

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Stručni studij

Statičke i dinamičke karakteristike instrumenata

Završni rad

Ivan Petrović

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 20.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit
na preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Petrović
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A 4655, 27.07.2020.
OIB Pristupnika:	51846671670
Mentor:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	doc. dr. sc. Goran Rozing
Član Povjerenstva 1:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Željko Špoljarić
Naslov završnog rada:	Statičke i dinamičke karakteristike instrumenata
Znanstvena grana završnog rada:	Automatika (zn. polje temeljne tehničke znanosti)
Zadatak završnog rada	
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.09.2023.
<i>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</i>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 24.10.2023.

Ime i prezime studenta:	Ivan Petrović
Studij:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4655, 27.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Statičke i dinamičke karakteristike instrumenata**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Venco Ćorluka

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. PREGLED MJERNIH INSTRUMENATA	2
2.1. Mjerni instrumenti i njihovi dijelovi	2
2.1.1. Senzor	3
2.1.1.1. Pasivni	4
2.1.1.2. Aktivni	4
2.1.1.3. Usporedba pasivnog i aktivnog senzora	5
2.1.2. Pojačalo	6
2.1.3. A/D pretvarač	6
2.2. Vrste instrumenata i izvedbene karakteristike	8
2.2.1. Pasivni i aktivni instrumenti	8
2.2.2. Nulti instrument	8
2.3. Kalibracija	9
3. Statičke karakteristike instrumenata	11
3.1. Točnost	12
3.2. Preciznost	12
3.3. Tolerancija	13
3.4. Raspon instrumenta	13
3.5. Rezolucija (razlučivost)	13
3.6. Linearnost i nelinearnost	14
3.7. Osjetljivost	15
3.8. Mrtvi prostor i vrijeme	15
3.9. Histereza	17
4. Dinamičke karakteristike instrumenta	18
4.1. Vrijeme odziva	19
4.2. Brzina odziva	19
4.3. Kašnjenje mjerenja	19
4.4. Vrijeme smirenja	20

4.5. Pouzdanost.....	21
4.6. Dinamička pogreška	22
5. Zaključak	23
6. Literatura.....	24
6.1. Knjige:.....	24
6.2. Internetski izvori:.....	24
6.3. Popis slika:	25
7. Životopis	26

1. UVOD

Instrumenti su alati koji se koriste u različitim područjima znanosti, tehnologije, industrije i svakodnevnog života. Mjerni instrument je uređaj koji transformira fizičku varijablu od interesa (predmet mjerenja) u oblik koji je prikladan za bilježenje. Oni su ključni u promatranju, razumijevanju i kontroli okoline, procesa i sustava oko nas. Kako bi mjerenje imalo široko i dosljedno značenje uobičajeno je koristiti standardni sustav jedinica pomoću kojeg se mjerenje jednog instrumenta može usporediti s drugim. Primjer osnovnog mjernog instrumenta je vaga koja će u trenutku kada stanemo na nju fizičku veličinu (našu masu) iskazati brojačno u kilogramima koji su osnovna mjerna jedinica izražavanja fizičke varijable mase. Kako bi rezultati mjerenja bili pouzdani i vjerodostojni potrebno je da su instrumenti točni, precizni i pouzdani. Ipak da bi dobili kvalitetna i vjerodostojna mjerenja potrebno je razumijeti rad mjernih instrumenata i način na koji oni funkcioniraju, a u tome nam pomažu njihove karakteristike. Karakteristike mjernih instrumenata imaju važnu ulogu jer imaju izravan utjecaj na točnosti, preciznost i pouzdanost rezultata mjerenja, one nam pružaju temeljne informacije za donošenje odluka i postizanje željenih rezultata. Karakteristike mjernih instrumenata se dijele u dvije skupine, statičke karakteristike i dinamičke karakteristike. Glavna razlika u podjeli između tih dviju skupina je vrijeme odnosno statičke karakteristike opisuju ponašanje instrumenta kako i sam naziv kaže u statičkim (stabilnim) uvjetima dok dinamičke karakteristike opisuju ponašanje instrumenata pri promjenama ulazne veličine.

