

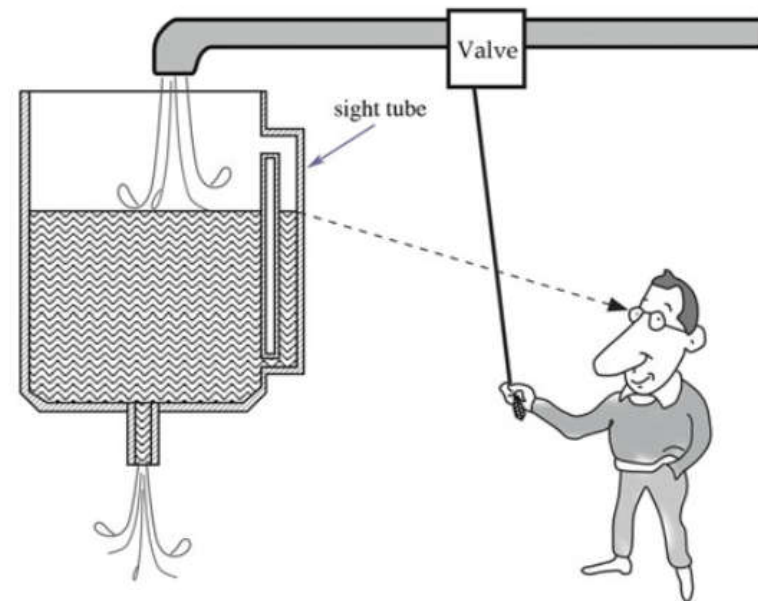
Projektovanje IoT sistema

Senzori

Vladimir Rajović, prema
J.Fraden Handbook of Modern Sensors

Akvizicija podataka

- Senzor “Naprava koja prima i odgovara na signal ili pobudu”.
 - Preširoko, obuhvata sve od ljudskog oka do okidača na pištolju
- Kombinacija cevi i oka je senzor →



Akvizicija podataka

- U svetu oko nas prirodni i objekti koje je napravio čovek
 - Prirodni senzori obično elektrohemijski karakter, baziran na transportu JONA (npr nervna vlakna)
 - Veštački senzori bazirani na transportu ELEKTRONA
- Uže, “senzor je naprava koja na pobudu odgovara električnim signalom”

Akvizicija podataka

- **Pobuda** je količina, osobina ili uslov koji se prima i konvertuje u **električni** signal
 - *Intenzitet i talasna dužina svetlosti, zvuk, sila, ubrzanje, razdaljina, brzina kretanja, hemijski sastav...*
- **Električni** označava signal koji može da se obrađuje elektronskim napravama (*devices*)

Akvizicija podataka

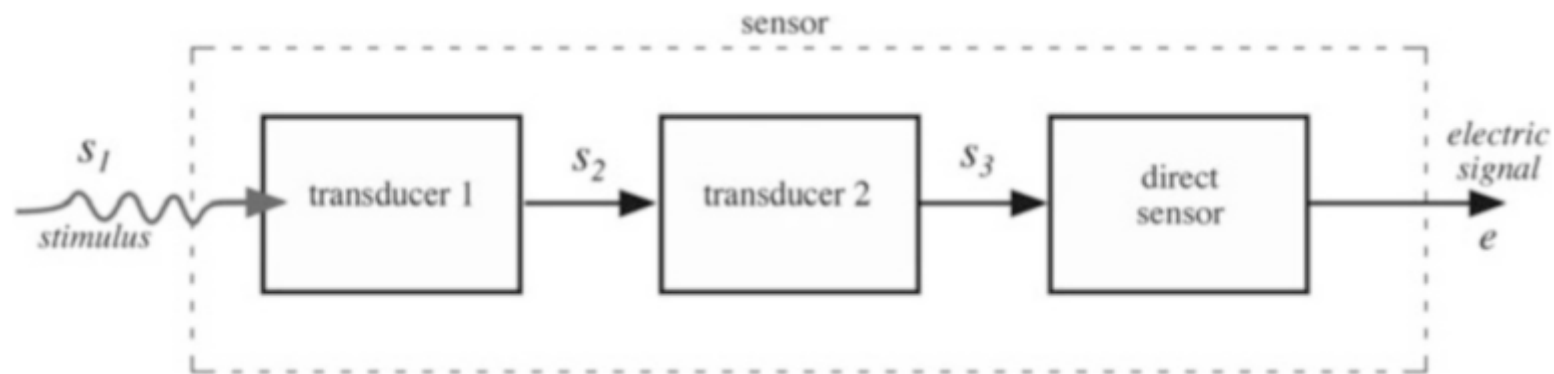
- Senzor je generalno prevodilac neelektrične veličine u električnu vrednost (napon, struja, naelektrisanje).
 - Dalje amplituda, polarizacija, učestanost, faza, digitalni kod (*format izlaznog podatka*)
- Svaki senzor je konvertor energije, koja se prenosi sa objekta merenja na senzor (ili obrnuto).
 - Prenos energije može biti i nula (merena vrednost jednaka referentnoj npr)

Akvizicija podataka

- *Senzor* (davač) i *detektor* su sinonimi, detektor češće u kontekstu kvaliteta a ređe kvantiteta.
 - *PIR* detektor detektuje pokret, ali ne meri pravac, brzinu ili ubrzanje.
- *Senzor* nije isto što i *pretvarač* (transducer)
 - *Pretvarač* bilo koji pravac konverzije energije (npr zvučnik). Pretvarači mogu biti *aktuatori* (pokretači, suprotno od davača: električni ulaz → neelektrični izlaz, npr motor ili pneumatski aktuator)

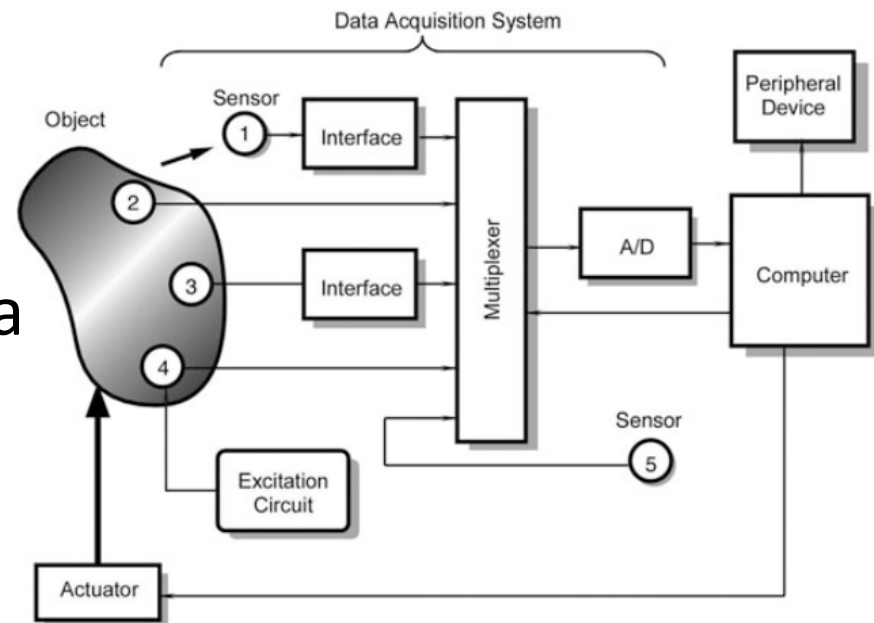
Akvizicija podataka

- Direktni senzor konvertuje pobudu u električni signal ili menja spoljašnji električni signal
- Hibridni senzor zahteva jedan ili više pretvarača da bi se mogao koristiti direktni senzor za električni izlaz



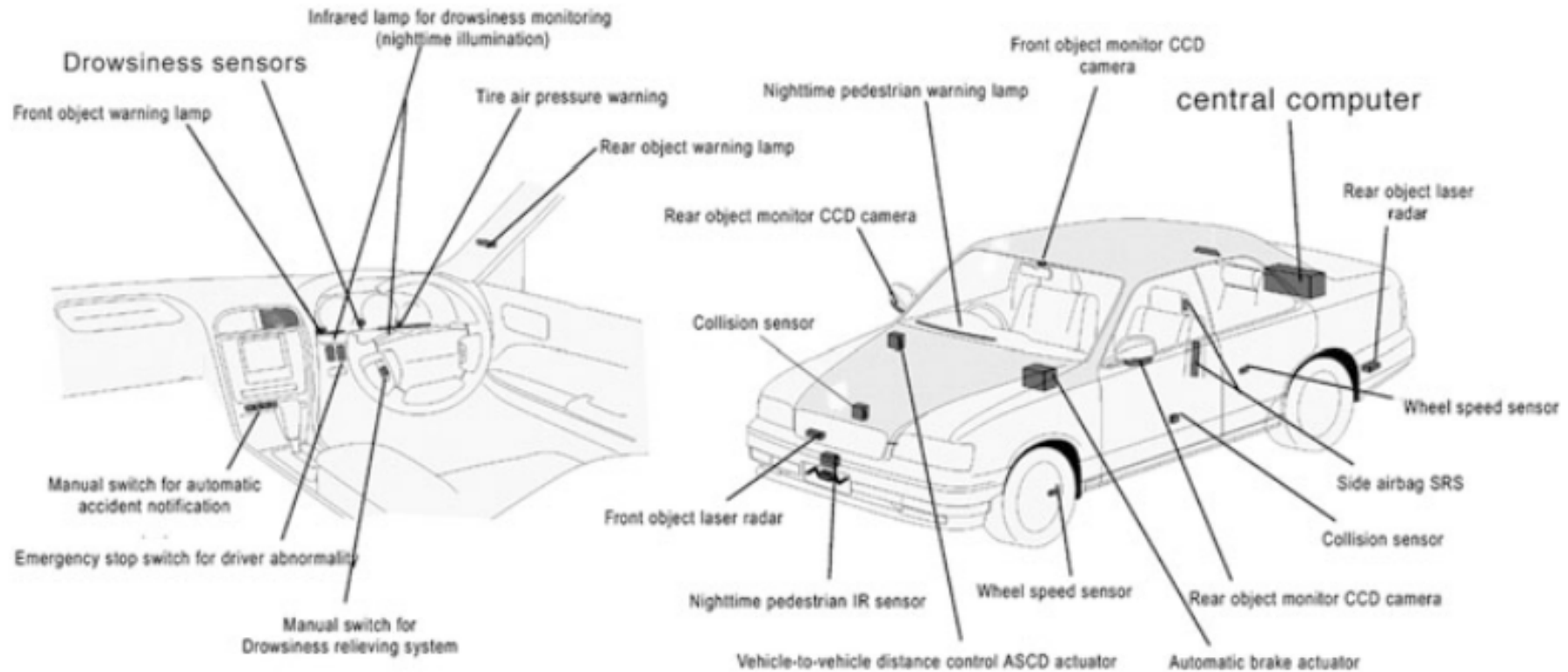
Akvizicija podataka

- Senzor je uvek deo većeg sistema
 - Spoljašnje pobude, ili unutrašnje stanje
- Deo sistema za akviziciju, koji je deo većeg upravljačkog sistema
 - 1 → bezkontaktni
 - 5 → unutrašnji
 - 1, 3 → potrebna sprega
 - 1, 2, 3, 5 → pasivni
 - 4 → aktivni



Akvizicija podataka

- Primer složenog sistema (Nissan ASV)



Akvizicija podataka

- Pakovanje senzora je važno
 - Isti senzor se drugačije pakuje za različite aplikacije
 - Pakovanjem se može postići i selektivnost
 - Npr detektor pokreta bi trebalo da reaguje na ljude, ali ne i na male životinje

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 1
 - Pasivni
 - Nije potreban dodatni izvor energije, energija pobude se konvertuje u električni izlaz
 - Aktivni
 - Potrebno spoljašnje napajanje (pobuda), koje senzor moduliše. AKA *parametarski* jer se osobine senzora menjaju i konvertuju u električni signal. Parametar senzora moduliše pobudu i ta modulacija nosi info o merenoj veličini.
 - Na primer termistor menja otpornost sa temperaturom, pobuda je struja, promena otpornosti moduliše napon

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 2
 - Apsolutni
 - Merenje u odnosu na neku vrednost nezavisnu od uslova merenja
 - Kod termistora otpornost zavisi od apsolutne temeprature
 - Relativni
 - Merenje u odnosu na neku posebnu vrednost
 - Kod termopara izlaz zavidi od razlike temperatura na dva kraja provodnika

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 3
 - Prema nekoj posebnoj karakteristici
 - Osetljivost
 - Opseg ulaza
 - Stabilnost (kratkoročna i dugoročna)
 - Rezolucija
 - Tačnost
 - Selektivnost
 - Brzina odziva
 - Uslovi okoline
 - Preopterećenje
 - Linearnost
 - Histerezis
 - Mrtva zona
 - Trajanje
 - Izlazni format
 - Cena, veličina, težina
 - ...

