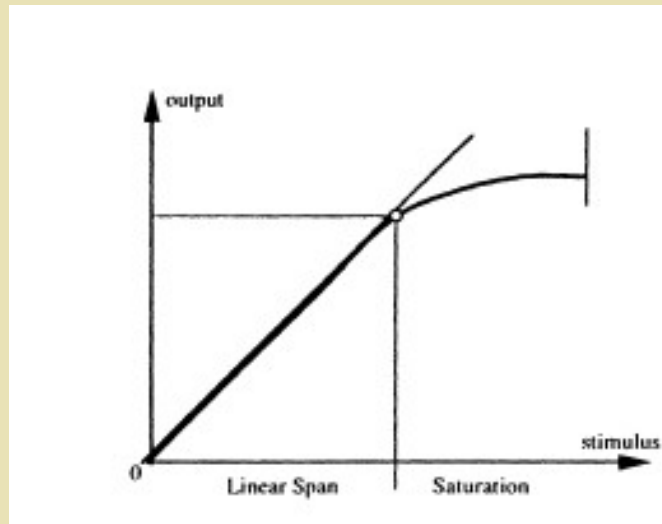
Histerezis

za datu vrijednost ulaza (I) izlaz (O) može biti različit zavisno da li ulaz (I) raste ili opada. Histerezis je razlika između te dvije vrijednosti



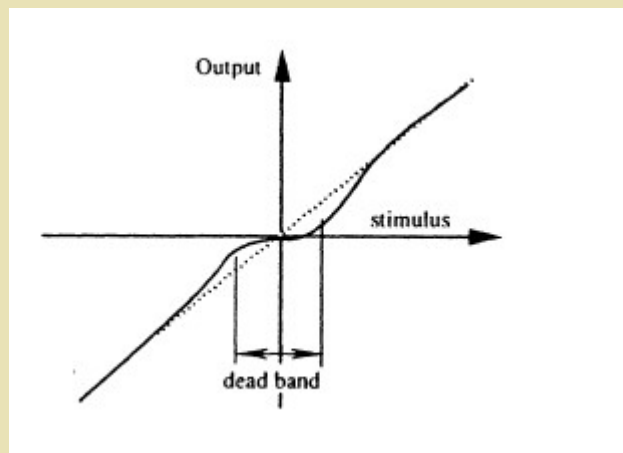


Zasićenje – nelinearnost na kraju opsega

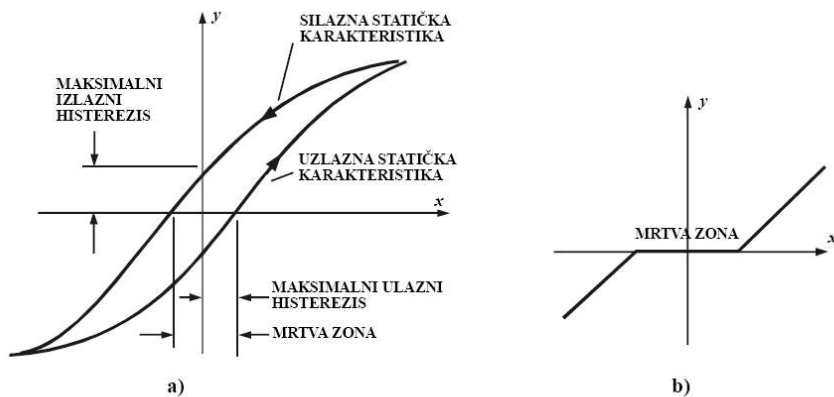


Zona neosjetljivosti –mrtva zona (Dead-Band)

Neosjetljivost senzora u specificiranom opsegu ulaznog signala



Mrtva zona je područje između dvije vrijednosti ulazne veličine kada nema nikakve promjene ulazne veličine (slika 8.4b). Histerezis je uvijek praćen mrtvom zonom, ali se mrtva zona pojavljuje i kao zaseban efekat.

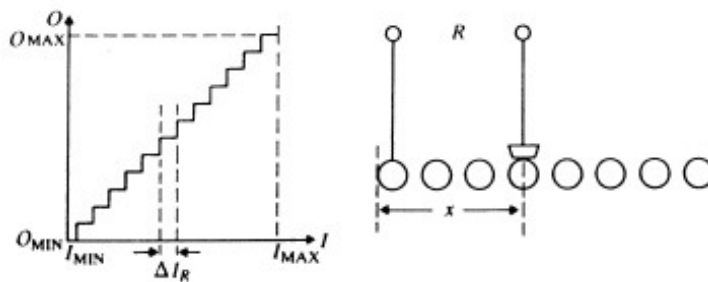


Slika 8.4. Nelinearni efekti: a) histerezis, b) mrtva zona

Rezolucija

izlaz se mijenja skokovito pri kontinualnoj promjeni ulaza

najveća promjena I koja ne izaziva promjenu O



$$R[\%] = \frac{\Delta I_R}{O_{MAX} - O_{MIN}} \cdot 100$$

žičani potencijometar , A/D konverzija



Habanje i staranje

Ovi efekti uzrokuju promjenu karakteristika lagano i sistematski tokom životnog vijeka elementa

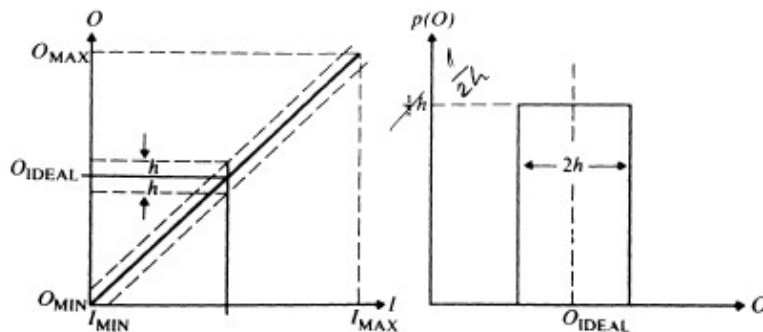
PR.: promjena konstante krutosti opruge, promjena konstanti u termoparu (zbog hemijskih promjena u metalu termopara).



Mjerna greška i tačnost

Mjerna greška – razlika između izmjerene vrijednosti O i stvarne vrijednosti O_{ideal} mjerene veličine

Kako je stvarna vrijednost mjerene veličine nepoznata definišu se granice mjerne greške h .





Definisane granice greške obuhvataju efekte nelinearnosti, histerezisa i rezolucije u mnogim savremenim sensorima i pretvaračima, koji su pojedinačno mali.

Proizvođač deklarira da za bilo koju promjenu vrijednosti I , izlaz O biti unutar intervala $\pm h$ oko idealne vrijednosti O_{ideal} mjerene veličine, tj. idealne statičke karakteristike mjernog elementa.

Ovaj se iskaz može zamijeniti statističkim izrazom pomoću funkcije gustine vjerovatnoće $p(O)$. Raspodjela funkcije gustine raspodjele je pravougaona u ovom slučaju

$$p(O) = \begin{cases} \frac{1}{2h} & \text{za } O_{ideal} - h \leq O \leq O_{ideal} + h \\ 0 & \text{za } O > O_{ideal} + h \\ 0 & \text{za } O < O_{ideal} - h \end{cases}$$



Granicama mjerne greške označava se **tačnost senzora** (*sensor accuracy*)

Kod modernih senzora se umjesto tačnosti često definiše **mjerna nesigurnost** (*measurement uncertainty*).

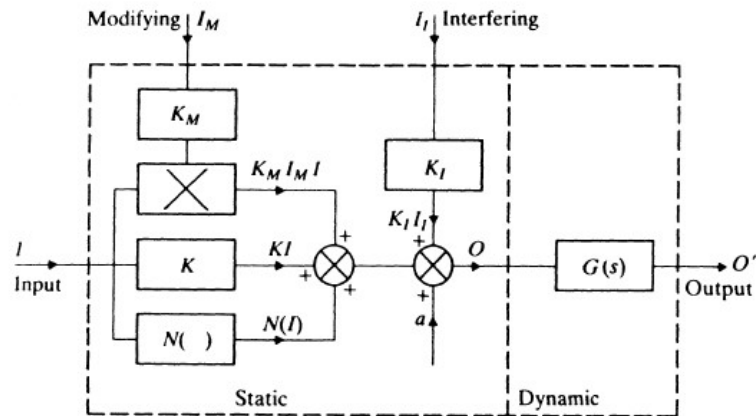
Dok tačnost definiše odstupanje od idealne statičke karakteristike, mjerna nesigurnost obuhvata sve sistemske i slučajne greške.

Uopšteni model mjernog elementa

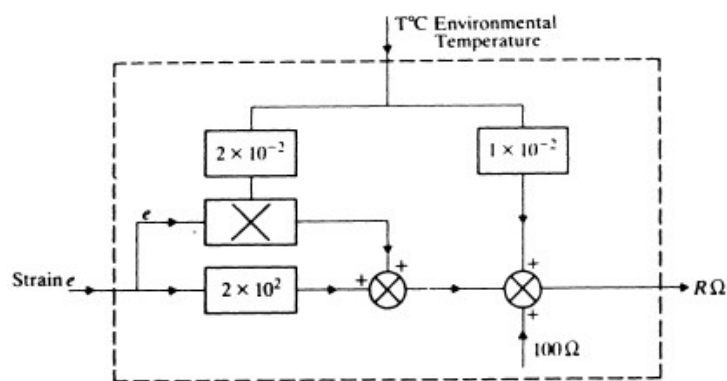
Ako efekti histerezisa i rezolucije nijesu prisutni u elementu, ali su prisutni ambijentalni efekti i drugi efekti nelinearnosti, izlaz O u stacionarnom stanju može se opisati pomoću

$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M + K_I I_I$$

$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I$$



Uređaj za mjerenje naprezanja – zanemaren nelinearni efekt i dinamika



Neopterećen mjerni član ima otpor 100Ω .

Koeficijent mjerenja je $2 \cdot 10^2$, temperatura okoline utiče i na naprezanje i na otpor mjerenja



Dinamičke karakteristike

Kada je mjerni element dio sistema upravljanja najčešće ga nije dovoljno opisati njegovom statičkom karakteristikom, već je neophodno uzeti i njegove dinamičke karakteristike.

Vrijeme od priključenja na napajanje do trenutka spremnosti mjernog elementa za rad sa deklariranim karakteristikama naziva se **vrijeme zagrijavanja** (warm-up time)

Frekvencijski odziv (Frequency response) pokazuje brzinu odziva mjernog elementa na promjenu mjerene veličine. Izražava se u jedinicama Hz ili rad/sec.

- zero-order instrument

$$a_0 q_o = b_0 q_i$$

- instrument prvog reda

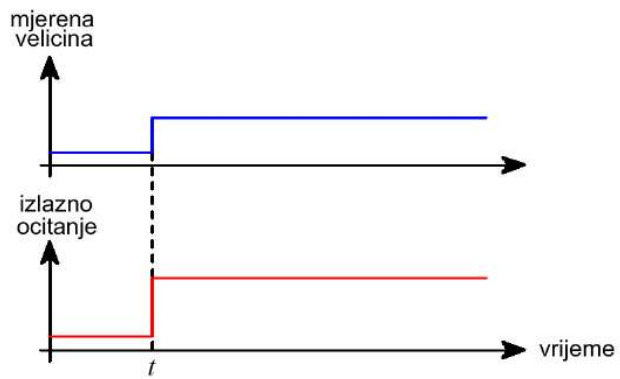
$$a_0 q_o + a_1 \frac{d}{dt} q_o = b_0 q_i$$

- instrument drugog reda

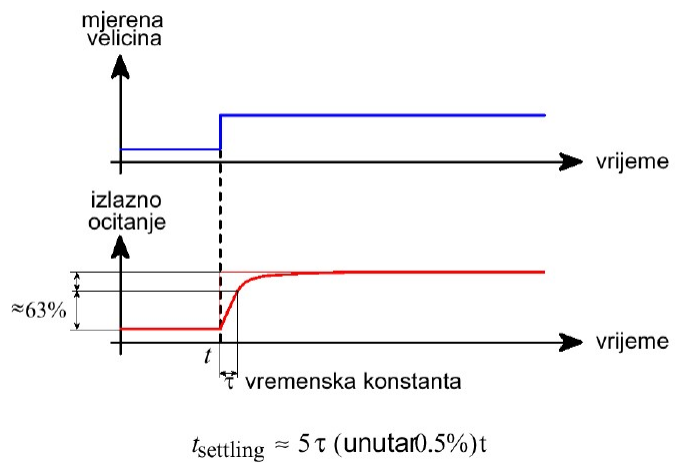
$$a_0 q_o + a_1 \frac{d}{dt} q_o + a_2 \frac{d^2}{dt^2} q_o = b_0 q_i$$



odziv instrumenta nultog reda

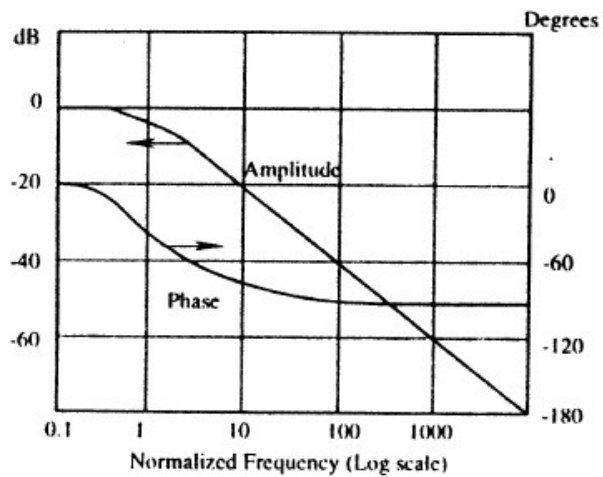
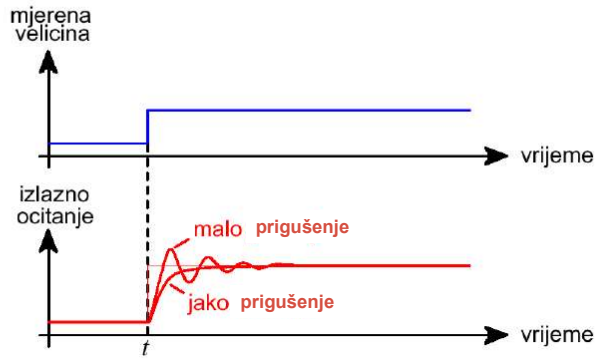


odziv instrumenta prvog reda





odziv instrumenta drugog reda

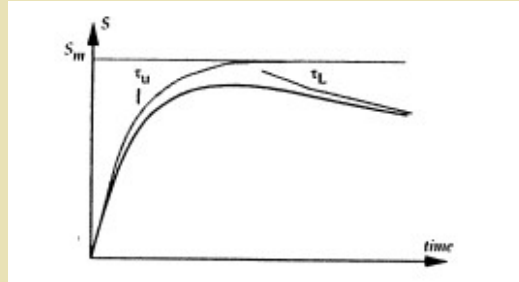


Gornja granična frekvencija (upper cutoff frequency) definisana je kao frekvencija na kojoj normirana amplitudna frekvencijska karakteristika mjernog elementa poprimi vrijednost -3 dB.