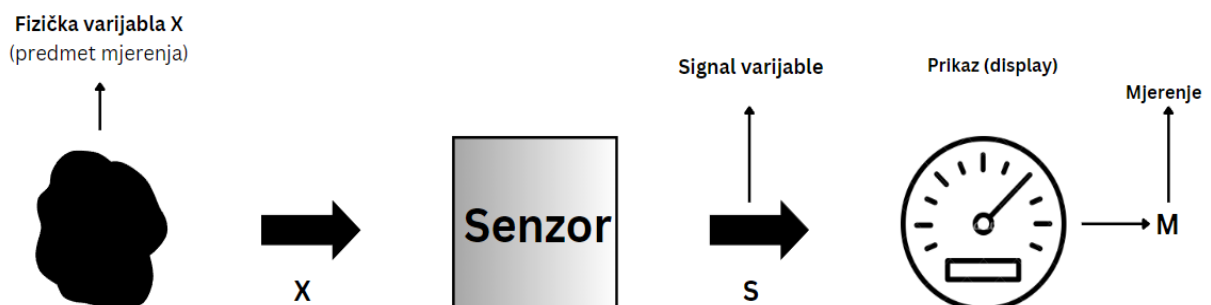
1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu ću obraditi temu statičkih i dinamičkih karakteristika instrumenata. Objasniti ću što su to instrumenti na primjeru jednostavnog modela i kako rade. Napraviti ću podjelu na statičke i dinamičke karakteristike instrumenata, što pripada statičkim, a što dinamičkim karakteristikama te objasniti svaku od karakteristika i njihovu ulogu. Također ću navesti primjere određenih instrumenata s naglaskom na statičke i dinamičke karakteristike te ću provesti određena mjerenja kako bi praktično prikazao rad instrumenta i princip na kojem rade. Obraditi ću metode provjere i kalibracije karakteristika instrumenata i sami utjecaja karakteristika instrumenata na kvalitetu mjerenje te ću u zaključku sažeti istraživanje i naglasti važnosti statičkih i dinamičkih karakteristika instrumenata.

2. PREGLED MJERNIH INSTRUMENATA

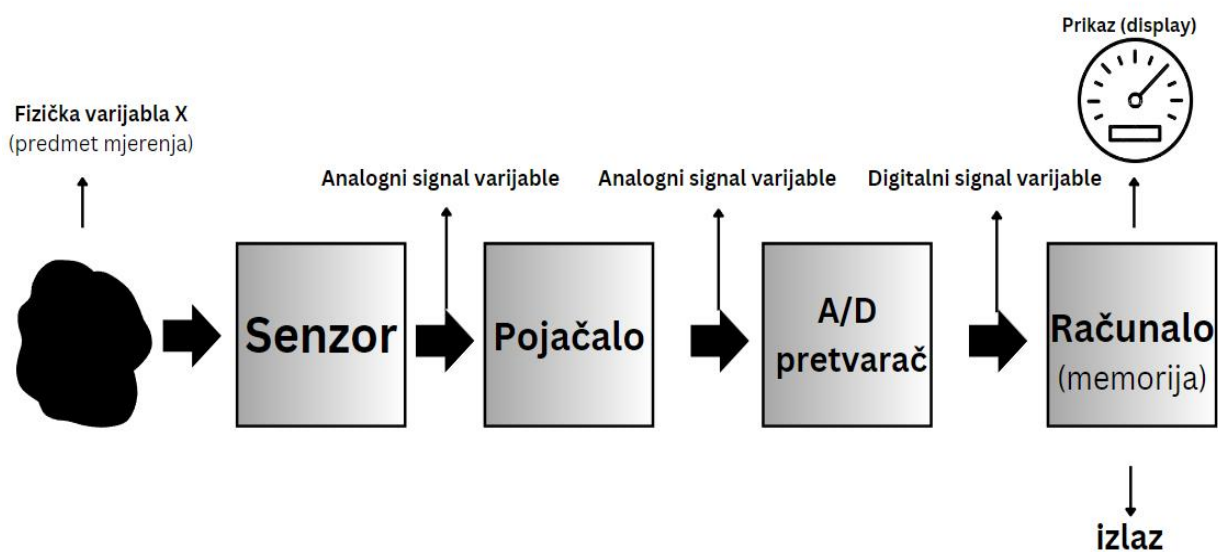
2.1. Mjerni instrumenti i njihovi dijelovi

