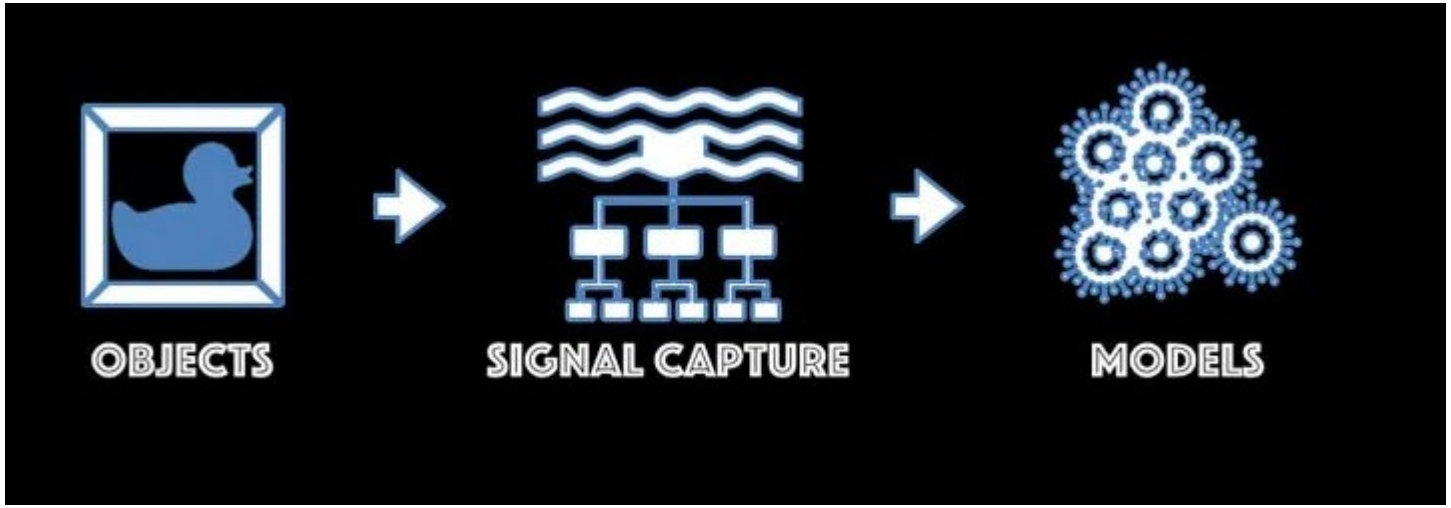
Senzori

Akvizicija i obrada podataka

Predavanje 2



Senzori i pretvarači

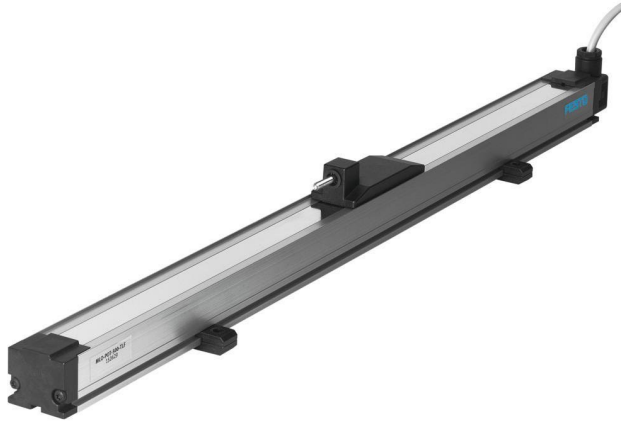
- Senzor je element mernog sistema koji reaguje na fizičku veličinu ili promenu u okruženju.
- Pretvarač je uređaj ili element koji jednu fizičku veličinu ili oblik energije pretvara u drugi, najčešće u signal pogodan za merenje, obradu ili prenos.
- Primer: temperaturni senzor registruje temperaturu, dok pretvarač može da je predstavi kao električni napon ili promenu otpora.

















Temperaturni senzori

- Mere temperaturu. Primeri: termopar, Pt100, termistor i infracrveni senzor.

Senzori pritiska

- Mere pritisak gasova i tečnosti. Primeri: piezorezistivni i kapacitivni senzori.

Senzori položaja i pomeranja

- Mere položaj, rastojanje ili pomeranje. Primeri: enkoder, LVDT i induktivni senzor.

Senzori ubrzanja i vibracija

- Mere ubrzanje i oscilacije. Primeri: MEMS akcelerometar i piezoelektrični senzor.

Optički senzori

- Koriste svetlost za detekciju objekata, merenje rastojanja ili analizu površine.

