

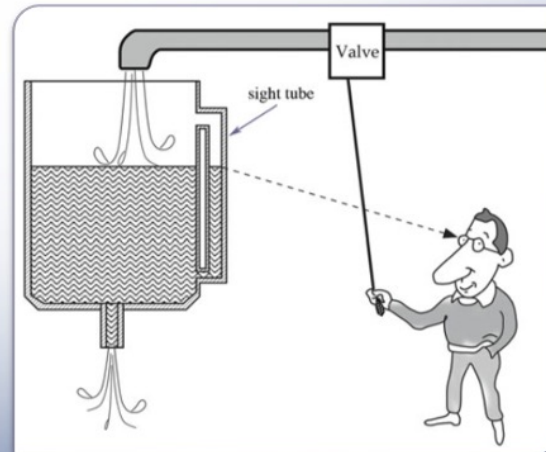


UVOD

FIZIČKO-TEHNIČKA MJERENJA, ETR, ELEKTRONIKA.

DEFINICIJA SENZORA

- Sensor se često definiše kao uređaj koji na stimulus odgovara signalom (?)



Senzor se često definiše kao uređaj koji na stimulus odgovara signalom. Međutim, ova definicija je suviše široka. Toliko je široka da se može primijeniti na sve od ljudskog oka do okidača na pištolju. Posmatrajmo sistem za kontrolu nivoa tečnosti prikazan na slici. Operator podešava nivo tečnosti u rezervoaru pomoću ventila. Varijacije u brzini protoka fluida, promjene temperature (došlo bi do promjene viskoznosti fluida a samim tim brzine protoka fluida kroz ventil), kao i ostale spoljašnje uticaje mora kompenzovati operator. Kako bi se obezbijedila odgovarajuća kontrola, operator mora konstantno pratiti nivo tečnosti u rezervoaru. U predstavljenom primjeru, informaciju generiše senzor koji se sastoji od dva osnovna dijela: cijevi za posmatranje i oka operatora koje generiše električni impuls u optičkom nervu. Cijev za posmatranje sama po sebi nije senzor, a ni oko posmatrača u ovom primjeru takođe nije senzor. Samo kombinacija ova dva elementa čini senzor specifične namjene (detektor) koji je selektivno osjetljiv na nivo fluida u rezervoaru. Ukoliko je cijev za posmatranje pravilno dimenzionisana, veoma brzo će reflektovati promjene u nivou tečnosti u rezervoaru tj. imaće veoma brz odziv. Ukoliko je unutrašnji prečnik cijevi isuviše mali za dati viskozitet tečnosti, nivo tečnosti u cijevi za posmatranje će zaostajati za nivoom tečnosti u rezervoaru. Dakle, performanse senzora se mogu ocijeniti jedino u sklopu sistema za akviziciju podataka.

DEFINICIJA SENZORA

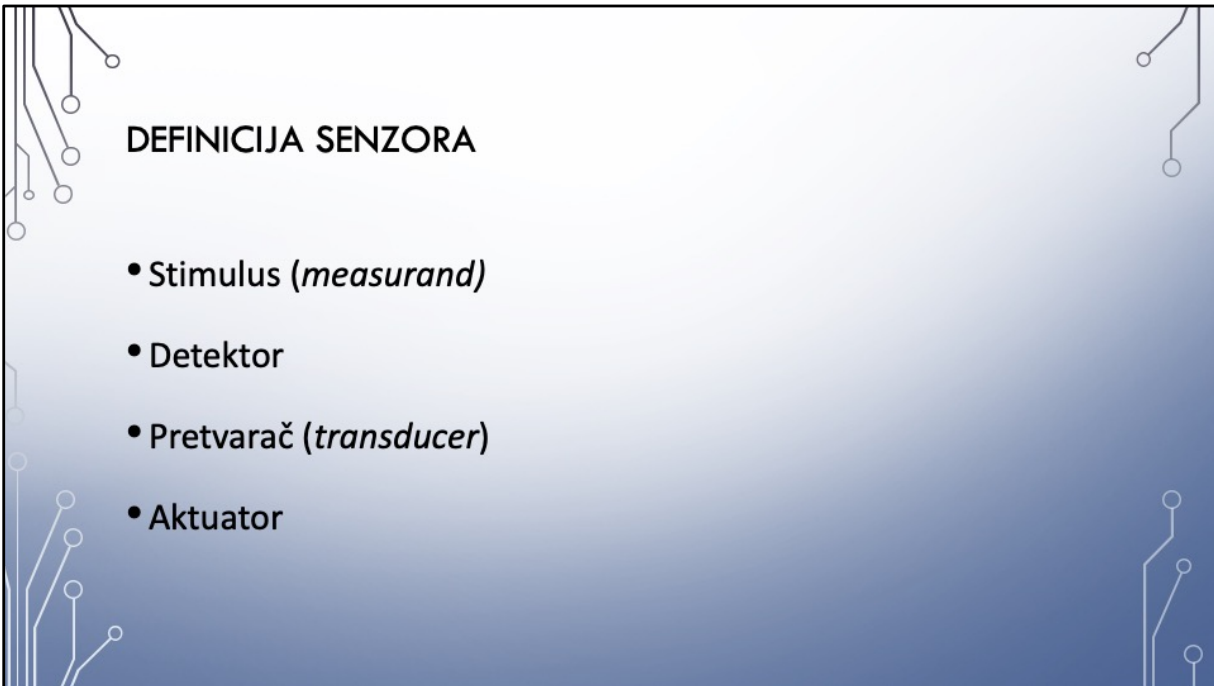
- Prirodni senzori: transport jona
- Vještački senzori: transport elektrona
- ✓ **Senzor je uređaj koji na stimulus odgovara električnim signalom.**
- ✓ **Senzor generalno prevodi neelektričnu veličinu u električnu veličinu.**

Prirodni senzori, kao oni koji se nalaze u živim organizmima, obično odgovaraju signalima koji imaju elektro-hemijski karakter, odnosno, njihova fizička priroda je bazirana na transportu jona, kao u nervnim vlaknima (optički nerv u prethodnom primjeru). Kod uređaja koje je napravio čovjek, informacija se takođe prenosi i obrađuje u električnoj formi, ali transportom elektrona.

Senzori namijenjeni vještačkim sistemima moraju govoriti jezikom sistema. Jezik je električne prirode i senzor mora biti u stanju da odgovori izlaznim signalom gdje su nosioci informacije elektroni, a ne joni. Iz datog uvoda slijedi malo uža definicija senzora: Senzor je uređaj koji na stimulus odgovara električnim signalom.

Može se reći da senzor prevodi generalno neelektričnu veličinu u električnu veličinu. Izlazni signal senzora može biti u formi napona, struje, ili naelektrisanja koji se dalje mogu opisati amplitudom, polaritetom, frekvencijom, fazom ili digitalnim kodom. Svaki senzor je konvertor energije. U procesu mjerenja, dolazi do prenosa informacija, a prenos informacija zahtijeva i prenos energije. Prenos energije može biti dvosmeran. Na primjer, infracrveni radijacioni senzor će dati pozitivan napon ukoliko je objekat topliji od senzora (infracrveni fluks je usmjeren ka senzoru). Napon postaje negativan kada je objekat hladniji od senzora (infracrveni fluks je usmjeren od senzora

ka objektu). Ukoliko su i senzor i objekat potpuno iste temperature, fluks je jednak nuli, pa je i izlazni napon jednak nuli.



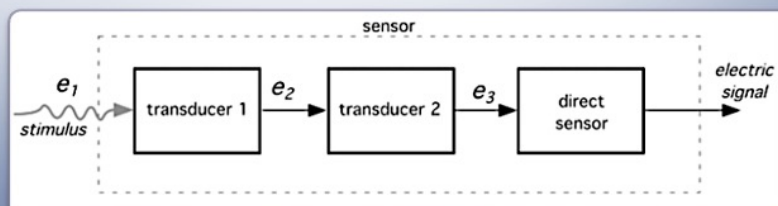
Primjeri stimulusa bi bili: intenzitet svjetlosti i talasna dužina svjetlosti, zvuk, sila, rastojanje, brzina kretanja, hemijski sastav. U literaturi se umjesto pojma stimulus, koristi i pojam *measurand*.

Termin senzor i termin **detektor** se koriste kao sinonimi. Međutim, detektor se češće koristi ukoliko se želi istaći kvalitativna u odnosu na kvantitativnu prirodu mjerenja. Na primjer, PIR (*passive infrared*) detektor se koristi da ukaže samo da je detektovano kretanje čovjeka, ali generalno ne može da izmjeri pravac, brzinu, ubrzanje.

Pojam senzor treba razlikovati od pojma **pretvarač**. Pretvarač konvertuje bilo koji tip energije ili svojstva u odgovarajući oblik energije ili svojstva, dok senzor vrši konverziju u električni signal. Primjer pretvarača bi bio zvučnik koji konvertuje električni signal u varijabilno magnetno polje, odnosno u zvučni talas. Pretvarači se mogu koristiti i kao aktuatori u mnogim sistemima. **Aktuator** bi bio neki komplement senzoru, on konvertuje električni signal u generalno neelektričnu veličinu. Na primjer, električni motor je aktuator, konvertuje električnu energiju u mehaničku radnju. Drugi primjer bi bio pneumatski ventil.

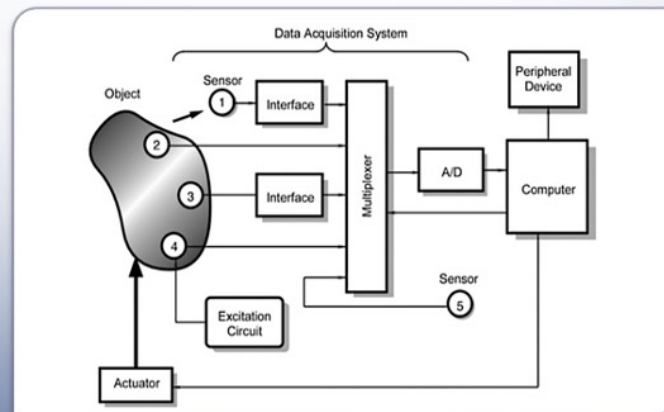
DEFINICIJA SENZORA

- Direktni senzor
- Hibridni senzor



Pretvarači mogu biti dio hibridnog ili kompleksnog senzora, slika. Na primjer, hemijski senzor se može sastojati od dva dijela: prvi dio konvertuje energiju hemijske reakcije u toplotu (pretvarač), dok drugi dio (*thermopile*) konvertuje toplotu u električni izlazni signal. Kombinacija pretvarača i *thermopile*-a čini hibridni hemijski senzor koji na izlazu daje električni signal kao odgovor na hemijsku reakciju. Mnogi senzori se sastoje od većeg broja pretvarača i bar jednog senzora direktnog tipa. **Direktni senzori** su oni kod kojih se koristi fizički efekat direktne konverzije energije u električni signal. Primjer su fotoelektrični efekat i *Seebeck* efekat.