Instrumente nam je najlakše promatrati i shvatiti njihov princip rada na primjeru idealnog jednostavnog modela s toga u ovom poglavlju ću pomoću jednostavnog modela pokušati prikazati postupak mjerenja i sam razvoj procesa. Mjerni instrumentima mjerimo određeni fizikalni proces, a mjerna veličina je predstavljena vidljivom fizičkom varijablom X . Vidljiva varijabla X ne mora biti mjerna veličina, može biti samo povezana s mjernom veličinom na neki poznat način. Primjer koji sam koristio u uvodu, postupak vaganja, masa objekta mjeri se postupkom vaganja i njena mjerna veličina je masa, ali fizička mjerna veličina je sila usmjerena prema dolje kojom masa djeluje zbog djelovanja Zemljine gravitacije. Postoje razne fizičke veličine koje možemo mjeriti, a nekoliko njih će biti spomenuti u ovom radu. Kao što možete vidjeti u prikazanom jednostavnom modelu instrumenta na slici 2.1. senzor je ključan element instrumenta. [1] To je komponenta koja ima funkciju pretvaranja ulazne fizičke varijable u izlaznu varijablu signala (u električnim krugovima obično je napon signalna varijabla). Ovisno o vrsti mjerenja, postoje različite vrste senzora. Osnovna funkcija senzora je generirati izlaznu varijablu (signal) proporcionalnu mjernoj veličini. Svojstvo izlazne varijable da lako manipuliramo njome u prijenosnom sustavu kao što je električni krug omogućuje nam da signal možemo prenijeti na izlaz ili uređaje za snimanje koji mogu biti udaljeni od senzora. Snimljeni signal (izlazni signal) možemo prikazivati ili koristiti kao ulazni signal za neki sekundarni uređaj u sustavu ili za sam sustav. Na primjeru osnovnog modela možemo vidjeti kako se signal prenosi na zaslon ili uređaj za snimanje koji promatrač može lako očitati. Promatrani izlaz odnosno samo mjerenje je označeno slovom M , ulazna fizička varijabla slovom X , a signal same varijable koji senzor šalje je označen slovom S .



Slika 2.1 Jednostavni model instrumenta [1]

Kao što je već rečeno senzori pretvaraju fizičke varijable u signalne varijable, ali taj proces je puno kompliciraniji u stvarnosti. Primjer koji ću prikazati slikom 2.1 je kada je izlazni signal iz senzora mali. U tom slučaju potrebno je pojačati izlaz pojačalom kao što je prikazano na slici ispod, a zatim pojačani izlaz možemo prenijeti na drugi uređaj za prikaz ili snimiti ovisno o našoj potrebi i primjeni mjerenja. U većini slučajeva je potreban digitalni izlazni signal kako bi se instrument mogao povezati s računalnim sustavom za komunikaciju ili prikupljanje podataka. U tom slučaju ukoliko sensor ne daje digitalni izlaz potrebno analogni izlaz senzora pretvoriti analogno-digitalnim pretvaračem. Takav pretvarač i cijeli sklop sa pojačalom i računalom je prikazan na slici 2.2.