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 4
 - Prema osetljivom materijalu
 - Neorganski
 - Organski
 - Provodni
 - Izolatori
 - Poluprovodnički
 - Tečni gas ili plazma
 - Biološka supstanca
 - ...

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 5
 - Vrsta konverzije
 - Fizički
 - Termoelektrični
 - Fotoelektrični
 - Fotomagnetski
 - Magnetoelektrični
 - Elektromagnetski
 - Termoelastični
 - Elektroelastični
 - Termomagnetski
 - Termooptički
 - Fotoelastični
 - ...

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 5
 - Vrsta konverzije (nastavak)
 - Hemijski
 - Hemijska transformacija
 - Fizička transformacija
 - Elektrohemijski proces
 - Spektroskopija
 - ...
 - Biološki
 - Biohemijska transformacija
 - Fizička transformacija
 - Efekat na test organizam
 - Spektroskopija
 - ...

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 6
 - Polje primene
 - Poljoprivreda
 - Automobili
 - Građevina
 - Domaćinstvo
 - Trgovina, finansije, distribucija
 - Okolina, meteorologija, bezbednost
 - Energetika
 - Telekomunikacije
 - Medicina
 - More
 - Proizvodnja
 - Rekreacija, igračke
 - Vojska
 - Svemir
 - Nauka
 - Saobraćaj (bez automobila)
 - ...

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 7

- Pobuda

- Akustički (amplituda, faza, spektralna polarizacija, brzina)
 - Biološki (vrste i stanja koncentracije biomase)
 - Hemijski (komponente: vrste, koncentracije, stanja)
 - Električni (naelektrisanje, struja, potencijal, napon, polje (amplituda, faza, polarizacija, spektar), provodnost, permitivnost)
 - Magnetni (polje (amplituda, faza, polarizacija, spektar), fluks, permeabilnost)
 - Optički (amplituda, faza, polarizacija i spektar talasa, brzina, indeks refrakcije, emisivnost, reflektivnost, apsorpcija)

Akvizicija podataka

- Klasifikacija senzora 7
 - Pobuda (nastavak)
 - Mehanički (linearna i ugaona pozicija, ubrzanje, sila, stres, pritisak, naprezanje, masa, gustina, momenat, obrtni momenat, protok, maseni protok, oblik, orijentacija, hrapavost, krutost, popustljivost, viskoznost, kristalnost, strukturni integritet)
 - Radijacioni (vrsta, energija, intenzitet)
 - Termalni (temperatura, protok, specifična toplota, termalna provodljivost)

Prenosne karakteristike

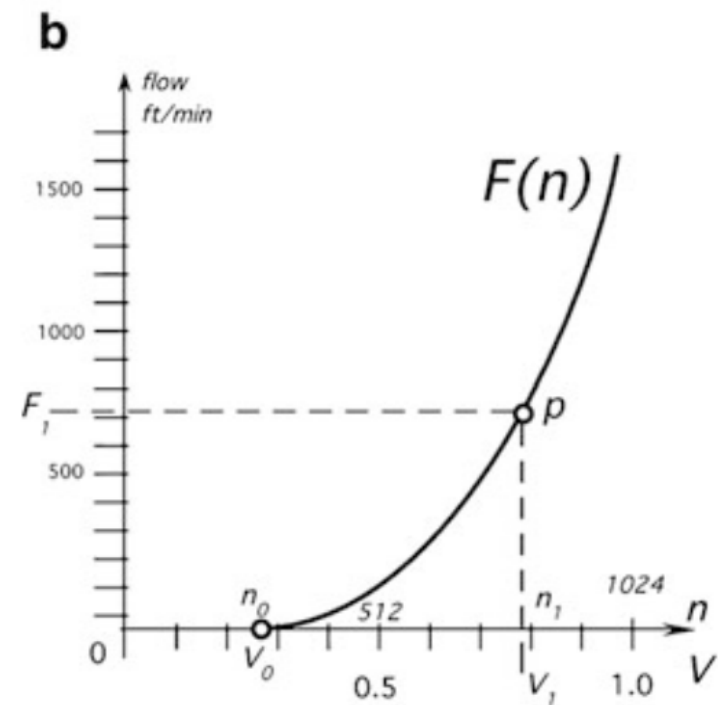
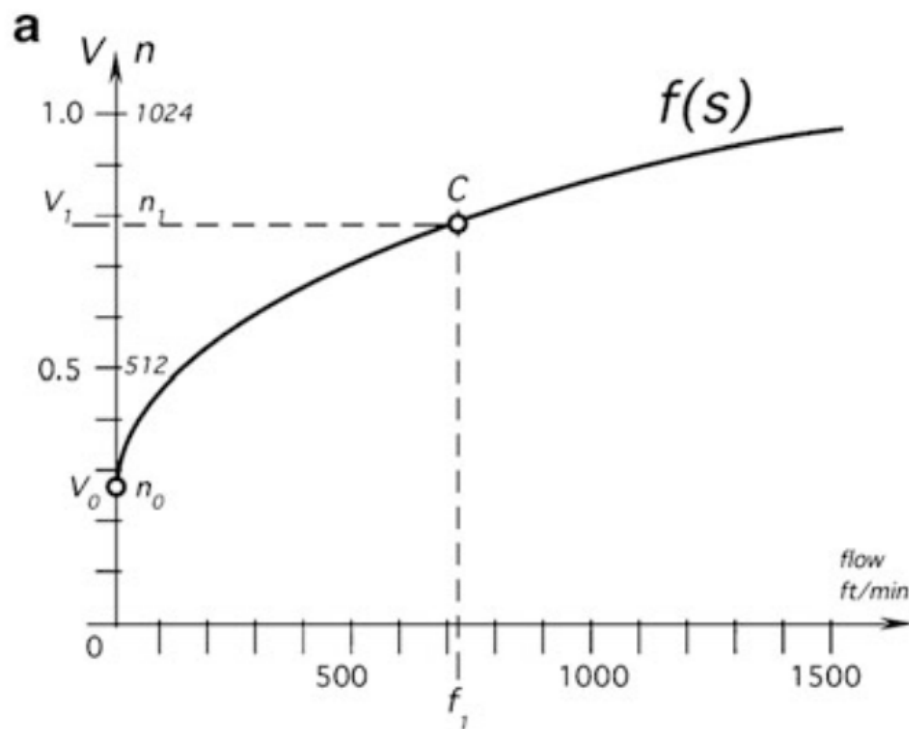
- Za svaki senzor postoji teorijska (idealna) veza između ulaza i izlaza
 - Ako je senzor idealno projektovan i napravljen sa idealnim materijalima od strane idealnih radnika u idealnom okruženju sa idealnim alatima... izlaz tog senzora bi predstavljao **pravu** vrednost ulaza
 - Tabela, grafik, formula, jednačina
 - Ako se veza u vremenu ne menja govorimo o vremenski nepromenljivoj ili statičkoj prenosnoj karakteristici (kratko prenosna karakteristika)

Prenosne karakteristike

- Statička prenosna karakteristika povezuje pobudu s i električni signal E : $E = f(s)$
 - Pobuda nepoznata, signal meren i poznat, predstavlja pobudu. Projektant treba da obezbedi da E što bolje predstavlja s
- Jedna od funkcija mernog sistema je da odredi nepoznato s na osnovu izmerenog E . Zato je potrebna inverzna prenosna k-ka $s = f^{-1}(E)$
 - Ne samo za senzor već za senzor i prateća kola

Prenosne karakteristike

- Primer termoanemometar (maseni protok fluida)



Prenosne karakteristike

- Poželjno je da je zakon fizike ili hemije koji je osnova rada senzora poznat. Ako taj zakon može da se izrazi formulom, često je lako dobiti inverznu prenosnu k-ku.
 - Primer linearni otporni potencijometar za merenje pomeraja d
$$d = F(E) = \frac{D}{v_0}v$$
 - v_0 je referentni napon, D maksimalni pomeraj, na osnovu izmerenog napona v određuje se pomeraj d
- U praksi rešivih formula najčešće nema, i potrebne su aproksimacije direktne i inverzne prenosne k-ke

Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije
 - Dovoljno proste radi lakog proračuna
 - Nema gotovog metoda, analiza i iskustvo su praktično jedini način
 - Inicijalno proveriti da li neka standardna funkcija zadovoljava, ako ne ide se na složenije tehnike

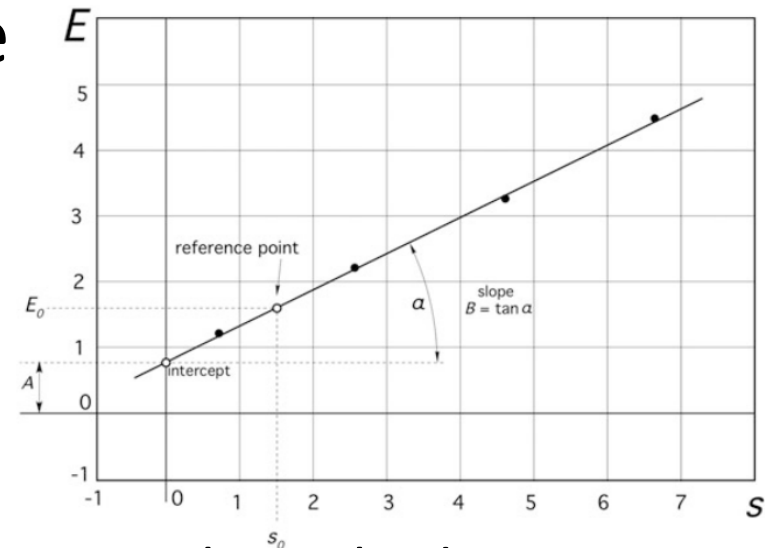
Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije

- Linearna prenosna k-ka

$$E = A + Bs.$$

- B osetljivost



- Često je praktično nemoguće imati nultu pobudu senzora, zato se referiše u odnosu na neku početnu vrednost $E = E_0 + B(s - s_0)$

- Inverzna prenosna k-ka

$$s = \frac{E - E_0}{B} + s_0$$

Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije
 - Jako malo senzora je stvarno linearno. U stvarnosti uvek postoji makar mala nelinearnost, naročito za širok opseg pobude.
 - Linearna prenosna k-ka predstavlja samo linearnu aproksimaciju nelinearne prenosne k-ke
 - Nelinearnu prenosnu k-ku moguće je aproksimirati nelinearnom matematičkom funkcijom.