SENZOR KAO DIO SISTEMA



Senzor ne funkcioniše samostalno, uvijek je dio nekog većeg sistema koji može sadržati veliki broj detektora, procesora, memorija, rekordera i aktuatora. Senzor može biti smješten na ulazu uređaja kako bi informisao sistem o varijacijama spoljašnjih stimulusa. On takođe može biti sastavni dio uređaja i služiti za praćenje stanje uređaja. Senzor je uvijek dio sistema za neku vrstu akvizicije podataka. Takav sistem opet može biti dio nekog složenijeg kontrolnog sistema koji sadrži različite povratne mehanizme.

Na slici prikazan je blok dijagram sistema za akviziciju i kontrolnog sistema. Objekat može biti bilo šta: automobil, svemirski brod, životinja, tečnost, gas, čovjek. Podaci se prikupljaju od objekta pomoću velikog broja senzora. Neki od njih (2, 3 i 4) su pozicionirani direktno na objektu ili unutar njega. Senzor 1 je beskontaktnog tipa, kao što su na primjer detektor zračenja i TV kamera. Kod beskontaktnog senzora, iako ne postoji direktan kontakt, postoji prenos energije između senzora i objekta. Senzor 5 služi za monitoring internih uslova sistema za akviziciju podataka. Neki senzori (1 i 3) se ne mogu direktno povezati na standardna elektronska kola zbog neodgovarajućeg formata izlaznog signala. Njima je potrebno interfejsno kolo za kondicioniranje signala kako bi se dobio odgovarajući format izlaznog signala. Senzori 1, 2, 3 i 5 su **pasivni** senzori. Oni generišu električni signal bez dodatnog trošenja električne energije. Senzor 4 je **aktivni** senzor. On zahtijeva pobudno kolo.

Primjer aktivnih senzora je termistor koji je temperaturno-osjetljiv otpornik. Potreban mu je strujni izvor, koji u ovom primjeru predstavlja pobudno kolo. U zavisnosti od složenosti sistema, ukupan broj senzora varira od jednog (kućni termostat) do nekoliko hiljada (svemirska stanica).

Električni signali koje generiše senzor se vode na multiplekser. Funkcija multipleksera je da prosljeđuje signal odgovarajućeg senzora u datom trenutku na ulaz AD konvertora ukoliko je izlaz senzora analogna veličina, odnosno prema računaru, ukoliko je izlaz senzora u digitalnom formatu. Računar vrši kontrolu tajminga multipleksera i AD konvertora. Takođe, računar može da šalje odgovarajuće kontrolne signale prema aktuatoru. Sistem takođe sadrži periferije (npr: rekorder, displeje, alarm...) i veliki broj kola za kondicioniranje signala koja nisu prikazana na dijagramu (filtre, SH kola, pojačavače...).

SENZOR KAO DIO SISTEMA

Primjeri:

- Monitoring vrata automobila
- Sistem za anesteziju pacijenta
- ASV (*Nissan*)
- Piezorezistivni senzor aortalnog pritiska

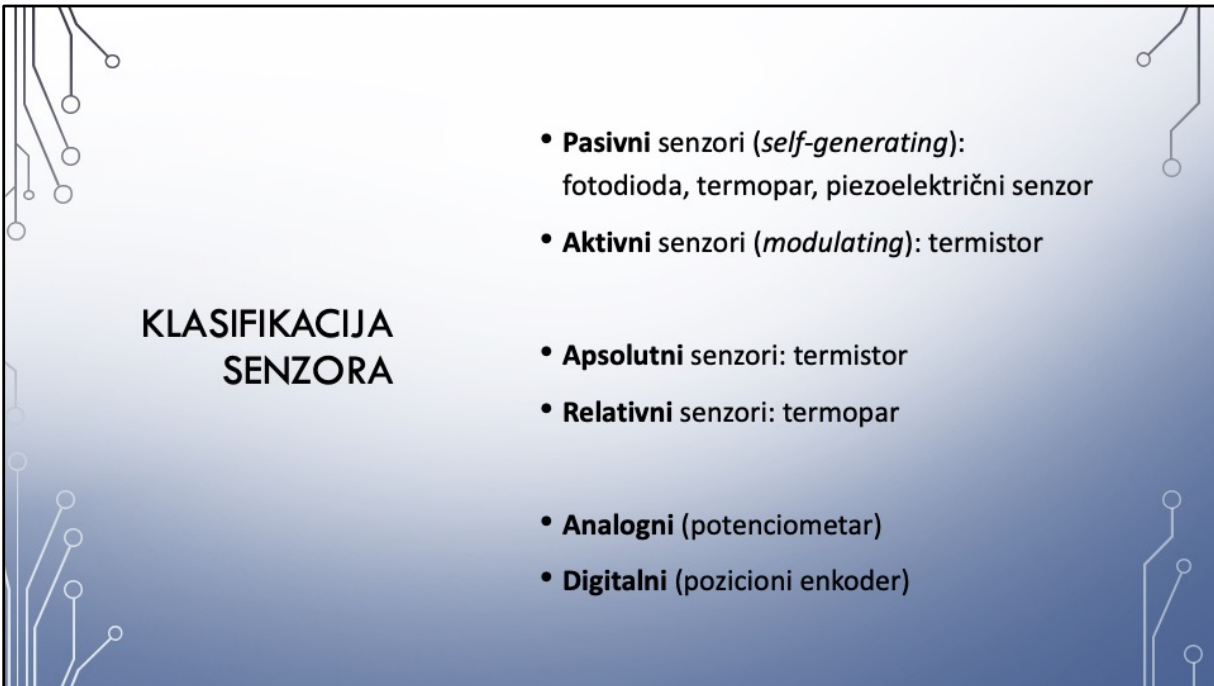
U cilju ilustracije rada takvog sistema, može se razmotriti jednostavan sistem za monitoring vrata automobila. Svaka vrata automobila sadrže senzore koji detektuju poziciju vrata (otvorena ili zatvorena). Kod većine automobila, senzor je jednostavni električni prekidač. Signali sa prekidača svih vrata automobila prosljeđuju se prema internom procesoru (nema potrebe za AD konverzijom jer su signali u digitalnom formatu). Procesor detektuje koja vrata su otvorena (signal je nula) i šalje odgovarajuću poruku perifernom uređaju (kontrolna table i zvučni alarm). Vozač (aktuator) prima poruku i vrši odgovarajuću radnju - zatvara vrata. Izlaz senzora se mijenja u logičku jedinicu.

Primjer složenijeg uređaja je sistem za anesteziju pacijenata prilikom hirurških intervencija. Namijenjen je za kontrolu količine anestetika koji se primjenjuje inhalacijom. Sistem koristi nekoliko aktivnih i pasivnih senzora. Koncentracija anestetika se selektivno posmatra pomoću piezoelektričnog senzora koji je smješten na ventilacionoj cijevi. Molekuli gasa mijenjaju frekvenciju oscilatora na bazi kristala, što predstavlja mjeru koncentracije gasa. U ovom sistemu potrebno je izmjeriti i koncentraciju CO₂, kako bi se razlikovao udah od izdaha, temperaturu, pritisak. Izlazi senzora se digitalizuju i prosljeđuju DSP-u na dalju obradu, odnosno, izračunavanje koncentracije gasa. Anesteziolog odabere željenu dozu anestetika, a kontroler izvršava

podešavanje aktuatora kako bi se održala odgovarajuća koncentracija anestetika.

Još jedan primjer složene kombinacije različitih senzora, aktuatora, i interfejsa je ASV (*Advanced Safety Vehicle*) koje je razvio *Nissan*. Sistem obezbjeđuje visoku bezbjednost u vozilu. Pored mnogobrojnih senzora, tu je i sistem za uočavanje "pospanosti" vozača koji prati pokrete očne jabučice kao i inklinaciju glave vozača. Sadrži i sistem koji u odgovarajućim situacijama aktivira štop svjetla čak i prije nego vozač naglo zakoči, kako bi vozač u vozilu iza bio na vrijeme obaviješten o vanrednoj situaciji u saobraćaju. Tu je i sistem za upozorenje ukoliko se na putu nalazi prepreka. Adaptivni *cruise-control* sistem podrazumijeva smanjenje brzine kretanja vozila, kako bi se održalo odgovarajuće rastojanje među vozilima. Ovaj automobil sadrži i sistem za uočavanje pješaka noću, kao i sistem za održavanje automobila u odgovarajućoj kolovoznoj traci, ukoliko sistem ocijeni da napuštanje kolovozne trake nije namjera vozača.

U principu, ulazni signal senzora (stimulus) može da bude bilo fizičke ili hemijske prirode (svjetlosni fluks, temperatura, pritisak, vibracije, pomjeraj, pozicija, koncentracija jona,...). Senzori se često proizvode za širu upotrebu. Na primjer, mikro piezorezistivni senzor pritiska se može koristiti u kućištu otpornom na vodu za invazivno mjerenje aortalnog krvnog pritiska preko katetera. Isti senzor se smješta u potpuno drugačije kućište ukoliko se koristi za mjerenje krvnog pritiska neinvazivnom oscilometrijskom metodom. Neki senzori su dizajnirani tako da budu osjetljivi samo na određeni opseg stimulusa, dok su istovremeno imuni na stimulus van zadatih granica. Na primjer, senzor za detekciju kretanja u bezbjednosnim sistemima bi trebalo da budu osjetljivi na kretanje čovjeka, ali ne i na kretanje manjih živih bića kao što su psi ili mačke.



Klasifikacione šeme senzora variraju od jednostavnijih do veoma složenih. U zavisnosti od svrhe klasifikacije, mogu se izabrati različiti klasifikacioni kriterijumi. Slijedi nekoliko pristupa klasifikaciji.

Svi senzori se mogu podijeliti na dvije osnovne vrste: pasivne i aktivne.

Pasivni senzori ne zahtijevaju dodatni izvor energije. Generišu električni signal kao odziv na spoljašnju stimulus. Senzor konvertuje energiju stimulusa u izlazni signal. Primjeri su termopar, fotodioda, piezoelektrični senzor. Većina pasivnih senzora su direktni senzori.