Podela pretvarača

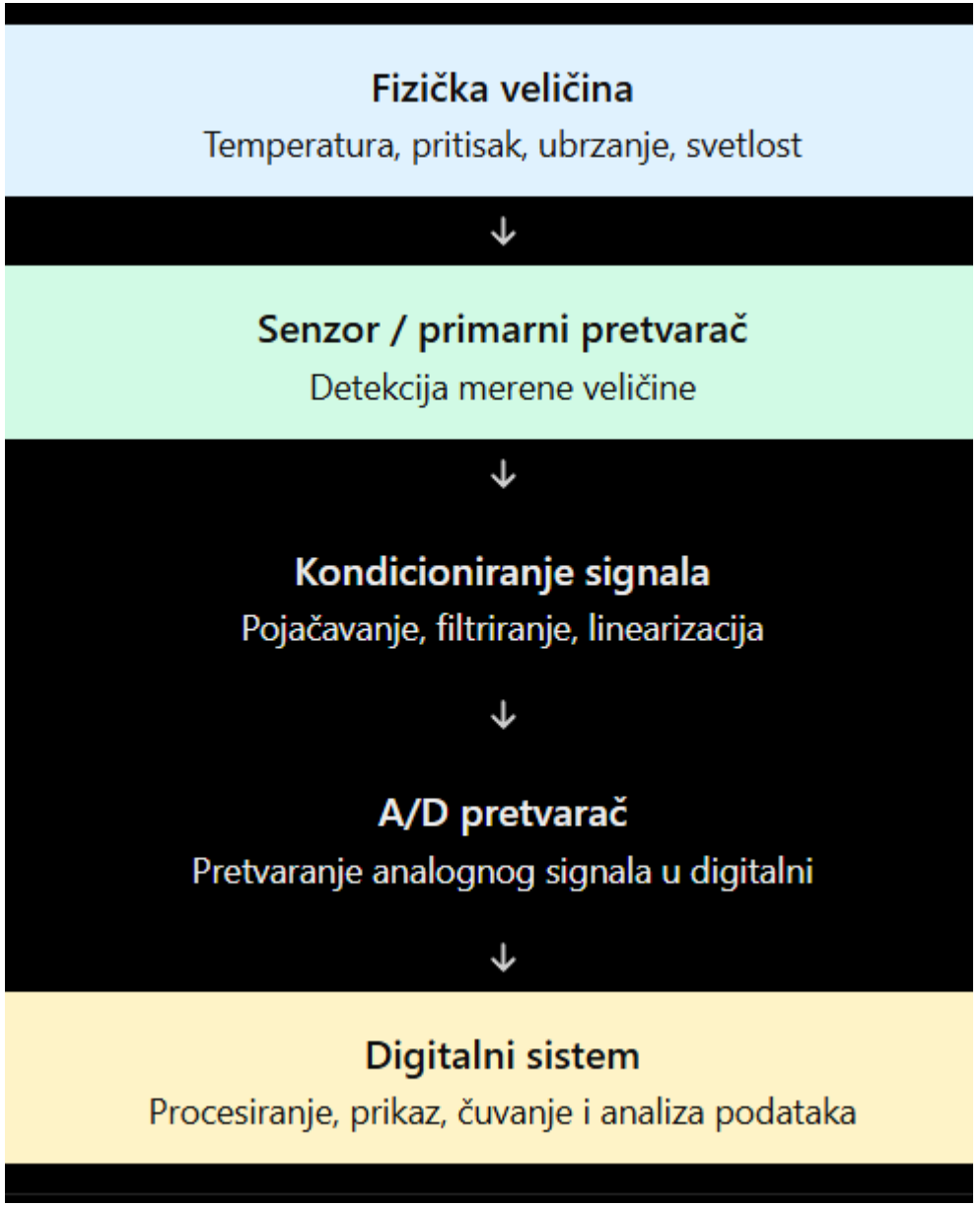
Pretvarači se mogu klasifikovati prema principu rada i veličini koja se pretvara.

Važno je razlikovati senzor od pretvarača: u praksi se pojmovi često preklapaju.

Na primer, termopar istovremeno predstavlja senzor temperature i pretvarač temperaturne razlike u električni napon.

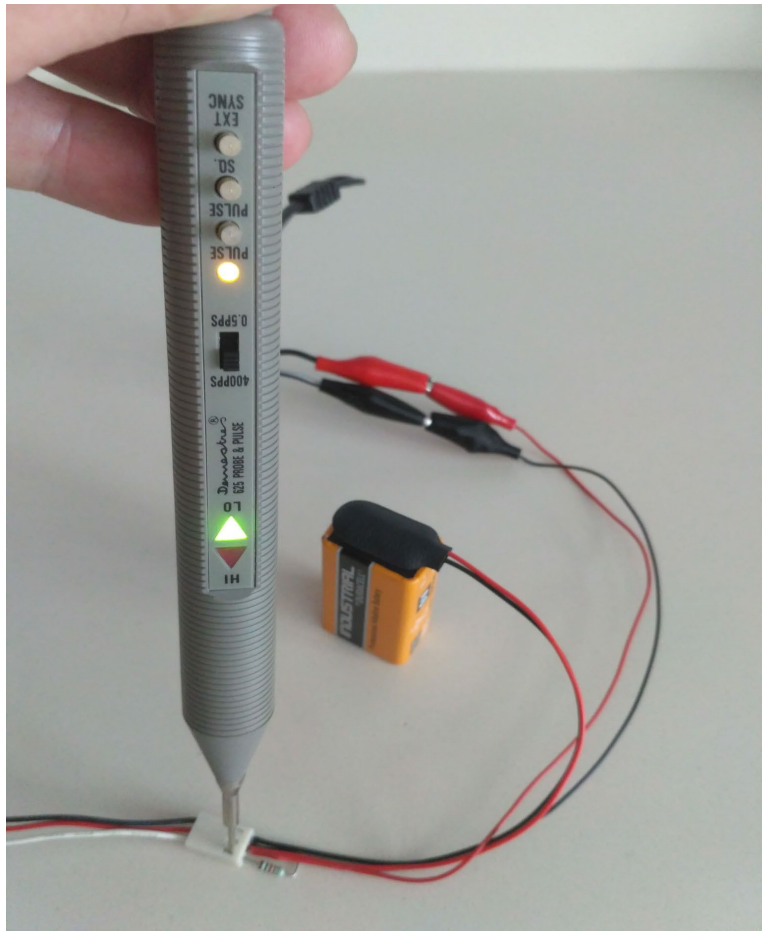
Vrsta pretvarača	Princip rada	Primer
Otpornički	Promena električnog otpora	Pt100, tenzometar
Induktivni	Promena induktivnosti	LVDT
Kapacitivni	Promena kapacitivnosti	Senzor nivoa
Piezoelektrični	Mehanička sila stvara električni naboj	Senzor vibracija
Termoelektrični	Temperaturna razlika stvara napon	Termopar
Fotoelektrični	Svetlost izaziva električni signal	Fotodioda