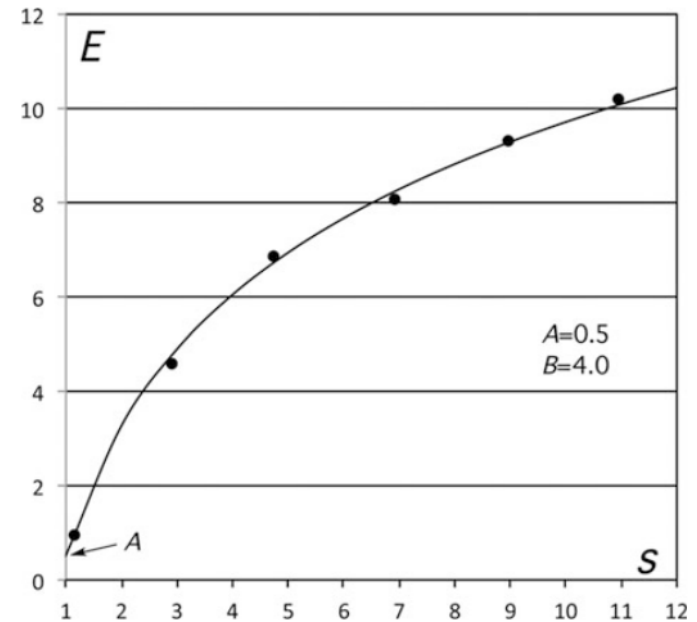
Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije
 - Logaritamska aproksimacija

$$E = A + B \ln s$$

- Inverzna k-ka

$$s = e^{\frac{E-A}{B}}$$



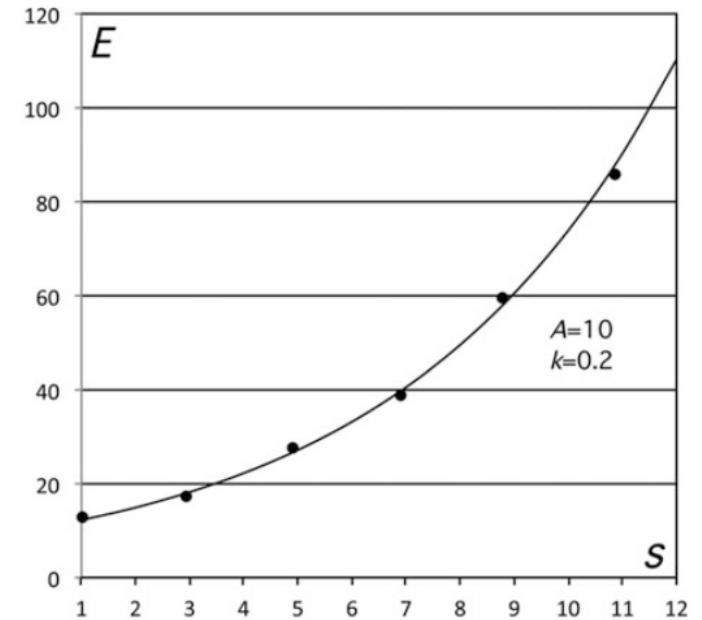
Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije
 - Eksponencijalna aproksimacija

$$E = Ae^{ks}$$

- Inverzna k-ka

$$s = \frac{1}{k} \ln \frac{E}{A}$$



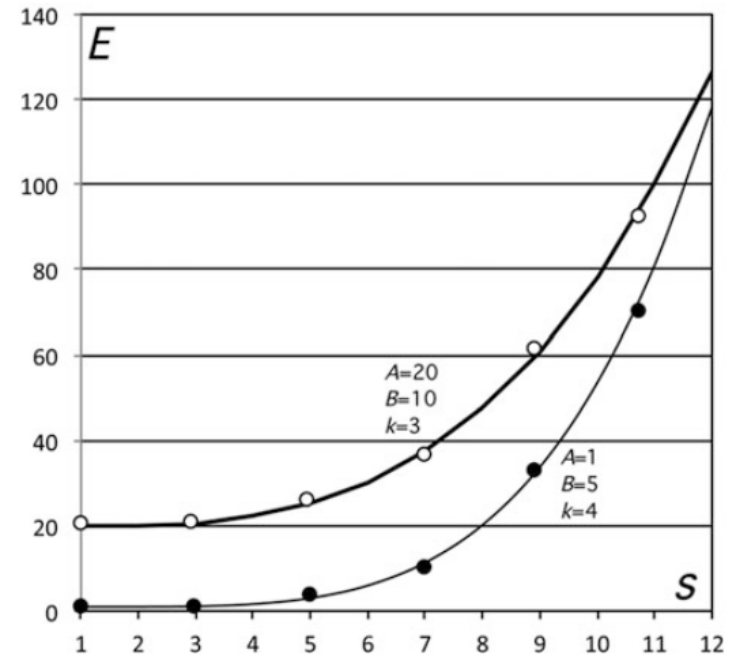
Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije
 - Stepena aproksimacija

$$E = A + Bs^k$$

- Inverzna k-ka

$$s = \sqrt[k]{\frac{E - A}{B}}$$



Prenosne karakteristike

- Funkcionalne aproksimacije
 - Pomenute nelinearne aproksimacije imaju mali broj parametra
 - Manje parametara je pogodnije, pod uslovom da je aproksimacija zadovoljavajuća, između ostalog i zbog kalibracije koja će biti kraća

Prenosne karakteristike

- Linearna regresija
 - Ako merenja ulazne pobude tokom kalibracije nisu konzistentna sa velikom tačnošću i očekuju se velike slučajne greške, minimalni broj merenja neće dati dovoljnu tačnost.
 - Sa slučajnim greškama se bori metodom najmanjih kvadrata, za određivanje nagiba B i odsečka A , ponavljajući merenje k puta za ceo opseg s

$$A = \frac{\Sigma E \Sigma s^2 - \Sigma s \Sigma s E}{k \Sigma s^2 - (\Sigma s)^2}, \quad B = \frac{k \Sigma s E - \Sigma s \Sigma E}{k \Sigma s^2 - (\Sigma s)^2},$$

Prenosne karakteristike

- Polinomijalna aproksimacija
 - Ako osnovne aproksimacije ne zadovoljavaju.
 - Neka druga funkcionalna aproksimacija
 - Stepeni red, tj polinomijalna aproksimacija
 - Često dovoljno aproksimacija II ili III reda

$$E = a_2s^2 + a_1s + a_0$$

$$E = b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0$$

Prenosne karakteristike

- Polinomijalna aproksimacija

- Ista tehnika može i za inverznu prenosnu k-ku

$$s = A_2E^2 + A_1E + A_0$$

$$s = B_3E^3 + B_2E^2 + B_1E + B_0$$

- Koeficijenti aproksimacija direktne i inverzne prenosne k-ke mogu se dobiti jedni iz drugih, ali obično nema potrebe
 - U zavisnosti od slučaja, dovoljna je jedna aproksimacija.
- Što veći red polinoma bolje poklapanje, ali u uskom opsegu čest dovoljan samo II red, ako je funkcija monotona

Prenosne karakteristike

- Osetljivost
 - Kod linearne aproksimacije nagib prave

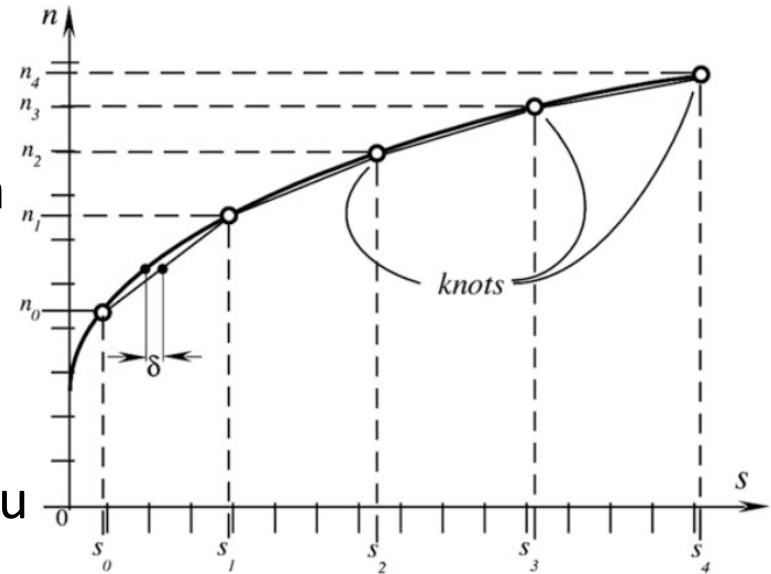
$$E = A + Bs.$$

- kod nelinearnih nije konstanta, već zavisi od vrednosti pobude u datoj tački

$$b_i(s_i) = \frac{dE(s_i)}{ds} = \frac{\Delta E_i}{\Delta s_i}$$

Prenosne karakteristike

- Deo po deo linearna aproksimacija
 - Nelinearna prenosna k-ka se deli na sekcije koje se smatraju linearnim; zakrivljeni segmenti između čvorova se menjaju linearnim odsečcima – čvorovi su povezani pravim linijama.
 - Posmatra se samo opseg ulaza od interesa
 - Što više čvorova → manja greška
 - Čvorovi ne moraju biti jednako udaljeni; gušći gde je veća nelinearnost
 - U procesoru potrebno čuvati samo koordinate čvorova; između linearna interpolacija



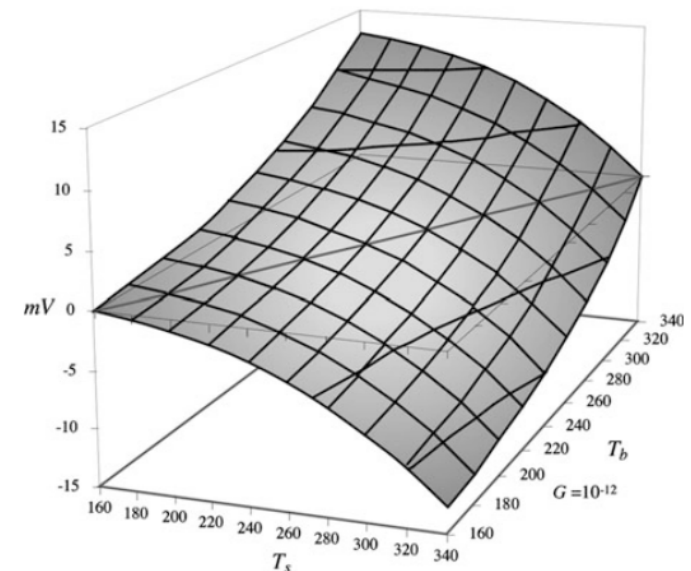
Prenosne karakteristike

- Splajn (*spline*) interpolacija
 - Deo po deo interpolacija polinomom (obično) trećeg reda
 - Ako se koriste polinomi trećeg reda, i drugi izvod u čvorovima nula, aproksimacija je *relaksirana*
 - čuva se glatkost prenosne karakteristike
 - Računarski resursi mogu biti problem u MCU sistemima

Prenosne karakteristike

- Višedimenzione prenosne karakteristike
 - Prenosna karakteristika može zavisiti od više pobuda
 - Senzor vlažnosti: vlažnost i temperatura
 - Termalni radijacioni (IR) senzor: apsolutne temperature objekta i samog senzora

$$V = G(T_b^4 - T_s^4)$$



Prenosne karakteristike

- **Određivanje pobude**

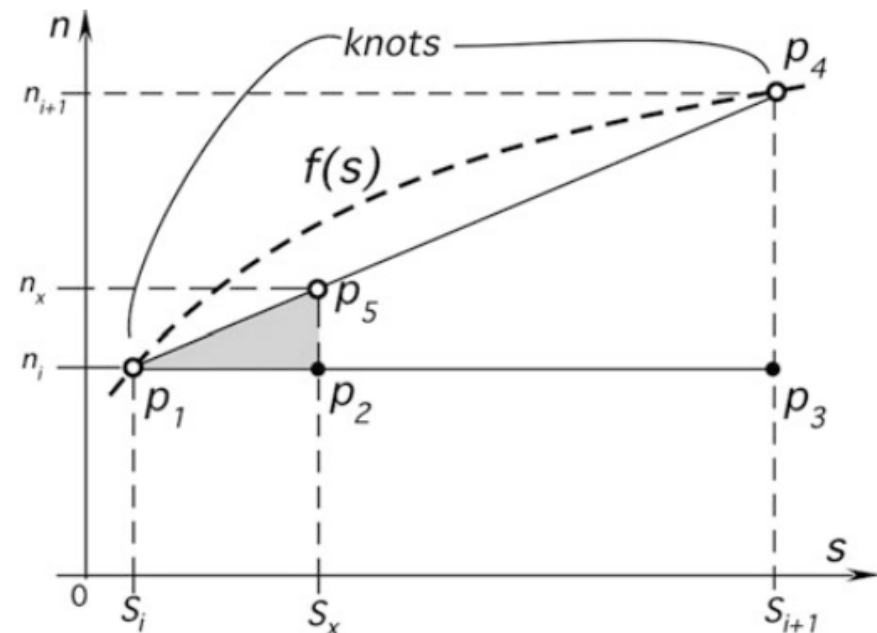
- Analitička jednačina, pravolinijski
- Deo po deo linearna aproksimacija