Aktivni senzori zahtijevaju eksterni izvor energije, koji se označava kao pobudni signal. Senzor moduliše taj signal i generiše odgovarajući izlazni signal. Aktivni senzori se često označavaju i kao parametarski. Parametri senzora modulišu pobudni signal i izvršena modulacija nosi informaciju o mjerenoj veličini. Na primjer, termistor je temperaturno-osjetljiv otpornik. On ne generiše električni signal. Međutim, propuštajući struju (pobudni signal) kroz termistor, može se mjeriti njegova otpornost mjerenjem varijacija napona na njegovim krajevima. Mjerenjem promjene otpornosti, dobija se informacija o promjeni temperature.

Senzori se mogu podijeliti i na apsolutne i relativne. Apsolutni senzor detektuje

stimulus u odnosu na apsolutnu fizičku skalu koja je nezavisna od uslova mjerenja, dok je izlazni signal kod relativnih senzora vezan za neki specifičan uslov. Primjer apsolutnog senzora bi opet bio termistor. Njegova električna otpornost je u direktnoj vezi sa apsolutnom temperaturnom skalom. Drugi veoma popularan temperaturni senzor termopar je relativni senzor. Na izlazu termopara je napon koji je funkcija gradijenta temperature duž provodnih linija termopara. Dakle, izlazni signal termopara ne ukazuje direktno na izmjerenu temperaturu, već je potrebno uzeti u obzir specifičnu bazu tj. referentnu temperaturu.

KLASIFIKACIJA SENZORA

- Prema **tipu stimulusa**: akustični, biološki, hemijski, električni, magnetni, optički, mehanički, radijacioni, termalni,...
- Prema **oblasti primjene**: agrikultura, medicina, civilno inženjerstvo, energija, proizvodnja, vojska, transport, domaćinstvo, meteorologija, bezbjednost, telekomunikacije,...

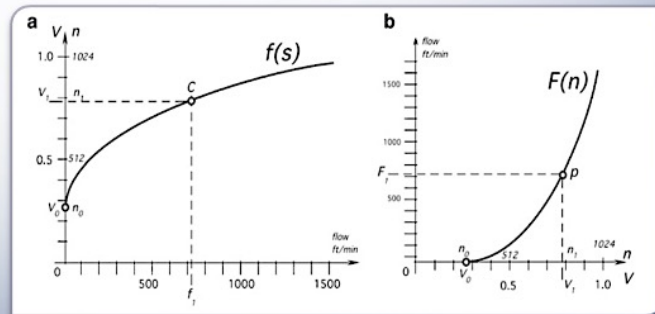
PRENOSNA FUNKCIJA. MATEMATIČKO MODELOVANJE.

Prenosna funkcija:

$$E = f(s)$$

Inverzna prenosna funkcija:

$$s = f^{-1}(E) = F(E)$$



Prenosna funkcija termo-anemometra

Kako većina stimulusa nisu električne prirode, od ulaza prema izlazu sistema potrebno je izvršiti nekoliko konverzija signala prije nego se dobije električni signal na izlazu. Na primjer, pritisak izvršen nad optičkim vlaknom optičkog senzora pritiska najprije rezultira naprezanjem vlakna, što dovodi do promjene indeksa prelamanja, što dalje moduliše gustinu fotona u vlaknu, i konačno fotodioda kao odgovor na upadnu svjetlost generiše fotostruju. U narednom izlaganju biće riječi o prenosnoj karakteristici senzora, dok će se sam senzor posmatrati kao "crna kutija". Cilj je odrediti nepoznati stimulus na osnovu električnog odziva senzora. U tom smislu, neophodno je poznavati prenosnu karakteristiku senzora.

Idealna ili teorijska relacija između ulaznog i izlaznog signala senzora uvijek postoji. Ukoliko je senzor idealno dizajniran i proizveden od savršenih materijala u idealnom okruženju upotrebom idealnih alata, izlaz senzora će u potpunosti reprezentovati stimulus. Idealna relacija ulaz-izlaz može biti data tabelarno, grafički ili u formi matematičkog modela. Ulazno-izlazna relacija koja je vremenski invarijantna se označava kao statička prenosna funkcija ili samo prenosna funkcija. Statička prenosna funkcija predstavlja relaciju između ulaznog signala s i električnog signala E koji daje senzor na svom izlazu:

$$E = f(s)$$

Izmjerena veličina E (napon, struja,...) reprezentuje stimulus s . Zadatak dizajnera senzora bi bio da ta reprezentacija bude što bliža tačnoj vrijednosti stimulusa s . U praksi, senzor je najčešće dio složenijeg mjernog sistema. Mjerni sistem će koristiti inverznu prenosnu funkciju:

$$s = f^{-1}(E) = F(E)$$

kako bi se izračunala vrijednost stimulusa s . Najčešće je potrebno naći prenosnu funkciju kompletnog mjernog sistema, uključujući i senzor.

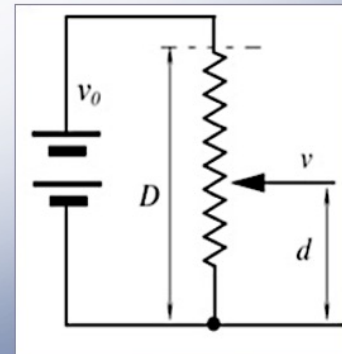
Na slici lijevo je prikazana prenosna funkcija termo-anemometra koji mjeri brzinu protok fluida. U principu, ona se može modelovati kvadratnom funkcijom. Izlaz senzora je napon ili broj kao izlaz 10-bitnog AD konverora, kako je prikazano na slici. Nakon očitano rezultata, potrebno je iskoristiti inverznu funkciju prenosa kako bi se izračunala tražena vrijednost, slika desno.

PRENOSNA FUNKCIJA. KONCEPT

- **Poznavanje fizičkog zakona** na kome se senzor bazira
- *Primjer:* linearni rezistivni potencijometar za mjerenje pomjeraja:

$$d = \frac{D}{V_0} V$$

- **Aproksimacije**



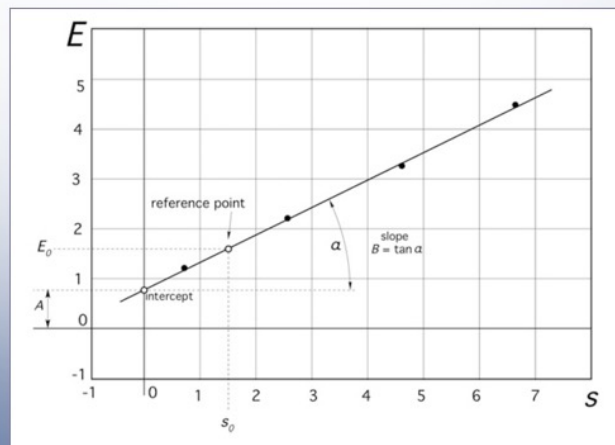
Prije svega, potrebno je **poznavati fizički zakon** na kome se senzor bazira. Posmatrajmo primjer linearnog rezistivnog potencijometra koji se koristi za mjerenje pomjeraja d , slika. Mjerenjem napona V , može se izračunati pomjeraj d :

$$d = \frac{D}{V_0} V$$

gdje je V_0 referentni napon, dok je D maksimalni pomjeraj (*full scale*).

U praksi, veoma često ne postoje jednostavne prenosne funkcije koje opisuju vezu između ulazne i izlazne veličine senzora, već je uglavnom potrebno vršiti odgovarajuće **aproksimacije**.

PRENOSNA FUNKCIJA. APROKSIMACIJE



Aproksimacija je odabir pogodnog matematičkog izraza koji se u što većoj mjeri poklapa sa eksperimentalnim rezultatima. Poželjno je da dobijena funkcija bude što jednostavnija, ukoliko je to moguće.

Najjednostavniji model prenosne funkcije je linearni, slika:

$$E = A + Bs$$

Crne tačke označavaju eksperimentalne podatke. Nagib karakteristike predstavlja osjetljivost sistema.

Veoma često senzor nije moguće testirati za nulti ulaz. Iz tog razloga, kod većine linearnih ili kvazilinearnih senzora poželjno je uvesti referentnu vrijednost s_0 :

$$E = E_0 + B(s - s_0)$$

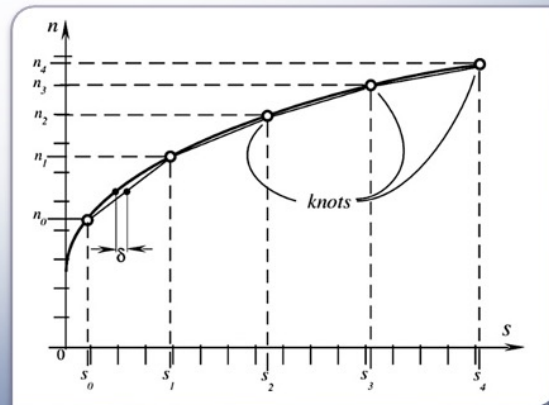
Gotovo da ne postoji senzor čija je prenosna karakteristika linearna. Uvijek je prisutna makar mala nelinearnost, naročito ukoliko je u pitanju širok opseg ulazne veličine. Prethodne relacije predstavljaju samo linearne aproksimacije odziva senzora gdje se nelinearnost u specifičnom slučaju može zanemariti. U mnogim situacijama, gdje se nelinearnost ipak ne može zanemariti prenosna funkcija se nekad može aproksimirati

grupom linearnih funkcija.

Postoje slučajevi kada se nelinearna prenosna funkcija može aproksimirati nelinearnim matematičkim funkcijama, kao što su logaritamska, eksponencijalna, kvadratna. Prednost ovih funkcija je ta što imaju mali broj parametara koje je potrebno odrediti u postupku kalibracije.

PRENOSNA FUNKCIJA. APROKSIMACIJE

- Linearna regresija
- Polinomialne aproksimacije
- Segmentno linearana aproksimacija (PWL)
- *Spline* interpolacija



U cilju izbjegavanja slučajnih grešaka u procesu kalibracije, može se koristiti metoda najmanjih kvadrata kako bi se našli odgovarajući parametri optimalne prave.

Postoji nekoliko osnovnih tehnika koje se mogu iskoristiti u situaciji kada senzor nema linearnu prenosnu karakteristiku. Jedna od njih je polinomialna aproksimacija. U najvećem broju slučajeva, dovoljno je provjeriti da li se aproksimacija drugog ili trećeg reda dovoljno dobro poklapa sa eksperimentalnim rezultatima.