4. Od merene veličine do digitalne informacije



5.Osnovne karakteristike senzora

- ✓osetljivost,
- ✓selektivnost,
- ✓opseg,
- ✓rezolucija,
- ✓ofset,
- ✓linearnost,
- ✓šum i reverzibilnost.

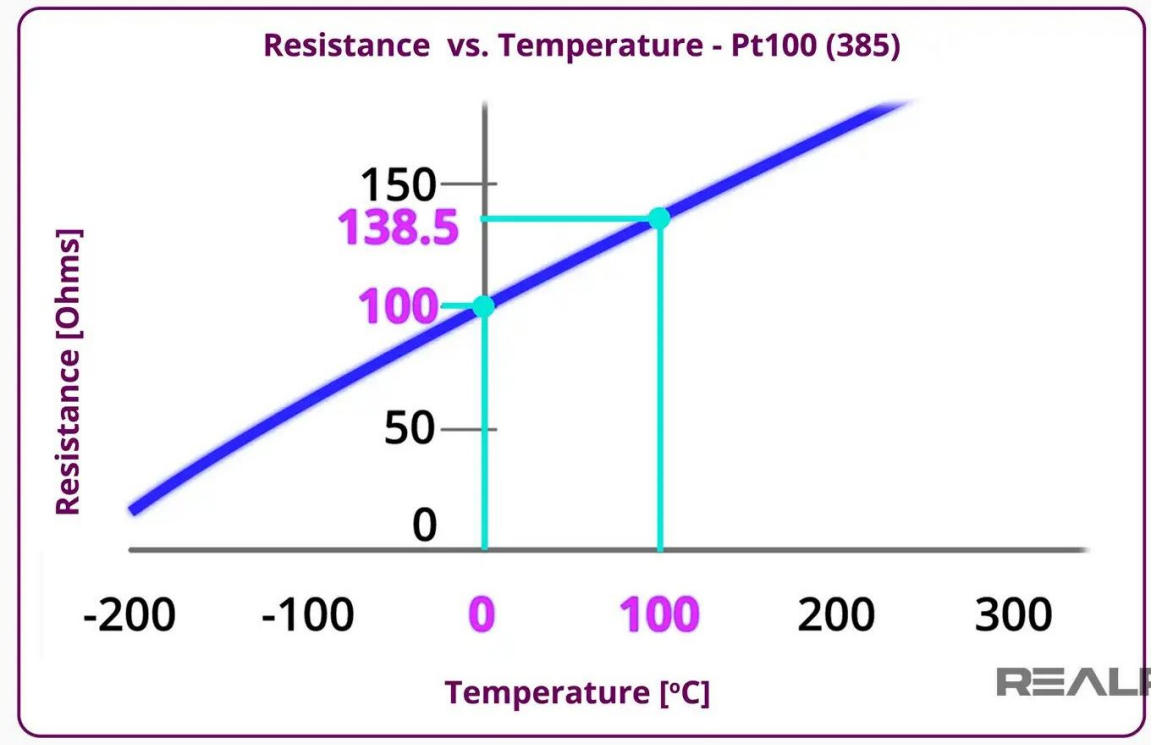


Osetljivost

Prvi izvod izlaznog signala po merenoj veličini.

Izražava se kao količnik odgovarajućih jedinica bez skraćivanja.

Ako je npr. reč o otpornom senzoru temperature, jedinica za osetljivost će biti Ω/K.