Prelazna karakteristika

Pokazuje brzinu odziva mjernog elementa, kao i frekventijska karakteristika, ali u vremenskom području. Obično je zadato vrijeme porasta, tj. vrijeme za koje izlaz poprimi 90% (100%) stacionarne vrijednosti.



Za mjerne elemente s prenosnom funkcijom prvog reda zadaje se vremenska konstanta τ

$$S = S_m (1 - e^{-t/\tau})$$

za $t = \tau$ $S = 0.63 S_m$



Veza između granične frekvencije i vremenske konstante mjernog člana:

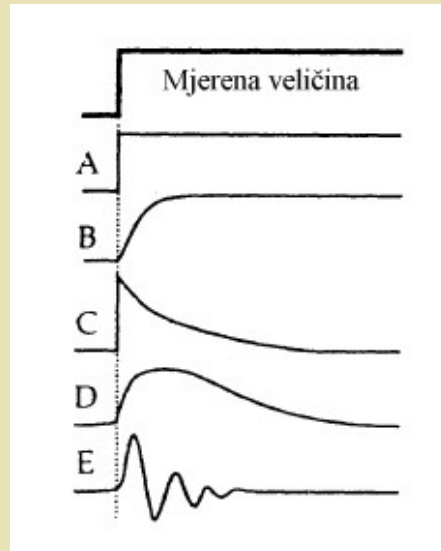
$$f_c \approx \frac{0.159}{\tau}$$

Donja granična frekvencija (Lower cutoff frequency) f_L : Najniža frekvencija promjene mjerene veličine koju mjerni član može procesirati. Senzori za koje nije $f_L = 0$ mogu se opisati prelaznom karakteristikom:

$$S = S_m (1 - e^{-t/\tau_1}) e^{-t/\tau_2} \rightarrow \text{Ovi senzori ne mogu postići stacionarno stanje.}$$



Tipični odzivi senzora na odskočnu promjenu mjerene veličine:



Fazna karakteristika

Pokazuje kašnjenje izlaza mjernog elementa za stvarnom vrijednošću u stepenima ili u radijanima.

Rezonantna frekvencija

Pojavljuje se kod mjernih elemenata s prenosnom funkcijom drugog (ili višeg) reda.

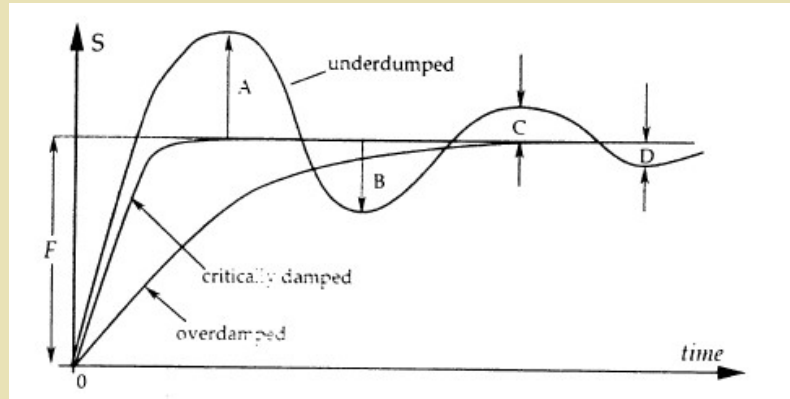
Radna frekvencija senzora mora biti ograničena; ispod 60% rezonantne frekvencije.

Nekim je sensorima rezonantna frekvencija radna frekvencija. Npr. senzor za detekciju loma u staklu.



Prigušenje (Damping)

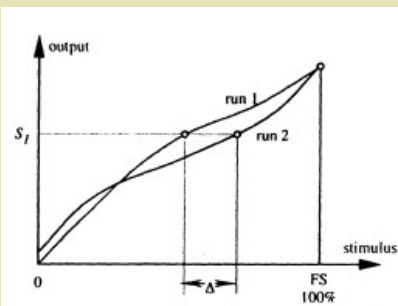
Progresivno prigušenje oscilacija kod senzora prijenosne funkcije drugog ili višeg reda.



Statističke karakteristike

Ponovljivost mjerenja – preciznost senzora

Statističke promjene na izlazu mjernoga člana (elementa) s vremenom – ponovljivost (repeatability).

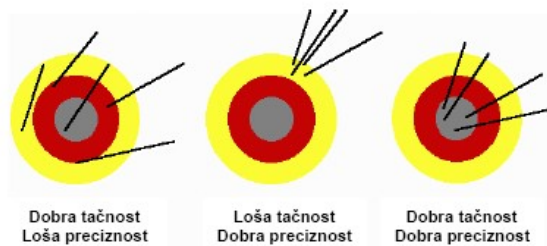


- Uz konstantni ulaz mjernoga člana izlaz s vremenom varira. Nije ostvarena ponovljivost.
- Greška ponovljivosti definiše se kao:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} 100\%$$



- Izostanak ponovljivosti uzrokovan je slučajnim efektima u mjernom članu (npr. toplotni šum, plastičnost materijala) i u okolini mjernoga člana.
- Ako ambijentalni ulazi I_M i I_I slučajno variraju, tada će slučajno varirati i izlaz O (temperatura, vlažnost; napon napajanja).
- Ponovljivošću mjerenja definiše se **preciznost senzora**. Važno je uočiti razliku između tačnosti i preciznosti, koja je ilustrovana na sljedećoj slici:



- Najvjerojatnija funkcija gustine vjerojatnoće za I , I_M , I_I je normalna (Gaussova) funkcija raspodjele:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

gdje je:

\bar{x} - očekivana vrijednost (centar raspodjele)

σ - standardno rasipanje (devijacija)

- Iz prethodnih je izlaganja uočljivo da je O funkcija od I , I_M , I_I . Za male promjene O oko srednje vrijednosti \bar{O} , uslovljenene promjenama ΔI , ΔI_M , ΔI_I oko odgovarajućih srednjih vrijednosti \bar{I} , \bar{I}_M i \bar{I}_I slijedi:

$$\Delta O = \left(\frac{\partial O}{\partial I}\right)\Delta I + \left(\frac{\partial O}{\partial I_M}\right)\Delta I_M + \left(\frac{\partial O}{\partial I_I}\right)\Delta I_I, \quad (\text{A-1})$$

tj. ΔO je linearna kombinacija varijabli ΔI , ΔI_M i ΔI_I .





- Pokazuje se, ako je zavisna varijabla (funkcija) y linearna kombinacija nezavisnih varijabli x_1, x_2 i x_3 , tj.:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

i ako x_1, x_2 i x_3 podliježu Gaussovoj raspodjeli sa standardnim rasipanjima σ_1, σ_2 i σ_3 , tada je vjerojatnost raspodjele od y također Gaussova raspodjela sa standardnim rasipanjem:

$$\sigma = \sqrt{a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2 + a_3^2\sigma_3^2} \quad (\text{A-2})$$

- Iz izraza (A-1) i (A-2) dobije se da je standardno rasipanje od $\Delta O = (O - \bar{O})$:

$$\sigma_o = \sqrt{\left(\frac{\partial O}{\partial I}\right)^2 \sigma_i^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_m}\right)^2 \sigma_{i_m}^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_l}\right)^2 \sigma_{i_l}^2}$$

Dakle, σ_o se može odrediti ako je poznato σ_i, σ_{i_m} i σ_{i_l} .

σ_o se može odrediti i eksperimentalno pomoću testa umjeravanja, tj:

$$p(O) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_o} e^{-\frac{(O-\bar{O})^2}{2\sigma_o^2}}$$

gdje je $\bar{O} = K\bar{I} + a + N(\bar{I}) + K_m\bar{I}_m + K_l\bar{I}_l$ - očekivana vrijednost izlaza.

Mjerna nesigurnost

- Kako je već rečeno, mjerna je vrijednost samo aproksimacija stvarne vrijednosti mjerene veličine, bez obzira kolika je tačnost mjerenja.
- Dakle, rezultat mjerenja može se smatrati cjelovitim tek ako mu je pridružena vrijednost mjerne nesigurnosti.
- Prema propisima međunarodnog komiteta CIPM (Committee for Weights and Measures), mjernoj nesigurnosti doprinose mnogobrojni činioci, ali se mogu grupisati u dva skupa:

- A: činioci koji se procjenjuju statističkim metodama;
- B: činioci koji se procjenjuju drugim metodama.



- Granica između ove dvije grupe nije potpuno jasna. Uopšteno, komponente A mjerne nesigurnosti proizlaze iz slučajnih efekata, a komponente B mjerne nesigurnosti iz sistemskih efekata.
- Nesigurnost tipa A specificira se standardnom devijacijom σ . Za i -tu komponentu mjerne nesigurnosti tipa A mjerna nesigurnost $u_i = \sigma_i$.
- Procjena nesigurnosti tipa B obično se zasniva na naučnim procjenama na temelju svih dostupnih relevantnih informacija, npr. na temelju:
 - ♦ prošlih mjernih vrijednosti,
 - ♦ iskustva s odgovarajućim senzorom ili opšteg poznavanja svojstava i ponašnja senzora, materijala, instrumentacije;
 - ♦ specifikacija proizvođača,
 - ♦ podataka dobijenim umjeravanjem senzora te
 - ♦ nesigurnosti pridruženih referentnim podacima iz priručnika.



- Kada se načini procjena oba tipa nesigurnosti, one se trebaju združiti u **kombinovanu standardnu nesigurnost** (engl. combined standard uncertainty), što se čini prema tzv. zakonu propagacije nesigurnosti (engl. law of propagation of uncertainty):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_i^2 + \dots + u_n^2}$$

gdje je n broj komponenata mjerne nesigurnosti.



Primjer: Mjerna nesigurnost elektronskog termometra s termistorom:

Izvor mjerne nesigurnosti	Standardna nesigurnost °C	Tip
Umjeravanje senzora	0.03	B
Mjerne greške		
Ponovljivost mjerenja	0.02	A
Mjerni šum senzora	0.01	A
Šum pojačala	0.005	A
Starenje senzora	0.025	B
Toplotni gubici kroz spojne žice	0.01	A
Dinamičkagreška zbog tromosti senzora	0.005	B
Temperaturna nestabilnost objekta mjerenja	0.04	A
Prenosni šum	0.01	A
Odstupanje od linearne statičke karakteristike	0.02	B
Ambijentalni uticaji		
Napon napajanja	0.01	A
Otpornici u mosnom spoju	0.01	A
Dielektrični gubici u kondenzatoru A/D pretvornik	0.00	B
Digitalna rezolucija	0.01	A
Kombinovana standardna nesigurnost	0.068	

2. Senzori

- Senzor je prvi element (od četiri elementa) u mjernom podsistemu.
- Senzor je u kontaktu s procesom i uzima energiju iz
 - ◆ procesa ili
 - ◆ mjernoga podsistema.
- Na ulazu senzora je tačna (prava) vrijednost, izlaz iz senzora zavisi od te ulazne vrijednosti.
- Postoji široki spektar senzora baziranih na raznim fizickim (i hemijskim) načelima.
- Postoji i raznolikost u klasifikaciji senzora, npr. klasifikacija prema izlaznom signalu senzora :
 - ◆ električni izlaz;
 - ◆ mehanički izlaz.



- Sensori s električnim izlaznim signalom:

- ◆ pasivni;
- ◆ aktivni.

- Pasivni senzori zahtijevaju spoljašnji napon napajanja da bi se dobio izlazni električki signal (napon ili struja).

Primjeri:

- ◆ otpornički senzori;
- ◆ kapacitivna senzori;
- ◆ induktivna senzori.

- Aktivni senzori ne zahtijevaju spoljašnji napon napajanja.

Primjeri:

- ◆ elektromagnetski senzori;
- ◆ termoelektrični senzori.



- Sensori s mehaničkim izlazom obično se koriste kao primarni element; a sekundarni senzorski element, koji slijedi, ima izlazni električni signal (npr. mjerenje naprezanja).

- Zavisno od primjene, senzori mogu biti konstrukcijski i proizvodno izvedeni na različite načine.

- Sensori se moraju kalibrisati (umjeravati) i u određenim primjenama povremeno kalibrisati.

- Isto tako, zavisno o primjeni, razlikuju se klase senzora (za industrijsku tehniku, npr. procesnu tehniku ili proizvodnu tehniku, senzori za precizne primjene, senzori u uređajima široke primjene).