- Najpre odrediti u kom segmentu se nalazi pobuda

- Linearna aproksimacija na segmentu

$$s_x = s_i + \frac{n_x - n_i}{n_{i+1} - n_i} (s_{i+1} - s_i)$$

- Jednostavno za MCU, LUT sadrži koordinate čvorova



Prenosne karakteristike

- **Određivanje pobude**

- Iterativno određivanje pobude (Njutnova metoda) ako je poznata direktna prenosna k-ka

- Pretpostavi se vrednost pobude $s = s_0$ i onda izračunava niz vrednosti koji konvergira ka tačnoj
 - Metod razumno brzo konvergira, naročito ako je početna vrednost bliska stvarnoj

$$s_{i+1} = s_i - \frac{f(s_i) - E}{f'(s_i)}$$

Prenosne karakteristike

- **Određivanje pobude**

- Iterativno određivanje pobude (Njutnova metoda)

- Primer $f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$ $s_{i+1} = s_i - \frac{f(s_i) - E}{f'(s_i)}$

$$s_{i+1} = s_i - \frac{as_i^3 + bs_i^2 + cs_i + d - E}{3as_i^2 + 2bs_i + c} = \frac{2as_i^3 + bs_i^2 - d + E}{3as_i^2 + 2bs_i + c}$$

- Metod proizvodi velike greške ako je osetljivost (prvi izvod prenosne k-ke) mala – tamo gde je prenosna k-ka ravna
 - Ako je teško naći prvi izvod onda se može koristiti osetljivost računata preko priraštaja

Karakteristike senzora

- Prilikom izbora senzora prvo definisati zahteve određene aplikacije → onda se može istražiti šta je dostupno
 - Proučavanje dokumentacije i određivanje šta je potrebno a šta dostupno
 - Iskušenje je uzeti NAJBOLJI dostupni senzor, ali previše dobar senzor nije dobra inženjerska praksa zbog ekonomičnosti

Karakteristike senzora

- **Zahtevi za moderne senzore**
 - Ugradnja u male uređaje → integracija sa potrebnim komponentama (kondicioniranje signala, obrada signala, komunikaciona kola).
Senzor nije samo davač, već integrisani samodovoljan *senzorski modul* – minijaturni instrument koji detektuje, kondicionira, digitalizuje, obrađuje, daje izlaz i komunicira.
 - Niska potrošnja, mala veličina/težina, visoka tačnost, stabilnost, brz odziv...

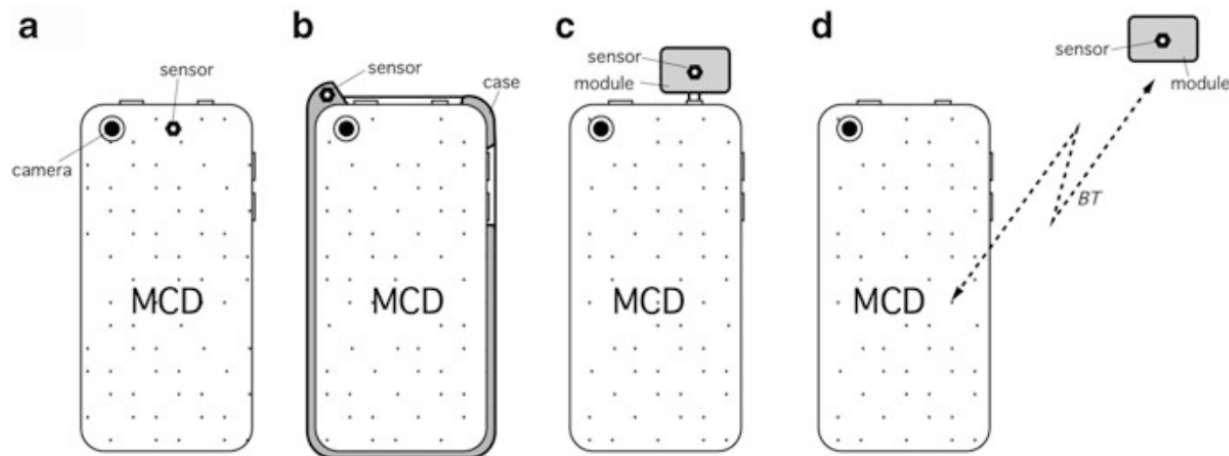
Karakteristike senzora

- **Zahtevi za moderne senzore**
 - “10 zapovesti” za moderne senzore (za mobilne uređaje)
 - Svaka je neophodna

1	Intelligent sensor: built-in signal conditioner and DSP
2	Built-in communication circuit (<i>I</i> ² C, NFC, Bluetooth, etc.)
3	Integrated supporting components (optics, thermostat, blower, etc.)
4	High selectivity of the sensed signal (reject interferences)
5	Fast response
6	Miniature size to fit a mobile device
7	Low power consumption
8	High stability in changing environment
9	Lifetime stability: no periodic recalibration or replacement
10	Low cost at sufficiently high volumes

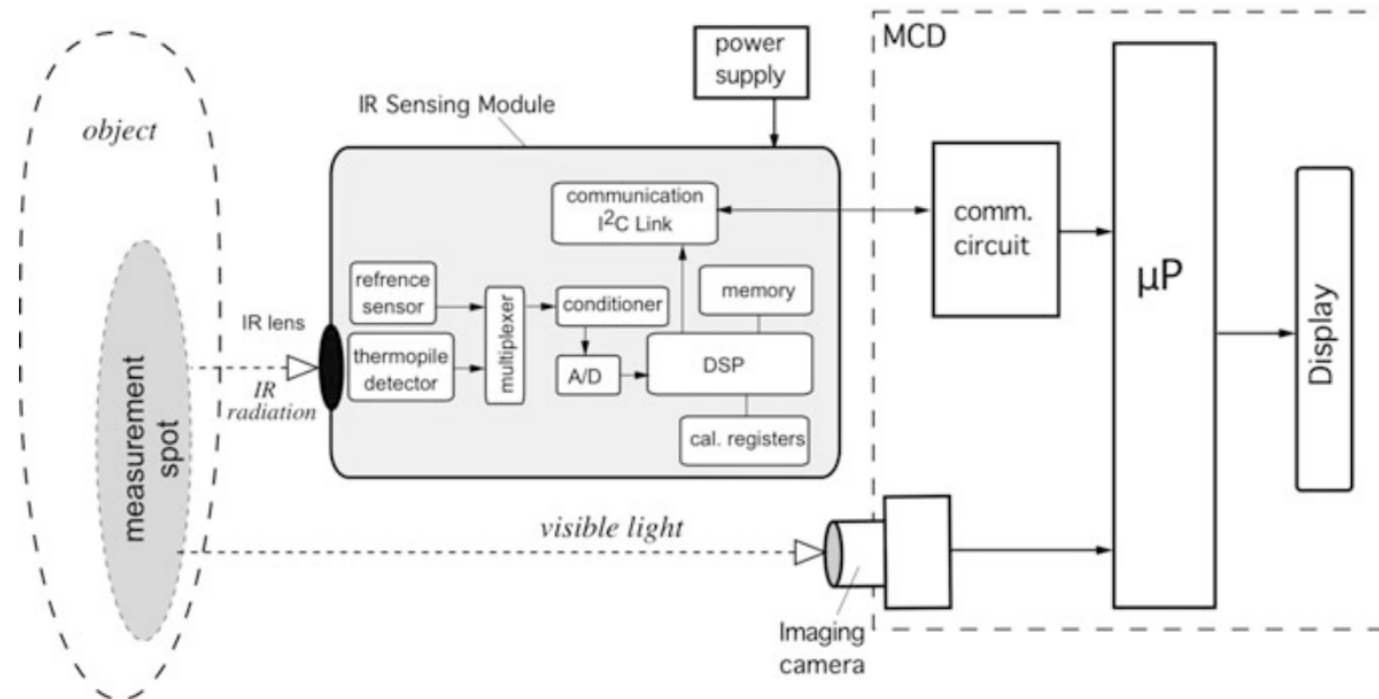
Karakteristike senzora

- **Zahtevi za moderne senzore**
 - Sprega senzora sa mobilnim telefonom
 - a unutrašnji, b u futroli, c preko porta, d bežično



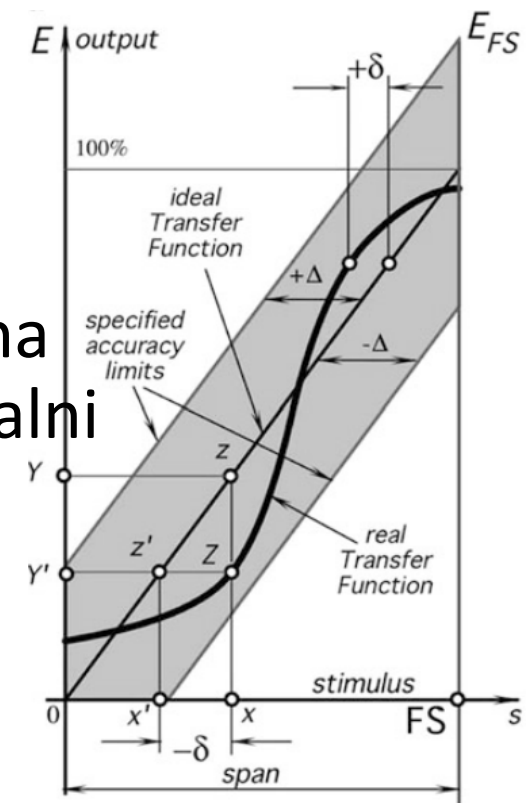
Karakteristike senzora

- **Zahtevi za moderne senzore**
 - Primer integracije



Karakteristike senzora

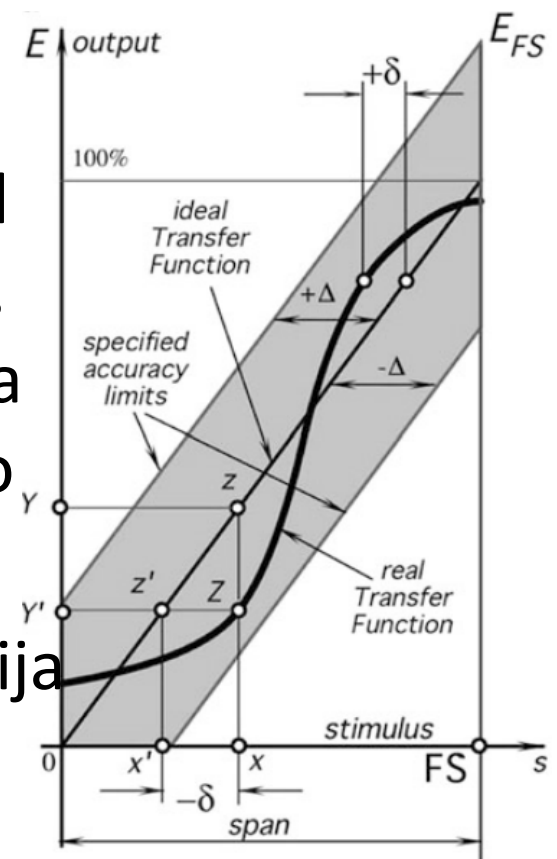
- **Pun opseg signala na ulazu (span, input FS)**
 - Dinamički opseg pobude koji se može konvertovati, najveća moguća vrednost na ulazu koja uzrokuje prihvatljivu grešku
- **Pun opseg signala na izlazu (output FS)**
 - Razlika izlaza kada je pobuda minimalna i maksimalna za analogni izlaz, za digitalni izlaz vrednost kada je ulaz FS
 - Uzimaju se u obzir sva odstupanja od idealne prenosne karakteristike.