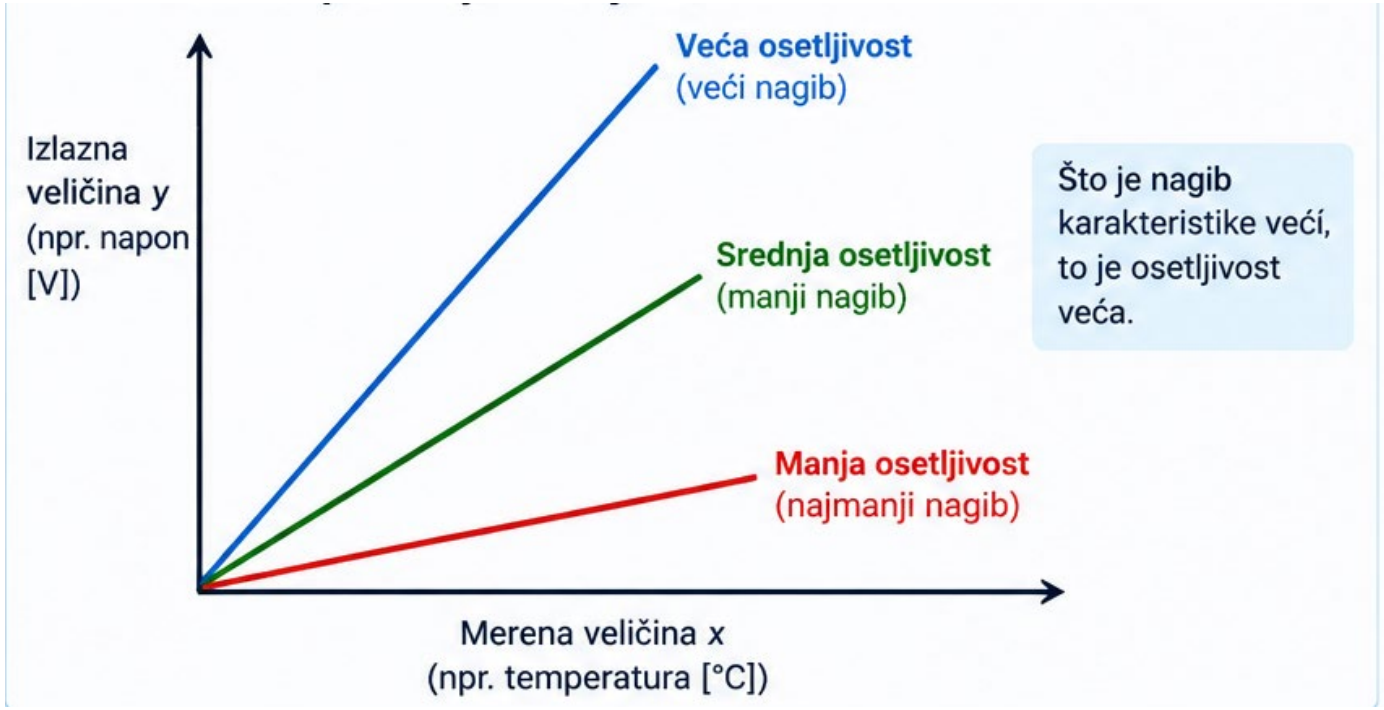


Osetljivost predstavlja prvi izvod izlaznog signala u odnosu na mernu veličinu:

$$S = \frac{dy}{dx}$$

S – osetljivost senzora
dy – promena izlazne veličine
dx – promena merene veličine

- x – merena veličina,
- y – izlazni signal senzora,
- S – osetljivost.



Kod Pt100 senzora izlazna veličina je električni otpor R, a merena veličina je temperatura T.

$$S=dR/dT$$

Jedinica je:

$$\Omega/T$$

Za Pt100, u blizini 0 °C, nominalni temperaturni koeficijent je približno:

$$\alpha= 0{,}00385K^{-1}$$

pa je približna osetljivost:

$$S=R_o\alpha =0{,}385\ \Omega /K^{-1}$$

- Povećanje temperature za 1 K izaziva približno povećanje otpora za 0,385 Ω u okolini 0 °C.
- Na primer, ako se temperatura promeni sa 20 °C na 21 °C, otpor Pt100 će se približno povećati za 0,385 Ω.
- Važno: osetljivost nije isto što i opseg merenja.
- Osetljivost govori koliko se izlaz promeni kada se merena veličina promeni za jednu jedinicu.

Selektivnost senzora

Pokazuje koliko je senzor osetljiv na neželjenu, uticajnu veličinu u odnosu na veličinu koju želimo da merimo.

$$K_s = S_u / S_m$$

gde je:

- (S_u) – osetljivost senzora na uticajnu (parazitnu) veličinu,
- (S_m) – osetljivost senzora na merenu veličinu.
- Selektivnost se često izražava u %, ‰ ili ppm.

Posmatrajmo senzor temperature koji treba da meri temperaturu, ali na njegov izlaz utiče i pritisak.

Ako je:

- osetljivost na temperaturu: S_T=0,5V/K
- osetljivost na pritisak: S_P=0,001 VPa

za promenu pritiska od 1 kPa dobijamo:

$$K_s=0,001/0,5=0,002$$

odnosno:

$$Ks=0,2\%$$

Tumačenje: senzor je 0,2% osetljiv na uticaj pritiska u odnosu na svoju osetljivost na temperaturu.

Opseg senzora

- područje vrednosti merene veličine u kojem senzor može pravilno da detektuje i meri promenu, bez zasićenja ili oštećenja.
- Merni opseg je određen najmanjom i najvećom vrednošću koju senzor može da meri:
  - Merni opseg = [Xmin, Xmax]
- Ako merena veličina izađe iz tog područja, senzor više ne može pouzdano da registruje njenu promenu, a kod prekoračenja dozvoljene granice može doći i do oštećenja senzora.