Sklopovi za obradu koji se koriste za senzore Postoji načelno 5 grupa sklopova koji se koriste za senzore:

1. mjerni sklopovi (spojevi) bez pojačavača;
2. linearna mjerna pojačala;
3. analogna računarska pojačala (funkcijska pojačala);
4. A/D pretvarači;
5. mikroracunari.

1. mjerni sklopovi (spojevi) bez pojačavača

Spojevi za pretvaranje promjene otpora, induktiviteta ili kapaciteta u naponski signal (mosni spojevi).



2. linearni mjerni pojačavači i
3. analogni računarski pojačavači (funkcijski pojačavači):

Pojačavaju male naponske signale u napone ili struje većega iznosa.

4. A/D pretvarači

A/D pretvarači koji rade na različitim principima; izbor A/D pretvarača s obzirom na rezoluciju i brzinu pretvaranja zavisi od tačnosti senzora i o njegovim dinamičkim karakteristikama.

5. mikroracunari procesori (mikrokontroleri), a u složenijim primjenama DSP.



- U procesnoj industriji još uvijek dominiraju sklopovi za obradu koji signal senzora pretvaraju u strujni signal 4-20 mA.

Ovi se sklopovi nazivaju mjerni pretvarači.

- U budućnosti će se značajnije koristiti senzori s integrisanom obradom signala:

- ◆ inteligentni senzor (smart sensors ili integrated intelligent sensors)

svojstva:

- obavlja logičke funkcije;
- komunicira s jednim uređajem ili s više uređaja (npr. direktnim spojem na sabirnici);
- donosi odluke korišćenjem (npr. na temelju fuzzy logike).

Umjeravanje senzora

Cilj: Isključiti uticaj rasipanja uslovljenih proizvodnjom (postići ponovljivost).



Zahtjevi za izbor senzora

Najvažniji se zahtjevi odnose na sljedeća svojstva (karakteristike):

- ◆ statičke karakteristike (prije objašnjeno);
- ◆ uticaji okoline, npr. temperaturni elektromagnetski uticaji (prije objašnjeno);
- ◆ dinamičke karakteristike (prije objašnjeno);
- ◆ pouzdanost i ekonomičnost.

Oblici signala senzora

Oblici signala senzora zavise od principa rada na kojem je senzor zasnovan, kao i o zahtjevima za obradu tih signala:

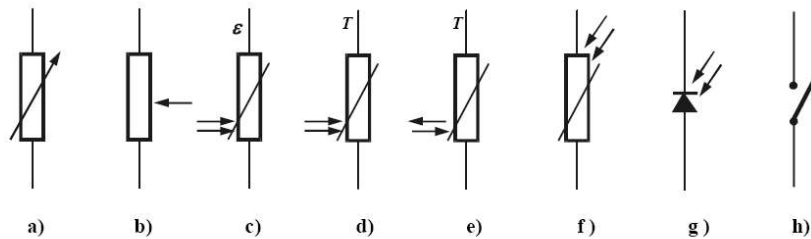
- ◆ amplitudno analogni (analogni);
- ◆ frekvencijsko analogni (frekvencijski) → primjena u porastu;
- ◆ digitalni.



Fizički principi

Otpornički senzori

- ◆ Promjena električnog otpora u zavisnosti od djelovanja mehaničke sile, temperature ili zračenja odavno se primenjuje u tehnici senzora. Kod poluprovodnika je uočeno da na površini dolazi do razmjene elektrona sa atomima i molekulima iz okoline – tako su nastali hemirezistori, otpornici osjetljivi na koncentraciju kiseonika, vodonika, metana i drugih gasova. Kada se takav otpornik prekrije slojem biološkog materijala koji omogućava pretvaranje koncentracije tečnog sadržaja u koncentraciju gasa, dobija se biosenzor. Agregatno stanje senzorskog otpornika može biti čvrsto, tečno ili gasovito.



Slika 9.1. Oznake otporničkih senzora: a) opšta oznaka, b) potencijometrijski senzor pomaka, c) senzor mehaničkog naprezanja, d) termootpornik sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom, e) termootpornik sa negativnim temperaturnim koeficijentom, f) fotootpornik, g) fotodioda, h) kontakti senzor



Otpornički senzori od čvrstih materijala primjenjuju se za mjerenje veličina koje su u vezi sa djelovanjem mehaničke sile ili temperature. Prave se od metala ili poluprovodnika. Otpor metalnih senzora računa se na osnovu poznate formule:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$



- ◆ Djelovanje mehaničke sile odražava se na otpornički senzor od metala kao promjena njegovih geometrijskih parametara – dužine l i presjeka S . Osjetljivost na promjenu dužine l je konstantna:

$$\frac{\Delta R}{\Delta l} = \frac{\rho}{S}$$

- ◆ a osjetljivost na linearnu promjenu poprečnog presjeka je nelinearna

$$\frac{\Delta R}{\Delta S} = -\rho \frac{l}{S^2}$$

- ◆ Osnovno svojstvo svih čvrstih otpornika je da im otpor u manjoj ili većoj mjeri zavisi od temperature. Na toj osnovi grade se temperaturni senzori, koji su vrlo rasprostranjeni i cijenjeni u tehničkoj praksi. Zavisnost otpora od temperature je nepoželjan efekat kada je u pitanju mjerenje mehaničkih veličina. U opštem slučaju promjena otpora u zavisnosti od temperature je eksponencijalna:

$$R = Ae^{\alpha T}$$



- ◆ Razvojem u Tajlorov red, prethodna eksponencijalna jednačina transformiše se u polinom n -tog stepena

$$R_t = R_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots \right]$$

gde su: R_0 otpor na referentnoj temperaturi T_0 , R_t otpor na aktuelnoj temperaturi T , a α , β itd. odgovarajući temperaturni koeficijenti otpora.

Analiza polinoma pokazuje da je temperaturna osjetljivost $\Delta R/\Delta T$ otporničkih senzora nelinearna. Za metale je ova osjetljivost pozitivna, a za poluprovodnike negativna ili pozitivna. Za tehničku praksu posebno su interesantni metali i poluprovodnici koji u određenim temperaturnim dijapazonima imaju konstantnu osjetljivost. To su termootpori koji služe kao osnov za gradnju senzora temperature.



- ♦ Kod poluprovodničkih otpornika intenzitet osvetljenosti ima uticaj na promjenu otpora. Naime, unutrašnji otpor R_u većine poluprovodnika linearno se smanjuje sa povećanjem intenziteta osvijetljenosti. Ovo je unutrašnji fotoefekat. Od poluprovodnika s jako izraženim unutrašnjim fotoefektom prave se fotootpornici, koji služe za gradnju fotosenzora. Promjena unutrašnjeg otpora ΔR_u fotosenzora u zavisnosti od promjene intenziteta osvijetljenosti ΔE_s je osjetljivost:

$$\frac{\Delta R_u}{\Delta E_s} = -k [\Omega / cd]$$

koja je konstantna. Osjetljivost fotootpornika na djelovanje sile gotovo je zanemarljiva. Negativna osobina fotootpornika je velika osjetljivost na djelovanje temperature.



- ♦ Manji broj otporničkih senzora na bazi poluprovodnika imaju otpor koji zavisi od pritiska. Ukupni otpor R takvog poluprovodnika kada na njegovim krajevima deluje pritisak p jest suma prelaznog otpora R_p i unutrašnjeg otpora R_u :

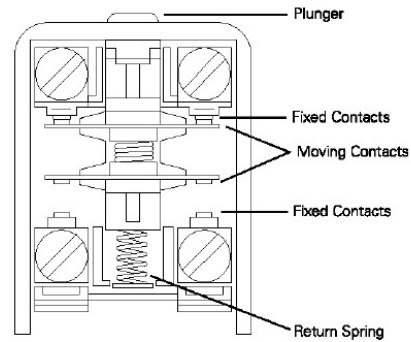
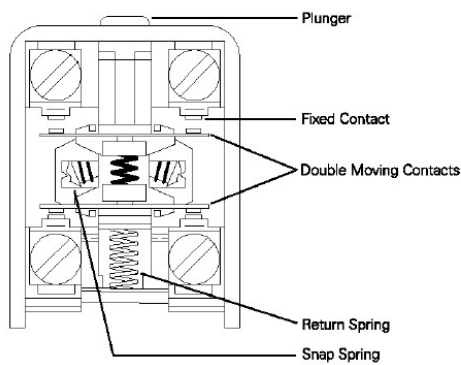
$$R = R_p + R_u = \frac{K}{p} + R_u$$

- ♦ Osjetljivost $\Delta R / \Delta p$ statičke karakteristike je nelinearna sa negativnim predznakom, koji ukazuje da pozitivnom prirastu Δp odgovara negativni prirast ΔR .
- ♦ Na osjetljivost jako utiču starenje poluprovodnika i vlažnost okoline. Promjena otpora u funkciji pritiska primjenjuje se u gradnji senzora zvučnih signala.

Mikroprekidač

Mehanički kontakti, prebacivanje dodirrom, isključivo binarni:

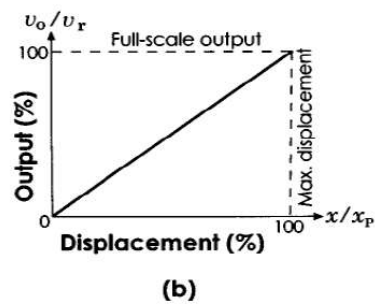
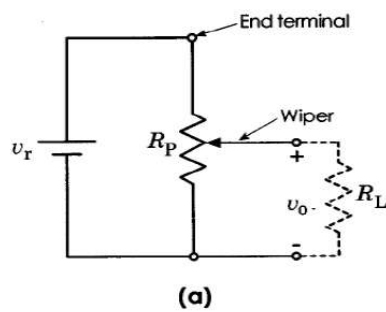
- Bistabilna verzija (snap-action)
 - za spore procese, -histereza
- "Spora verzija" (sliding contact, slow-break)
 - nema histereze, -osjetljiv na prašinu ili tekućine



Potenciometri

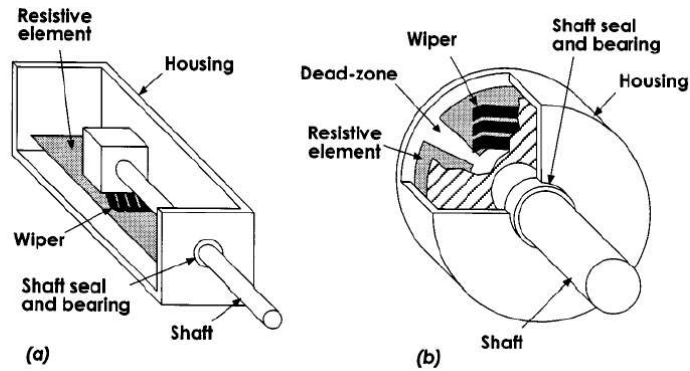
Prvenstveno analogni senzor

- Materijal klizne staze
 - Žica (konačna razlučljivost, ali zato vrlo dobra linearnost)
 - Mješavina ugljika s vezivom
 - Provodljiva plastika
 - Sintetovana keramičko metalna masa
 - Hibridni (motana žica u matrici od provodljive plastike)



Potenciometri

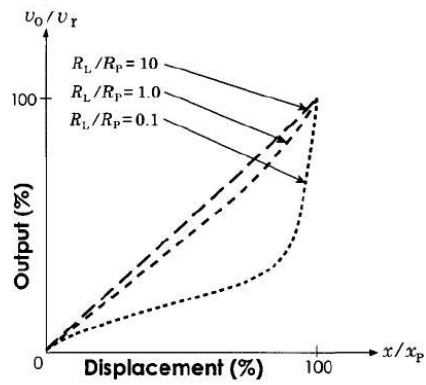
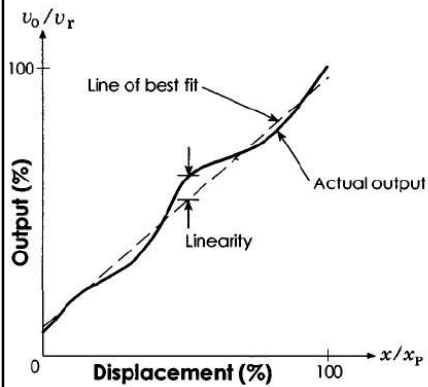
- Linearna i rotacijska izvedba
- Helikoidalna višeokretna (samo kod žičanih p.)