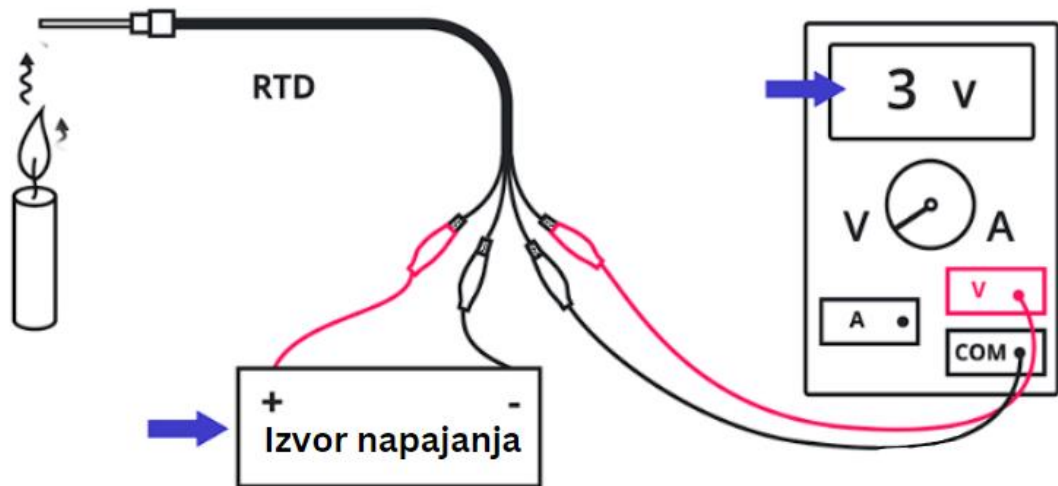
Slika 1.2 Model instrumenta sa računalom, pretvaračem i pojačalom [1]

2.1.1. Senzor

Senzori pretvaraju fizičke varijable u signalne varijable, oni su pretvorni u smislu da su uređaji koji ulaznu energiju jednog oblika pretvaraju u izlaznu energiju drugog oblika. Senzore možemo podjeliti u dvije klase ovisno o njihovom djelovanju na okolinu samog mjerenja. Dijelimo ih na aktivne i pasivne ovisno o tome je li izlazni signal instrumenta u potpunosti prozveden veličinom koja se mjeri ili veličina koja se mjeri modulira mjernu veličinu pomoću nekog vanjskog izvora energije.

2.1.1.1. Pasivni

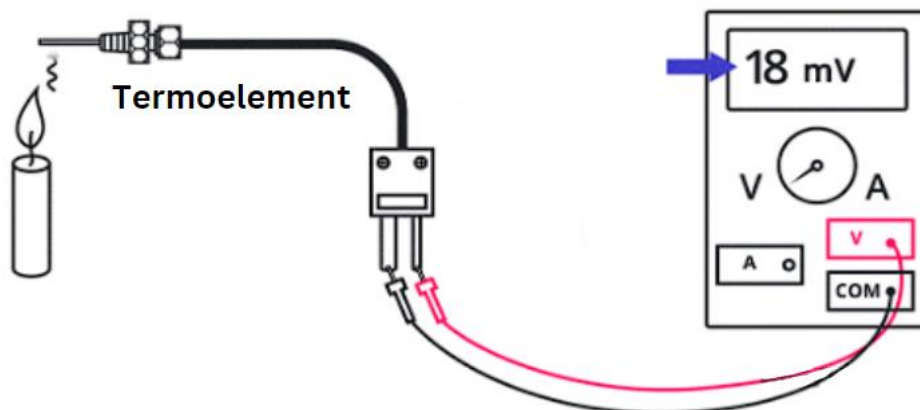
Senzori koji dodaju energiju tijekom procesa mjerenja, ali mogu oduzeti energiju tijekom svog rada. Zahtijevaju vanjski napon napajanja da bi se dobio izlazni signal (napon, struja). Na slici 2.3 vidimo primjer spoja pasivnog senzora odnosno otpornog temperaturnog detektora (eng. RTD). Senzor čiji se otpor mijenja s promjenom temperature. Otpor senzora raste linearno kada temperatura raste, a da bi se iskoristila promjena otpora za proizvodnju promjene napona potreban je vanjski izvor napajanja. Primjeri pasivnih senzora su otpornički, kapacitivni i induktivni senzori.