Pretpostavimo da temperaturni senzor ima deklarisani opseg:

−50 °C do +150 °C

To znači:

−50 °C – donja granica mernog opsega

+150 °C – gornja granica mernog opsega

Senzor pravilno meri temperature između −50 °C i +150 °C

- temperatura od +200 °C je izvan mernog opsega i senzor više nije garantovano tačan, a može doći i do oštećenja.

Važno je razlikovati opseg od raspona (span):

- Opseg: −50 °C do +150 °C
  Raspon: 150 − (−50) = 200 °C

- Opseg govori između kojih granica senzor meri, dok raspon predstavlja razliku između gornje i donje granice.

Rezolucija senzora

predstavlja sposobnost senzora da razlikuje male promene merene veličine.

Može se definisati na dva načina:

- Na izlaznoj strani – kao broj različitih vrednosti koje senzor može da proizvede.
- Na ulaznoj strani – kao najmanja promena merene veličine koju senzor može da detektuje kao promenu na svom izlazu.

- Rezolucija = najmanja promena koju senzor može da „primeti“.

Pretpostavimo da senzor temperature ima rezoluciju:

- 0,1 °C

Ako temperatura poraste sa:

- 25,0 °C → 25,1 °C

senzor može da registruje promenu.

Ali ako temperatura poraste samo:

- 25,0 °C → 25,05 °C

senzor tu promenu neće moći da prikaže kao novu vrednost ako mu je rezolucija 0,1 °C.

Primer sa A/D konvertorom

Kod digitalnih senzora rezolucija je često povezana sa brojem bitova A/D konvertora.

Na primer, 8-bitni A/D konvertor ima:

$2^8 = 256$ različitih nivoa

Ako je merni opseg 0–5 V, približna rezolucija je:

$5\ V / 256 \approx 0{,}0195\ V = 19{,}5\ mV$

Promena ulaznog napona manja od približno 19,5 mV ne može da proizvede novu digitalnu vrednost.

Važna razlika

- Rezolucija nije isto što i tačnost.
- Senzor može imati veoma visoku rezoluciju, na primer 0,01 °C, ali ako je loše kalibrisan, može sistematski pokazivati pogrešnu temperaturu.

Ofset senzora

Ofset je vrednost izlaznog signala senzora kada je merena veličina jednaka nuli.

Idealno je da za:

- $x = 0 \rightarrow y = 0$

Međutim, u stvarnom senzoru može postojati izlazni signal različit od nule:

- $x = 0 \rightarrow y = y_0$

Ta vrednost y_0 predstavlja ofset senzora.

Stvarni pritisak	Idealan izlaz	Izlaz sa ofsetom
0 bar	0,00 V	0,15 V
5 bar	2,50 V	2,65 V
10 bar	5,00 V	5,15 V

Kako se ofset može prikazati?

Na karakteristici senzora, ofset predstavlja presečnu tačku sa y-osom:

$$y = S \cdot x + y_0$$

gde je:

- y – izlaz senzora,
- x – merena veličina,
- S – osetljivost,
- y_0 – ofset.

Dakle, osetljivost određuje nagib karakteristike, dok ofset određuje koliko je cela karakteristika pomerena od idealne nulte tačke.

Jednostavno

- Ofset je „greška nule“ senzora – izlaz postoji i kada je merena veličina jednaka nuli.

Nelinearnost senzora

Nelinearnost predstavlja odstupanje stvarne karakteristike senzora od idealne linearne karakteristike.

Kod idealnog linearnog senzora, jednake promene merene veličine izazivaju jednake promene izlaznog signala.

Kod stvarnog senzora karakteristika može odstupati od prave linije.

Nelinearnost se najčešće izražava kao odnos najvećeg odstupanja od referentne prave i ukupnog izlaznog raspona senzora, u procentima.

$$\delta_L = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%$$

Gde je:

- Δy_{max} – najveće odstupanje stvarne karakteristike od referentne prave;

y_{max}-y_{min} – izlazni raspon senzora.

Primer – senzor pritiska

Pretpostavimo da senzor meri pritisak od 0 do 10 bar, a izlazni signal mu je od 0 do 5 V.

Ako je najveće odstupanje stvarne karakteristike od idealne prave 0,05 V, nelinearnost iznosi:

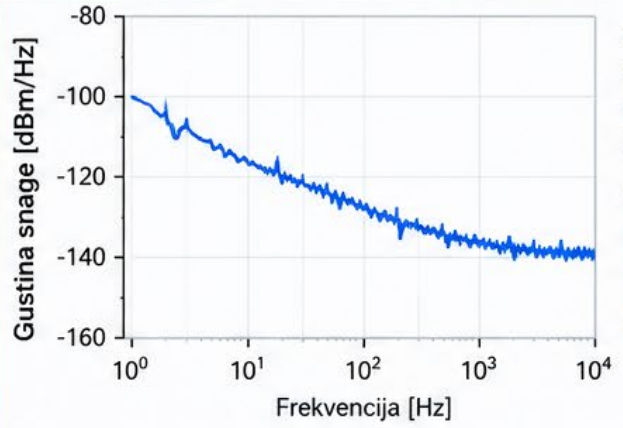
$$\delta_L = \frac{0,05}{5} \cdot 100\% = 1\%$$

Dakle, nelinearnost senzora iznosi 1% izlaznog raspona.