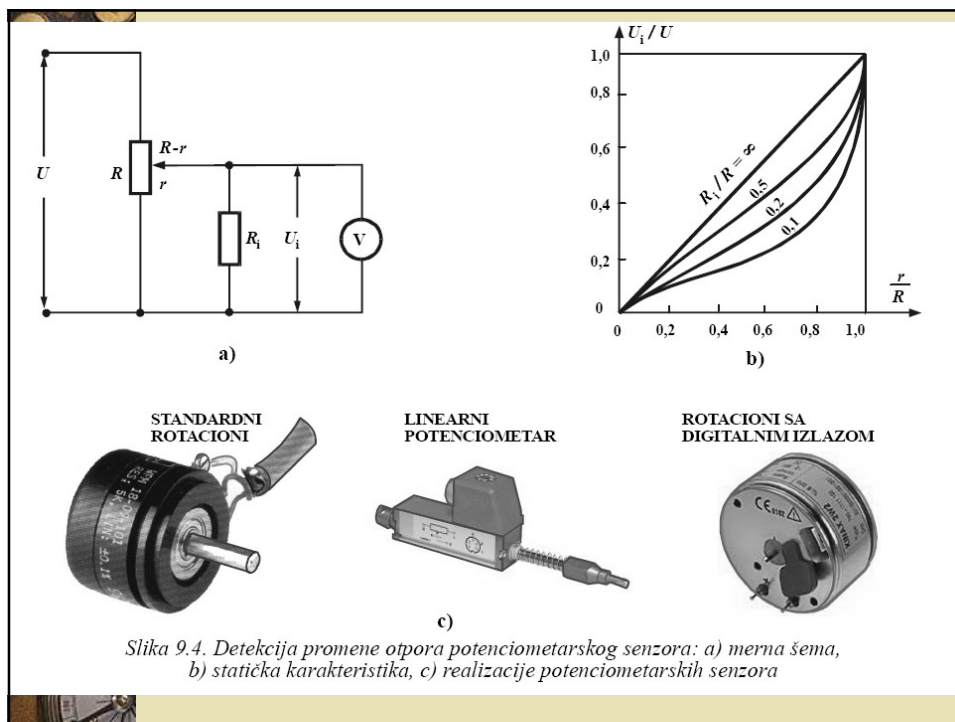


Potenciometri

- Nelinearnost uslijed nehomogenosti klizne staze
- Nelinearnost uslijed utjecaja otpora opterećenja RL:

$$\frac{v_o}{v_r} = \frac{(x/x_p)(R_L/R_p)}{(R_L/R_p) + (x/x_p) - (x/x_p)^2}$$





2.1. Otpornički senzorski elementi mjerenje temperature

2.1.1. Otpornički termometri (RTD – Resistance Thermometer Devices)

- Otpor većine metala značajno raste s porastom temperature: (u području -100 do $+800^{\circ}\text{C}$)

$$R_T[\Omega] = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots)$$

- ◆ $R_0[\Omega]$ – otpor pri referentnoj temperaturi $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ili $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ → tada se u gornjem izrazu umjesto T koristi $\Delta T = T - T_0$.
- ◆ $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ - temperaturni koeficijenti električnoga otpora metala

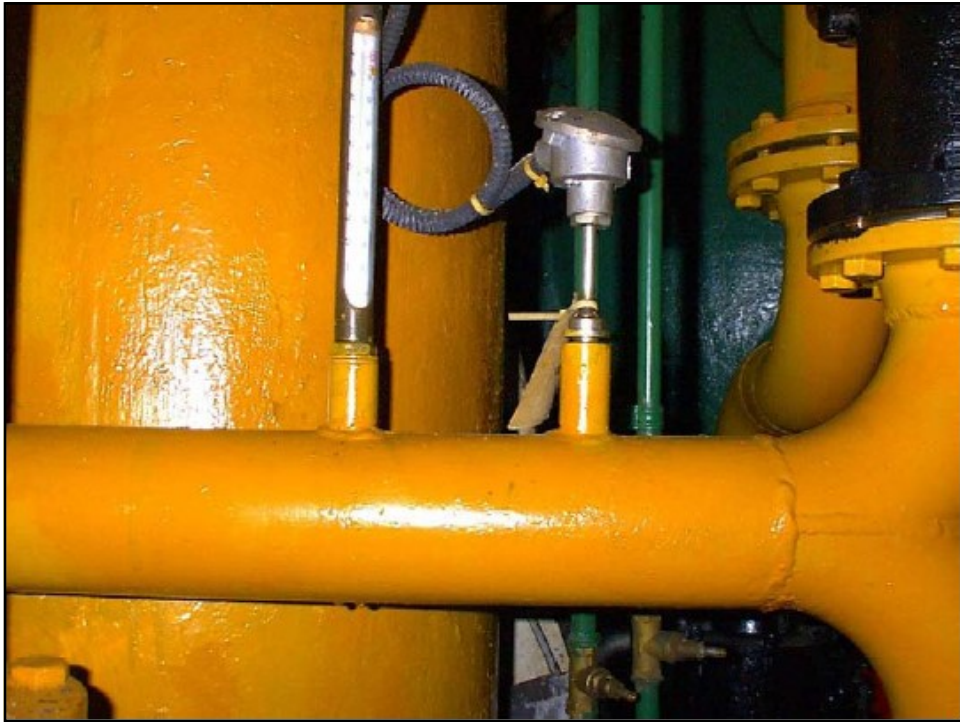
Temperatura: Najčešće mjerena veličina u industriji



www.omega.com

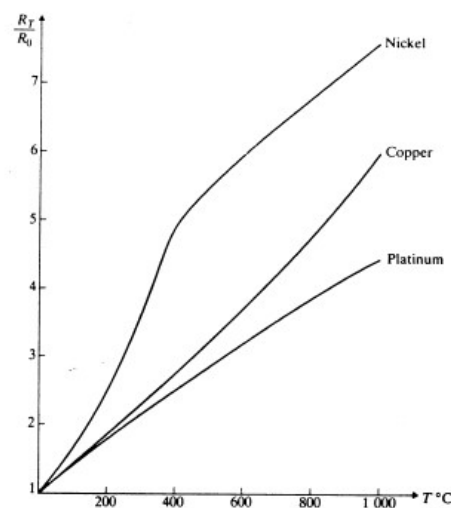


Sensors for SITRANS T





- Obično vrijedi aproksimacija:
 $R_T[\Omega] \approx R_0 (1 + \alpha T)$ - zanemaren nelinearni član
- Kao metal najčešće se koristi platina (za zahtjevnije primjene),
 - ◆ dobra linearnost u području -200°C do $+800^\circ\text{C}$
 - ◆ hemijski je otporna
 - ◆ otpornički senzor temperature označen sa PT 100. Pri 0°C ima otpor 100Ω .
- Takođe se koristi i volfram, a nikal i bakar za manje zahtjevne primjene.



Otporno-temperaturne karakteristike Platine, Bakra i Nikla.

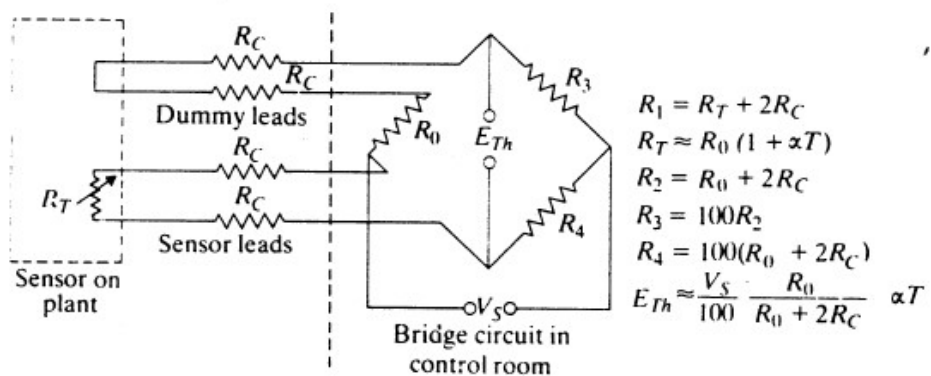


Karakteristike RTD-ova

- Najtačniji mjerni senzori temperature;
- Potrebna je kompenzacija otpora vodova;
- Relativno spora dinamika – vremenska konstanta 1-40 s.

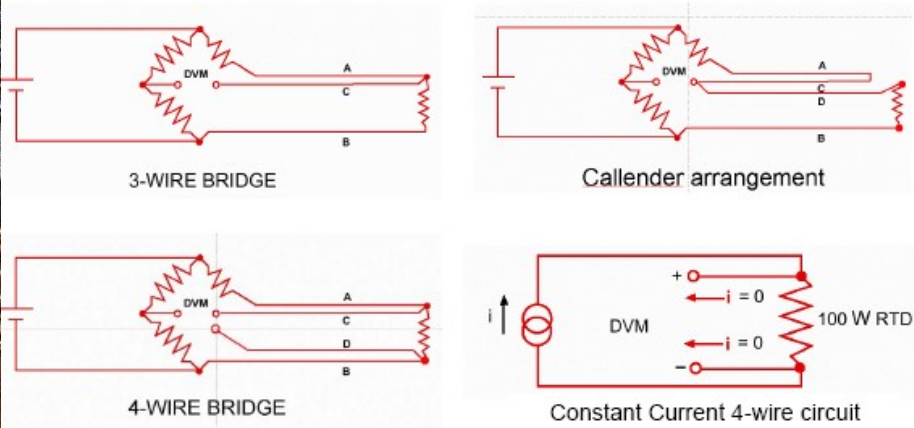


Otpornički senzor temperature u mosnom spoju



Senzor temperature u mosnom spoju (R_C - otpor kabla spojnih žica otporničkoga senzora).

Ostali spojevi RTD-a za kompenzaciju otpora vodova



Termistori:

- Senzori temperature načinjena od poluprovodničkih materijala nazivaju se termistorima (poluprovodnički otpornički senzori).

- Koriste se materijali u obliku smjesa sulfida, selenida ili oksida metala, npr. magnezijum, nikal, kobalt, bakar, željezo, uran.

Npr.

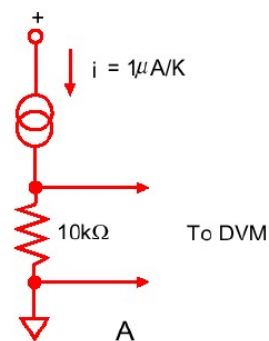
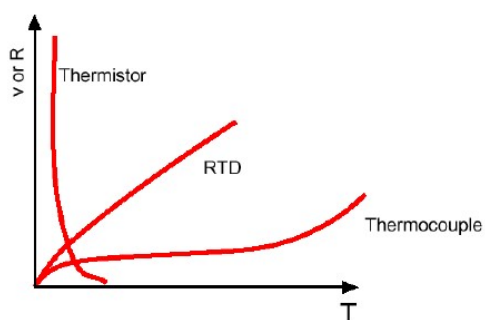
- ♦ vrijednost otpora opada s porastom temperature (imaju NTC);
- ♦ mala vremenska konstanta;
- ♦ veća osjetljivost od otporničkih termometara;
- ♦ osjetljivost na strujno opterećenje;
- ♦ postoje termistori i s PTC.


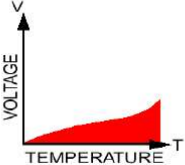

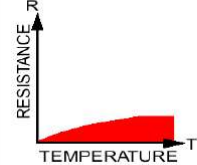

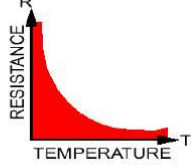

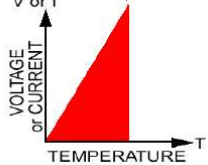
$$R_{\Theta} = Ke^{\frac{\beta}{\Theta}}$$

R_{Θ} otpor pri temperaturi Θ Kelvina; K, β – konstante termistora

- Termistor je poluprovodnička varijanta RTD
 - Ima veću promjenu otpora za istu promjenu temperature
 - Koeficijent može biti negativan NTC
 - Može biti i pozitivan PTC
 - Izračunavanje pomoću Steinhart-Hart jednadžbe

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3$$



Thermocouple	RTD	Thermistor	I. C. Sensor
 	 	 	 
•Prednosti: <ul style="list-style-type: none"> •Aktivni o. •Pouzdan •Nije skup •Pokriva veliko temp podr. •Mane: <ul style="list-style-type: none"> •Nelinearan •Nizak Napon •Potrebna ref. točka •Nestabilan 	•Prednosti: <ul style="list-style-type: none"> •Najstabilniji •Najtočniji •Linearniji od termopara •Mane: <ul style="list-style-type: none"> •Skup •Zahtijeva izvor str. •Vlastito grijanje •Nizak vlastiti otpor 	•Prednosti: <ul style="list-style-type: none"> •Visoki odziv •Brz odziv •Dvije žice •Mane: <ul style="list-style-type: none"> •Nelinearan •Ogran. područje •Vlastito grijanje •Zahtijeva izvor str. •Osjetljiv 	•Prednosti: <ul style="list-style-type: none"> •Najlinearnij •Niska cijena •Najviši odziv •Mane: <ul style="list-style-type: none"> •Do max. 200°C •Zahtijeva napajanje •Vlastito grijanje •Spor odziv



2.1.2. Metalni i poluprovodnički otpornički senzori deformacije

- Deformacija može biti mjera mehaničkoga naprezanja (npr. za mjerenje sile, pritiska, momenta).

Podsjetnik:

- Sile koje djeluju na tijelo i nalaze se u ravnoteži prouzrokuju deformaciju tijela:
 - ◆ deformacija – istežanjem, izvlačenjem
 - ◆ deformacija – sabijanjem.
- Sila koja djeluje na jediničnu površinu tijela zove se naprezanje:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [N / cm^2]$$



- ◆ Ako je σ sa pozitivnim predznakom, onda je to naprezanje vučenjem – izaziva istežanje.
- ◆ Ako je σ sa negativnim predznakom, onda je to naprezanje stežanjem – uzrokuje sabijanje.
- Dakle, efekt prinudnog naprezanje je deformacija:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

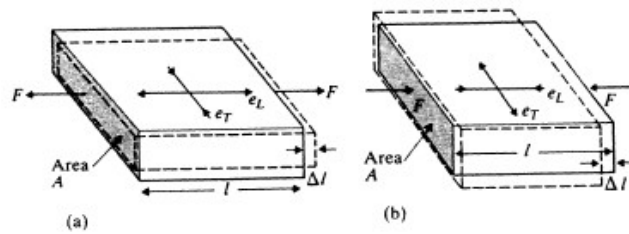
- Ovdje se radi o uzdužnoj (longitudinalnoj) deformaciji (deformaciji duž smjera naprezanja).
- Odnos između naprezanja i deformacije naziva se modul elastičnosti:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \Rightarrow \sigma = E\varepsilon$$

Hukov zakon



- Često se modul elastičnosti naziva Youngovim modulom E za linearno sabijanje ili istezanje.



