

SENZORI I MJERNI PRETVARAČI



Što je automatika danas?

Automatsko upravljanje
+
(Procesno) računarstvo
+
Komunikacione tehnologije

Sinergija automatike (Control), računarstva
(Computing) i komunikacija (Communication): C3
složeni međusobno povezani sistem



AUTOMATIKA

U sistemima automatskog upravljanja

- ◆ Senzori predstavljaju "oči"
- ◆ Aktuatori su "mišići"
- ◆ Komunikacijski kanali su "živci"
- ◆ Regulatori su "mozak"

Teorija automatskog upravljanja osnova je za kvalitetan rad tehničkih sistema!

U tehničkom sistemu koordinaciju senzora i aktuatora obavlja algoritam upravljanja (regulator). On predstavlja izraz znanja automatičara o teoriji upravljanja

U algoritmu upravljanja je stoga srž automatike!

Better Sensors

Provide better *Vision*



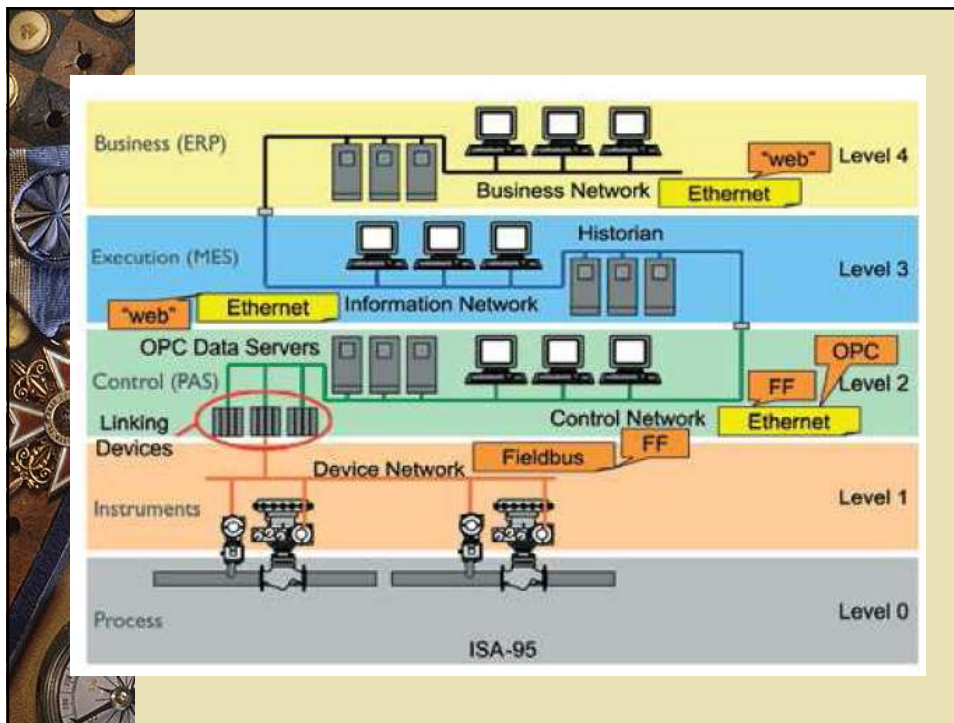
◆ **Better Actuators**
Provide more *Muscle*



Better Control

Provides more finesse by combining *sensors* and *actuators* in more intelligent ways





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 nepotouno, 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
GRADSKE 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

Pojmovi

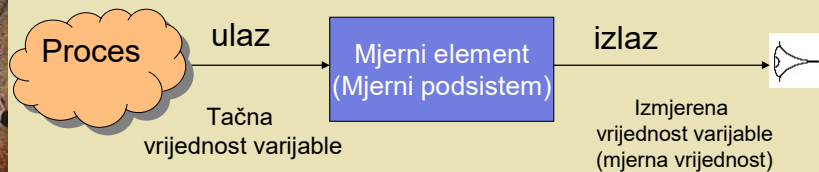
Pretvarači (*Transducers, Umformer*) => Pretvaraju jednu formu energije u drugu
 Osjetnici (*sensors, Messgeber*) => Pretvaraju neku fizičku veličinu u električnu
 Pokretački el. (*Actuators Stellglieder*) => Koristeći neku od formi energije obavljaju rad

binarni i analogni instrumenti se tretiraju odvojeno.

Industrijski uslovi

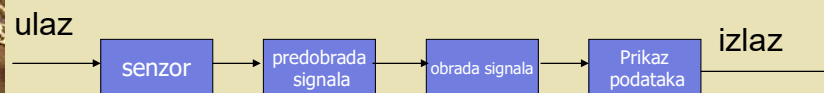
- temperaturni opseg
 - komercijalni: (0°C do +70°C)
 - industrijski (-40°C..+85°C)
 - prošireni industrijski(-40°C..+125°C)
 - vojni (-55°C..+125°C)
- mehanička otpornost (udar i vibracije) EN 60068
- zaštićeni protiv Elektro-Magnetskih (EM)-smetnji EN 55022, EN55024)
- ponekad zaštićeni od NEMP (Nuclear 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

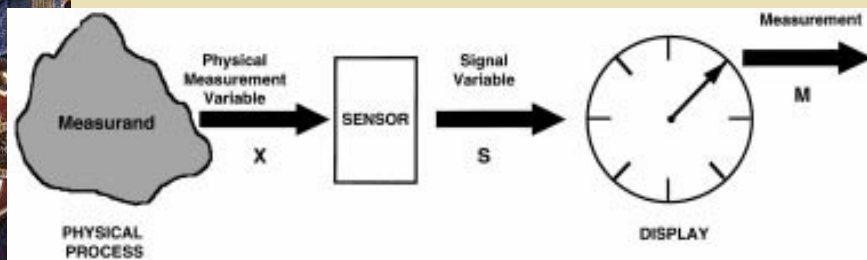


Struktura mjernog elementa (mjernog podsistema)

Mjerni element sastoji se od tipično 4 elementa

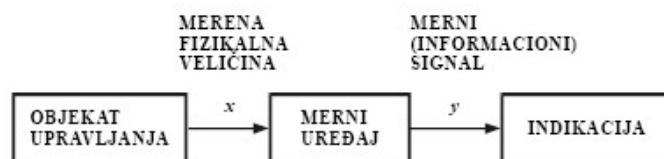


- ♦ Mjerni uređaji u upravljanju primjenjuju se na tri funkcionalno različita načina.
- ♦ **Prvi način** podrazumijeva primjenu specifičnih instrumenata za mjerenje fizičkih veličina sa ciljem utvrđivanja njihovih vrijednosti u standardnim jedinicama. Ovaj način, zapravo, određuje uobičajenu primjenu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



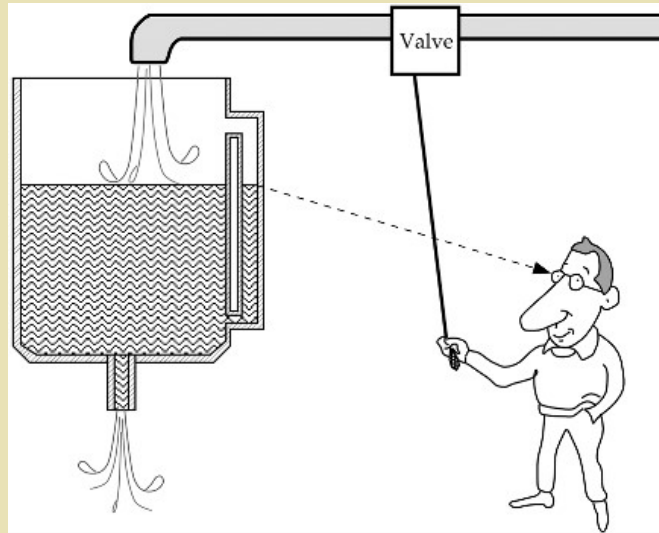
mjerenje fizičkih veličina

Drugi način je primjena mjernih uređaja u funkciji nadgledanja (monitoringa). Instrumenti sa takvom funkcijom (slika 1.3) daju informaciju koja čovjeku-operatoru omogućava da preduzme odgovarajuću upravljačku akciju.