Šum

- Šum je neželjena, slučajna promena električnog signala na izlazu senzora koja nije posledica promene merene veličine.
- Nastaje usled različitih fizičkih i električnih procesa, kao što su termičko kretanje nosilaca naelektrisanja, elektromagnetne smetnje i karakteristike elektronskih komponenti.
- Zbog šuma, izlazni signal senzora može da varira čak i kada je merena veličina konstantna.

Spektralna gustina snage šuma



Spektralna gustina snage šuma pokazuje kako je snaga šuma raspoređena po frekvencijama.

Često se izražava u:

- dBm/Hz
- $V/\sqrt{Hz}$ (za naponski šum)
- $nV/\sqrt{Hz}$

Odnos signal–šum (SNR)

$$SNR = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \text{ [dB]}$$

P_s – snaga korisnog signala
P_n – snaga šuma

Primer:
Ako je $P_s = 100 \cdot P_n$:
$SNR = 10 \log_{10}(100) = 20$ dB

Zašto je šum važan?

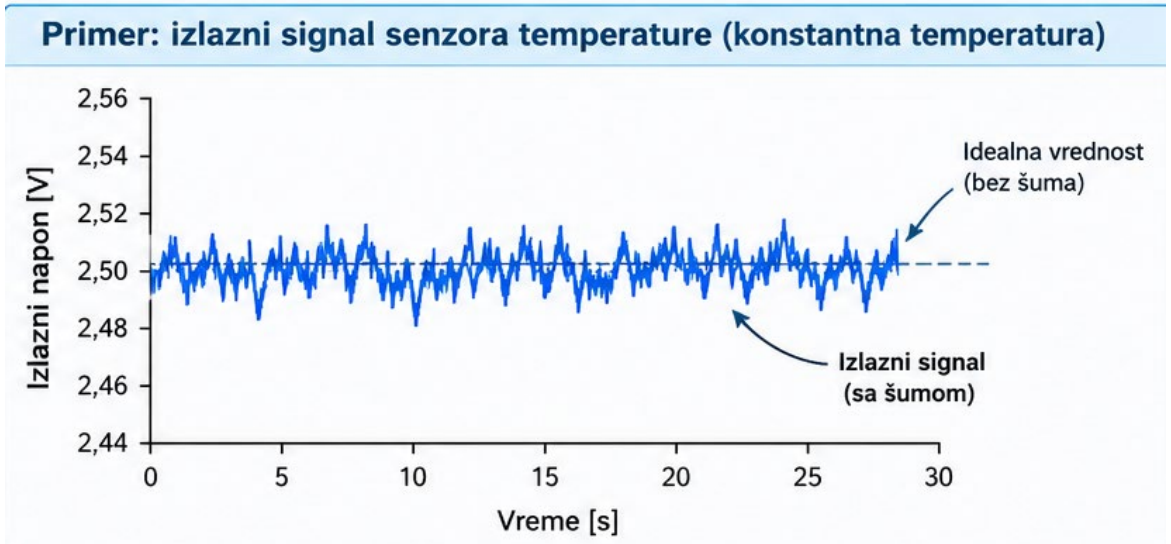
- Ograničava najmanju promenu merene veličine koju možemo pouzdano da detektujemo.
- Može da izazove nestabilna očitavanja.
- Može da oteža detekciju slabih signala (npr. kod termalnih kamera, magnetometara, LiDAR senzora).
- Smanjuje se filtriranjem, oklapanjem, pravilnim uzemljenjem i odgovarajućim izborom senzora.