Karakteristike senzora

- **Tačnost**

- Praktično netačnost
- Najveće odstupanje izlaza senzora od idealne ili stvarne vrednosti na ulazu. Stvarna vrednost ulaza se razmatra sa izvesnom nesigurnošću – ne možemo biti apsolutno sigurni kolika je
- Razlika između vrednosti koja se dobija na osnovu izlaza i stvarne vrednosti na ulazu



Karakteristike senzora

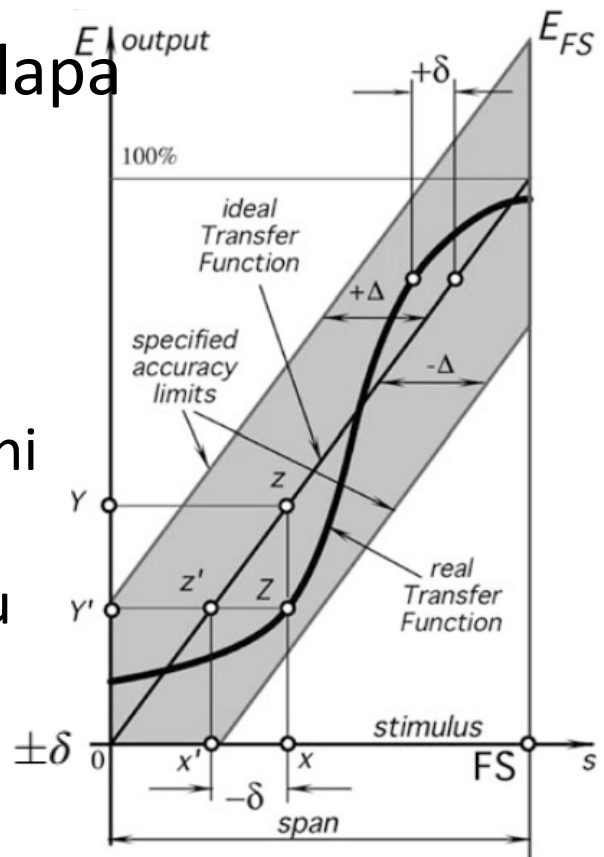
- **Tačnost**

- Stvarna prenosna k-ka se retko poklapa sa idealnom

- Varijacije materijala, veština radnika, greške u projektovanju, tolerancije proizvodnje → familije stvarnih prenosnih k-ka, iako su senzori testirani pod istim uslovima

- Sve prenosne k-ke moraju biti u okviru specificirane tačnosti, u granicama $\pm\Delta$
Stvarne k-ke se razlikuju od idealne za $\pm\delta$

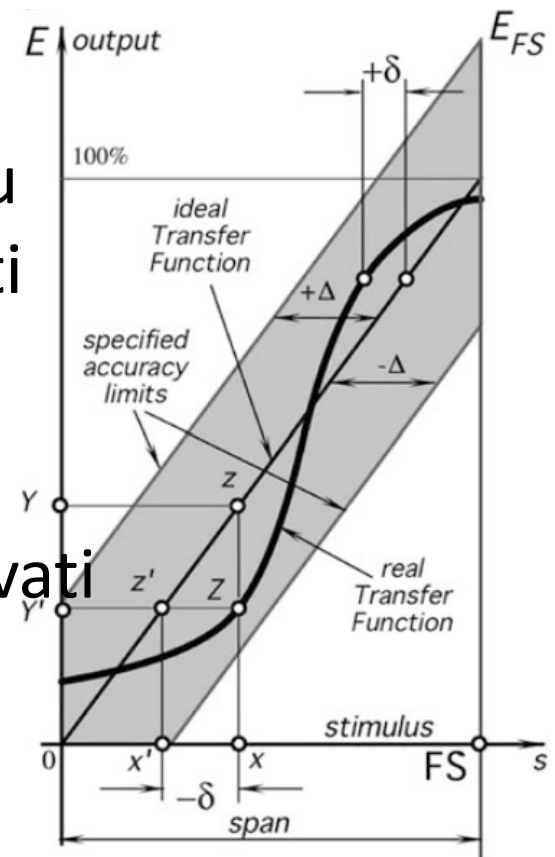
$$\delta \leq \Delta$$



Karakteristike senzora

- **Tačnost**

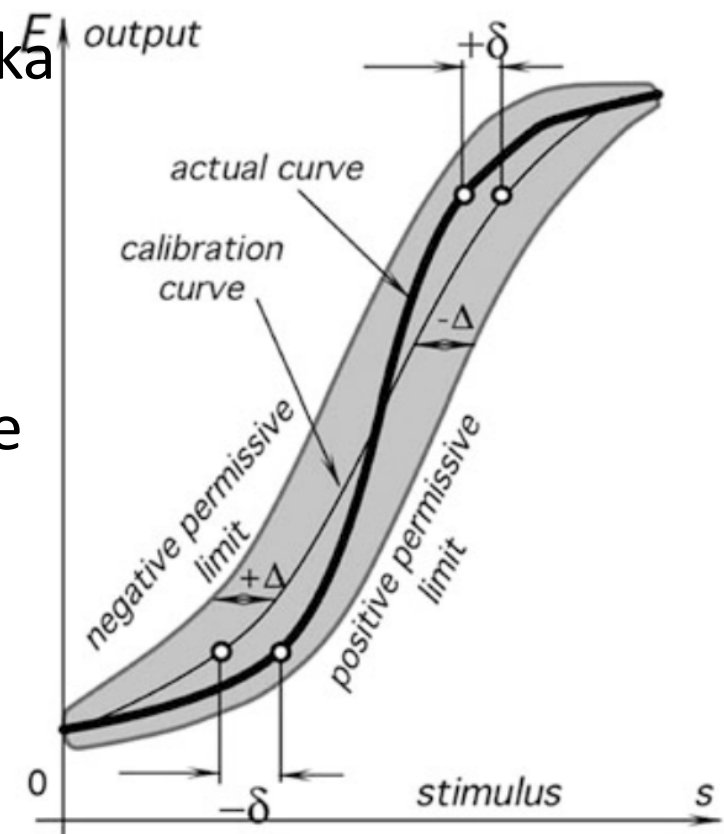
- (Ne)tačnost uključuje varijacije od komada do komada, histerezis, mrtvu zonu, kalibraciju i greške ponovljivosti
- Granice tačnosti se koriste za analizu najgoreg slučaja
- Radi poboljšanja je potrebno redukovati broj faktora koji utiču na grešku
 - Ne verovati podacima proizvođača, već kalibrisati svaki komad



Karakteristike senzora

- **Tačnost**

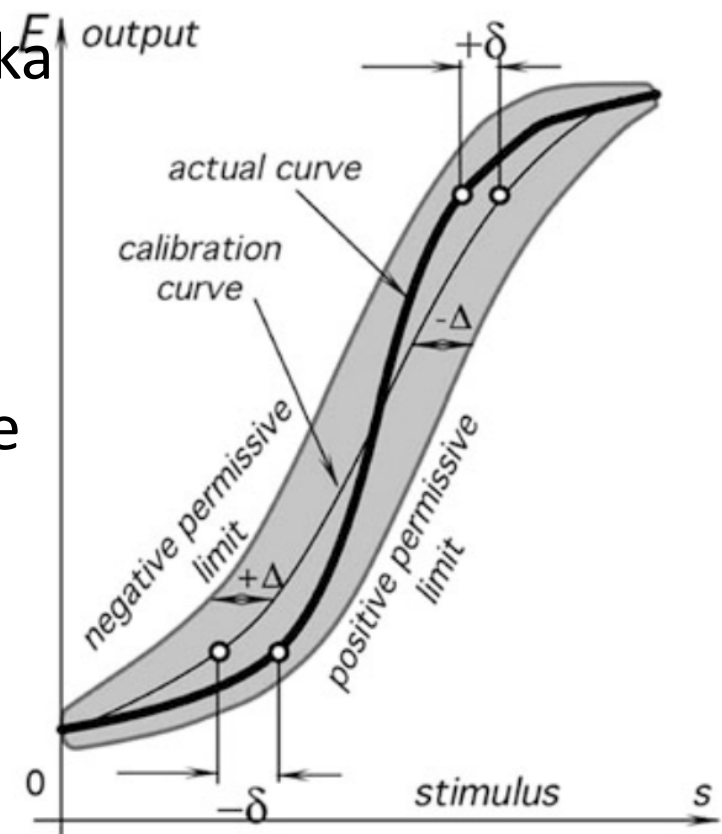
- Granice mogu bolje pratiti stvarnu karakteristiku → bolja tačnost
- Postiže se kalibracijom u više tačaka i fitovanjem
 - Granice tačnosti ne oko idealne k-ke već oko kalibracione krive koja se dobija kalibracijom
- Tako granice ne uključuju varijacije od komada do komada
- Ovako se postiže tačnije merenje, ali po ceni povećanja troškova



Karakteristike senzora

- **Tačnost**

- Granice mogu bolje pratiti stvarnu karakteristiku → bolja tačnost
- Postiže se kalibracijom u više tačaka i fitovanjem
 - Granice tačnosti ne oko idealna k-ke već oko kalibracione krive koja se dobija kalibracijom
- Tako granice ne uključuju varijacije od komada do komada
- Ovako se postiže tačnije merenje, ali po ceni povećanja troškova



Karakteristike senzora

- **Tačnost**

- Često se definiše kao maksimalna, tipična ili srednja greška
- Predstavljanje tačnosti
 - U jedinici pobude npr $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, kada je greška nezavisna od vrednosti ulaznog signala – posledica aditivnog šuma ili sistemskog ofseta, ali i drugih uzroka. Obično se navodi i opseg ulaza za koji važi
 - U procentima pune skale (FS), pogodno za linearne senzore, ili deo opsega nelinearnih senzora
 - U procentima merenog signala, zgodno za nelinearne senzore, ali nije preporučljivo jer greška tipično zavisi od pobude. Zato je bolje podeliti opseg ulaza na male kvazilinearne odsečke i koristiti prethodni način
 - U jedinicama izlaznog signala – korisno za senzore sa digitalnim izlazom.
- Šta koristiti zavisi od aplikacije
- Kod modernih senzora se često umesto tačnosti koristi *nesigurnost* koja kombinuje sve sistemske i slučajne efekte i nije ograničena samo na netačnost senzora.

Karakteristike senzora

- **Greška kalibracije**

- Dozvoljena netačnost kada je senzor kalibrisan u fabrici.