Segmentno linearna aproksimacija je metoda koja se široko koristi u sistemima za akviziciju podataka. Ideja je da se nelinearna prenosna karakteristika podijeli u segmente u okviru kojih se može smatrati linearnom, slika. Aproksimacija se vrši samo za opseg ulazne veličine koji je od interesa. U prikazanom primjeru, to nije slučaj za opseg ulazne veličine od 0 do s_0 .

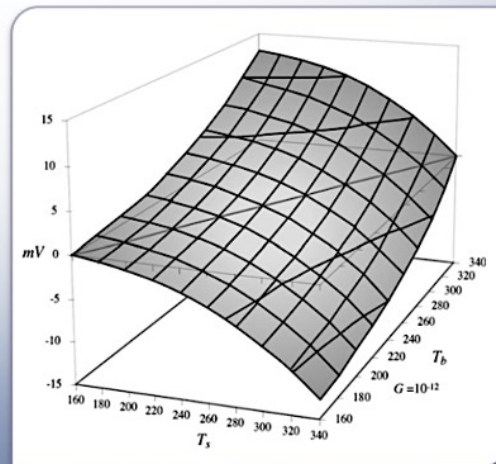
Greška segmentno linearne aproksimacije se može opisati preko maksimalne devijacije δ aproksimacije u odnosu na stvarnu krivu. Ukoliko je devijacija neprihvatljivo velika, potrebno je suziti odgovarajuće segmente, odnosno povećati broj segmenata. Širina segmenata ne mora biti jednaka, već se prilagođava maksimalnoj prihvatljivoj devijaciji.

Aproksimacije polinomima višeg reda imaju određene nedostatke. Naime, određene tačke na jednom dijelu krive imaju značajan uticaj na udaljene tačke iste krive. Ovaj problem se donekle rješava *spline* metodom aproksimacije. *Spline* metod slično segmentnoj linearnoj aproksimaciji, podrazumijeva interpolaciju polinomom obično trećeg reda po segmentima. Dobijene krive se međusobno povezuju, kako bi se dobila glatka (*smooth*) kriva. *Spline* aproksimacija može da bude računski veoma zahtjevna, što treba uzeti u obzir pri ograničenim hardverskim resursima.

MATEMATIČKO MODELOVANJE. APROKSIMACIJE

- Multidimenzionalne prenosne funkcije
- *Primjer:* senzor termalnog zračenja

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



Prenosna funkcija senzora može da zavisi od više od jedne ulazne veličine, odnosno, izlaz senzora može da bude funkcija više stimulusa. Primjer bi bio senzor termalnog zračenja (infracrveni). Izlaz ovog senzora zavisi od temperature na površini senzora T_s , kao i od temperature objekta mjerenja T_b :

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

gdje je G konstanta senzora. Temperatura na površini senzora se mjeri uz pomoć drugog kontaktnog temperaturnog senzora. Grafička reprezentacija prenosne funkcije senzora termalnog zračenja data je na slici.

KALIBRACIJA

- **Određivanje jedinstvene prenosne funkcije senzora.**
- **Postupci kalibracije:**
 - **Modifikovanje prenosne funkcije. Senzor se ne modifikuje**
 - **Prilagođavanje izlaza senzora. Senzor se ne modifikuje**
 - **Modifikovanje senzora**
 - **Kreiranje referentnog senzora**

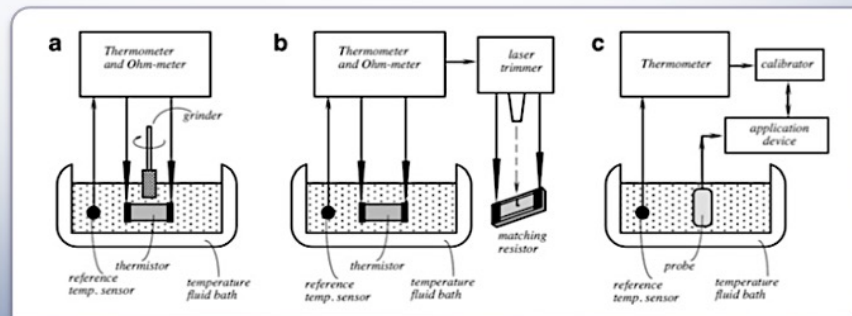
Ukoliko je tolerancija senzora i odgovarajućeg interfejsnog kola šira nego ukupna zahtijevana tačnost, potrebno je izvršiti kalibraciju senzora i interfejsnog kola kako bi se greška smanjila. Drugim riječima, kad god je potrebna veća tačnost od manje tačnog senzora, potrebno je izvršiti kalibraciju. Na primjer, ukoliko je potrebno mjeriti temperaturu sa tačnošću od 0.1 °C, a raspoloživi senzor posjeduje tačnost od 1 °C, to ne znači da se senzor ne može upotrijebiti, već ga je potrebno kalibrisati. Potrebno je odrediti njegovu jedinstvenu prenosnu funkciju. Taj proces se označava kao kalibracija.

Kalibracija zahtijeva primjenu nekoliko veoma precizno poznatih stimulusa na koje se posmatra odziv senzora. Dobijene tačke se označavaju kao kalibracione tačke. Najčešće je potrebno 2-5 kalibracionih tačaka kako bi se dovoljno pouzdano odredila prenosna karakteristika senzora. Potrebno je koristiti standardne reference kao stimulse kako bi se odredile kalibracione tačke. Tačnost kalibracije se oslanja na tačnost korišćene reference. Prije kalibracije, neophodno je imati matematički model prenosne funkcije senzora ili pouzdanu aproksimaciju odziva senzora za čitav opseg stimulusa.

Kalibracija senzora se može izvršiti na nekoliko načina:

1. Modifikovanjem prenosne funkcije ili njene aproksimacije kako bi se uskladila sa eksperimentalnim podacima. Svaki kalibrisani senzor imaće jedinstveni set parametara koji odgovara njegovoj prenosnoj funkciji. Sam senzor se ne modifikuje.
2. Podešavanjem sistema za akviziciju da modifikuje izlaz senzora na način da se prilagodi datoj „idealnoj“ prenosnoj funkciji senzora. Primjer bi bio skaliranje ili šiftovanje dobijenih podataka (npr. prilagođavanjem pojačanja i ofseta). Sam senzor se ne modifikuje.
3. Modifikacijom (*trimming*) svojstava senzora kako bi se prilagodio predefinisanoj prenosnoj funkciji. Dakle, sam senzor se modifikuje.
4. Kreiranjem za senzor specifičnog referentnog uređaja koji će koristiti sistem za akviziciju podataka da kompenzuje nepreciznost senzora. Sam senzor se ne modifikuje.

KALIBRACIJA



Kalibracija termistora

Kao primjer, slikom su ilustrovane tri metode kalibracije termistora. Slika a prikazuje termistor koji je uronjen u električno neprovodnu tečnost čija temperatura se precizno kontroliše i prati. Temperatura tečnosti se mjeri u kontinuitetu preciznim termometrom. Otpornost termistora se mjeri preciznim ommetrom. Minijaturna brusilica mehanički brusi termistor kako bi mu se promijenile dimenzije. Smanjenje dimenzija termistora vodi povećanju njegove otpornosti na odabranoj temperaturi. Kada se otpornost termistora izjednači sa predefinisanom vrijednošću, brušenje prestaje, kalibracija je završena. Otpornost termistora je sada bliska „idealnoj“ na zadatoj temperaturi. (metod 3.)

Drugi način kalibracije termistora prikazan je na slici b, gdje se termistor ne modifikuje već se mjerenje otpornosti vrši na određenoj referentnoj temperaturi. Na osnovu izmjerene otpornosti, bira se konvencionalni temperaturno stabilni otpornik kao jedinstvena referenca. Ovaj otpornik se koristi kao referenca za interfejsno kolo kojim će se izvršiti odgovarajuće skaliranje. Precizna vrijednost otpornosti referentnog otpornika se postiže npr. laserskom obradom. (metod 4)

Metode prikazane na slikama a i b su korisne za kalibraciju na samo jednoj temperaturi, pretpostavljajući da ostalim parametrima prenosne funkcije nije

potrebna kalibracija. Ukoliko to nije slučaj, potrebno je generisati nekoliko kalibracionih tačaka za nekoliko temperatura i odgovarajućih otpornosti, kako je prikazano na slici c. Temperatura tečnosti se podešava na nekoliko različitih vrijednosti. Posmatra se odziv senzora koji se kalibriše kako bi se odredili jedinstveni parametri za formiranje inverzne funkcije prenosa.

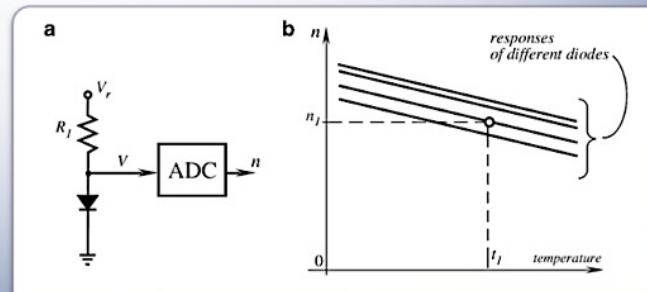
IZRAČUNAVANJE PARAMETARA PRENSONE FUNKCIJE

Primjer: Temperaturni senzor baziran na *pn* spoju

$$n = n_1 + B(t - t_1)$$

$$t = t_1 + \frac{n - n_1}{B}$$

$$B = \frac{n_2 - n_1}{t_2 - t_1}$$



$$T = \frac{qV_D}{k} \ln \frac{I_D}{I_S}, I_D = \text{const.}$$

U cilju izračunavanja parametara linearne prenosne funkcije, potrebne su dvije tačke. Na slici je dat jednostavan primjer direktno polarisanog *pn* spoja koji se koristi kao temperaturni senzor. Njegova prenosna funkcija je linearna (slika b) sa temperaturnom t kao stimulusom dok izlaz n predstavlja rezultat AD konverzije:

$$n = n_1 + B(t - t_1)$$

Koordinate prve referentne kalibracione tačke su t_1 i n_1 . Kako bi se izvršila kalibracija senzora, potrebno je izložiti ga temperaturama t_1 i t_2 i registrovati odgovarajuće izlaze n_1 i n_2 . Osjetljivost senzora predstavljena koeficijentom B se izračunava kao:

$$B = \frac{n_2 - n_1}{t_2 - t_1}$$

Parametri dobijeni kalibracijom su jedinstveni za senzor. Nakon izvršene kalibracije, bilo koja temperatura iz temperaturnog opsega za koji je senzor projektovan se može izračunati na osnovu izlaza AD konvertora:

$$t = t_1 + \frac{n - n_1}{B}$$

U rijetkim slučajevima, parametar B je unaprijed poznat sa dovoljnom tačnošću. Kada je u pitanju senzor prikazan na slici, parametar B je obično približno konstantan za određeni lot i tip poluprovodničkog vafera, pa se može smatrati poznatim za sve diode posmatranog proizvodnog lota. Međutim, sve diode mogu imati različit *offset*, tako da je potrebna kalibracija makar u jednoj tački za određivanje parametra n_1 za svaki senzor pojedinačno na temperaturi t_1 .