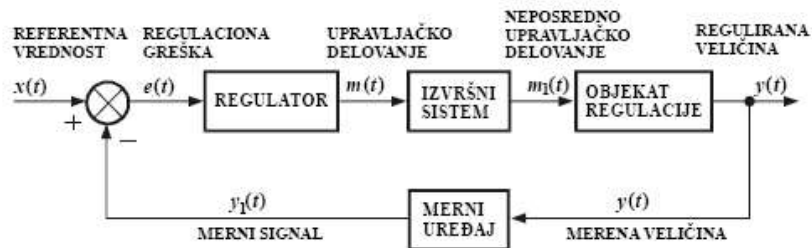


Slika 1.3. Merni uređaj sa funkcijom monitoringa

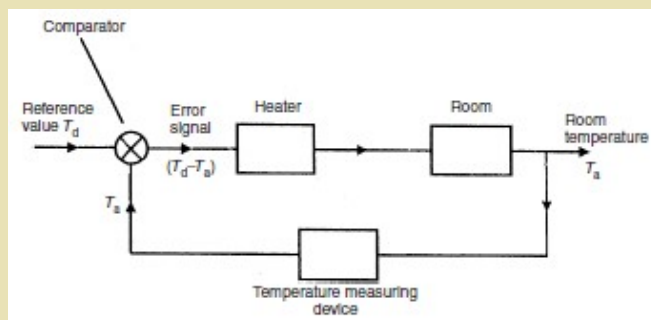
Primjena mjernih uređaja u funkciji nadgledanja (monitoringa).



Treći način odnosi se na primjenu mernih uređaja koji su sastavni dio sistema automatskog upravljanja. Struktura sistema automatskog upravljanja može biti različita. Na slici 1.4 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 zadanom (referentnom) vrijednošću $x(t)$. Mjerni uređaj mjeri trenutnu vrednost regulirane veličine $y(t)$, a rezultat u formi mjernog signala $y_1(t)$ dolazi na komparator, gde se poredi sa referentnom vrijednošću. 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 $e(t) \rightarrow 0$.



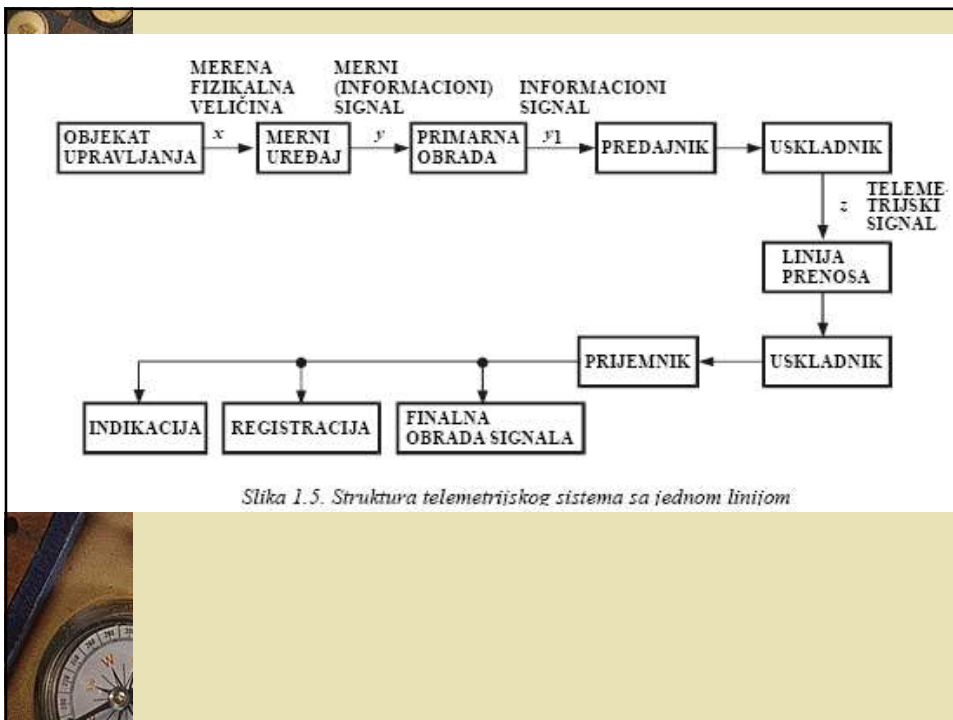
Slika 1.4. Strukturna blok-šema sistema automatske regulacije sa negativnom povratnom spregom



Kvalitet upravljanja principijelno zavisi od karakteristika mjernog uređaja u povratnoj grani. To znači da tačnost i rezolucija regulisanja procesne varijable nikad ne mogu biti veći od tačnosti i rezolucije upotrebljenog mjernog uređaja. Za ovako strukturirane sisteme automatskog upravljanja u cjelosti važi konstatacija da bez mjerenja nema ni upravljanja.



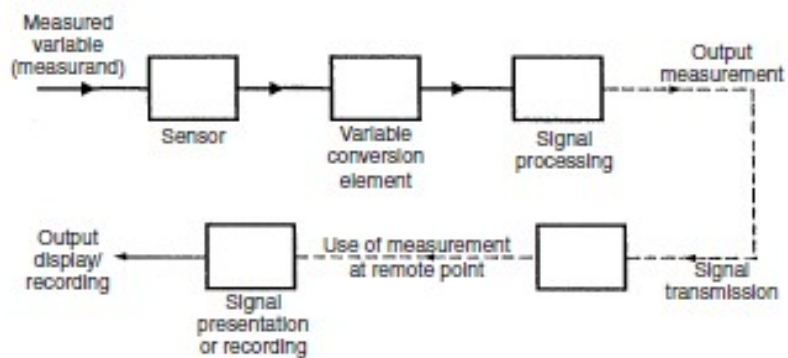
Digitalna obrada informacija nalazi sve veću primjenu u raznim oblastima nauke i tehnike, a naročito u informaciono-mjernoj tehnici. Razlog je, u prvom redu, u brzini djelovanja digitalnih mjernih uređaja, koji se grade na bazi integralnih kola velikog ili srednjeg stepena integracije. Zahvaljujući tome 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).