Slika 2.3 Primjer pasivnog mjernog senzora (RTD) [8]

2.1.1.2. Aktivni

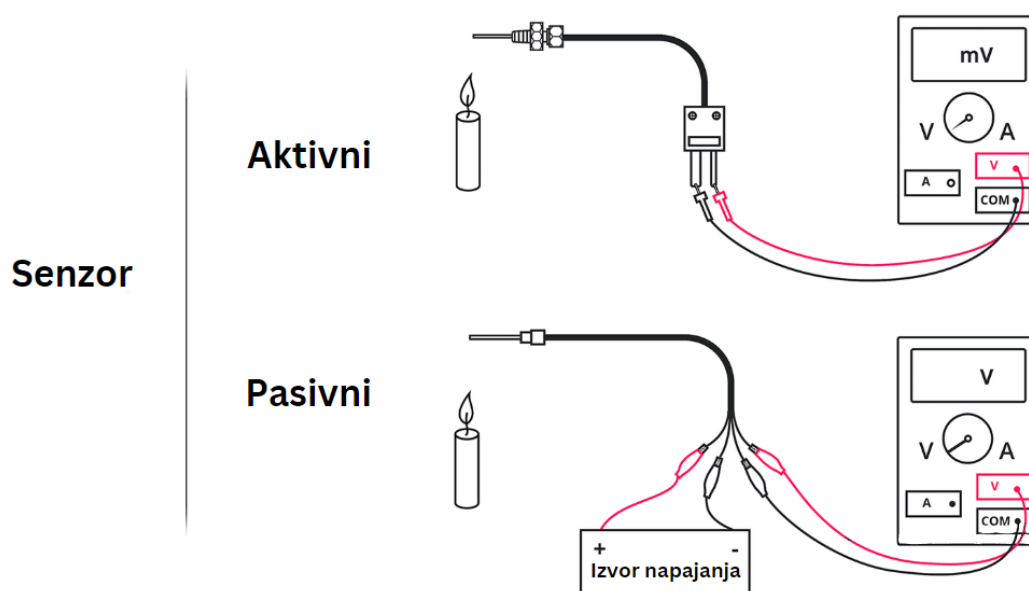
Senzori koji ne zahtijevaju dodatni (vanjski) izvor energije tijekom procesa mjerenja, oni dodaju energiju mjernom okruženju kao dio samog procesa mjerenja. Primjeri aktivnog senzora su termoelektrični senzori i elektromagnetski senzori. Termoelement je senzor koji radi na principu termoelektričnog efekta. Taj efekt je pojava napon pri izlaganju termoelementa temperaturnom gradijentu. Na slici 2.4 vidimo primjer aktivnog mjernog senzora.



Slika 2.4 Primjer aktivnog mjernog senzora [8]

2.1.1.3. Usporedba pasivnog i aktivnog senzora

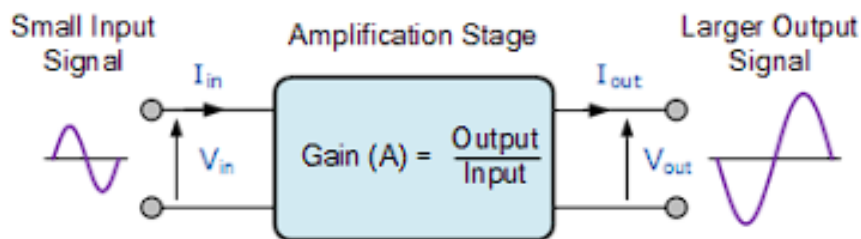
Glavna i osnovna razlika između pasivnog i aktivnog senzora je u prisutnost vanjskog izvora energije. To najbolje možemo vidjeti na slici 5. gdje su prikazana oba spoja i njihov način spajanja.



Slika 2.5 Prikaz spoja aktivnog i pasivnog senzora [8]

2.1.2. Pojačalo

Pojačalo je sklop koji proizvodi povećanu verziju ulaznog signala, koristimo ga kada nam je izlazni signal iz senzora mali za očitavanje. U pravilu za pojačanje signala koristimo linearna mjerna pojačala, to je elektronički sklop s dva ulaza koji koristi električnu energiju iz izvora napajanja za povećanje amplitude signala (najčešće napona i struje) koji dolaze na njegove ulazne priključke. Pojačalo proizvodi proporcionalno veću amplitudu signala na svom izlazu. Količina pojačanja koju pojačalo daje mjeri se omjerom izlaznog napona, struje prema ulaznom napon, struji. Na slici 2.6 možemo vidjeti princip rada pretvarača i njegovu shemu.