- Izvlačenje : Povećanje dužine tijela uzrokuje smanjenje poprečnoga presjeka A , tj. smanjuje se debljina i širina. Posljedica toga je poprečna deformacija ϵ_T (transverzalna)
- Sabijanje: Postiže se suprotan efekt u odnosu na izvlačenje



- Odnos između uzdužne i poprečne deformacije izražen je relacijom:

$$\epsilon_T = - \nu \epsilon_L$$

ν (μ) - Poissonov odnos (broj) (vrijednost: 0,25 – 0,4 za većinu metala)

- Otpor deformisanoga tijela (elementa), načinjenog od metala ili poluprovodnika mijenja s deformacijom (strain gauge - deformirajući element, rastezno tijelo):

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

gdje je:

l - dužina elementa; ρ - specifični otpor; A -poprečni presjek



- Pod djelovanjem naprezanja mijenja se otpor za iznos ΔR :

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial l}\right)\Delta l + \left(\frac{\partial R}{\partial A}\right)\Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho}\right)\Delta \rho$$

$$\Delta R = \frac{\rho}{A}\Delta l - \frac{\rho l}{A^2}\Delta A + \frac{l}{A}\Delta \rho \quad /: R = \frac{\rho l}{A} \quad \implies \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta w}{w} + \frac{\Delta t}{t} = 2\varepsilon_\tau = 2\nu\varepsilon_L$$

Slijedi: $\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_L - 2(-\nu\varepsilon_L) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$ piezootpornički efekt (0,4)

$\varepsilon_L = \varepsilon; R \rightarrow R_0 \implies \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} = G = 1 + 2\nu + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta \rho}{\rho}$

- G – gauge factor (mjerni faktor); Za $\nu \approx 0,3$ je $G \approx 2.0$
 \implies Promjena otpora linearna s deformacijom:
 $\Delta R = R_0 G \varepsilon$



- Tipičan primjer: $R_0 = 120 \Omega$, $G = 2$ i $\varepsilon = 1 \text{ ppm}$

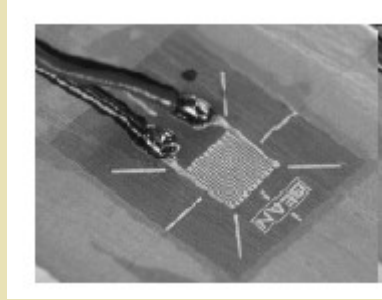
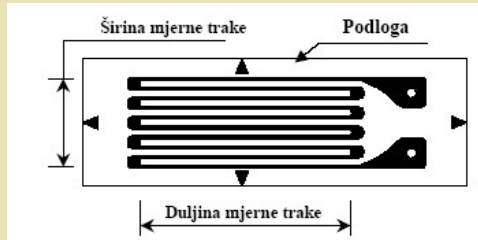
$$\Delta R = R_0 G \varepsilon_a = (120 \Omega)(2)(1 \cdot 10^{-6}) = 0.00024 \Omega$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0.00024}{120} = 2 \cdot 10^{-6} = 0.0002\%$$

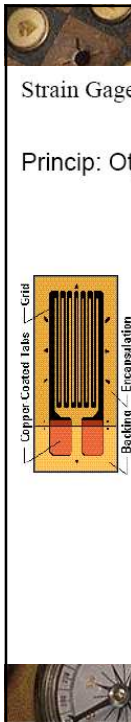
- Materijali i tehnologija izrade deformirajućih elemenata (“Advance”: 54% Cu, 44% Ni, 1% Mn).
- Poluprovodnički deformirajući elementi imaju piezootpornički član veliki \rightarrow G time postaje veliko
- Uobičajen materijal je silicij dopiran malom količinom materijala “P” tipa ili “N” tipa.

Za P: $G \approx 100$ do 175; Za N: $G \approx -100$ do -140

- Prednost u odnosu na metalne deform. elemente: veća osjetljivost.
- Nedostatak: veća osjetljivost na promjenu temperature.

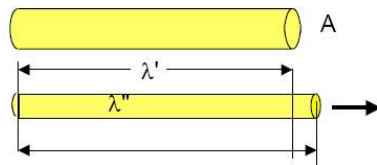
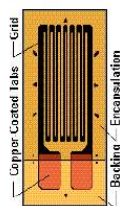


- Smještaj (montaža) (uzduž aktivne ose) → uputstva proizvođača
- Ovi otpornički senzori spajaju se u mosne spojeve (otklonske).



Strain Gage, Dehnungsmessstreifen (DMS)

Princip: Otpor vodiča raste ako se vodič rasteže :



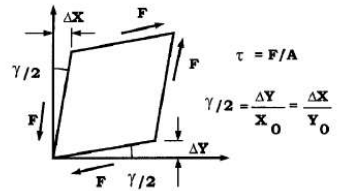
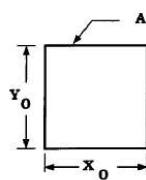
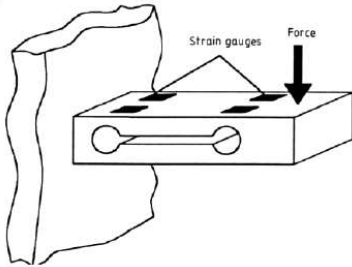
Volumen konst., $\rho = \text{konst.}$

$$R = \rho \frac{\lambda}{A} = \rho \frac{\lambda^2}{V}$$

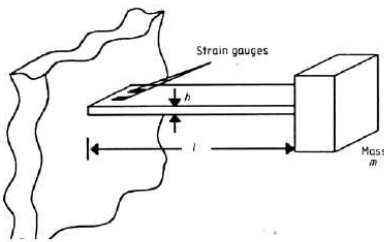
Kod metalnih vodiča preteže geometrijski član,
Kod poluprovodničkih preteže piezoelektrični

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \approx (1+2\nu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \Rightarrow G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \underbrace{(1+2\nu)}_{\text{GEOMETRIC EFFECT}} + \underbrace{\frac{\Delta \rho}{\rho \Delta L}}_{\text{PIEZO-RESISTIVE EFFECT}}$$

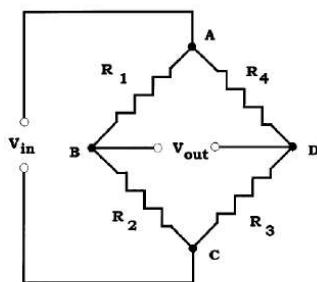
Tenzometarske otporničke trake



- Tenzometri mogu, ovisno o izvedbi mjeriti:
 - Linearnu deformaciju
 - Smičnu deformaciju
 - Ukupno stanje defrmacije (mohrova kružnica)



Tenzometarske otporničke trake

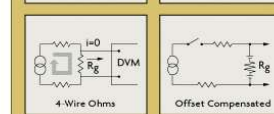
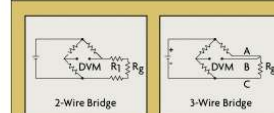
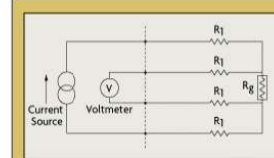
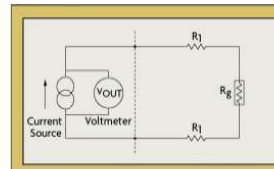


$$V_B = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

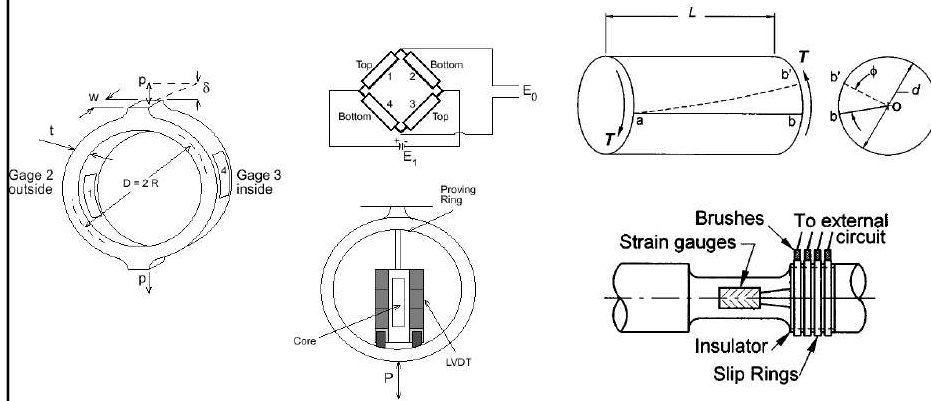
$$V_D = V_{in} \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$V_{out} = V_B - V_D$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \left(-\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

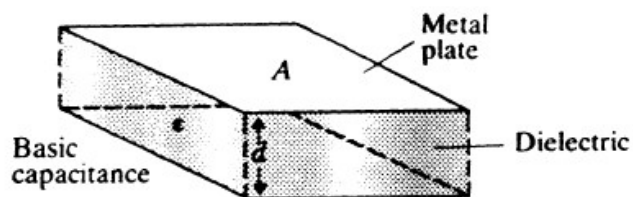


Različiti načini postavljanja tenzootporničkih senzora



Kapacitivni senzori

2.2. Kapacitivni senzorski element



$$C = \frac{\epsilon_o \epsilon A}{d} \rightarrow \text{kapacitet pločastoga kondenzatora } C = f(\epsilon, A, d)$$

- ◆ ϵ_o – apsolutna dielektrička konstanta vakuuma $\epsilon_o = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m;
- ◆ ϵ – relativna dielektrička konstanta dielektrika;
- ◆ $A[\text{m}^2]$ – površina ploče; $d[\text{m}]$ – razmak među pločama.

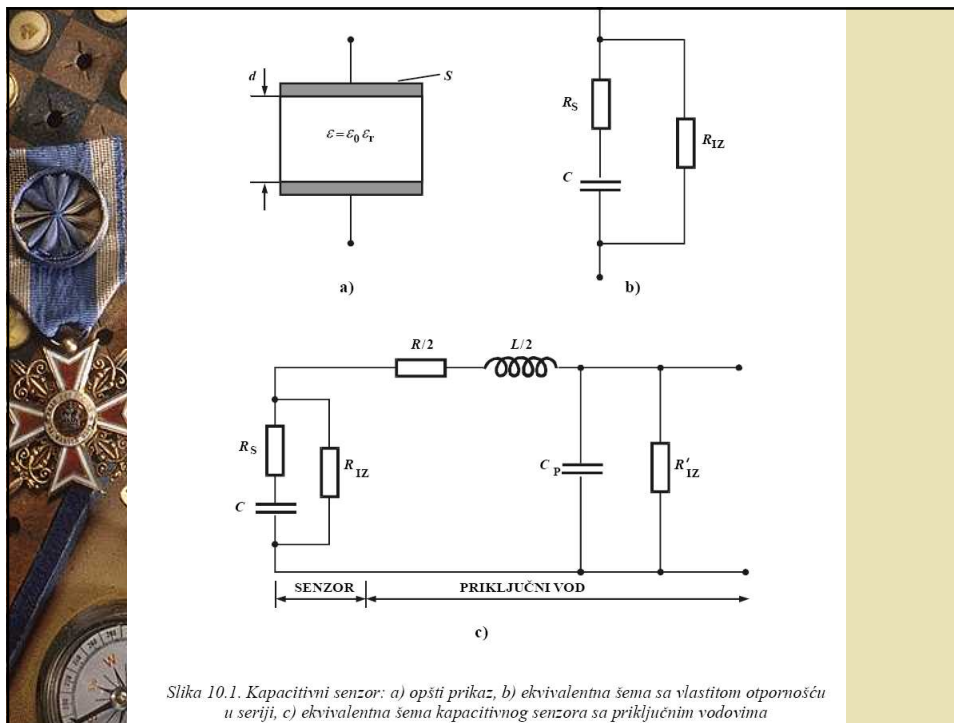


Kapacitivni senzori

- ◆ Ukoliko se na S , d ili ϵ utiče nekom neelektričnom veličinom, tada kapacitet C zavisi od te veličine, pa se na taj način dobija kapacitivni senzor. Već prema tome utiče li se na S , d ili ϵ , postoje razne konstrukcije kapacitivnih senzora. Za sve njih je zajedničko da spadaju u pasivne senzore.



- ◆ Dobre osobine kapacitivnih senzora su: jednostavnost, preglednost, visoka osjetljivost, svestrana upotrebljivost (kako za praćenje stacionarnih tako i za praćenje brzo promenljivih fizičkih veličina), te primjena i kod viših temperatura.
- ◆ Loša osobina kapacitivnih senzora je njihov veliki unutrašnji otpor, koji zahtijeva još veći ulazni otpor mjernog elektronskog bloka. Na primjer, kapacitivni senzor sa elektrodama površine 10 cm^2 , koje su na međusobnom rastojanju 1 mm u vazduhu, ima kapacitet $8,8 \text{ pF}$. Modul njegove impedanse $1/(\omega C)$ na frekvenciji $f = 50 \text{ kHz}$ je $320 \text{ k}\Omega$, a na frekvenciji 20 kHz čak $905 \text{ k}\Omega$.
- ◆ Nedostatak je takođe i osjetljivost relativne dielektrične konstante dielektrika na djelovanje tečnosti sa $\epsilon_r > 1$, kao što su razna ulja, a naročito voda ($\epsilon_r = 80$).