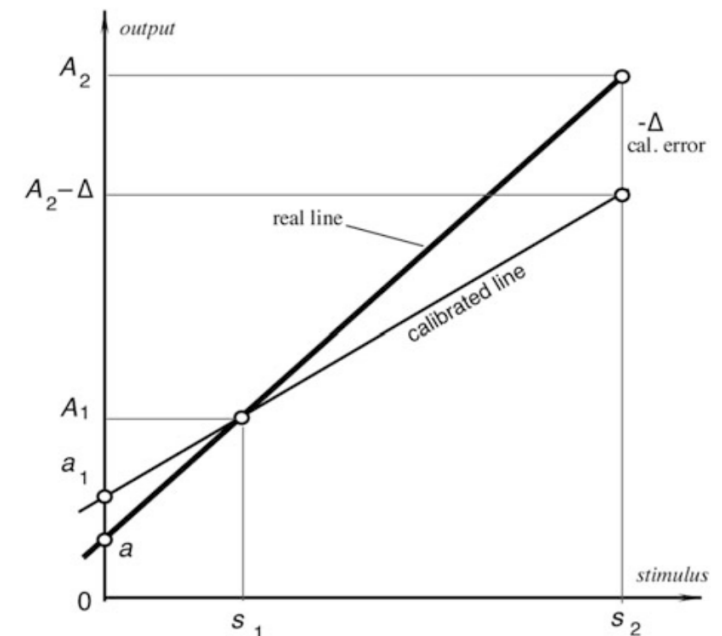
- Nije obavezno ista za svaku vrednost pobude

- Greška merenja odziva A_2

- Greška odsečka $\delta_a = a_1 - a = \frac{\Delta}{s_2 - s_1}$

- Greška nagiba $\delta_b = -\frac{\Delta}{s_2 - s_1}$

- Drugi izvor greške je referentni senzor

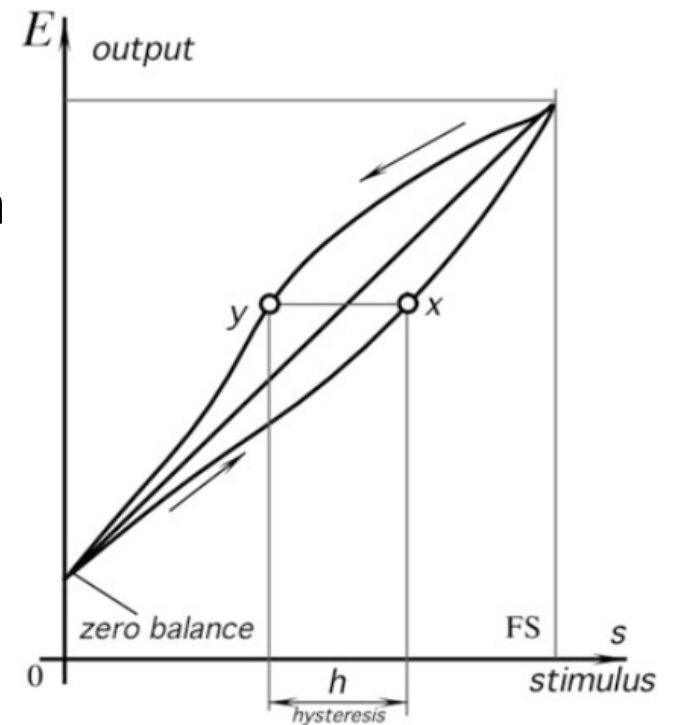


Karakteristike senzora

- **Histerezis**

- Odstupanje izlaza senzora za neku vrednost ulaza kada joj se prilazi iz različitih pravaca.

- Geometrija dizajna
- Trenje
- Strukturne promene u materijalima



Karakteristike senzora

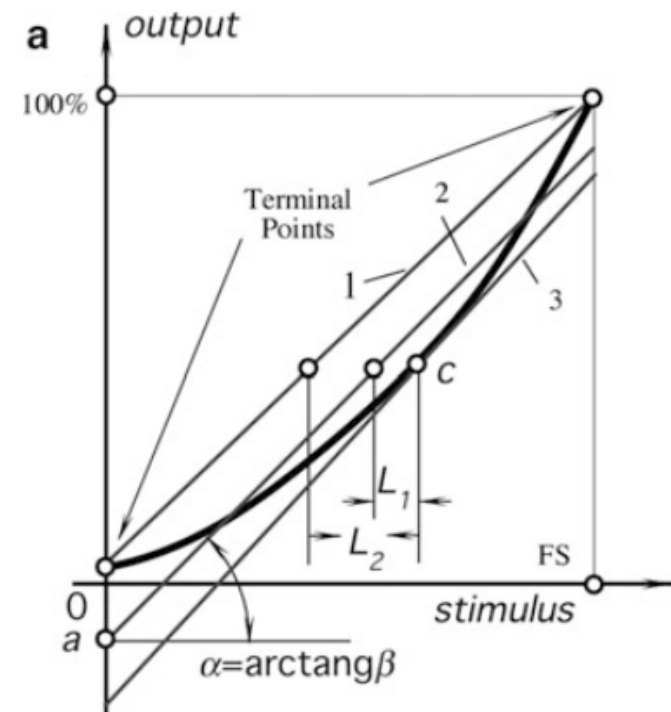
- **Nelinearnost**

- Kod senzora čija se prenosna k-ka može predstaviti pravom linijom.
- Maksimalno odstupanje stvarne k-ke od prave linije
- Kada se vrši višestruka kalibracija potrebno je naznačiti najgoru linearnost
- U procentima FS ili jedinicama ulaza.
- Bez smisla ako se ne naznači u odnosu na koju pravu liniju se definiše
 - Nekoliko načina da se prava linija provuče kroz prenosnu k-ku

Karakteristike senzora

- **Nelinearnost**

- Provlačenje linije kroz krajnje tačke
 - Najmanja greška na krajevima opsega



Karakteristike senzora

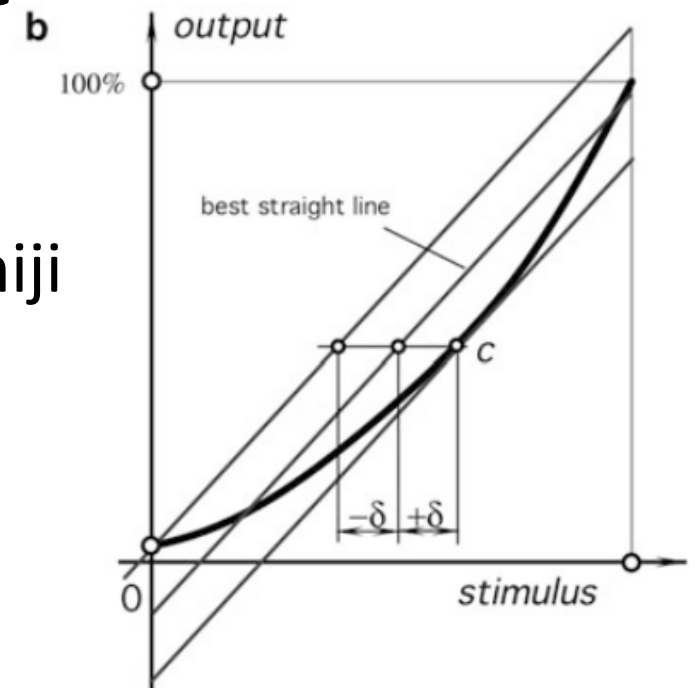
- **Nelinearnost**

- Ako je potrebna bolja linearnost u nekom užem opsegu (npr medicinski termotetar 36-38 °C)
 - Tada se linija provlači kroz tačku koja je na sredini tog opsega, kao tangenta prave prenosne k-ke
 - Nelinearnost je tada najmanja u opsegu od interesa

Karakteristike senzora

- **Nelinearnost**

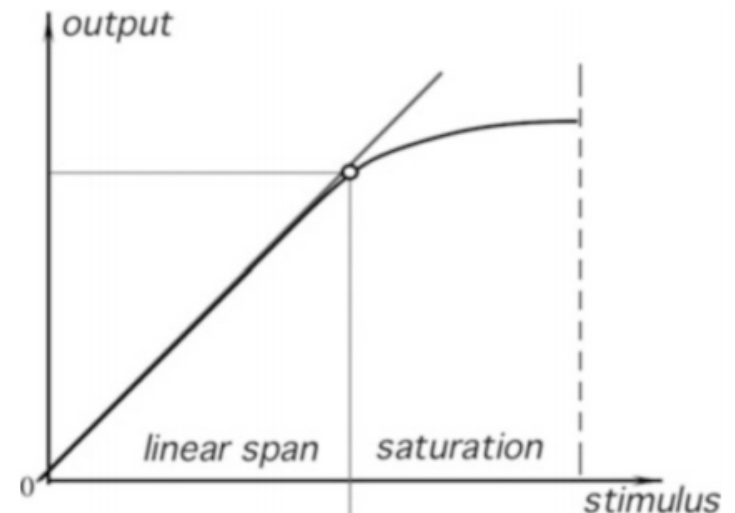
- Nezavisna linearnost se odnosi na tzv najbolju pravu liniju, koja je na sredini između dve prave linije koje su međusobno najbliže i obuhvataju celu realnu prenosnu k-ku
- Kada se ne može izdvojiti značajniji deo opsega ulaza



Karakteristike senzora

- **Zasićenje**

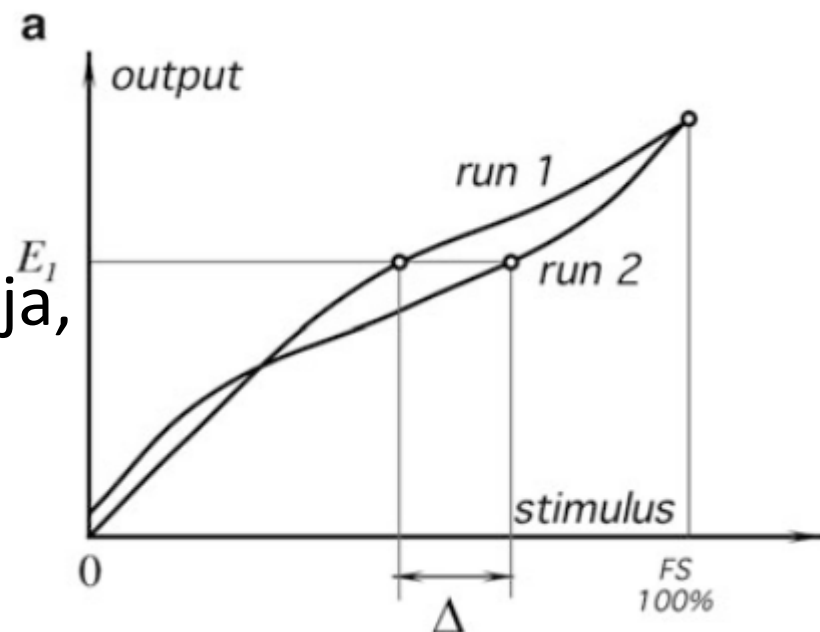
- Pri nekim nivoima pobude, izlaz senzora se više ne menja – nelinearnost na kraju opsega, tj zasićenje



Karakteristike senzora

- **Ponovljivost**

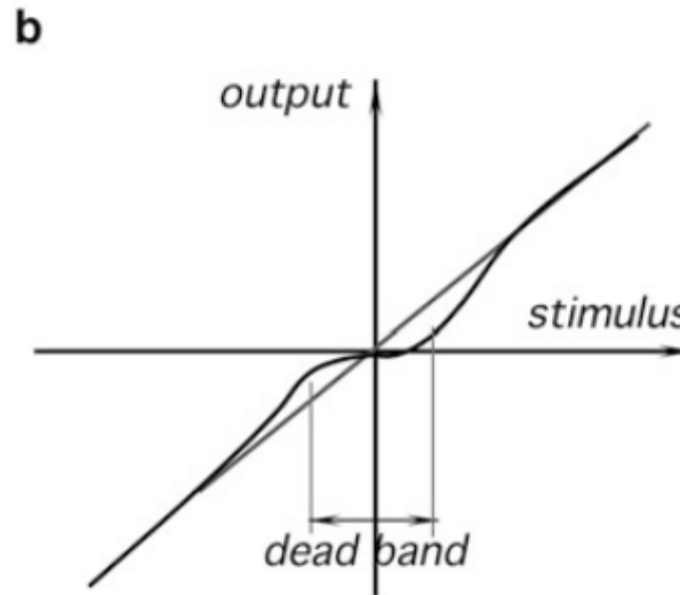
- Senzor pod istim uslovima ne daje na izlazu istu vrednost
- Maksimalna razlika očitavanja u dva uzastopna merenja
 - Obično u procentima FS
- Zbog termalnog šuma, nagomilavanja naelektrisanja, plastičnosti materijala...