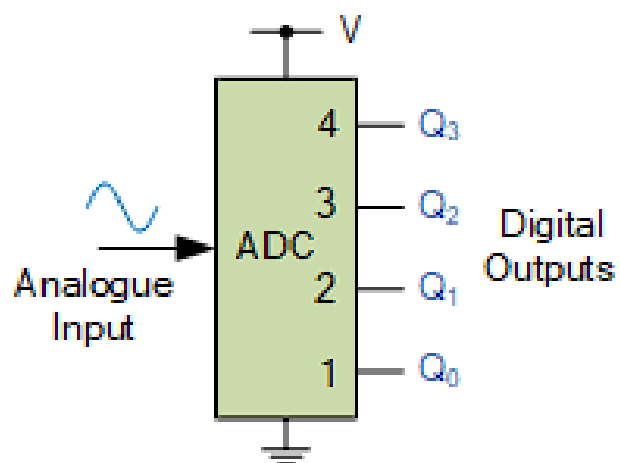
Slika 2.6 Pojačalo [9]

2.1.3. A/D pretvarač

Analogno-digitalni pretvarač je sklop koji digitalnim sklopovima omogućuje povezivanje sa stvarnim svijetom putem binarnog koda koji generira kodiranjem analognog signala. ADC (eng. analogue digital converter) snima analogni signal (napon, struju) u određenom trenutku i za njega proizvodi digitalni izlazni kod koji predstavlja taj analogni signal (napon, struju). Broj znamenki binarnog koda ovisi o razlučivosti A/D pretvarača. Primjer 2-bitni A/D pretvarač će imati razlučivost od četiri znamenke dok će 3-bitni pretvarač imati razlučivost od osam znamenki. Analogno-digitalni pretvarač uzima nepoznati kontinuirani analogni signal i pretvara ga u n-bitni binarni broj koji se računa sljedećim izrazom: broj znamenki koda = 2^n . Na slici 2.7 je tablično prikazano svih osam mogućih vrijednosti analognog ulaza 3-bitnog A/D pretvarača, a na slici 2.8 shematski prikaz A/D pretvarača s ulaznim i izlaznim vrijednostima.

Analogue Input Voltage (V_{IN})	Comparator Outputs								Digital Outputs		
	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	Q ₂	Q ₁	Q ₀
0 to 0.5 V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5 to 1.0 V	0	0	0	0	0	0	1	X	0	0	1
1.0 to 1.5 V	0	0	0	0	0	1	X	X	0	1	0
1.5 to 2.0 V	0	0	0	0	1	X	X	X	0	1	1
2.0 to 2.5 V	0	0	0	1	X	X	X	X	1	0	0
2.5 to 3.0 V	0	0	1	X	X	X	X	X	1	0	1
3.0 to 3.5 V	0	1	X	X	X	X	X	X	1	1	0
3.5 to 4.0 V	1	X	X	X	X	X	X	X	1	1	1

Slika 2.7 Sve moguće vrijednosti 3-bitnog A/D pretvarača [10]



Slika 2.2 A/D pretvarač [10]