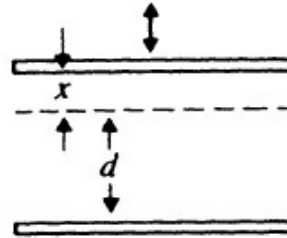
- ♦ Na osjetljivost kapacitivnog senzora utiču omski otpor R i induktivnost priključnih vodova L , a takođe i otpor izolacije između vodova R_{iz} i kapacitet između vodova C_p . Kapacitet između vodova uključuje i paraziti kapacitet između elektroda.
- ♦ Uticaj priključnih vodova je zanemarljiv ako je ispunjen uslov:

$$R, \omega L \ll \frac{1}{\omega C} \ll R'_{iz}, \frac{1}{\omega C_p}.$$

◆ Kapacitivni senzorski element za mjerenje pomjeraja

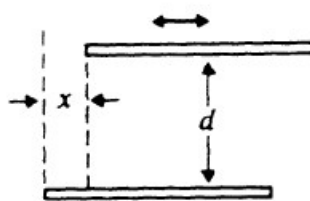
a) promjenljivo rastojanje

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d + x}$$



nelinearna zavisnost; korišćenje mosnoga spoja; potrebna je kompenzacija nelinearnosti.

b) promjenljiva površina

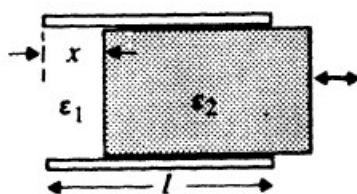


$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d} (A - \Delta A);$$

$$\Delta A = wx;$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d} (A - wx)$$

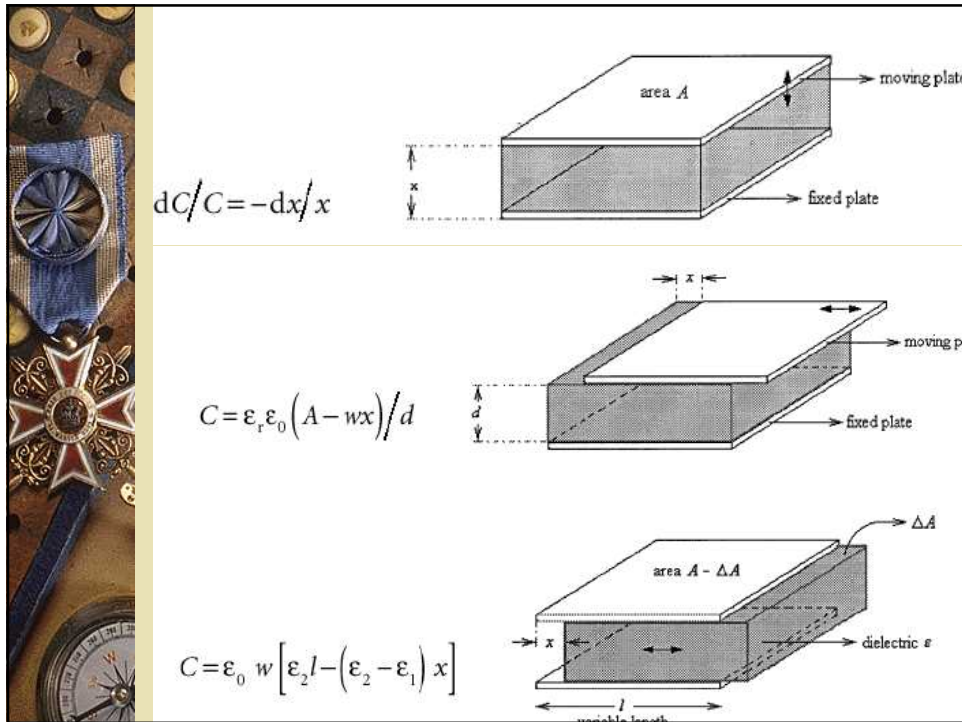
c) promjenljivi dielektrik



$$\epsilon_2 > \epsilon_1; C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{d} A_1 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{d} A_2;$$

$$A_1 = wx; A_2 = w(l - x);$$

$$C = \frac{\epsilon_0 w}{d} (\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1)x)$$



d) kapacitivni senzor pritiska

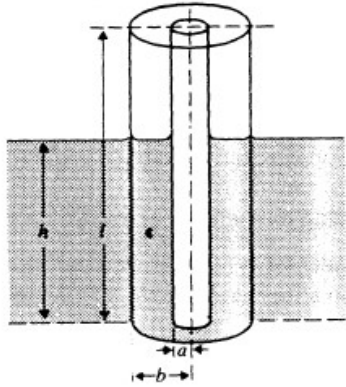
- ♦ Jedna ploča je fiksirana, druga ploča je izvedena kao kružna dijafragma.
- ♦ Dijafragma je elastični senzorski element koji se podiže (ugiba) pod utjecajem pritiska.

♦ Izobličenje y na odabranome radijusu je:

$$y = \frac{3(1-\nu^2)}{16Et^3} (a^2 - r^2)^2 P \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta C}{C} = \frac{(1-\nu^2)a^4}{16Edt^3} P$$

d – početni razmak ploča; E – Youngov broj.
 ν = Poisson's ratio

e) kapacitivni senzor nivoa



- ♦ Dva koncentrična metalna cilindra.
- ♦ U prostoru između cilindra tečnost do visine h .
- ♦ Ako je tečnost neprovodna, onda je za dati oblik cilindra ($\epsilon_{\text{vazduha}}=1$):

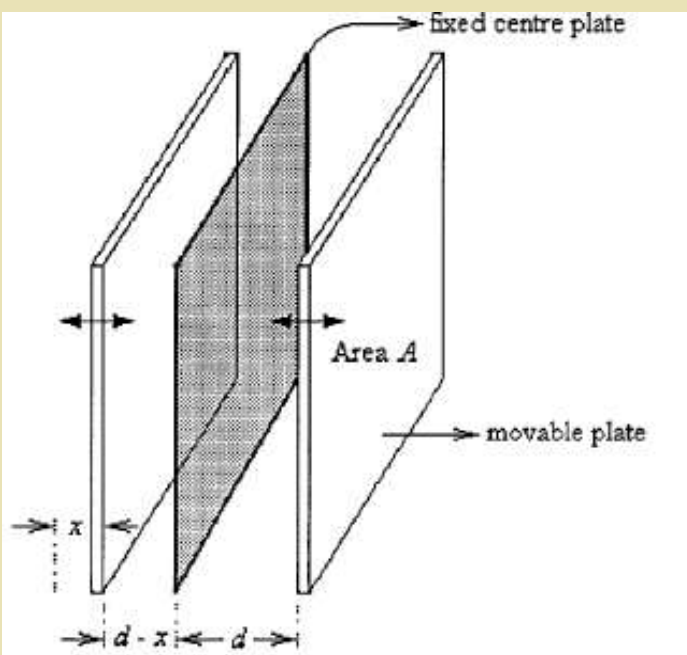
$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon h}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} + \frac{2\pi\epsilon_0(l-h)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

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

Napomena:

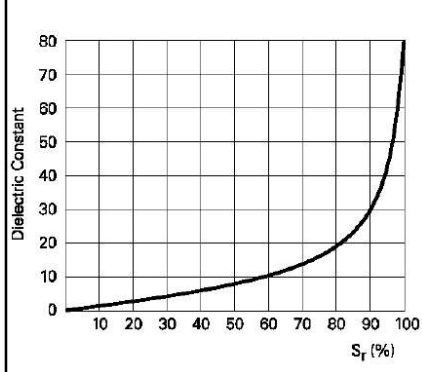
- ♦ Kapacitivni senzor nivoa ugrađuje se u naizmjenični mosni napon ili u kolo električnog oscilatora.

- ♦ kapacitivni senzori ne sadrže čiste kapacitete, nego i otpore u paraleli (što reprezentira dielektričke gubitke);
- ♦ kapaciteti kabla koji spajaju senzor sa sklopom za obradu.





- Kod kapacitivnih senzora je moguća detekcija kroz krutu barijeru
- Senzori sa promjenljivim dielektrikom
- Proizvođači isporučuju tablicu osjetljivosti za standardne dielektrike, kao i graf relativne osjetljivosti kod nestandardnih dielektrika za interpolaciju



Material	Dielectric Constant	Material	Dielectric Constant
Alcohol	25.8	Polyamide	5
Araldite	3.6	Polyethylene	2.3
Bakelite	3.6	Polypropylene	2.3
Glass	5	Polystyrene	3
Mica	6	Polyvinyl Chloride	2.9
Hard Rubber	4	Porcelain	4.4
Paper-Based Laminate	4.5	Pressboard	4
Wood	2.7	Silica Glass	3.7
Cable Casting Compound	2.5	Silica Sand	4.5
Air, Vacuum	1	Silicone Rubber	2.8
Marble	8	Teflon	2
Oil-Impregnated Paper	4	Turpentine Oil	2.2
Paper	2.3	Transformer Oil	2.2
Paraffin	2.2	Water	80
Petroleum	2.2	Soft Rubber	2.5
Plexiglas	3.2	Celluloid	3



Induktivni i magnetski senzori

- ♦ **Rad elektromagnetnih senzora** zasniva se na zavisnosti induktivnosti kalema od promjene otpora elektromagnetnog kola ili na elektromagnetnoj indukciji. U tom smislu razlikuju se induktivni, međuinduktivni i indukcioni (elektrodinamički) senzori.
- ♦ Induktivni i međuinduktivni spadaju u pasivne, a indukcioni u aktivne senzore.
- ♦ Mogu biti i binarni i analogni, i zasnovani na dva principa:
 - Sa vrtložnim strujama
 - Feromagnetski
- ♦ Pobuda naizmjeničnom strujom



- ♦ Induktivnost kalema (svitka, solenoida) sa jezgrom od feromagnetnog materijala i vazdušnim zazorom računa se pomoću sledeće jednačine:

$$L = \frac{N^2}{Z_m} = \frac{N^2}{\sqrt{(R_m + R_\delta)^2 + R_g^2}} =$$
$$= \frac{N^2}{\sqrt{\left[\frac{l_m}{\mu_0 \mu_r S_m} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_\delta} \right]^2 + \left[\frac{2P_m}{N\phi_m^2} \right]^2}},$$

gde su: Z_m ukupni magnetni otpor (reluktansa) kola [H^{-1}], R_m , R_δ i R_g magnetni otpor jezgra, zazora i gubitaka [H^{-1}], δ širina zazora [m], S_m i S_δ površina poprečnog presjeka jezgra i zazora [m^2], μ_0 - magnetni permeabilitet vakuumu, μ_r -relativni magnetni permeabilitet feromagnetika, l_m srednja dužina magnetnih linija [m], P_m gubitak snage u jezgru [W], Φ magnetni fluks [Wb] i N broj navojaka.



- ♦ Magnetni otpor jezgra i namotaja R_m mnogo je manji od magnetnog otpora vazdušnog zazora, tj. $R_m \ll R_\delta$. Pošto je mali magnetni otpor jezgra, gubici u jezgru se mogu zanemariti, tako da je induktivnost određena izrazom:

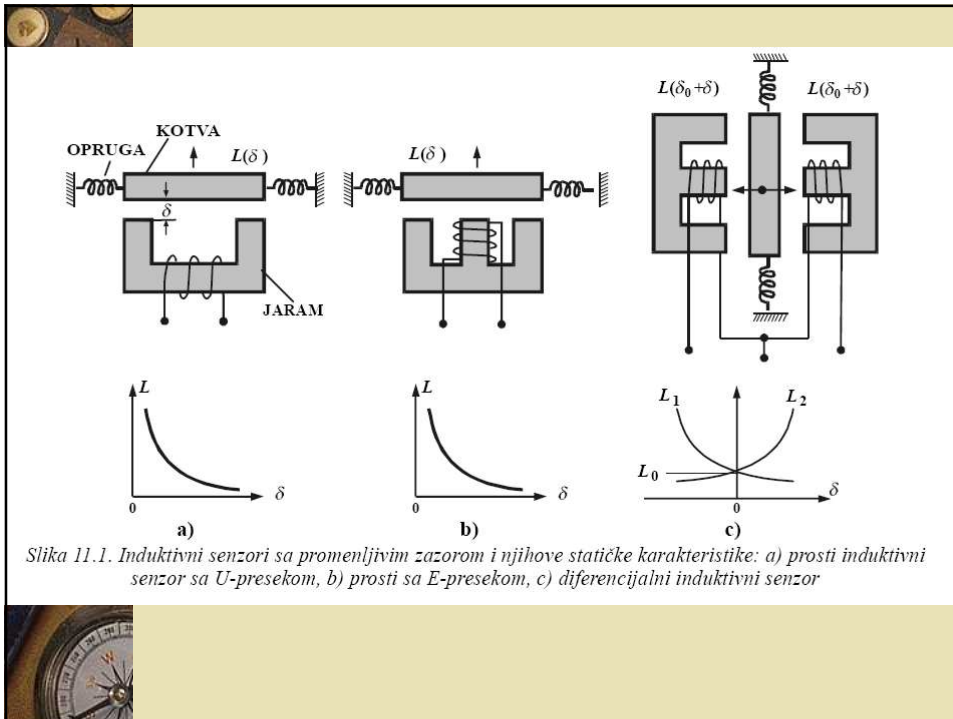
$$L = \frac{\mu_0 N^2 S_\delta}{2\delta}$$

gde je S_δ/δ faktor oblika kalema.

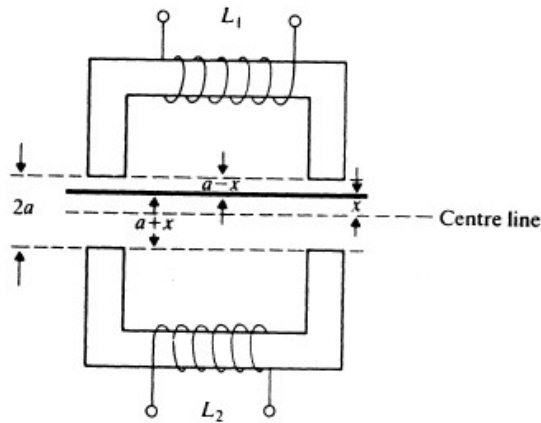
Statičke karakteristike. Magnetni permeabilitet i geometrija elektromagnetnog kola menjaju se pod uticajem mehaničkih veličina, te se na osnovu toga grade odgovarajući induktivni senzori. Samo je statička karakteristika koja se odnosi na širinu zazora nelinearna, a odgovarajuća osjetljivost nije konstantna, već zavisi od radne tačke unutar opsega mjerene veličine. Statičke karakteristike koje se odnose na magnetni permeabilitet zazora i površinu zazora su linearne, pa je i osjetljivost senzora u odnosu na te veličine konstantna.