Karakteristike senzora

- **Mrtva zona**

- Neosetljivost senzora na promene ulazog signala u određenom opsegu



Karakteristike senzora

- **Rezolucija**

- Najmanja promena pobude koja može da se detektuje
- Pobuda se kontinualno menja, ali neki senzori i kada nema šuma nemaju gladak izlaz
 - Npr za senzor pokreta: *rezolucija – minimalni pomeraj objekta za 20cm na udaljenosti od 5m*
 - Za žičani potenciometerski senzor ugla: *minimalni ugao 0.5°*
 - Nekad se izražava u procentima FS. Ako je FS 270 °, rezolucija je 0.18% FS.
 - Ne mora da bude konstantna na celom opsegu, zato postoje tipična, srednja, i najlošija.
- Za digitalni senzor rezolucija je broj bita, ali se mora znati ili FS ili vrednost LSB.
- Kada ne postoje merljivi skokovi na izlazu, kaže se da je rezolucija infitezimalna (pogrešno je reći beskonačna)

Karakteristike senzora

- **Specifične osobine**

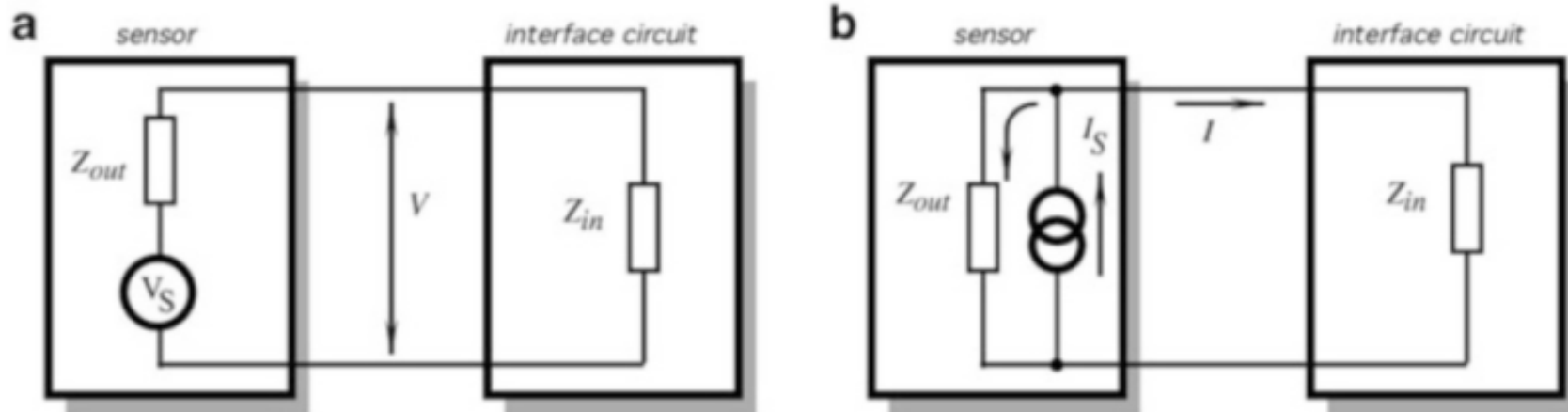
- Za neke specifične senzore postoje specifične osobine

- Npr detektori svetla su osetljivi u nekom ograničenom delu optičkog spektra. Zato je za njih potrebno naznačiti spektralni odziv.

Karakteristike senzora

- **Izlazna impedansa**

- Potrebno je znati zbog boljeg povezivanja senzora i interfejsnog kola
- Strujni senzor što veću, naponski što manju

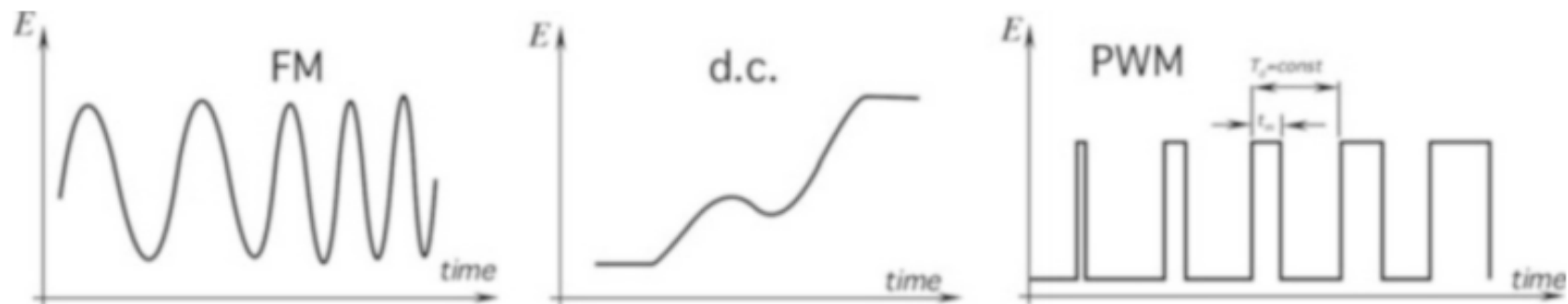


Karakteristike senzora

- **Izlazni format**

- Skup izlaznih električnih karakteristika samog senzora ili zajedno sa integrisanom pobudom (eksitacijom) i kondicionerom signala

- Napon, struja, naelektrisanje, frekvencija, amplituda, faza, polaritet, oblik signala, kašnjenje, digitalni kod...



Karakteristike senzora

- **Izlazni format**
 - Od digitalnih veza, najpopularnija je serijska
 - PWM, UART, I2C, SPI

Karakteristike senzora

- **Eksitacija**

- Signal potreban da senzor bude aktivan

- Opseg napona ili struja, negde svetlost, magnetno polje, uopšteno bilo koja vrsta signala
- Za neke senzore je potrebna određena frekvencija i oblik eksitacije, kao i stabilnost – nagle promene u eksitaciji mogu promeniti prenosnu k-ku, generisati šum, i uzrokovati greške na izlazu

- Npr električna struja koja teče kroz termistor:

Maximum current through a thermistor	in still air	50 μ A
	in water	1 mA

Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

- Kada se pobuda menja značajnom brzinom izlaz senzora je ne prati verno
 - Senzor i njegova sprega sa pobudom ne reaguju uvek trenutno, tako da postoji *dinamička* greška, koja je uvek vremenski zavisna
 - Ako je senzor deo upravljačkog sistema koji ima svoje dinamičke karakteristike, može doći do oscilacija
- *Vreme zagrevanja*, vreme od momenta uključivanja napajanja senzora pa do momenta kada senzor radi ispravno. Kod mnogih je ono zanemarljivo kratko, ali npr kod hemijskih i temperaturnih nije (sekunde do minuta)

Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

- Koriste se diferencijalne jednačine sa konstantnim koeficijentima
- *Senzor nultog reda* ima prenosnu k-ku koja je vremenski nezavisna – u njemu nema komponenti koje skladište energiju. Trenutno reaguje na promenu pobude.
- *Senzor prvog reda* ima jedan element koji skladišti energiju

$$b_1 \frac{dE(t)}{dt} + b_0 E(t) = s(t)$$

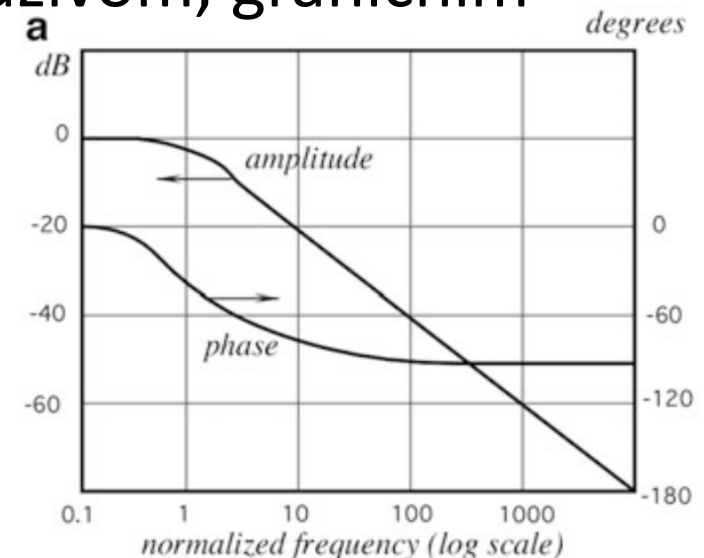
Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

- Primer prvog reda termometar gde se energija skladišti u termalnoj kapacitivnosti senzora u kućištu.

- Karakteriše se frekvencijskim odzivom, graničnim učestanostima (gornja i donja)

- Brzina odziva je povezana sa f. odzivom (promena pobude u vremenu)



Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

- Brzina odziva se definiše i kao vreme potrebno da izlaz dostigne neki nivo, npr 63% ili 90% ustaljenog stanja nakon nagle promene pobude.
- Za senzor prvog reda koristi se vremenska konstanta, mera inercije senzora

$$E = E_m \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

- Za $t = \tau$, $\frac{E}{E_m} = 1 - \frac{1}{e} = 0.6321$

- Nakon protekle jedne vremenske konstante, senzor dostiže 63% konačnog odziva

Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

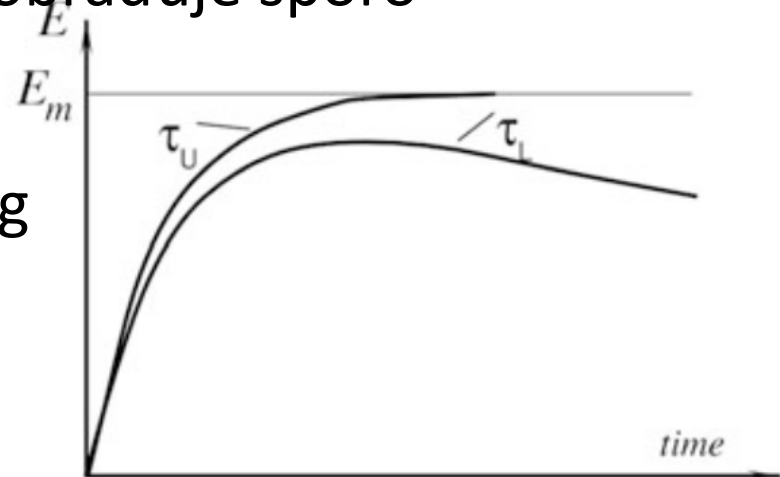
- Gornja granična učestanost pokazuje koliko brzo senzor reaguje, a donja kako obrađuje sporo promenljive signale

- Šac metoda kod senzora prvog reda

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

- Fazna karakteristika pokazuje koliko izlaz kasni u odnosu na ulaz na nekoj određenoj učestanosti – bitno kod obrade periodičnih signala

- Kod upravljačkih sistema sa povratnom spregom redukuje faznu marginu što može dovesti do nestabilnosti



Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

- *Senzor drugog reda* ima dva elementa koji skladište energiju

$$b_2 \frac{d^2 E(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dE(t)}{dt} + b_0 E(t) = s(t)$$