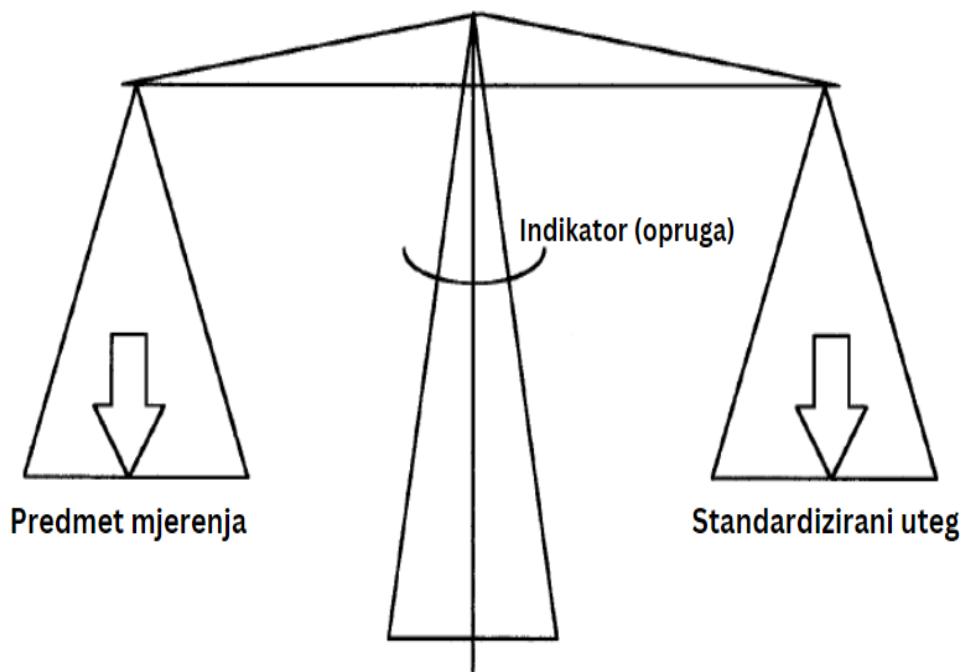
2.2. Vrste instrumenata i izvedbene karakteristike

2.2.1. Pasivni i aktivni instrumenti

Instrumente s obzirom možemo podjeliti u nekoliko kriterija s obzirom na njihovo djelovanje i način na koji provede mjerenje. Prva i najosnovnija podjela je na pasivne i aktivne instrumenti. Pasivni i aktivni instrumenti su dva osnovna tipa instrumenata, a koriste se u različite svrhe. Osnovna razlika je njihovo manipuliranje signalom tijekom mjerenja. Pasivni instrumenti su jednostavni za uporabu, ne mijenjaju svojstva signala koji se mjeri te se oni koriste za osnovna mjerenja i analizu signala. Aktivni instrumenti imaju sposobnost manipulacije signalima, obično zahtijevaju dodatno napajanje te se koriste kada je potrebna precizna kontrola nad signalima ili kad je potrebno provesti napredne analize. Odabir instrumenta koji ćemo koristiti ovisi o potrebama mjerenja koje provodimo.