Slika 1.5. Struktura telemetrijskog sistema sa jednom linijom



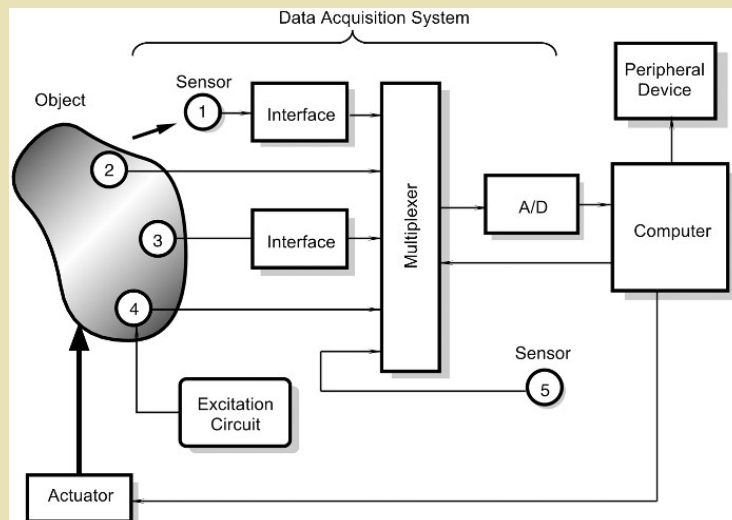
TELEMETRIJSKI SISTEM



Informacioni signal y kao rezultat mjerenja fizičke veličine x najčešće nije pogodan za prenos na daljinu, pa ga je potrebno u predajniku prilagoditi tom zahtjevu, tako da se dobije telemetrijski signal z .

Na prijemnoj strani telemetrijskog sistema prijemnik prihvata takav signal i pretvara ga u formu pogodnu za indikaciju, registraciju ili obradu u računaru. Podjela na primarnu i završnu (sekundarnu) obradu signala je uslovna, ali se može reći da se primarna obrada bazira na manjem, a završna na većem obimu sračunavanja.

Positions of the sensors in a data acquisition system



Senzor

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

Primjeri:

Termopar; napon termopara (mV) zavisi od temperature;

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

Elementi za kondicioniranje signala

izlaz iz senzora pretvara u oblik pogodan za dalju obradu (obično jednosmjerni napon ili 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

Element za obradu signala

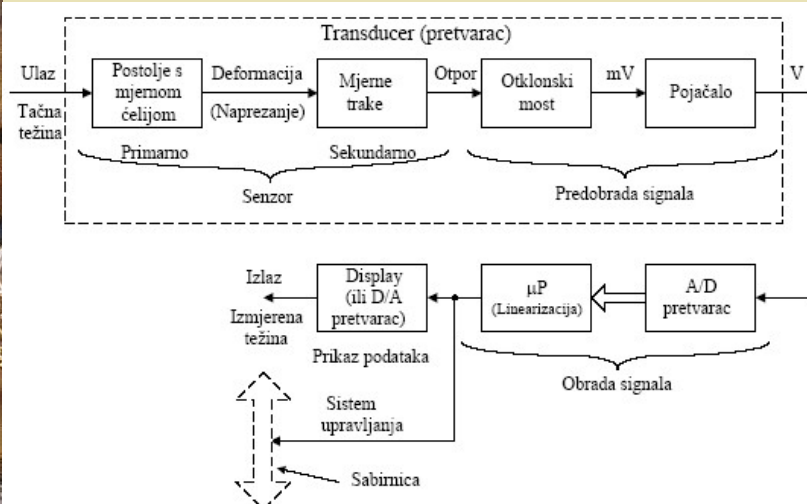
izlaz iz elementa za predobradu pretvara u oblik pogodan za prikaz ili dalje korišćenje

Primjeri:

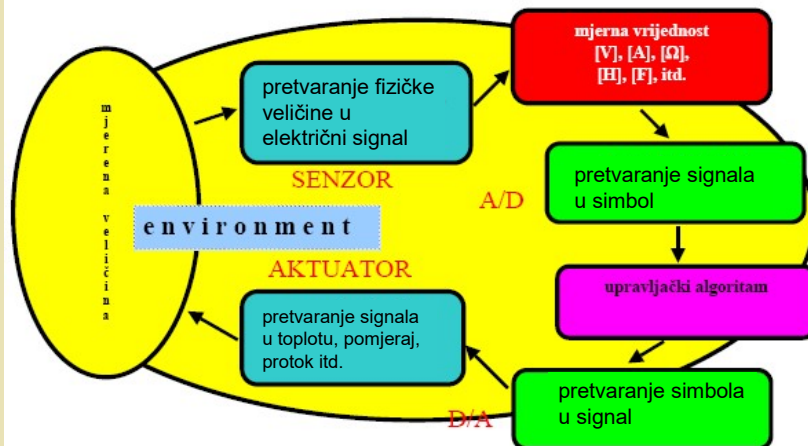
- A/D pretvarači za pretvaranje napona u digitalni oblik za ulaz u računar
- mikroprocesor koji izračunava mjernu vrijednost na bazi ulaznih digitalnih podataka (npr. za računanje ukupne mase gasa na bazi protoka i gustine, korekcija nelinearnih senzora)



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
Električki, 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 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



Konstrukcija i proizvodnja senzora

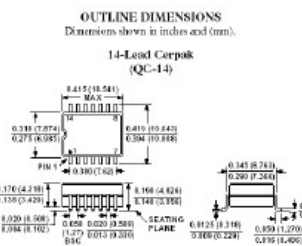
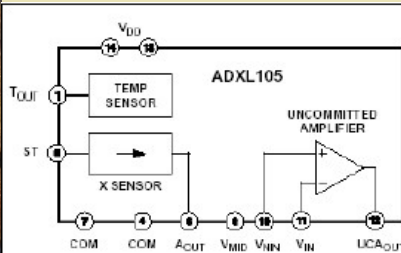
Konstrukcija i proizvodnja senzora se moraju spregnuto posmatrati. U proizvodnji senzora važnu ulogu imaju materijali:

- 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)

Primjer mikrosenzora: Mikroakcelerometar Analog Devices ADXL105





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 promenama 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

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.

- **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 $I_{\max} - I_{\min} = 150^\circ\text{C}$

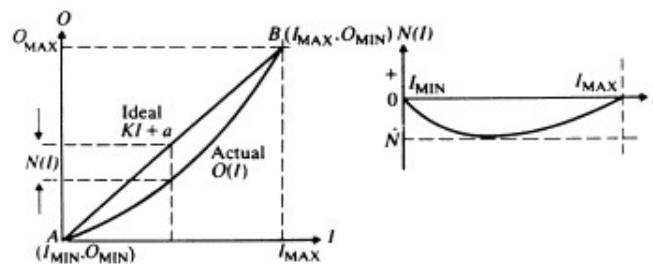
$O_{\max} - O_{\min} = 6 \text{ mV}$

Linearna statička karakteristika

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

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

Nelinearnost



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

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

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

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



Osjetljivost odnos promjene O s obzirom na promjenu I

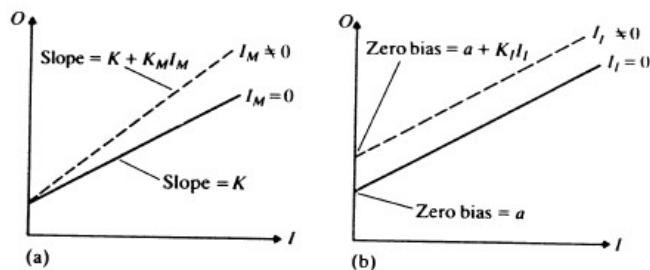
$$\frac{dO}{dI} = K + \frac{dN}{dI}$$

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.