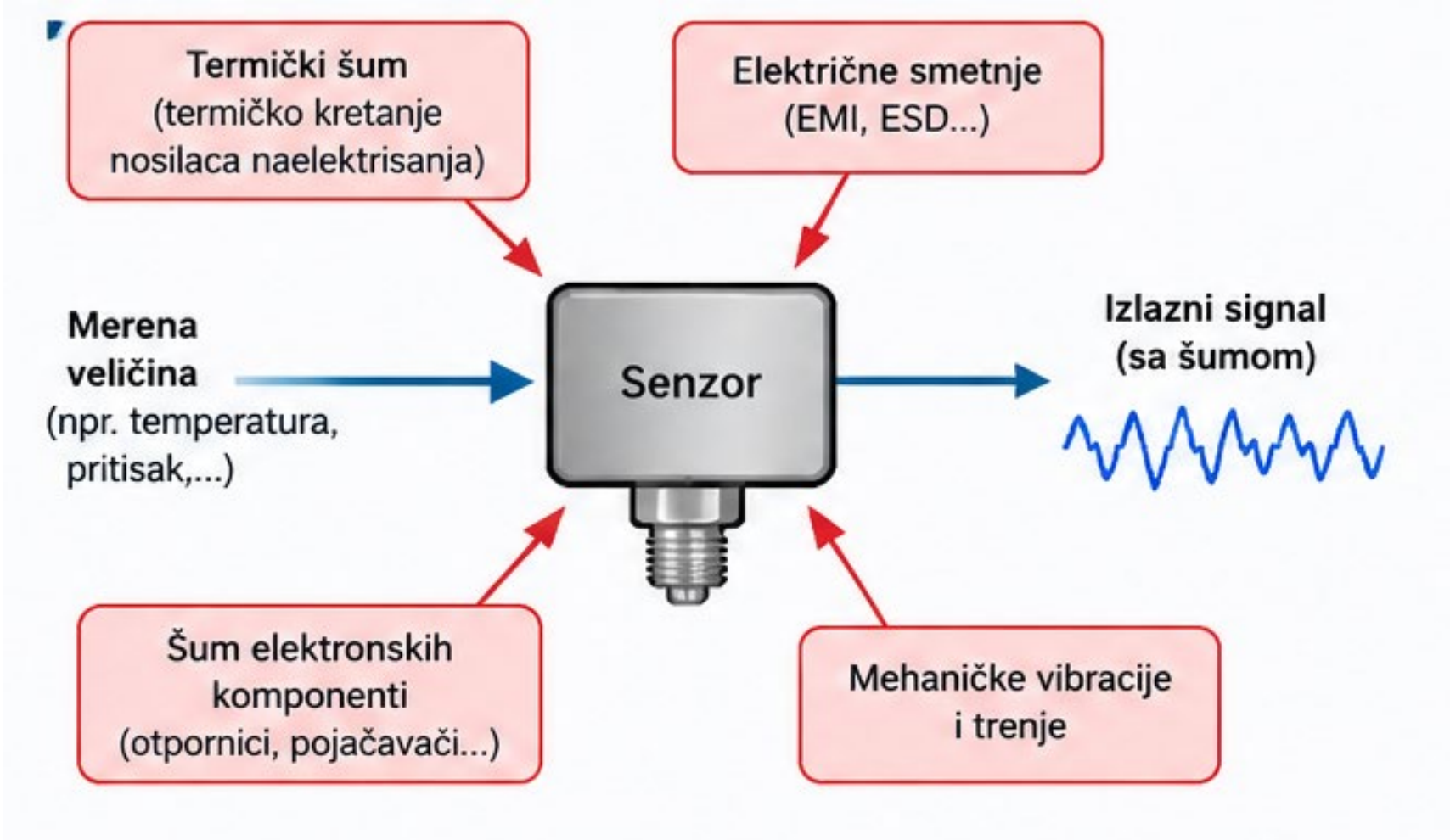
Primer – senzor temperature

Pretpostavimo da senzor meri konstantnu temperaturu od 25 °C. Umesto stabilnog izlaznog napona od 2,50 V, dobijamo:

2,49 V → 2,51 V → 2,50 V → 2,48 V → 2,52 V

Ako ove promene nisu izazvane stvarnom promenom temperature, već neželjenim električnim pojavama, one predstavljaju šum.




Termički šum
(termičko kretanje
nosilaca naelektrisanja)
Električne smetnje
(EMI, ESD...)
Merena
veličina
(npr. temperatura,
pritisak,...)
Senzor
Izlazni signal
(sa šumom)
Šum elektronskih
komponenti
(otpornici, pojačavači...)
Mehaničke vibracije
i trenje

Zašto je šum važan kod senzora?

Ograničava najmanju promenu merene veličine koju možemo pouzdano da detektujemo.

Može da izazove nestabilna očitavanja.

Može da oteža detekciju slabih signala, na primer kod termalnih kamera, magnetometara i LiDAR senzora.

Može da se smanji filtriranjem, oklapanjem, pravilnim uzemljenjem i odgovarajućim izborom senzora.

Reverzibilnost senzora i histerezis

Reverzibilnost opisuje sposobnost senzora da pri istoj vrednosti merene veličine daje istu ili približno istu vrednost izlaznog signala, nezavisno od toga da li se merena veličina povećava ili smanjuje.

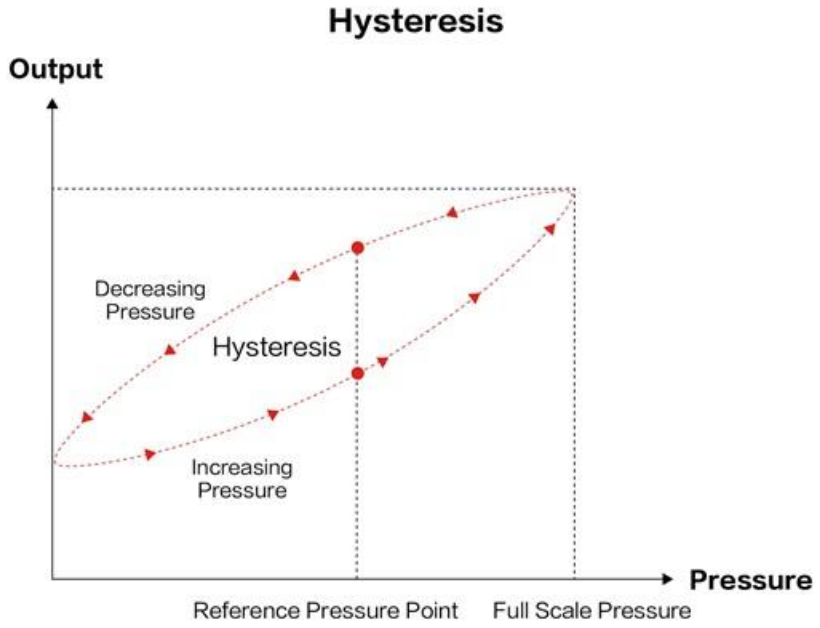
Kod idealnog senzora izlaz zavisi samo od trenutne vrednosti merene veličine. Kod stvarnog senzora izlaz može zavisiti i od prethodnog stanja senzora.