Za nelinearne prenosne funkcije, najčešće je potrebna kalibracija u dvije i više tačaka. Za polinom određenog reda, potrebno je izvršiti kalibraciju u za red više tačaka. Na primjer, za polinom trećeg reda:

$$E = b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0$$

potrebno je izvršiti kalibraciju u četiri tačke (s_1, E_1) , (s_2, E_2) , (s_3, E_3) i (s_4, E_4) .

Važno je pravilno odabrati kalibracione tačke, a to znači ravnomjerno ih rasporediti širinom radnog opsega.

Kalibracija može da bude veoma zahtjevan proces. Potrebno je zadovoljiti traženu tačnost sa najmanjim mogućim brojem kalibracionih tačaka i što jednostavnijom aproksimacijom prenosne funkcije, kako bi se vremenski optimizovao proces kalibracije.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA

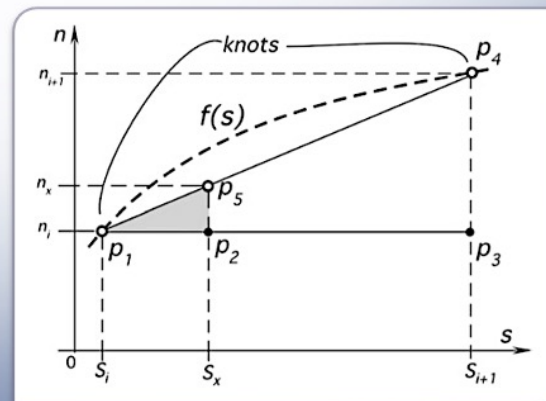
- Na osnovu inverzne funkcije prenosa
- Iz direktne funkcije prenosa iterativnim izračunavanjem

Osnovni cilj je naravno odrediti vrijednost stimulusa s na osnovu izmjerene veličine E . To se može odraditi na dva načina:

1. Na osnovu inverzne prenosne funkcije $s = F(E)$
2. Iz direktne funkcije prenosa $E = f(s)$ iterativnim izračunavanjima.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA LINEARNOM SEGMENTNOM APROKSIMACIJOM

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



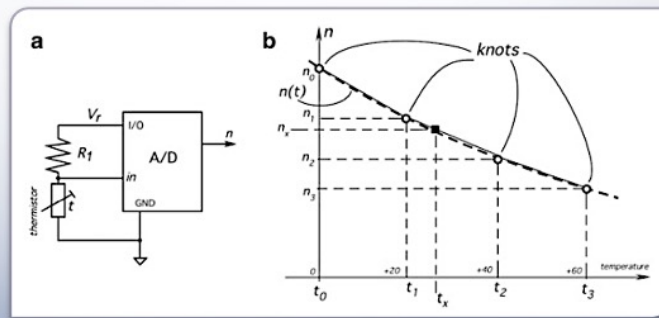
U cilju određivanja stimulusa s , prvi korak bi bio lociranje izlaznog signala E na prenosnoj karakteristici. Sljedeći korak je upotreba linearne interpolacije za izračunavanje stimulusa s .

Primjer određivanja vrijednosti stimulusa s na osnovu linearne segmentne aproksimacije prikazan je na slici. Neka lokacija izlaznog signala E bude na segmentu $p_1 - p_4$, kako je prikazano na slici. Na osnovu sličnosti odgovarajućih trouglova, dobija se da je vrijednost nepoznatog stimulusa s_x koji odgovara izlazu n_x data izrazom:

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

Relacija je veoma jednostavna, tako da bilo koji mikrokontroler (na primjer) može obaviti traženo izračunavanje na osnovu *look-up* tabele koja sadrži koordinate čvorišta.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA



termistorski temperaturni senzor (0 °C - 60 °C)

U cilju ilustracije, posmatrajmo poređenje upotrebe precizne matematički modelovane prenosne karakteristike u zatvorenoj formi i njene linearne segmentne aproksimacije. Na slici je prikazan termistorski temperaturni senzor sa *pull-up* otpornikom R_1 koji je povezan na 12-bitni AD konvertor. Termistor se koristi da mjeri temperature u opsegu od 0 °C do 60 °C.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA PRECIZNIM MATEMATIČKIM MODELOM

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}$$

Zavisnost izlaza senzora n_x od mjerene temperature T_x data je sljedećim izrazom:

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}$$

gdje je N_0 maksimalna vrijednost koja se može dobiti na izlazu AD konvertora koja odgovara referentnom naponu V_r , T_r je referentna temperatura, R_r je otpornost termistora na referentnoj temperaturi T_r , i β je karakteristična temperatura termistora. Ukoliko je u pitanju 12-bitni AD konvertor, $N_0 = 4095$.

Na osnovu prethodne relacije dobija se zavisnost tražene temperature T_x od izlaza senzora n_x :

$$T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

Prethodna relacija sadrži dva nepoznata parametra R_r i β . Dakle, neophodno je kalibrisati kolo na temperaturi T_r , kao i na još nekoj temperaturi T_c . U datom primjeru, *pull-up* otpornik ima vrijednost $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Za kalibraciju su odabrane dvije

temperature $T_r = 293.15$ K i $T_c = 313.15$ K.

U toku kalibracije termistor se uranja u fluid čija temperatura ima prethodno definisane vrijednosti. Registrovan je sljedeći izlaz AD konvertora:

$n_r = 1863$ na temperaturi $T_r = 293.15$ K

$n_c = 1078$ na temperaturi $T_c = 313.15$ K

Na osnovu prethodno dobijenih vrijednosti, mogu se izračunati parametri $R_r = 8.350$ k Ω i $\beta = 3895$ K. Ovim se završava kalibracija. Sada se na osnovu prenosne funkcije senzora može odrediti tražena temperatura T_x . Ovaj pristup je najprecizniji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA PRECIZNIM MATEMATIČKIM MODELOM

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}} \Rightarrow T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

Zavisnost izlaza senzora n_x od mjerene temperature T_x data je sljedećim izrazom:

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}$$

gdje je N_0 je maksimalna vrijednost koja se može dobiti na izlazu AD konvertora koja odgovara referentnom naponu V_r , T_r je referentna temperatura, R_r je otpornost termistora na referentnoj temperaturi T_r , i β je karakteristična temperatura. Ukoliko je u pitanju 12-bitni AD konvertor, $N_0 = 4095$.

Na osnovu prethodne relacije dobija se zavisnost tražene temperature T_x od izlaza senzora n_x :

$$T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

Prethodna relacija sadrži dva nepoznata parametra R_r i β . Dakle, neophodno je kalibrisati kolo na temperaturi T_r , kao i na još nekoj temperaturi T_c . U datom primjeru, *pull-up* otpornik ima vrijednost $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Za kalibraciju su odabrane dvije

temperature $T_r = 293.15$ K i $T_c = 313.15$ K.

U toku kalibracije termistor se uranja u fluid čija temperatura ima prethodno definisane vrijednosti. Registrovan je sljedeći izlaz AD konvertora:

$n_r = 1863$ na temperaturi $T_r = 293.15$ K

$n_c = 1078$ na temperaturi $T_c = 313.15$ K

Na osnovu prethodno dobijenih vrijednosti, mogu se izračunati parametri $R_r = 8.350$ k Ω i $\beta = 3895$ K. Ovim se završava kalibracija. Sada se na osnovu prenosne funkcije senzora može odrediti tražena temperatura T_x . Ovaj pristup je najprecizniji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA PRECIZNIM MATEMATIČKIM MODELOM

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}} \Rightarrow T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

- kalibracione tačke:

$$(n_r = 1863, T_r = 293.15 \text{ K}) \text{ i } (n_c = 1078, T_c = 313.15 \text{ K})$$

Zavisnost izlaza senzora n_x od mjerene temperature T_x data je sljedećim izrazom:

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}$$

gdje je N_0 je maksimalna vrijednost koja se može dobiti na izlazu AD konvertora koja odgovara referentnom naponu V_r , T_r je referentna temperatura, R_r je otpornost termistora na referentnoj temperaturi T_r , i β je karakteristična temperatura. Ukoliko je u pitanju 12-bitni AD konvertor, $N_0 = 4095$.

Na osnovu prethodne relacije dobija se zavisnost tražene temperature T_x od izlaza senzora n_x :

$$T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

Prethodna relacija sadrži dva nepoznata parametra R_r i β . Dakle, neophodno je kalibrisati kolo na temperaturi T_r , kao i na još nekoj temperaturi T_c . U datom primjeru, *pull-up* otpornik ima vrijednost $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Za kalibraciju su odabrane dvije

temperature $T_r = 293.15$ K i $T_c = 313.15$ K.

U toku kalibracije termistor se uranja u fluid čija temperatura ima prethodno definisane vrijednosti. Registrovan je sljedeći izlaz AD konvertora:

$n_r = 1863$ na temperaturi $T_r = 293.15$ K

$n_c = 1078$ na temperaturi $T_c = 313.15$ K

Na osnovu prethodno dobijenih vrijednosti, mogu se izračunati parametri $R_r = 8.350$ k Ω i $\beta = 3895$ K. Ovim se završava kalibracija. Sada se na osnovu prenosne funkcije senzora može odrediti tražena temperatura T_x . Ovaj pristup je najprecizniji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA PRECIZNIM MATEMATIČKIM MODELOM

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}} \Rightarrow T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

- kalibracione tačke:

$$(n_r = 1863, T_r = 293.15 \text{ K}) \text{ i } (n_c = 1078, T_c = 313.15 \text{ K})$$

$$\Rightarrow R_r = 8.350 \text{ k}\Omega \text{ i } \beta = 3895 \text{ K}$$

Zavisnost izlaza senzora n_x od mjerene temperature T_x data je sljedećim izrazom:

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}$$

gdje je N_0 je maksimalna vrijednost koja se može dobiti na izlazu AD konvertora koja odgovara referentnom naponu V_r , T_r je referentna temperatura, R_r je otpornost termistora na referentnoj temperaturi T_r , i β je karakteristična temperatura. Ukoliko je u pitanju 12-bitni AD konvertor, $N_0 = 4095$.