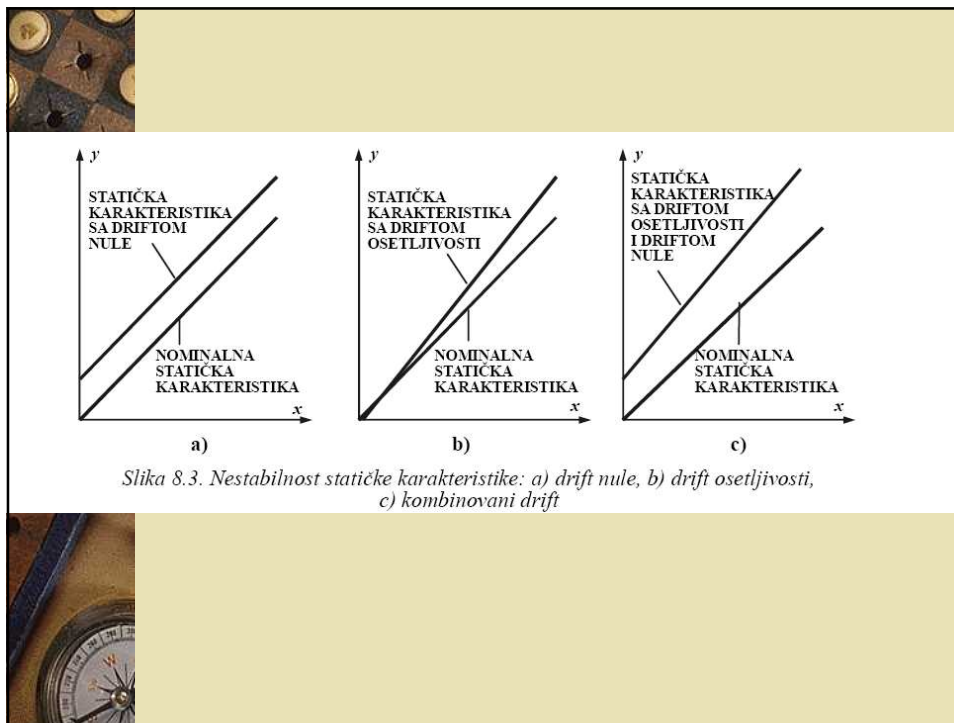
Ako jednačina (*) vazi za standardne uslove neće važiti za izmijenjene uslove. Potrebno je izvršiti njenu modifikaciju kako bi se te promjene uzele u obzir.

Postoje dva osnovna tipa ambijentalnog uticaja
 modifikovani ulaz I_M prouzrokuje linearnu promjenu osjetljivosti elemenata
 interferirajući ulaz I_i



a) efekt modificirajućeg ulaza b) efekt interferirajućeg ulaza

$$O = KI + a + N(I) \xrightarrow[\begin{matrix} KI \rightarrow (K + K_M I_M)I \\ a \rightarrow (a + K_I I_i) \end{matrix}]{\text{}} O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_i$$



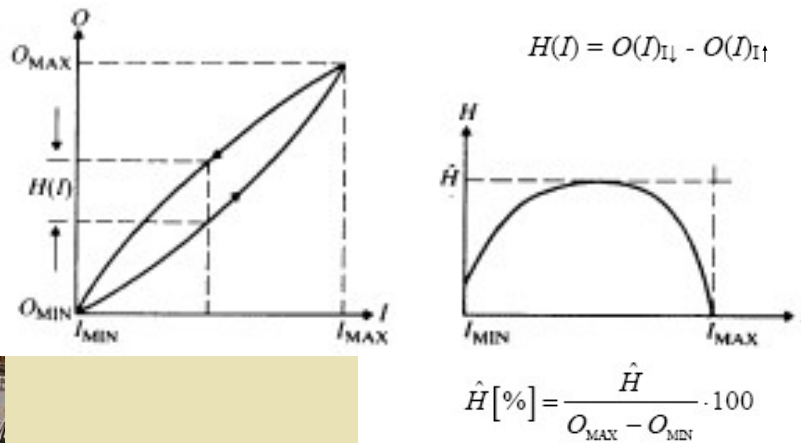
Slika 8.3. Nestabilnost statičke karakteristike: a) drift nule, b) drift osetljivosti, c) kombinovani drift

- ♦ **Osjetljivost na poremećaje** određuje uticaj vanjskih delovanja, prije svega temperature, na statičku karakteristiku senzora. Ovi uticaji najčešće se izražavaju kao drift nule i drift osetljivosti.
- ♦ 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 osetljivosti određuje vrijednost sa kojom se osjetljivost senzora mijenja u zavisnosti od vanjskih uticaja. Efekat drifta osetljivosti odražava se kao promjena nagiba statičke karakteristike (slika 8.3b). Temperaturni drift osetljivosti izražava se kao odnos jedinica izlaza i jedinica ulaza na temperaturnom intervalu 1 °C.
- ♦ Drift nule i drift osetljivosti mogu delovati istovremeno, pa u tom slučaju statička karakteristika izgleda kao na slici 8.3c.

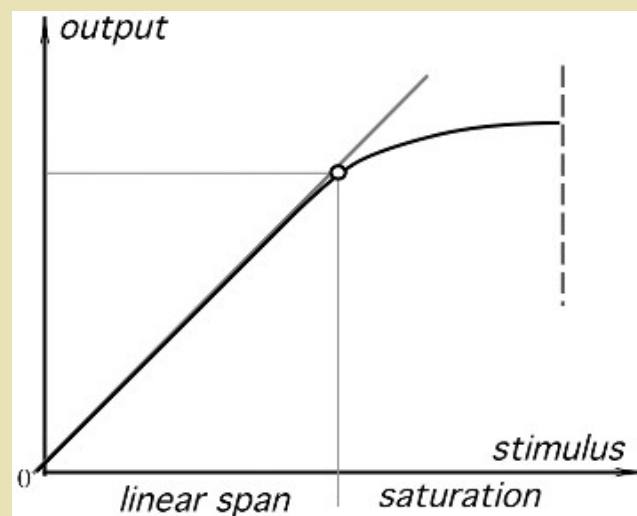


Histerezis

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



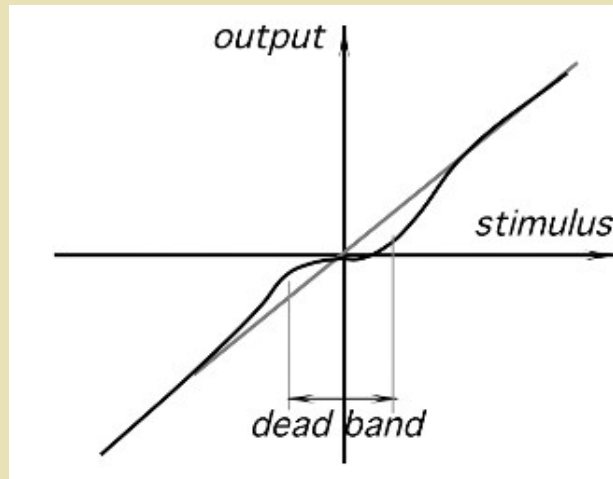
Zasićenje – granica opsega prelazak u nelinearnu karakteristiku