Primer – senzor pritiska

- Pretpostavimo da merimo pritisak od 0 do 10 bar, a zatim ga smanjujemo sa 10 na 0 bar.
- Pri povećanju pritiska do 5 bar, senzor daje izlaz od 2,50 V.
- Pri smanjenju pritiska do istih 5 bar, senzor daje izlaz od 2,60 V.
- Iako je pritisak u oba slučaja isti, izlazni napon se razlikuje za 0,10 V. Ova razlika predstavlja posledicu histerezisa.

histerezis

Histerezis je pojava pri kojoj izlazna vrednost senzora za istu ulaznu vrednost zavisi od smera promene merene veličine, odnosno od toga da li se ona povećava ili smanjuje.



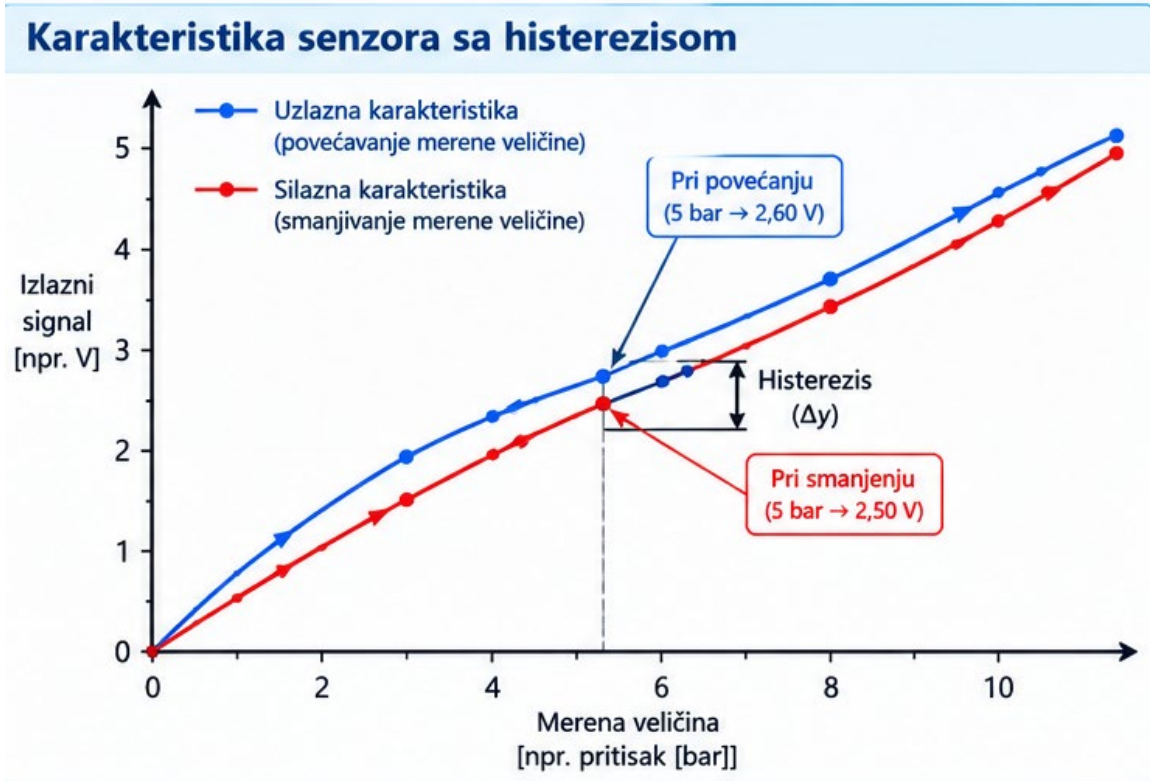
Uzlazna karakteristika – kada se merena veličina povećava.

Silazna karakteristika – kada se merena veličina smanjuje.

Razlika između ovih karakteristika pri istoj ulaznoj vrednosti predstavlja histerezis.

Gde se javlja histerezis?

- Kod senzora pritiska sa elastičnim membranama.
- Kod temperaturnih senzora i termostata.
- Kod magnetnih senzora.
- Kod mehaničkih senzora sa trenjem i zazorima.



Senzori u prirodi

- ✓Živi organizmi - interakcija sa okolinom.
- ✓Senzori u kombinaciji sa odgovarajućim neuronima i osećajem koji stvaraju u centralnom nervnom sistemu dobili su naziv čula.
- ✓Najveći broj bioloških senzora su električni, odnosno generišu strujne impulse u neuronima.