Na osnovu prethodne relacije dobija se zavisnost tražene temperature T_x od izlaza senzora n_x :

$$T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

Prethodna relacija sadrži dva nepoznata parametra R_r i β . Dakle, neophodno je kalibrisati kolo na temperaturi T_r , kao i na još nekoj temperaturi T_c . U datom primjeru, *pull-up* otpornik ima vrijednost $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Za kalibraciju su odabrane dvije

temperature $T_r = 293.15$ K i $T_c = 313.15$ K.

U toku kalibracije termistor se uranja u fluid čija temperatura ima prethodno definisane vrijednosti. Registrovan je sljedeći izlaz AD konvertora:

$n_r = 1863$ na temperaturi $T_r = 293.15$ K

$n_c = 1078$ na temperaturi $T_c = 313.15$ K

Na osnovu prethodno dobijenih vrijednosti, mogu se izračunati parametri $R_r = 8.350$ k Ω i $\beta = 3895$ K. Ovim se završava kalibracija. Sada se na osnovu prenosne funkcije senzora može odrediti tražena temperatura T_x . Ovaj pristup je najprecizniji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA PRECIZNIM MATEMATIČKIM MODELOM

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}} \Rightarrow T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

- kalibracione tačke:

$$(n_r = 1863, T_r = 293.15 \text{ K}) \text{ i } (n_c = 1078, T_c = 313.15 \text{ K})$$

$$\Rightarrow R_r = 8.350 \text{ k}\Omega \text{ i } \beta = 3895 \text{ K}$$

- za $n_x = 1505$, tražena temperatura iznosi:

$$t_x = 28.22 \text{ }^\circ\text{C}$$

Zavisnost izlaza senzora n_x od mjerene temperature T_x data je sljedećim izrazom:

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}$$

gdje je N_0 je maksimalna vrijednost koja se može dobiti na izlazu AD konvertora koja odgovara referentnom naponu V_r , T_r je referentna temperatura, R_r je otpornost termistora na referentnoj temperaturi T_r , i β je karakteristična temperatura. Ukoliko je u pitanju 12-bitni AD konvertor, $N_0 = 4095$.

Na osnovu prethodne relacije dobija se zavisnost tražene temperature T_x od izlaza senzora n_x :

$$T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}$$

Prethodna relacija sadrži dva nepoznata parametra R_r i β . Dakle, neophodno je kalibrisati kolo na temperaturi T_r , kao i na još nekoj temperaturi T_c . U datom primjeru, *pull-up* otpornik ima vrijednost $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Za kalibraciju su odabrane dvije

temperature $T_r = 293.15$ K i $T_c = 313.15$ K.

U toku kalibracije termistor se uranja u fluid čija temperatura ima prethodno definisane vrijednosti. Registrovan je sljedeći izlaz AD konvertora:

$n_r = 1863$ na temperaturi $T_r = 293.15$ K

$n_c = 1078$ na temperaturi $T_c = 313.15$ K

Na osnovu prethodno dobijenih vrijednosti, mogu se izračunati parametri $R_r = 8.350$ k Ω i $\beta = 3895$ K. Ovim se završava kalibracija. Sada se na osnovu prenosne funkcije senzora može odrediti tražena temperatura T_x . Ovaj pristup je najprecizniji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA PRECIZNIM MATEMATIČKIM MODELOM

$$\frac{1}{293.15 \text{ K}} = \frac{1}{293.15 \text{ K}} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1863}{4095-1863} \frac{10 \text{ k}\Omega}{R_r} \right) \Rightarrow R_r = 8.350 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{1}{313.15 \text{ K}} = \frac{1}{293.15 \text{ K}} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1078}{4095-1078} \frac{10 \text{ k}\Omega}{8.350 \text{ k}\Omega} \right) \Rightarrow \beta = 3895 \text{ K}$$

- $n_x = 1505$:

$$T_x = \left[\frac{1}{293.15 \text{ K}} + \frac{1}{3895 \text{ K}} \ln \left(\frac{1505}{4095 - 1505} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{8.350 \text{ k}\Omega} \right) \right]^{-1} = 301.37 \text{ K} (28.22^\circ\text{C})$$

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA LINEARNOM SEGMENTNOM APROKSIMACIJOM

- tri segmenta
- kalibracione tačke:

$$(n_0 = 2819, t_0 = 0 \text{ °C}), (n_1 = n_r = 1863, t_1 = t_r = 20 \text{ °C}),$$

$$(n_2 = 1078, t_2 = 40 \text{ °C}) \text{ i } (n_3 = 593, t_3 = 60 \text{ °C})$$

Ukoliko se prenosna funkcija podijeli na tri segmenta, slika b (slajd 20), kalibracijom se dobijaju sljedeći rezultati:

$n_0 = 2819$ na temperaturi $t_0 = 0 \text{ °C}$

$n_1 = n_r = 1863$ na temperaturi $t_1 = t_r = 20 \text{ °C}$

$n_2 = 1078$ na temperaturi $t_2 = 40 \text{ °C}$

$n_3 = 593$ na temperaturi $t_3 = 60 \text{ °C}$

Kako bi se uporedili rezultati dobijeni korišćenjem dva prethodno opisana pristupa, pretpostavimo da na izlazu AD konvertora imamo vrijednost $n_x = 1505$. Na osnovu prvog pristupa koji se bazira na preciznom matematičkom modelu prenosne funkcije senzora dobija se temperatura $t_x = 28.22 \text{ °C}$. Koristeći drugi pristup i linearnu interpolaciju dobija se:

$$t_x = t_1 + \frac{n_x - n_1}{n_2 - n_1} (t_2 - t_1) = 29.12 \text{ °C}$$

Dakle, linearna segmentna aproksimacija sa samo dva centralna čvorišta ima apsolutnu grešku od 0.9 °C . U cilju redukovanja greške, potrebno je koristiti veći broj

segmenata u aproksimaciji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA LINEARNOM SEGMENTNOM APROKSIMACIJOM

- tri segmenta
- kalibracione tačke:

$$(n_0 = 2819, t_0 = 0 \text{ °C}), (n_1 = n_r = 1863, t_1 = t_r = 20 \text{ °C}),$$

$$(n_2 = 1078, t_2 = 40 \text{ °C}) \text{ i } (n_3 = 593, t_3 = 60 \text{ °C})$$

- za $n_x = 1505$, tražena temperatura iznosi:

$$t_x = t_1 + \frac{n_x - n_1}{n_2 - n_1} (t_2 - t_1) = 29.12 \text{ °C}$$

Ukoliko se prenosna funkcija podijeli na tri segmenta, slika b (slajd 20), kalibracijom se dobijaju sljedeći rezultati:

$n_0 = 2819$ na temperaturi $t_0 = 0 \text{ °C}$

$n_1 = n_r = 1863$ na temperaturi $t_1 = t_r = 20 \text{ °C}$

$n_2 = 1078$ na temperaturi $t_2 = 40 \text{ °C}$

$n_3 = 593$ na temperaturi $t_3 = 60 \text{ °C}$

Kako bi se uporedili rezultati dobijeni korišćenjem dva prethodno opisana pristupa, pretpostavimo da na izlazu AD konvertora imamo vrijednost $n_x = 1505$. Na osnovu prvog pristupa koji se bazira na preciznom matematičkom modelu prenosne funkcije senzora dobija se temperatura $t_x = 28.22 \text{ °C}$. Koristeći drugi pristup i linearnu interpolaciju dobija se:

$$t_x = t_1 + \frac{n_x - n_1}{n_2 - n_1} (t_2 - t_1) = 29.12 \text{ °C}$$

Dakle, linearna segmentna aproksimacija sa samo dva centralna čvorišta ima apsolutnu grešku od 0.9 °C . U cilju redukovanja greške, potrebno je koristiti veći broj

segmenata u aproksimaciji.

ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA LINEARNOM SEGMENTNOM APROKSIMACIJOM

za $n_x = 1505$, tražena temperatura iznosi:

$$t_x = 20 \text{ °C} + \frac{1505 - 1863}{1078 - 1863} (40 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 29.12 \text{ °C}$$

$(n_1 = n_r = 1863, t_1 = t_r = 20 \text{ °C}), (n_2 = 1078, t_2 = 40 \text{ °C})$

Izmjerena vrijednost n_x je negdje između čvorova 1 i 2.

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA

- Pretpostavka o inicijalnoj vrijednosti $s = s_0$
- *Newton*-ov metod:

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

Ukoliko inverzna funkcija prenosa nije poznata, iterativno izračunavanje omogućava određivanje vrijednosti stimulusa na osnovu direktne prenosne funkcije. Metoda se bazira na pogađanju inicijalne (neke razumne) vrijednosti stimulusa $s = s_0$, a zatim na primjeni *Newton*-ovog algoritma za izračunavanje niza vrijednosti s koje konvergiraju traženoj vrijednosti stimulusa. Dakle, algoritam podrazumijeva nekoliko koraka, pri čemu smo svakim korakom bliži rješenju. Kada razlika dvije susjedne izračunate vrijednosti postane manja od prihvatljive greške, ta vrijednost se prihvata kao tražena vrijednost stimulusa. *Newton*-ov metoda konvergira prilično brzo, posebno ukoliko je inicijalna procjena dovoljno dobra.

Newton-ov metod podrazumijeva izračunavanje niza vrijednosti stimulusa na bazi sljedeće relacije:

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

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA. PRIMJER

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

$$a = 1.5, b = 5, c = 25, d = 1$$

U cilju demonstracije *Newton*-ove metode, pretpostavimo sljedeću funkciju prenosa:

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

gdje su koeficijenti $a = 1.5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Na osnovu *Newton*-ove metode dobija se relacija:

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

koja će se koristiti za izračunavanje niza vrijednosti stimulusa. Ukoliko je izmjeren izlazni signal $E = 22.000$, a pretpostavka za $s_0 = 2$, dobija se:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

Nakon treće iteracije s_i konvergira ka vrijednosti 0.716. Ukoliko se dobijena vrijednost $s = 0.716$ zamijeni u funkciju prenosa, dobija se izlaz $E = f(s) = 22.014$, što odstupa oko 0.06 % od izmjerene vrijednosti $E = 22.000$.

Treba naglasiti da *Newton*-ova metoda daje veoma slabe rezultate kada je u pitanju senzor male osjetljivosti. Drugim riječima, metoda se ne može koristiti ukoliko je prenosna karakteristika malog nagiba, pa joj se prvi izvod bliži nuli. U takvim situacijama može se primijeniti tzv. Modifikovani *Newton* metod.