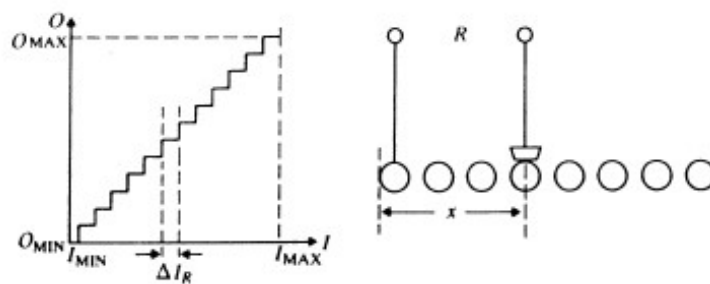
Zona neosjetljivosti (Dead-Band)

MRTVA ZONA- neosjetljivost senzora na specifični opseg promjene ulaznog signala



Rezolucija namanja promjena ulaza koja izaziva promjenu izlaza

izlaz se mijenja skokovito pri kontinualnoj promjeni ulaza



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

žičani potencijometar , A/D konverzija



Habanje i staranje

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

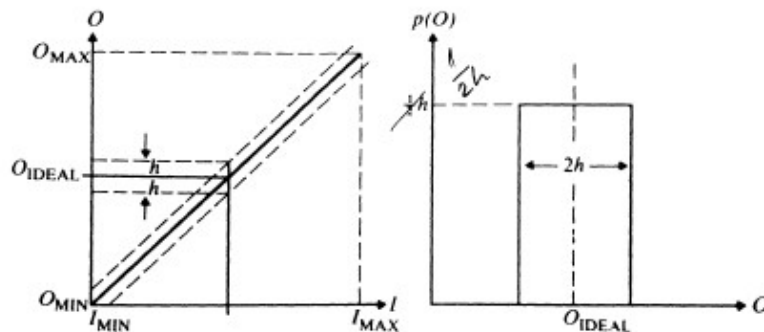
PR.: promjena konstante krutosti opruge, promjena konstanti u termoparu (zbog hemijskih promjena u metalu termopara).



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*).

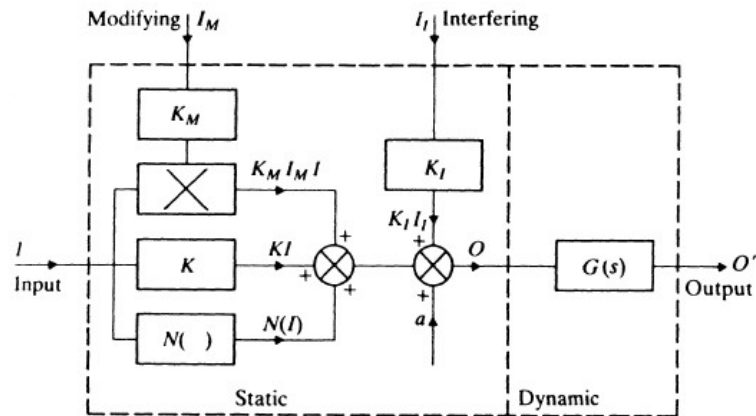
Dok tačnost definiše odstupanje od idealne statičke karakteristike, mjerna nesigurnost obuhvata sve sistemske i slučajne greške.

Uopšteni model mjernog elementa

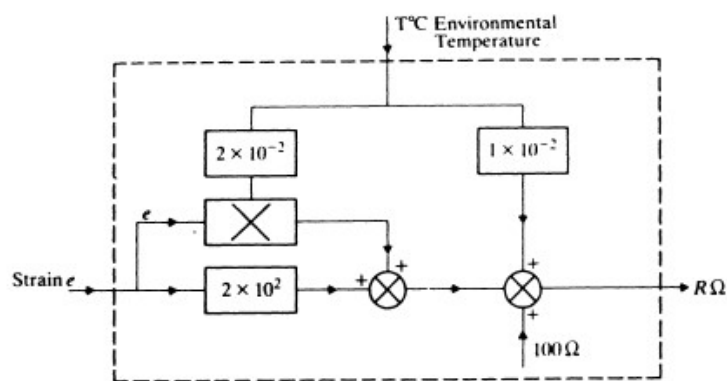
Ako efekti histerezisa i rezolucije nijesu prisutni u elementu, ali su prisutni ambijentalni efekti i drugi efekti nelinearnosti, izlaz O u stacionarnom stanju može se opisati pomoću

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

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



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

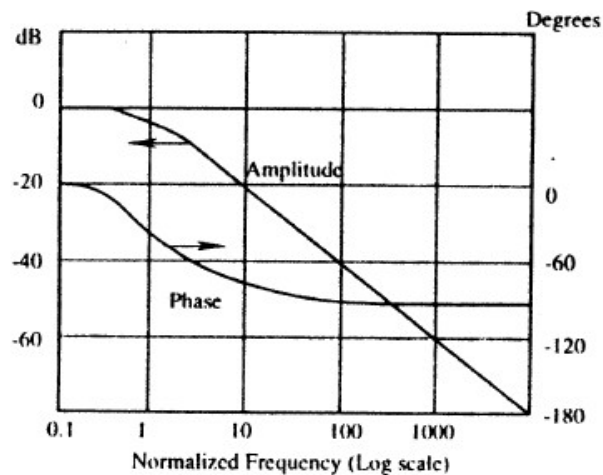


Dinamičke karakteristike

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.

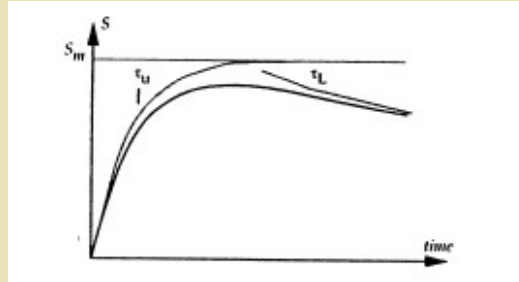


Gornja granična frekvencija (upper cutoff frequency) definisana je kao frekvencija na kojoj normirana amplitudna frekvencijska karakteristika mjernog elementa poprimi vrijednost -3 dB.



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:

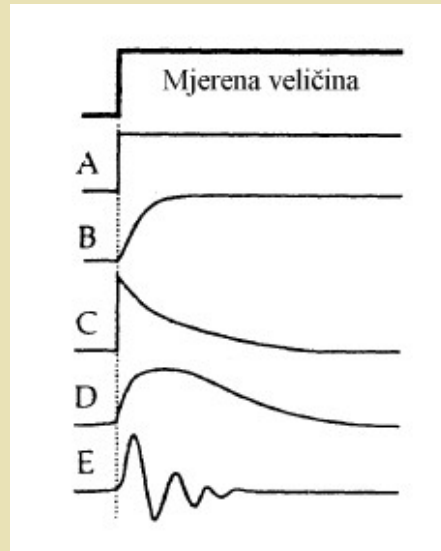
$$f_c \approx \frac{0.159}{\tau}$$

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:

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



Tipični odzivi senzora na skokovitu 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.