- Induktivni senzori sa promenljivim zazorom.**
 Induktivnost ovog senzora mijenja se zavisno od promjene vazdušnog zazora između jezgra (jarma) i pokretnog dijela od feromagnetika (kotve). Prosti induktivni senzor ima jaram u obliku slova U (slika 11.1a) ili E (slika 11.1b). Kada se kotva približi jarmu, zazor se smanji, a induktivnost poraste. Statička karakteristika je linearna samo za male relativne promjene vazdušnog zazora. Realni induktivni senzori prave se sa relativnom promjenom zazora $\Delta\delta/\delta = 0,1 - 15$, čime se osigurava linearnost karakteristike 1 – 3%. Za napajanje se primjenjuje napon frekvencije od 5 ili 50 kHz, a induktivnost je 5 ili 0,5 mH.
- Ozbiljan nedostatak prostih induktivnih senzora je nelinearnost statičke karakteristike i mali opseg promjene zazora. Osim toga, kada kroz kalem teče konstantna struja I , između jarma i kotve deluje privlačna sila $F = (I^2/2) / (dL/d\delta)$, koja izaziva nepoželjno kretanje kotve.



- Nelinearnost se kompenzira spajanjem induktivnih senzora u “push-pull” spoj



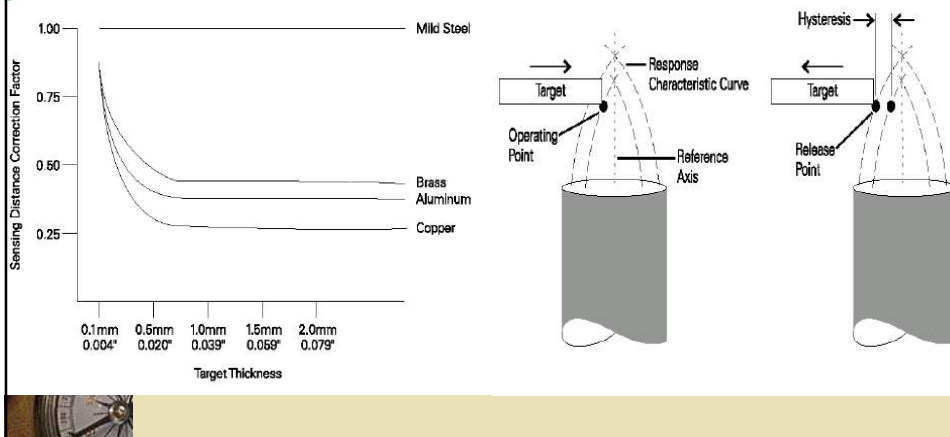
Dva induktivna senzora u “push-pull” spoju.

i njihovim povezivanjem u mosni spoj .

Mnogo je bolji diferencijalni induktivni senzor (slika 11.1c) koji je, zapravo napravljen od dva induktivna senzora tipa *E*. Prilikom kretanja kotva se primiče jednom kalemu, a od drugog se udaljava, tako da induktivnost jednog kalema raste a drugog opada. Statička karakteristika diferencijalnog induktivnog senzora dobija se kao razlika karakteristika dvaju prostih induktivnih senzora: $L = L_1 - L_2$. Diferencijalni senzor omogućava merenje pozitivnog i negativnog pomeraja kotve, na dvostruko većem opsegu u odnosu na prosti senzor. Za priključivanje diferencijalnog senzora koristi se simetrična mosna šema.

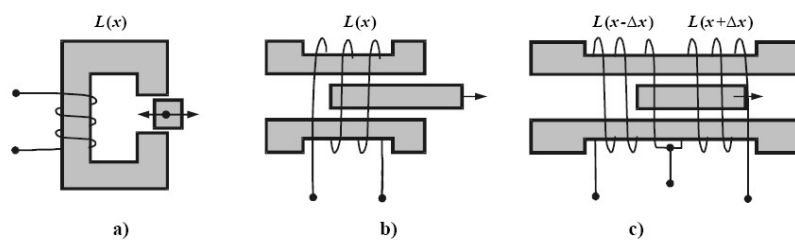


- Induktivni senzori zavise od materijala i debljine ciljnog objekta
- Mora se izvršiti kalibracija za svaki instalirani komad
- Izvedba može uključivati histerezis



Induktivni senzori sa promenljivom površinom vazdušnog zazora

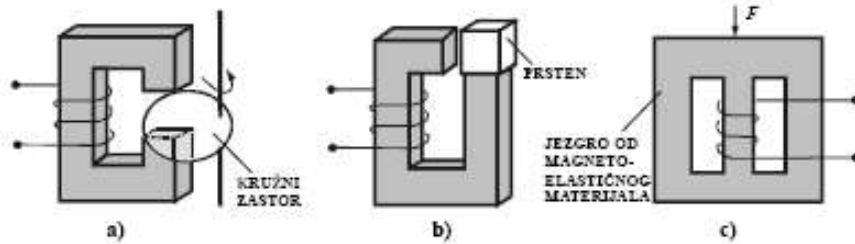
- ♦ Kotva ovih senzora pomjera se paralelno s navojima. Proste varijante imaju U ili E - presjek jezgra (slika 11.2a). Mnogo su praktičnije izvedbe sa pomičnim jezgrom (slika 11.2b). Proširenje opsega i poboljšanje linearnosti postiže se i u ovom slučaju izradom diferencijalnog induktivnog senzora (slika 11.2c).



Slika 11.2. Induktivni senzori sa promenljivom površinom: a) prosti, b) prosti sa pomičnim jezgrom, c) cilindrični diferencijalni



- ♦ **Induktivni senzori sa promenljivim magnetnim permeabilitetom.** Magnetni permeabilitet zazora mijenja se pomoću metalnog zastora u obliku ploče (slika 11.3a) ili prstena (slika 11.3b). Promjena je efikasnija ako je metal feromagnetni. Kada je zastor od magnetno nepropustljivog materijala – aluminijuma ili mesinga – tada se na njemu javljaju površinske struje koje onda dovode do promjene induktivnosti senzorskoq kalema.



Slika 11.3. Induktivni senzori sa promenljivim permeabilitetom: a) prosti senzor sa kružnim zastorom, b) prosti senzor sa pomičnim prstenom, c) magnetoelastični senzor



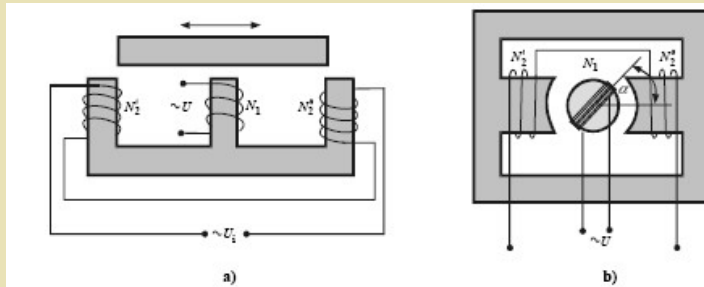
- ♦ Posebna klasa induktivnih senzora su magnetoelastični senzori. Njihov rad zasniva se na svojstvu nekih magnetnih materijala da menjaju permeabilnost usled mehaničkog naprezanja. U termodinamičkom pogledu riječ je o inverznoj magnetostriciji, odnosno o pojavi da se pod uticajem magnetnog polja mijenja naprezanje materijala. Osnovna karakteristika magnetoelastičnih senzora je faktor magnetoelastične osjetljivosti:

$$K_u = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l}$$

koji predstavlja odnos relativne promjene magnetne permeabilnosti materijala $\Delta\mu/\mu$ i relativne deformacije $\Delta l/l$. Za legure od gvožđa i nikla tipa permaloj faktor magnetoelastične osjetljivosti je oko 200. Na tačnost ovih senzora najviše utiču temperatura i zaostali mehanički naponi. Tačnost im je obično reda 3 – 4%.



Međuinduktivni senzori. Ovo je posebna klasa induktivnih senzora jer imaju po dva navoja magnetno povezana. Zahvaljujući tome, između izvora napajanja i izlaza postoji transformatorska veza, pa se ovi senzori nazivaju i transformatorski. Grade se tako da imaju promenljivu širinu zazora ili promjenljivu površinu presjeka. Pogodni su za merenje malih mehaničkih pomeraja. Konstrukcija diferencijalnog međuinduktivnog (transformatorskog) senzora omogućava proširenje mjernog opsega i bolju linearnost. Amplituda izlaznog signala proporcionalna je pomeraju kotve, a faza izlaznog signala pozitivnom/negativnom pomeraju u odnosu na nulti položaj.



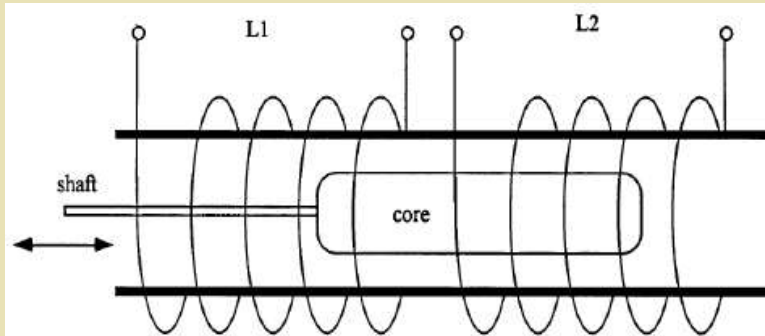
Slika 11.4. Transformatorski indukcioni senzor: a) sa linearnim pomeranjem kotve, b) sa ugaonim zakretanjem kotve

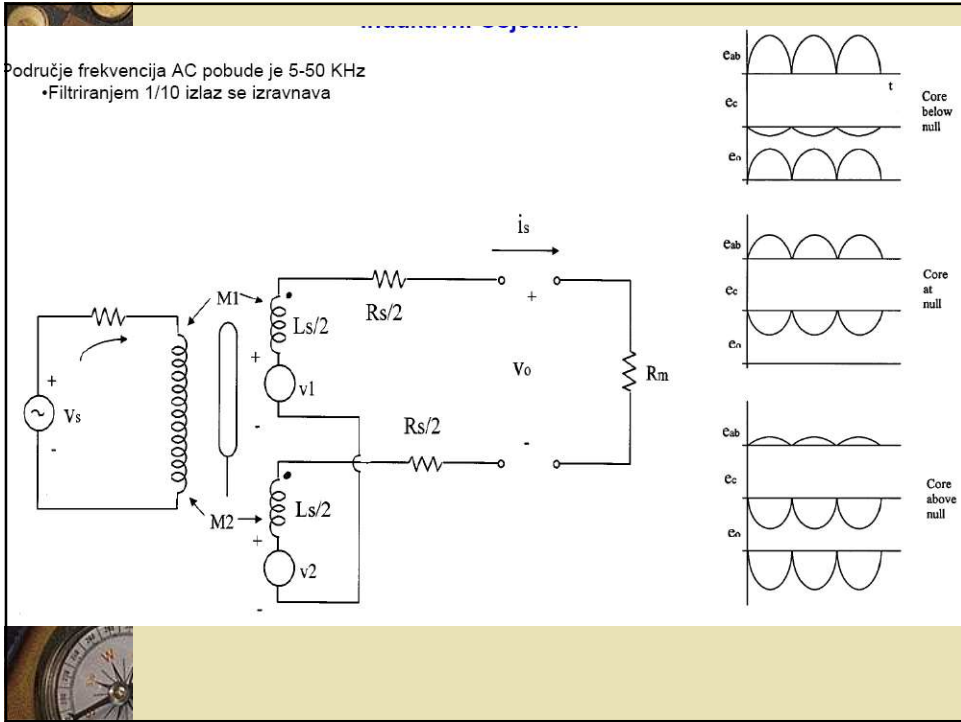
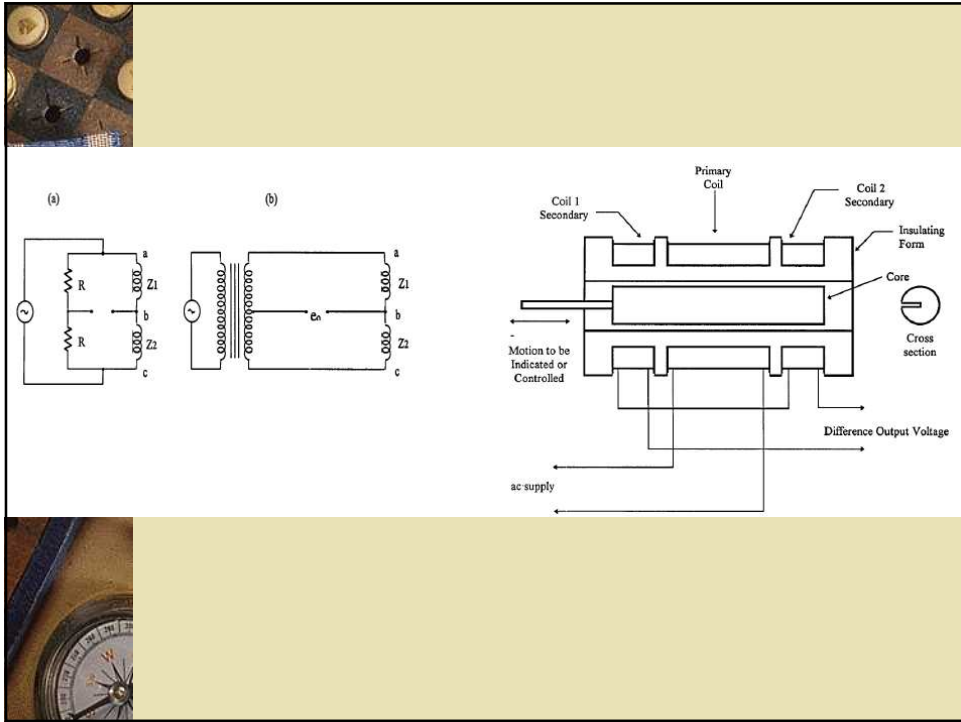
•LVDT i slični senzori