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA. PRIMJER

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

$$a = 1.5, b = 5, c = 25, d = 1$$

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

U cilju demonstracije *Newton*-ove metode, pretpostavimo sljedeću funkciju prenosa:

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

gdje su koeficijenti $a = 1.5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Na osnovu *Newton*-ove metode dobija se relacija:

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

koja će se koristiti za izračunavanje niza vrijednosti stimulusa. Ukoliko je izmjeren izlazni signal $E = 22.000$, a pretpostavka za $s_0 = 2$, dobija se:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

Nakon treće iteracije s_i konvergira ka vrijednosti 0.716. Ukoliko se dobijena vrijednost $s = 0.716$ zamijeni u funkciju prenosa, dobija se izlaz $E = f(s) = 22.014$, što odstupa oko 0.06 % od izmjerene vrijednosti $E = 22.000$.

Treba naglasiti da *Newton*-ova metoda daje veoma slabe rezultate kada je u pitanju senzor male osjetljivosti. Drugim riječima, metoda se ne može koristiti ukoliko je prenosna karakteristika malog nagiba, pa joj se prvi izvod bliži nuli. U takvim situacijama može se primijeniti tzv Modifikovani *Newton* metod.

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA. PRIMJER

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

$$a = 1.5, b = 5, c = 25, d = 1$$

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

$$\text{za } E = 22.000 \text{ i } s_0 = 2:$$

U cilju demonstracije *Newton*-ove metode, pretpostavimo sljedeću funkciju prenosa:

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

gdje su koeficijenti $a = 1.5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Na osnovu *Newton*-ove metode dobija se relacija:

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

koja će se koristiti za izračunavanje niza vrijednosti stimulusa. Ukoliko je izmjeren izlazni signal $E = 22.000$, a pretpostavka za $s_0 = 2$, dobija se:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

Nakon treće iteracije s_i konvergira ka vrijednosti 0.716. Ukoliko se dobijena vrijednost $s = 0.716$ zamijeni u funkciju prenosa, dobija se izlaz $E = f(s) = 22.014$, što odstupa oko 0.06 % od izmjerene vrijednosti $E = 22.000$.

Treba naglasiti da *Newton*-ova metoda daje veoma slabe rezultate kada je u pitanju senzor male osjetljivosti. Drugim riječima, metoda se ne može koristiti ukoliko je prenosna karakteristika malog nagiba, pa joj se prvi izvod bliži nuli. U takvim situacijama može se primijeniti tzv Modifikovani *Newton* metod.

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA. PRIMJER

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

$$a = 1.5, b = 5, c = 25, d = 1$$

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

za $E = 22.000$ i $s_0 = 2$:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

U cilju demonstracije *Newton*-ove metode, pretpostavimo sljedeću funkciju prenosa:

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

gdje su koeficijenti $a = 1.5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Na osnovu *Newton*-ove metode dobija se relacija:

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

koja će se koristiti za izračunavanje niza vrijednosti stimulusa. Ukoliko je izmjeren izlazni signal $E = 22.000$, a pretpostavka za $s_0 = 2$, dobija se:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

Nakon treće iteracije s_i konvergira ka vrijednosti 0.716. Ukoliko se dobijena vrijednost $s = 0.716$ zamijeni u funkciju prenosa, dobija se izlaz $E = f(s) = 22.014$, što odstupa oko 0.06 % od izmjerene vrijednosti $E = 22.000$.

Treba naglasiti da *Newton*-ova metoda daje veoma slabe rezultate kada je u pitanju senzor male osjetljivosti. Drugim riječima, metoda se ne može koristiti ukoliko je prenosna karakteristika malog nagiba, pa joj se prvi izvod bliži nuli. U takvim situacijama može se primijeniti tzv Modifikovani *Newton* metod.

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA. PRIMJER

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

$$a = 1.5, b = 5, c = 25, d = 1$$

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

za $E = 22.000$ i $s_0 = 2$:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

$$\Rightarrow E = 1.5 \cdot 0.716^3 + 5 \cdot 0.716^2 + 25 \cdot 0.716 + 1 = 22.014$$

U cilju demonstracije *Newton*-ove metode, pretpostavimo sljedeću funkciju prenosa:

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

gdje su koeficijenti $a = 1.5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Na osnovu *Newton*-ove metode dobija se relacija:

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

koja će se koristiti za izračunavanje niza vrijednosti stimulusa. Ukoliko je izmjeren izlazni signal $E = 22.000$, a pretpostavka za $s_0 = 2$, dobija se:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

Nakon treće iteracije s_i konvergira ka vrijednosti 0.716. Ukoliko se dobijena vrijednost $s = 0.716$ zamijeni u funkciju prenosa, dobija se izlaz $E = f(s) = 22.014$, što odstupa oko 0.06 % od izmjerene vrijednosti $E = 22.000$.

Treba naglasiti da *Newton*-ova metoda daje veoma slabe rezultate kada je u pitanju senzor male osjetljivosti. Drugim riječima, metoda se ne može koristiti ukoliko je prenosna karakteristika malog nagiba, pa joj se prvi izvod bliži nuli. U takvim situacijama može se primijeniti tzv Modifikovani *Newton* metod.

ITERATIVNO ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI STIMULUSA. PRIMJER

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

$$a = 1.5, b = 5, c = 25, d = 1$$

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

$$\text{za } E = 22.000 \text{ i } s_0 = 2:$$

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

$$\Rightarrow E = 1.5 \cdot 0.716^3 + 5 \cdot 0.716^2 + 25 \cdot 0.716 + 1 = 22.014$$

$$s_1 = \frac{2 \cdot 1.5 \cdot 2^3 + 5 \cdot 2^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1.5 \cdot 2^2 + 2 \cdot 5 \cdot 2 + 25} = 1.032$$

$$s_2 = \frac{2 \cdot 1.5 \cdot 1.032^3 + 5 \cdot 1.032^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1.5 \cdot 1.032^2 + 2 \cdot 5 \cdot 1.032 + 25} = 0.738$$

$$s_3 = \frac{2 \cdot 1.5 \cdot 0.738^3 + 5 \cdot 0.738^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1.5 \cdot 0.738^2 + 2 \cdot 5 \cdot 0.738 + 25} = 0.716$$

$$s_4 = \frac{2 \cdot 1.5 \cdot 0.716^3 + 5 \cdot 0.716^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1.5 \cdot 0.716^2 + 2 \cdot 5 \cdot 0.716 + 25} = 0.716$$

U cilju demonstracije *Newton*-ove metode, pretpostavimo sljedeću funkciju prenosa:

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d$$

gdje su koeficijenti $a = 1.5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Na osnovu *Newton*-ove metode dobija se relacija:

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

koja će se koristiti za izračunavanje niza vrijednosti stimulusa. Ukoliko je izmjeren izlazni signal $E = 22.000$, a pretpostavka za $s_0 = 2$, dobija se:

$$s_1 = 1.032$$

$$s_2 = 0.738$$

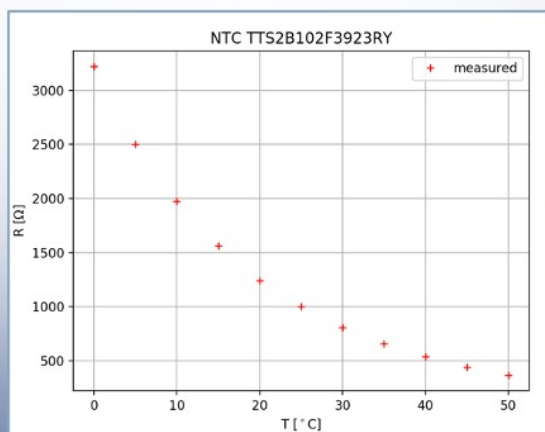
$$s_3 = 0.716$$

$$s_4 = 0.716$$

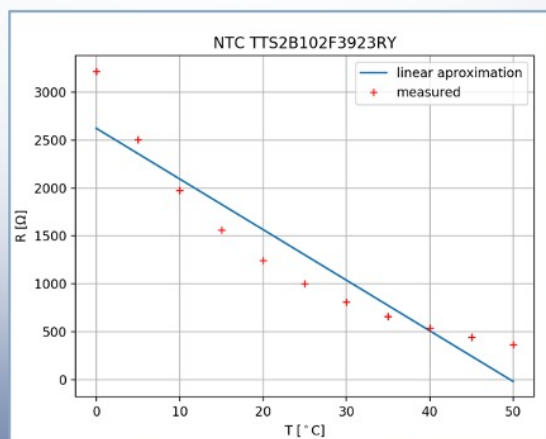
Nakon treće iteracije s_i konvergira ka vrijednosti 0.716. Ukoliko se dobijena vrijednost $s = 0.716$ zamijeni u funkciju prenosa, dobija se izlaz $E = f(s) = 22.014$, što odstupa oko 0.06 % od izmjerene vrijednosti $E = 22.000$.

Treba naglasiti da *Newton*-ova metoda daje veoma slabe rezultate kada je u pitanju senzor male osjetljivosti. Drugim riječima, metoda se ne može koristiti ukoliko je prenosna karakteristika malog nagiba, pa joj se prvi izvod bliži nuli. U takvim situacijama može se primijeniti tzv. modificovani *Newton*-ov metod.