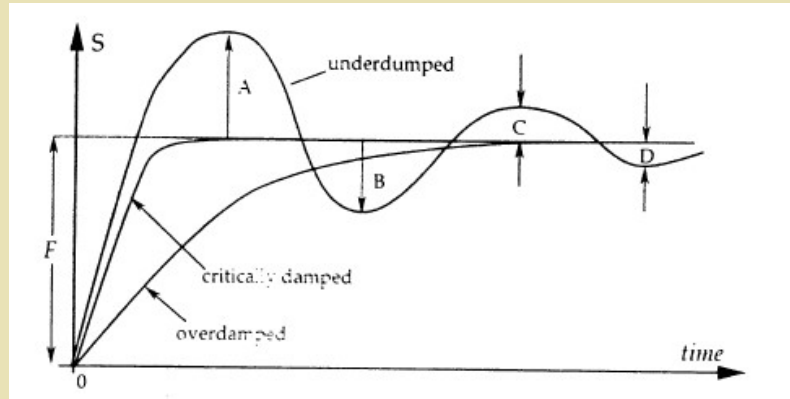
Radna frekvencija senzora mora biti ograničena; ispod 60% rezonantne frekvencije.

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



Prigušenje (Damping)

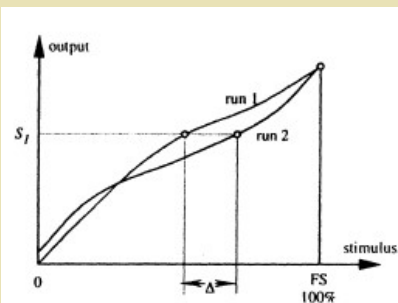
Progresivno prigušenje oscilacija kod senzora prijenosne funkcije drugog ili višeg reda.



Statističke karakteristike

Ponovljivost mjerenja – preciznost senzora

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

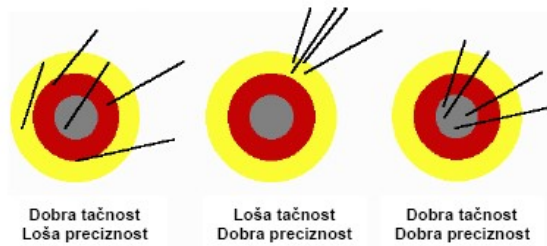


- Uz konstantni ulaz mjernoga člana izlaz s vremenom varira. Nije ostvarena ponovljivost.
- Greška ponovljivosti definiše se kao:

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



- 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:



Mjerna nesigurnost

- Kako je već rečeno, mjerna vrijednost je 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 činioči, ali se mogu grupisati u dva skupa:
A: činioči koji se procjenjuju statističkim metodama;
B: činioči 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 električni 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.



2.1. Otpornički senzorski elementi

2.1.1. Otpornički elementi za mjerenje temperature Otpornički termometri (RTD – Resistance Thermometer Devices)

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

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

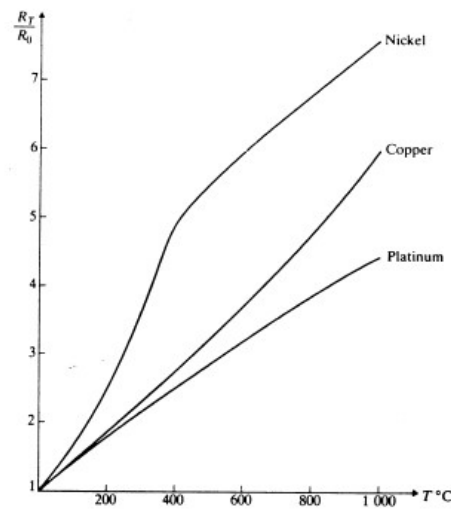
- ◆ $R_0[\Omega]$ – otpor pri referentnoj temperaturi $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ili $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ → tada se u gornjem izrazu umjesto T koristi $\Delta T = T - T_0$.
- ◆ $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ - temperaturni koeficijenti električnoga otpora metala



- Obično vrijedi aproksimacija:

$$R_T[\Omega] \approx R_0 (1 + \alpha T) \text{ - zanemaren nelinearni član}$$

- 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.

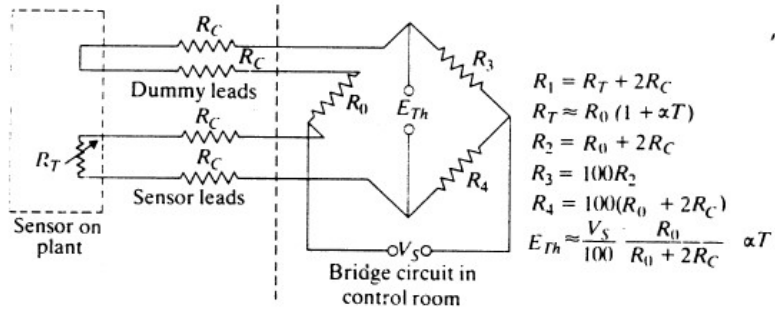


Karakteristike RTD-ova

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

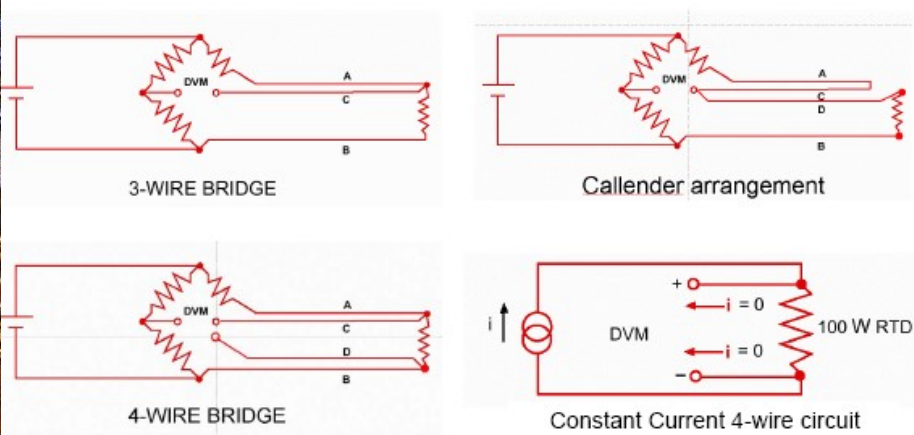


Otpornički senzor temperature u mosnom spoju



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, nikel, kobalt, bakar, željezo, uran.

Npr.