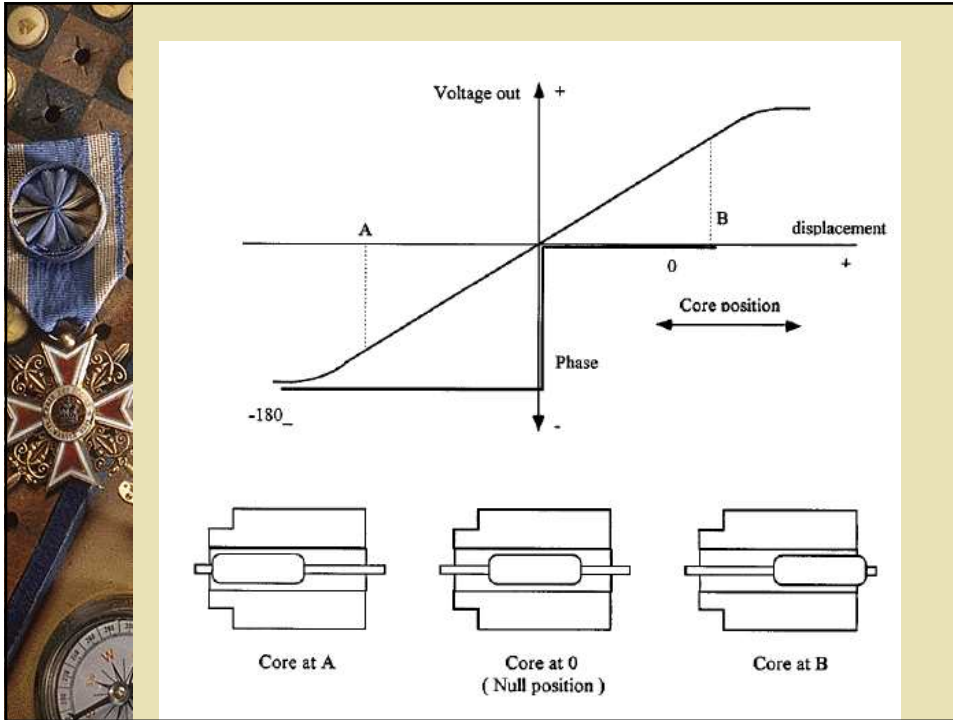
- a) induktivno balansirani most (3 kontakta)
- b) napajanje s centralnim izvodom (3 kontakta)
- c) diferencijalni sekundar (4 kontakta)

•Jezgra

- Feromagnetska (s procjepom)
- Nemagnetska (vrtložne struje)







Magnetski senzori koji se zasnivaju se na DC magnetskom polju

- Hall
- Magnetostriksijski

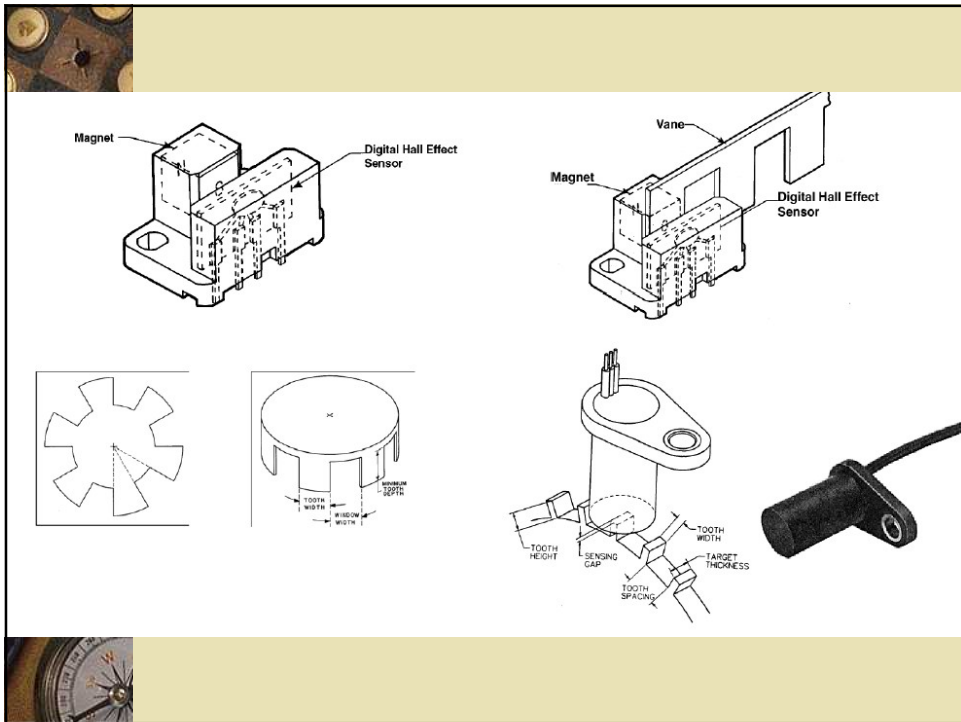
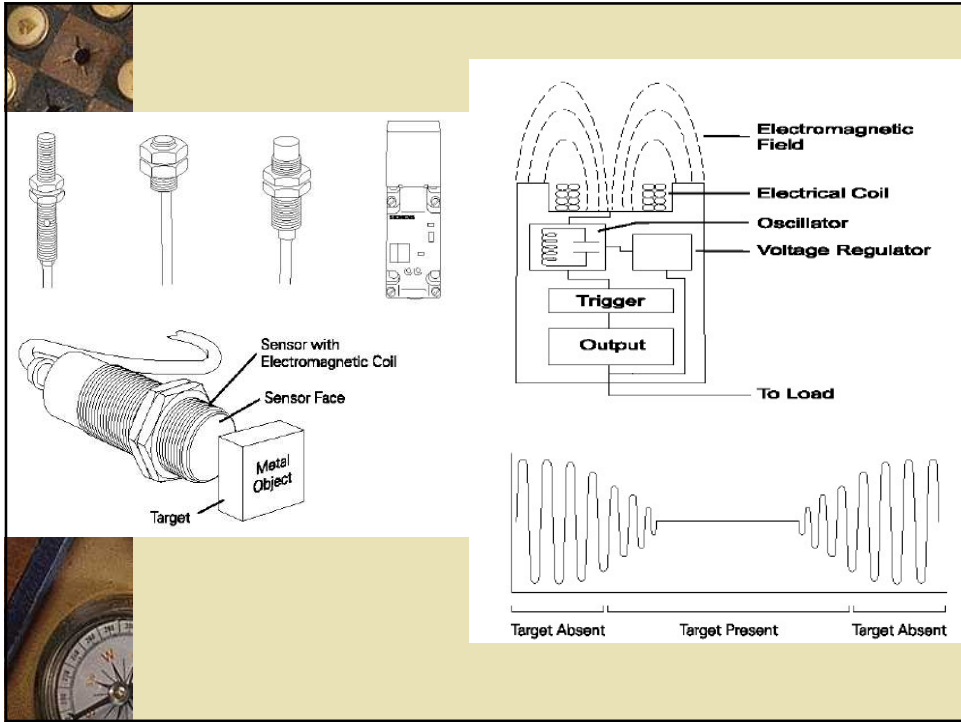
•Hall senzor je osjetljiv na:

- Gustoću magnetskog polja
- Napon napajanja
- Temperaturu

The diagram shows a rectangular sensor with current I flowing from left to right. A magnetic field B is applied vertically. A voltage V_H is induced across the sensor. The relationship is given by $V_H \propto I \times B$.

```

    graph LR
      subgraph Sensing_Device [Sensing Device]
        MS[Magnetic System] -- Magnetic Field --> HES[Hall Effect Sensor]
      end
      PQ[Physical Quantity] --> MS
      HES --> ES[Electrical Signal]
  
```



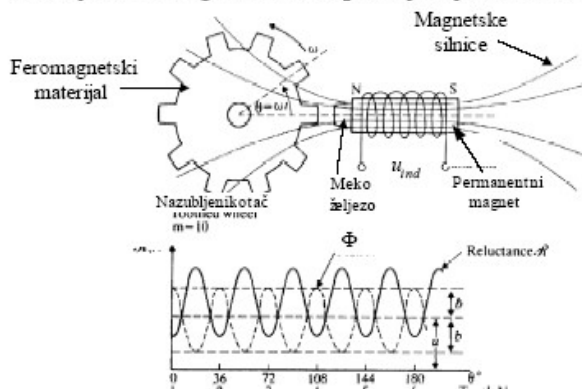
2.4. Elektromagnetski senzorski elementi - indukcioni senzori

- Koriste se npr. za mjerenje linearne ili ugaone brzine. • Temelje se na zakonu indukcije:

$$u_{in} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

- U nekom elektromagnetskom elementu mijenjaju se fluks Φ , uslijed pomjeranja, kojega treba izmjeriti.
- Za razliku od induktivnih i međuinduktivnih senzora, indukcioni senzori elektrodinamičkog tipa su u suštini generatori, te spadaju u grupu aktivnih senzora. Kao izvanredni detektori vibracija primenjuju se u alarmnim sistemima pod različitim komercijalnim nazivima (geofon, vibrafon). Na tačnost indukcionih senzora utiču temperatura i nestabilnost parametara magneta usled starenja, kao i nelinearnost magnetnog polja u zazoru. Uobičajena tačnost je reda 0,1 – 1%.

- Primjer: Tahogenerator s promjenljivom reluktansom ("pick-up")

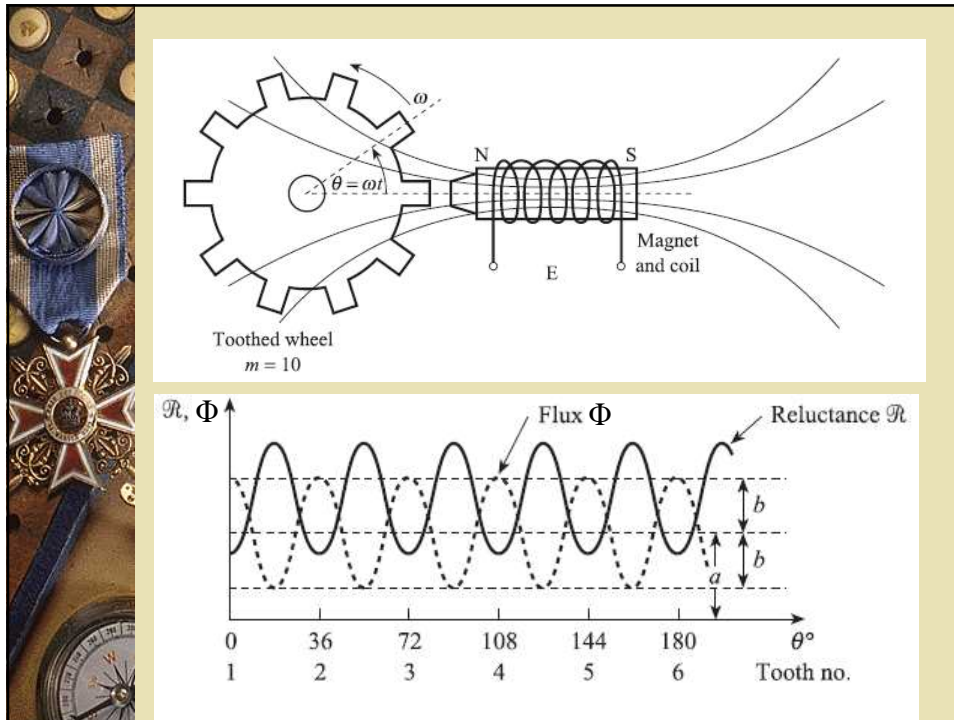


- Uspostavlja se magnetsko kolo preko permanentnog magneta, vazdušnog procjeka i točka.
- Magnetomotorna sila (MMS) je vremenski konstantna i zavisi od jacinje magnetskoga polja permanentnog magneta.

$$\Phi = N \frac{MMF}{R_m}$$

- Reluktancija magnetskoga kola zavisi o iznosu vazdušnog procjeka između točka i polnoga nastavka.
- Kada je zub nazubljenog točka blizu polnoga nastavka, reluktasa je minimalna, a potom raste kada se zub udaljuje.

$$\Phi(\theta) \approx a + b \cos(m\theta)$$



◆ Indukovani napon je
$$u_{in} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\Phi}{d\theta} \omega$$

◆ Kako je
$$\frac{d\Phi}{d\theta} = -bm \sin m\theta$$
 može se pisati

$$u_{in} = bm\omega \sin(m\omega t)$$
 gdje su:

$$U_m = bm\omega$$
 -amplituda indukovanog napona

$$f = \frac{m\omega}{2\pi}$$
 -frekvencija indukovanog napona

- I amplituda i frekvencija proporcionalne su ugaonoj brzini točka.
- U principu se ω da odrediti iz amplitude i frekvencije.
- Preferira se određivanje ω iz frekvencije.
- *Npr.* Ovaj princip mjerenja brzine koristi se u turbinskim mjernim elementima protoka.