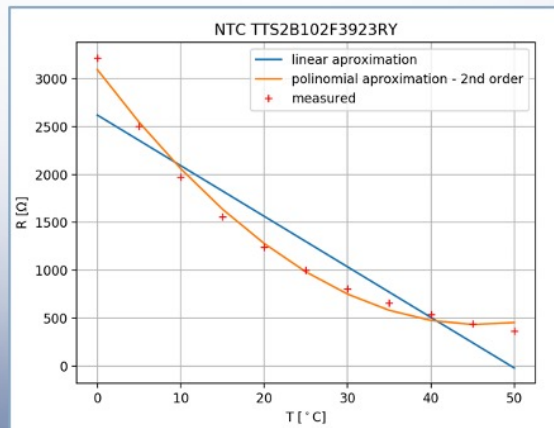
PRIMJER: TTS2B102F3923RY



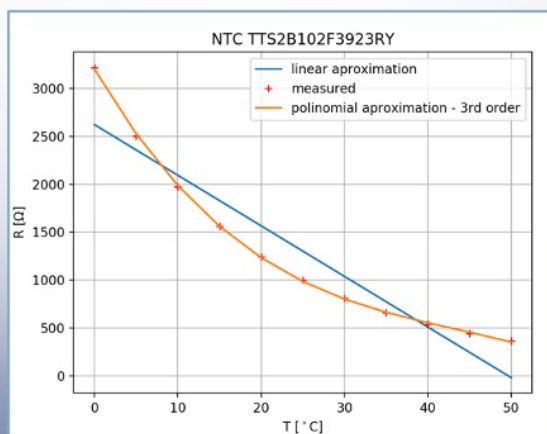
PRIMJER: TTS2B102F3923RY



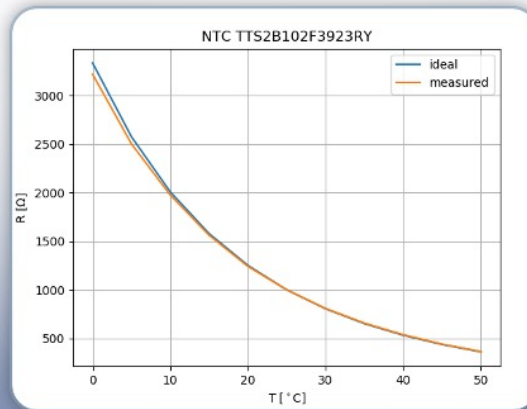
PRIMJER: TTS2B102F3923RY



PRIMJER: TTS2B102F3923RY



PRIMJER: TTS2B102F3923RY

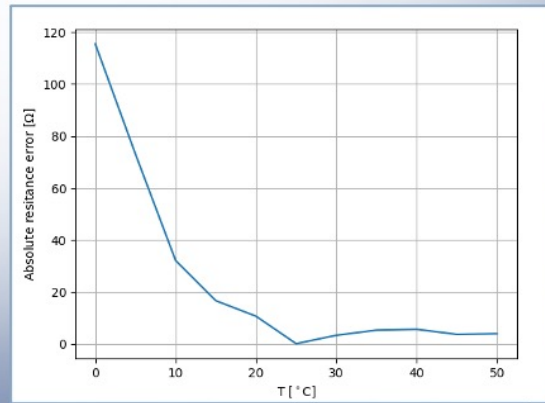
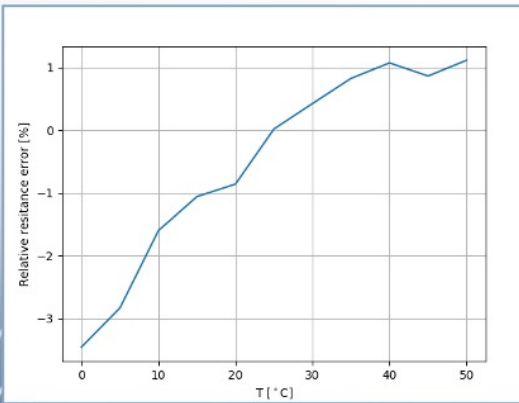


$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$$R_0 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 3920 \text{ K}$$

PRIMJER: TTS2B102F3923RY



FAKTORI SPOLJAŠNJE SREDINE

- **USLOVI SKLADIŠTENJA** (temperatura, relativna vlažnost na određenoj temperaturi, maksimalni pritisak, prisustvo nekih gasova)
- **KRATKOROČNA I DUGOROČNA STABILNOST**
 - *pre-aging* – izlaganje senzora ekstremnim uslovima prije kalibracije
- **RADNA TEMPERATURA**
 - opseg ambijentalnih temperatura u okviru kojih senzor ima specificiranu tačnost
 - nagle promjene temperature mogu dovesti do nevalidnog rezultata
 - greška samozagrijavanja – senzor apsorbuje pobudni signal usljed čega mu se promijeni tačnost

Svaki senzor je izložen uticajima spoljašnje sredine i dok je skladišten i dok je u funkciji. Svi mogući spoljašnji faktori koji mogu uticati na performanse senzora su generalno specificirani od strane proizvođača.

Uslovi skladištenja uglavnom podrazumijevaju najnižu i najvišu temperaturu i maksimalnu relativnu vlažnost na tim temperaturama. U zavisnosti od prirode senzora, nekada je važno navesti maksimalni pritisak, prisustvo nekih gasova,...

Kratkoročna i dugoročna stabilnost (*drift*) su dio specifikacije tačnosti. Kratkoročna stabilnost se manifestuje kroz promjene performansi senzora tokom minuta, sati, ili čak dana. Dugoročna stabilnost (starenje) se odnosi na ireverzibilne promjene u strukturi materijala u smislu promjene električnih, mehaničkih, hemijskih ili termalnih osobina. Ove promjene se najčešće dešavaju nakon relativno dugog vremenskog perioda koji se mjeri mjesecima ili godinama. Dugoročna stabilnost je veoma važna za senzore koji se koriste za precizna mjerenja. Starenje u velikoj mjeri zavisi od uslova skladištenja i radnih uslova, koliko dobro je senzor izolovan od okruženja i od kojih je materijala izrađen. Starenje se generalno brže odvija kada su u pitanju organski materijali.

Veoma moćan način unapređenja dugoročne stabilnosti senzora je izlaganje senzora ekstremnim uslovima prije kalibracije (*pre-aging*). Ovakvo ubrzavanje starenja ne samo da se pozitivno odražava na dugoročnu stabilnost, već poboljšava pouzdanost

senzora jer se ovom tehnikom mogu otkriti određeni skriveni defekti. Na primjer, stabilnost termistora se značajno može poboljšati ukoliko se on izloži temperaturi od 150 °C mjesec dana prije kalibracije i instalacije senzora.

Radna temperatura je opseg ambijentalnih temperatura u okviru kojih senzor ima specificiranu tačnost. Veoma često se opseg radne temperature izdijeli na podopsege za koje je posebno specificirana tačnost senzora. Promjene temperature utiču i na dinamičke karakteristike senzora. Nagle promjene temperature mogu dovesti do lažnog izlaznog signala. Na primjer, piroelektrični senzor u sklopu IR detektora pokreta je gotovo neosjetljiv na spore promjene temperature. Međutim, ukoliko dođe do nagle promjene temperature, senzor generiše struju koja se može prepoznati kao validan odziv, odnosno, može doći do lažne detekcije.

Greška samozagrijavanja se dešava kada senzor apsorbuje pobudni signal usljed čega se zagrije do stepena da mu se promijeni tačnost. Na ovu grešku se značajno može uticati pravilnim dizajnom senzora i odabirom materijala.

POUZDANOST

- **MTTF (MEAN TIME TO FAILURE)**

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_i (t_{fi} - t_{oi})$$

- **EKSTREMNO TESTIRANJE**

- visoka temperatura/visoka vlažnost dovoljno dug period vremena dok je senzor operativan
- mehanički šokovi i vibracije
- ekstremni uslovi skladištenja dok senzor ne radi
- termalni šokovi
- simuliranje uslova mora
- ...

Pouzdanost je sposobnost senzora da obavlja specificiranu funkciju pod definisanim uslovima za definisani period vremena. Može se izraziti kao vjerovatnoća da će senzor raditi bez greške tokom specificiranog perioda vremena ili specificirani broj upotreba. Pouzdanost se teško može izmjeriti, pa je i veoma rijetko navode proizvođači u specifikacijama.

MTTF (*mean-time-to-failure*) se definiše na sljedeći način:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_i (t_{fi} - t_{oi})$$

gdje je t_{oi} vrijeme kada je počelo testiranje i -tog uređaja, t_{fi} vrijeme kada je došlo do kvara i -tog uređaja, dok je n broj testiranih uređaja. MTTF testovi se obično rade pod ekstremnim uslovima.

O pouzdanosti senzora se može zaključiti tek nakon testiranja pod ekstremnim uslovima. Ovi testovi su veoma značajni u toku dizajniranja senzora u smislu detektovanja skrivenih problema. Postoji nekoliko testova ovog tipa među kojima su:

- Visoka temperatura/visoka vlažnost, dok je senzor pod napajanjem, dovoljno dug period vremena. Na primjer, senzor se izlaže maksimalnoj dozvoljenoj temperaturi pri relativnoj vlažnosti 85-90 % 500 sati.
- Mehanički šokovi i vibracije

- Ekstremni uslovi skladištenja. Na primjer, senzor se izlaže maksimalnoj i minimalnoj dozvoljenoj temperaturi u trajanju od 1000 sati dok senzor ne radi.
- Termalni šokovi, odnosno, nagle promjene temperature. Na primjer, senzor se izlaže maksimalnoj dozvoljenoj temperaturi 30 minuta, zatim se temperatura naglo promijeni na najnižu dozvoljenu vrijednost u trajanju od 30 minuta. Postupak se ponavlja 100 do 1000 puta.
- Simuliranje uslova u moru izlaganjem slanom spreju u određenom vremenskom intervalu.

POUZDANOST

- **AL (ACCELERATED LIFE)**

- Emuliranje rada senzora pri čemu su godine „sabijene“ u nedjelje
- Na brži način zaključiti o pouzdanosti senzora
- Uz standardan operativni ciklus, posmatrati značajno širi opseg uslova sredine (temperatura, pritisak, vlažnost)
- U toku testiranja performanse mogu izaći iz specificiranih okvira, ali nakon testiranja se moraju vratiti u specificirani opseg

AL (*Accelerated Life*) je procedura emuliranja rada senzora pri čemu su godine „sabijene“ u nedjelje. Cilj je naravno, na brži način utvrditi MTTF i zaključiti o pouzdanosti senzora.

Na odgovarajući način (na osnovu specificiranih i proširenih uslova sredine i specificiranog broja radnih ciklusa) se utvrđuje potreban broj testiranja koji je značajno manji od specificiranog broja radnih ciklusa. Potom se senzor izlaže širem opsegu uslova sredine prethodno utvrđen broj puta. Ukoliko recimo 2 od 100 senzora ne izdrže AL test, pouzdanost se prikazuje kao 98 % za određeni period vremena.

POUZDANOST

- **HALT (*HIGHLY ACCELERATED LIFE TESTING*)**

- Senzor se posmatra kao crna kutija.
- Senzor se izlaže stresu u smislu nagle promjene uslova.
- Nije kvalifikacioni test (*pass/fail*), već se označava i kao „*discovery*” test.
- Značajno utiče na poboljšanje robusnosti senzora (*test-fail-fix*).

- **FOAT (*FAILURE-ORIENTED ACCELERATED TESTING*)**

- Odnosi se na konkretne fizičke ili hemijske efekte unutar senzora, za razliku od HALT-a.
- Baziran je na prenosnoj karakteristici sistema i matematičkom modelovanju.
- Cilj je kreiranje prediktivnog modela koji se odnosi na stvarni mehanizam nastanka kvara i poboljšanje dizajna.



LITERATURA

- Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*, 5th edition, Springer, 2016 (Poglavlja 1, 2 i 3)