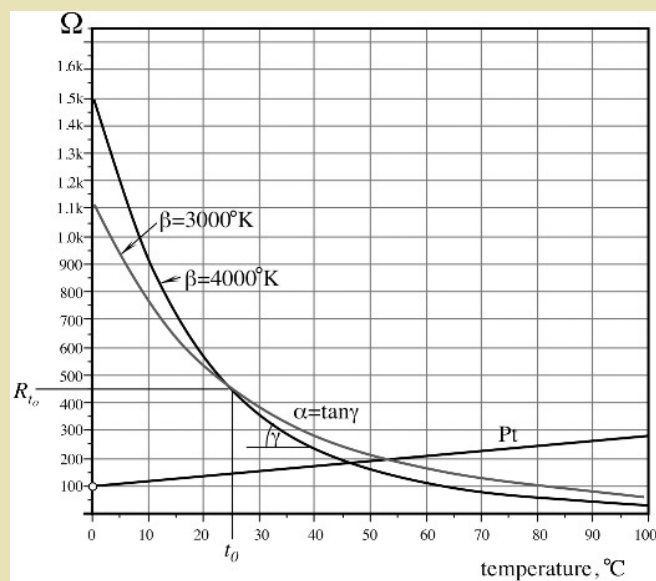
- ♦ vrijednost otpora opada s porastom temperature (imaju NTC);
- ♦ mala vremenska konstanta;
- ♦ veća osjetljivost od otporničkih termometara;
- ♦ osjetljivost na strujno opterećenje;
- ♦ postoje termistori i s PTC.

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

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



Termistori: karakteristika



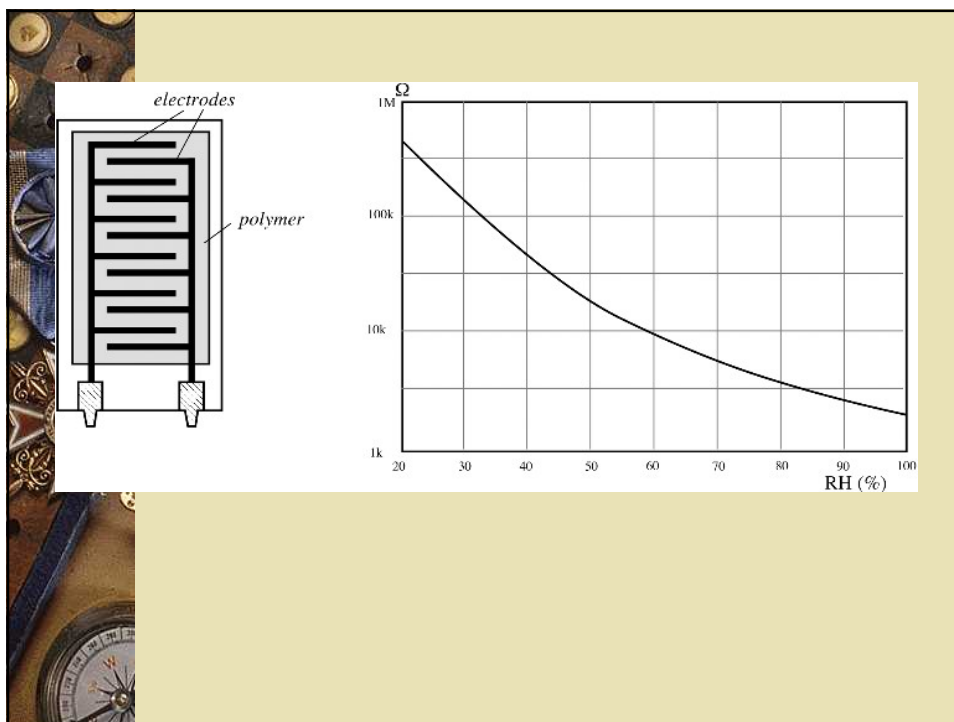
2.1.2. Metalni i poluprovodnički otpornički senzori deformacije

- Deformacija može biti mjera mehaničkoga napreznja (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 napreznje:

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





- ♦ 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:

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

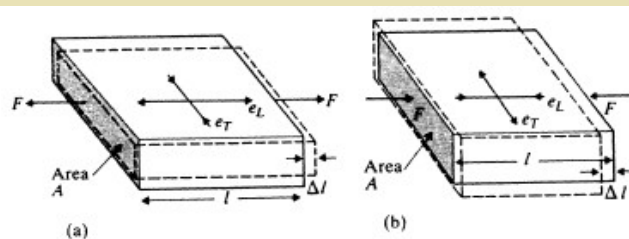
- Ovdje se radi o uzdužnoj (longitudinalnoj) deformaciji (deformaciji duž smjera naprezanja).
- Odnos između naprezanja i deformacije naziva se modul elastičnosti:

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

Hukov zakon



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



- 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:

$$\varepsilon_T = -\nu\varepsilon_L$$

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 :

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

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

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

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 $\epsilon = 1 \text{ ppm}$

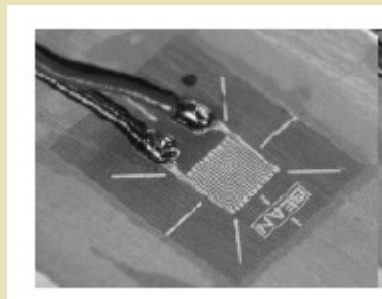
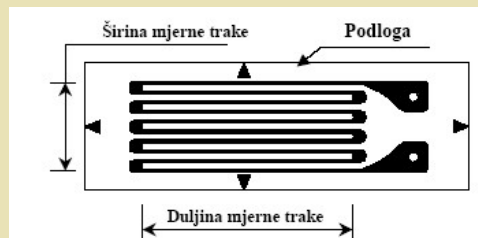
$$\Delta R = R_0 G \epsilon_a = (120 \Omega)(2)(1 \cdot 10^{-6}) = 0.00024 \Omega$$

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

- 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.

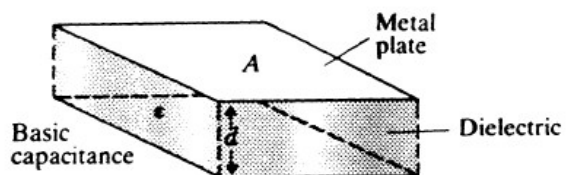
Za P: $G \approx 100$ do 175 ; Za N: $G \approx -100$ do -140

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



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

2.2. Kapacitivni senzorski element



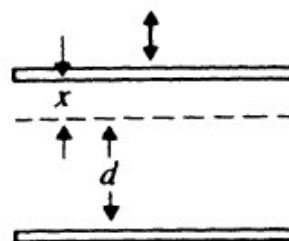
$$C = \frac{\epsilon_o \epsilon A}{d} \rightarrow \text{kapacitet pločastoga kondenzatora } C = f(\epsilon, A, d)$$

- ♦ 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 senzorski element za mjerenje pomaka:

a) promjenljivo rastojanje

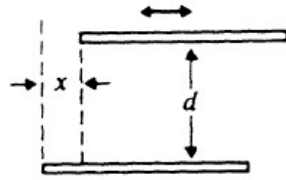
$$C = \frac{\epsilon_o \epsilon A}{d + x}$$



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



b) promjenljiva površina

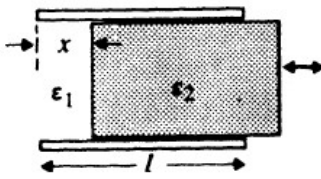


$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d} (A - \Delta A);$$

$$\Delta A = wx;$$

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

c) promjenljivi dielektrik

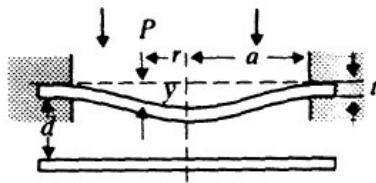


$$\epsilon_2 > \epsilon_1; C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{d} A_1 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{d} A_2;$$

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

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

d) kapacitivni senzor pritiska



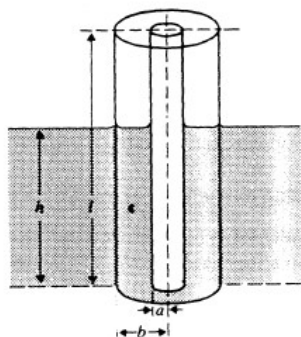
- ◆ Jedna ploča je fiksirana, druga ploča je izvedena kao kružna dijafragma.
- ◆ Dijafragma je elastični senzorski element koji se podiže (ugiba) pod utjecajem pritiska.