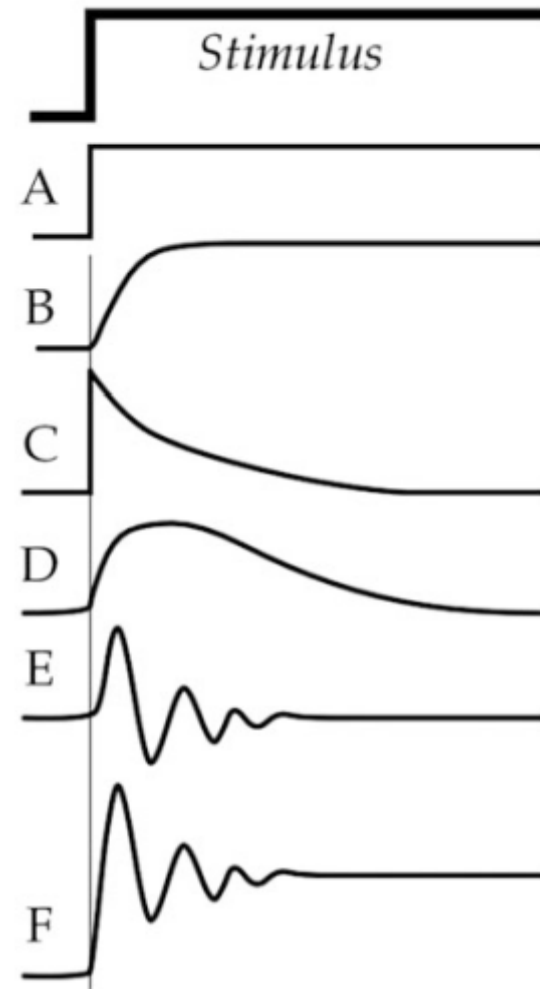
- Primer akcelerometar koji ima oprugu i inerciju
 - Odziv drugog reda se primećuje kod senzora čiji odziv sadrži periodični signal.
 - Ako je periodični signal kratak u pitanju je prigušeni senzor
 - Može trajati duže ili neprestano oscilovati, što je za većinu senzora pokazatelj lošeg rada

Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**
 - Senzori drugog reda se karakterišu rezonantnom učestanošću
 - Izlaz se značajno povećava a ulaz ne
 - Zavisí od mehaničkih, termičkih i električnih karakteristika senzora
 - Ako odziv senzora odgovara II redu proizvođač daje rez f-ju i faktor prigušenja
 - Radni opseg učestanosti senzora uopšte bi trebalo da bude ispod (barem 60%) ili iznad rezonantne učestanosti
 - Kod nekih selektivnih senzora ovo ne važi, već se koristi baš ta učestanost (akustički senzor loma stakla npr)

Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**
 - A senzor 0. reda
 - B senzor 1. reda sa gornjom g.u.
 - C senzor 1. reda sa donjom g.u.
 - D senzor 1. reda sa gornjim i donjom g.u.
 - E uski propusni opseg sa rez.u.
 - F široki propusni opseg sa rez.u.



Karakteristike senzora

- **Dinamičke karakteristike**

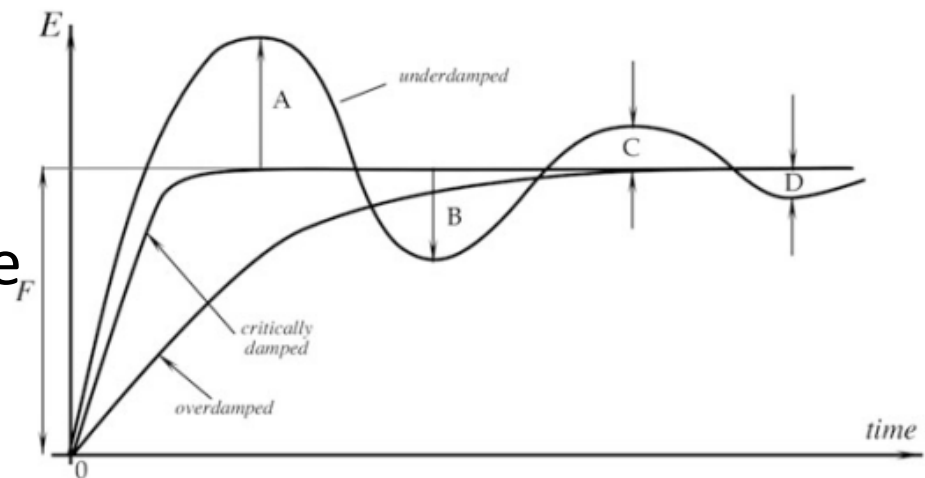
- Prigušenje je progresivna redukcija oscilacija kod senzora koji je reda većeg od prvog

- Odziv brz bez premašenja: *kritično prigušen*
- Odziv sa premašenjem: *nedovoljno prigušen*
- Odziv sporiji nego kritičan: *previše prigušen*

- **Faktor prigušenja** odnos prigušenja senzora i kritičnog prigušenja

- Kod oscilatornog odziva se može izmeriti

$$\frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \dots$$



Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- I dok radi i dok ne radi, senzor je pod uticajem okoline. Proizvođači obično navode sve faktore okoline koji utiču na rad senzora
- *Uslovi skladištenja*, kada senzor nije u radu
 - Određeni period bez trajne promene karakteristika
 - Često minimalna i maksimalna temperatura i maksimalna (nekondenzujuća) relativna vlažnost na tim temperaturama.
 - Kod nekih senzora maksimalni pritisak, prisustvo gasova, kontaminirajuća isparenja

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- Kratkotrajna i dugotrajna stabilnost su deo specifikacije tačnosti
- *Kratkotrajna stabilnost* (drift) je promena performansi senzora u toku minuta, sati, pa i dana.
 - Drugi način da se iskaže ponovljivost jer je drift dvosmeran – ultraspori šum

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- *Dugotrajna stabilnost* (starenje, aging) se vezuje sa ireverzibilnim promenama električnih, termalnih, mehaničkih ili hemijskih osobina materijala senzora.

- Obično jednosmeran i dešava se tokom meseci ili godina.
 - Jako bitan za senzore kod preciznih merenja
 - Veoma zavisi od uslova skladištenja i rada, koliko je senzor izolovan od okoline, i koji materijali se koriste za senzor
 - Organski materijali su kritični

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- Način da se poboljša dugotrajna stabilnost je da se senzor izloži ubrzanom ekstremnom starenju pre korišćenja.
 - Faktori okoline od minimalnih do maksimalnih se menjaju nekoliko puta (npr temperatura)
- Tako se poboljšava stabilnost, ali i pouzdanost (uočavaju se skriveni defekti)

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- Prilikom rada, mnogi faktori utiču na rad senzora

- Npr senzor vazdušnog pritiska je izložen i temperaturi vazduha, vlažnosti, vibracijama, jonizujućem zračenju, elektromagnetnom polju, gravitaciji...

- Svi ovi faktori bi mogli i obično stvarno utiču na rad senzora

- Neki uslovi okoline imaju multiplikativni efekat, tj. menjaju prenosnu k-ku

- Npr osetljivost otporne merne trake zavisi od temperature

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- Stabilnost senzora u odnosu na uslove okoline je veoma važna

- Npr piezoelektrični akcelerometar može da generiše lažne signale ako je izložen nagloj promeni temperature, elektrostatičkom pražnjenju, triboeletričnom efektu, vibracijama kabla, elektromagnetnoj interferenciji...

- U takvim slučajevima potrebne dodatne mere

- zaštitno kućište, električno oklapanje, termička izolacija ili termostat, ili korišćenje diferencijalnog dizajna.

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- Temperaturni efekti moraju biti poznati
- Radni opseg temperatura definisan je donjom i gornjom granicom u okviru kojih sezor radi sa zadatom tačnošću
- Mnoge karakteristike senzora se menjaju sa temperaturom i menjaju prenosnu k-ku
- Kompenzacioni elementi se ubacuju u senzor ili kolo za kondicioniranje signala

Karakteristike senzora

- **Uslovi okoline**

- *Samozagrevanje* se uzima u obzir ako se energija eksitacije apsorbuje od strane senzora i menja temperaturu tako da utiče na tačnost
- Primer termistor koji se eksituje strujom. Ako je sprega sa okolinom loša, temperatura senzora raste
→ dolazi do grešaka
 - Sprega zavisi od medijuma u kojem se senzor nalazi, najgora u nepokretnom vazduhu

$$\Delta t^{\circ} = \frac{V}{R(\xi v c + \alpha)}$$

Karakteristike senzora

- **Pouzdanost** je mogućnost senzora da vrši određenu funkciju pod zadatim uslovima u zatom periodu
- U statističkom smislu kao verovatnoća da će uređaj raditi bez otkaza (trenutnog ili trajnog) u određenom vremenu ili tokom nekog broja korišćenja.
- Retko se specificira, jer nema opšte dogovorene metrike.

Karakteristike senzora

- Jedna od mera pouzdanosti je MTTF (mean time to failure)

$$\text{MTTF} = \frac{1}{n} \sum_i (t_{fi} - t_{0i})$$

- Razna testiranja
 - Ekstremno testiranje (Extreme testing)
 - Ubrzano testiranje (Accelerated Life Testing)

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Ništa na svetu nije idealno.

- Materijali nisu baš onakvi kakvi mislimo da jesu, naše znanje o njima je uvek približno
 - Mašine nisu idealne i nikad ne proizvode komade identične crtežima
 - Sve komponente imaju drift zbog okoline i starenja
 - Spoljašnji uticaju mogu ući u sistem i promeniti izlazni signal
 - Ljudski faktor je uvek prisutan

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Svaki merni sistem sastoji se od velikog broja komponenti
 - Koliko god merenje bilo tačno, ono je uvek procena stvarne vrednosti.
 - Rezultat merenja je kompletan samo ako ga prati i kvantitativna mera njegove nesigurnosti
- Kada se vrše pojedinačna merenja pod realnim uslovima očekujemo da senzor pobudu s predstavi nešto drugačijom vrednošću s' , tako da je greška

$$\delta = s' - s.$$

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Greška i nesigurnost nisu isto!

- Greška se donekle može kompenzovati, i tako doći do prave vrednosti merene veličine sa malom greškom
 - Uprkos maloj grešci, nesigurnost može biti velika jer ne možemo verovati da je greška stvarno mala

- Faktori od kojih zavisi nesigurnost:

- **A** Oni koji se procenjuju statističkim metodama
 - Uopšteno slučajni efekti
 - **B** Oni koji se procenjuju na drugi način
 - Uopšteno sistemski efekti

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Tip A se uopšteno specificira preko standardne devijacije σ_i , i broja stepeni slobode ν_i . *Standardna nesigurnost* je tada

$$u_i = \sigma_i$$

i ona opisuje svaku od komponenti nesigurnosti koja utiče na ukupnu nesigurnost

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Standardna nesigurnost tipa B se procenjuje na osnovu naučne procene na osnovu raspoloživih informacija

- Prethodna merenja
 - Iskustvo sa ili znanje o ponašanju i osobinama senzora, materijala, i instrumenata
 - Specifikacije proizvođača
 - Podaci dobijeni kalibracijom i slični izveštaji
 - Nesigurnosti referentnih podataka

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Kada su poznate A i B nesigurnosti, potrebno ih je kombinovati da bi se dobila *kombinovana standardna nesigurnost*.

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

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Primer termometar sa termistorom

Source of uncertainty	Standard uncertainty (°C)	Type
<i>Calibration of sensor</i>		
Reference temperature source	0.03	A
Coupling between reference and sensor	0.02	A
<i>Measured errors</i>		
Repeated observations	0.02	A
Sensor inherent noise	0.01	A
Amplifier noise	0.005	A
DVM error	0.005	A
Sensor aging	0.025	B
Thermal loss through connecting wires	0.015	A
Dynamic error due to sensor's inertia	0.005	B
Transmitted noise	0.02	A
Misfit of transfer function	0.02	B
<i>Ambient drifts</i>		
Voltage reference	0.01	A
Bridge resistors	0.01	A
Dielectric absorption in A/D capacitor	0.005	B
Digital resolution	0.01	A
<i>Combined standard uncertainty</i>	0.062	

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Mora se biti veoma pažljiv da se ne previdi neka nesigurnost kada se računa kombinovana, ne samo u senzoru već i u interfejsnom kolu, eksperimentalnom setapu, i objektu merenja.
- U obzir se moraju uzeti i razni uslovi okoline (temperatura, vlažnost, pritisak, varijacija napona napajanja, preneseni šum, starenje...)

Karakteristike senzora

- **Nesigurnost**

- Nebitno koliko je izmerena vrednost bliska stvarnoj, ne može se biti siguran koliko je tačna. Izračunata kombinovana standardna nesigurnost ne garantuje da će greška uvek biti manja.
- To je samo standardna devijacija
- Sama reč nesigurnost označava da je u pitanju procena i nema dobro definisane granice.