- ◆ 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.

e) kapacitivni senzor nivoa



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

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

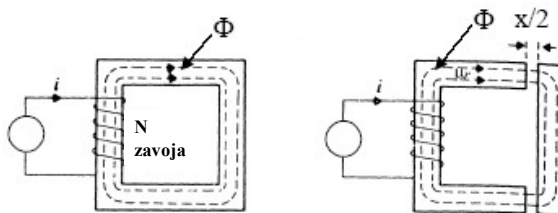
$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} [l + (\epsilon - 1)h]$$

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 dielektrične gubitke);
- ♦ kapaciteti kabla koji spajaju senzor sa sklopom za obradu.

2.3. Induktivni senzorski elementi

- Osnov: koncept magnetskoga kola



- Magnetomotorna sila= magnetski fluks • reluktansa (magnetski otpor):

$$F_m = \Phi R_m$$

- Električno kolo:

$$U = IR$$

- Magnetomotorna sila: $F_m = iN$; gdje je N - broj zavoja namota
magnetomotorna sila - amper navoj



Amperov zakon

- Cirkulacija se dobije iz integrala preko jačine magnetskog polja H duž zatvorene putanje:

$$iN = \oint H_x dx$$

- Za magnetsko kolo na slici je:

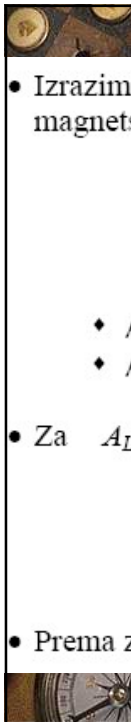
$$iN = H_L x + H_M x_M$$

gdje je:

H_L – jačina magnetskoga polja u vazdušnom procjepu:

H_M – jačina magnetskoga polja u željezu (magnetskome materijalu)

- Uz pretpostavku zanemarenoga rasipanja, fluks Φ u vazdušnom procjepu jednak je fluksu u magnetskom materijalu.



- Izrazimo cirkulaciju pomoću fluksa. Za to nam trebaju izrazi za magnetsku indukciju

$$B_L = \frac{\Phi}{A_L} = \mu_0 H_L; \quad B_M = \frac{\Phi}{A_M} = \mu_0 \mu_r H_M;$$

- ♦ $\mu_0 = 4\pi$ [nH/cm] - apsolutna permeabilnost;
- ♦ $\mu_r > 1$ - relativna permeabilnost magnetskoga materijala.

- Za $A_L = A_M = A$ slijedi

$$iN = \frac{\Phi}{\mu_0 A} \left(x + \frac{x_M}{\mu_r} \right) \rightarrow \Phi = iN \mu_0 A \frac{1}{\left(x + \frac{x_M}{\mu_r} \right)}$$

- Prema zakonu indukcije slijedi izraz za indukovani napon:

$$u_{ind} = -L \frac{di}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad L = W \frac{d\Phi}{di} \quad \left(\Phi = iW\mu_o A \frac{1}{\left(x + \frac{x_M}{\mu_r}\right)} \right)$$

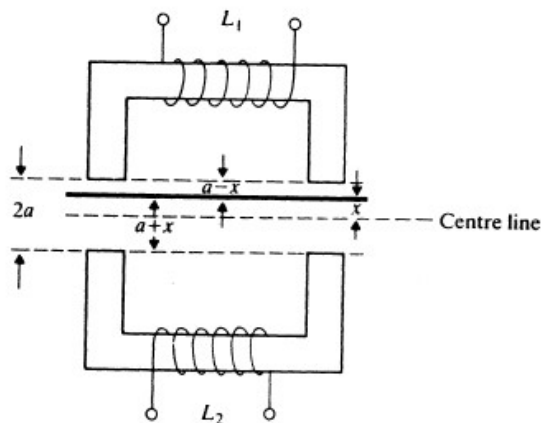
- Dakle:

$$L = \frac{W^2 \mu_o A}{x + \frac{x_M}{\mu_r}} = W^2 \mu_o \mu_r \frac{A}{x_M} \left(\frac{1}{1 + \mu_r \frac{x}{x_M}} \right)$$

- Uz $L(x=0) = L_0$ slijedi:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1}{1 + \mu_r \frac{x}{x_M}} \rightarrow \text{nelinearna zavisnost!}$$

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



Dva induktivna senzora u “push-pull” spoju.

i njihovim povezivanjem u mosni spoj .

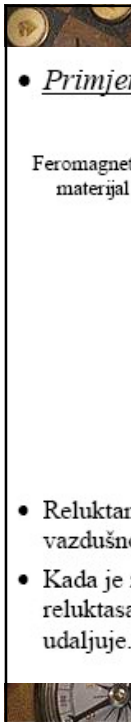


2.4. Elektromagnetski senzorski elementi

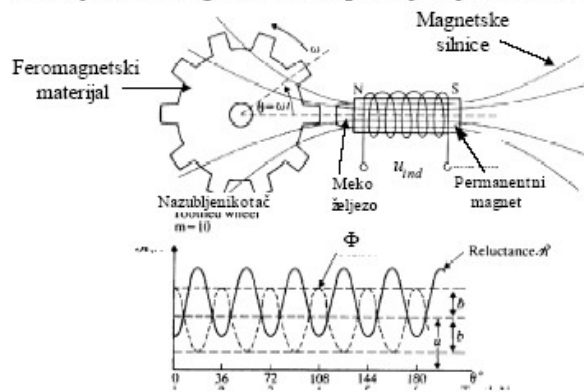
- Koriste se npr. za mjerenje linearne ili ugaone brzine. • Temelje se na zakonu indukcije:

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

- U nekom elektromagnetskom elementu mijenjaju se fluks Φ , uslijed pomjeranja, kojega treba izmjeriti.
- Dakle, indukovani napon zavisi od pomjeraja.



- 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.

$$\Phi = \frac{MMS}{R_m}$$

$$\Phi \approx a + b \cos m\Theta$$

- 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.




- Indukovani napon je:
$$u_{ind} = -W \frac{d\Phi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{d\Theta} \frac{d\Theta}{dt} = -W \frac{d\Phi}{d\Theta} \omega$$
- Budući je $\frac{d\Phi}{d\Theta} = -bm \sin m\Theta$ može se pisati:
$$u_{ind} = +Wbm\omega \sin m\omega t$$

gdje je:


$U_m = Wbm\omega$ - amplituda indukovanoga napona;

$f = \frac{m\omega}{2\pi}$ - frekvencija indukovanoga 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.



ZAKLJUČAK



- ♦ 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.