2.2.2. Nulti instrument

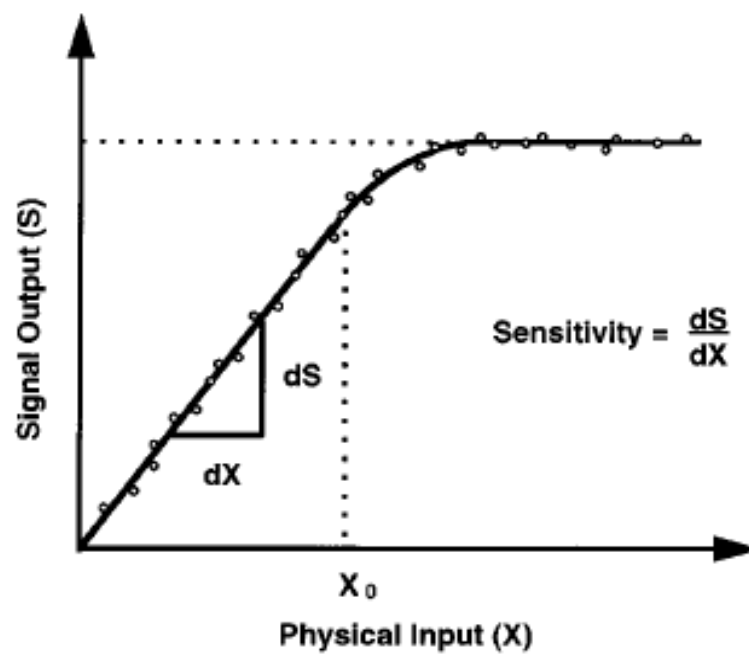
Nulta metoda po kojoj je ovaj tip instrumenata i dobio ime je najstariji tip mjerenja. U ovoj metodi pomoću opruge kojom se može ručno ili automatski upravljati i poznatog standardnog ulaza (utega) mjerni instrument (vaga) uspoređuje utjecaj mjerene veličine na mjerni sustav i izračunava razliku između dvaju predmeta na ulazima mjernog instrumenta. Ključne značajke nultog instrumenta svakako su operacija balansiranja pomoću nekog komparatora, dva ulaza na mjernom instrumentu, standardiziran ulaz na drugom kraju mjernog instrumenta i smanjenje interakcije između mjernog sustava i mjerne veličine zato što oba ulaza imaju zaseban izvor. [3] Kod ove metode izmjereni sustav vidi vrlo visoku ulaznu impedanciju i time se greške kod očitavanja smanjuju na minimum. Korištenje nultog instrumenta izrazito učinkovito kod mjerenja veličina malih vrijednosti jer se može postići visoka točnost za ulazne vrijednosti i niska pogreška kod očitavanja vrijednost. Nedostaci nul instrumenata što zahtijevaju više vremena za izvođenje jednostavnog mjerenja te što točnost instrumenta ovisi o linearnosti i kalibraciji opruge i kalibraciji standardiziranog utega. Činjenica je da su nulti instrumenti točniji od otklonskih kojih ćemo se dotaknuti nešto kasnije u ovom radu, ali češće ćemo koristiti otklonske zbog njihove praktičnosti i daleko jednostavnijeg očitavanja pokazivača položaja od razlike težina dvaju ulaza na nultom instrumentu. Stoga nulti instrument ćemo koristiti kada nam je potrebna vrhunska točnost u iznimnim situacijama. Najjednostavniji i svima poznat primjer nultog instrumenta je prikazan na slici 2.9. [2]



Slika 2.9 Primjer nultog mjernog instrumenta (vaga) [2]

2.3. Kalibracija

Kalibracija senzora je proces koju uspostavlja vezu između ulazne varijable i izlaznog signala za određeni senzor. Provedba kalibracije obično se obavlja tako što poznatu fizičku vrijednost primjenimo na senzor ili instrument, a zatim bilježimo dobiveni izlaz. Prilikom kalibracije ukoliko senzor ima linearni odziv za ulazne signale manje od vrijednosti X tada se osjetljivost senzora određuje nagibom kalibracijske krivulje. Problem nastaje kada su ulazi veće vrijednosti od X tada kalibracijska krivulja postaje manje osjetljiva sve dok ne dostigne graničnu vrijednost izlaznog signala. Takvo ponašanje nazivamo zasićenje i ono nam govori kako senzor ne može pouzdano mjeriti vrijednosti veće od svoje zasićene vrijednosti. Jednostavnije rečeno kalibraciju možemo objasniti kao proces usklađivanja instrumenta sa poznatim referentnim vrijednostima kako bi osigurali točnost i pouzdanost mjerenja. To je izuzetno bitan proces u održavanju kvalitete mjerenja i osiguranju pravilnog funkcioniranja instrumenata.



Slika 2.3 Prikaz krivulje kalibracije [11]

3. Statičke karakteristike instrumenata

U ovom poglavlju obraditi ću jednu od dvije teme ovog rada, a to su statičke karakteristike instrumenata. U uvodnom dijelu su pobliže objašnjeni instrumenti, njihovi tipovi i principi rada, a u ovom dijelu ću pobliže opisati svaku statičku karakteristiku instrumenta i zašto su nam one važne. Prvo moramo utvrditi što su statičke karakteristike instrumenata, to su karakteristike koje se odnose na mjerenje veličine koje varira s vremenom ili su uglavnom konstantne. U tom slučaju možemo definirati skup kriterija koji daju zadovoljavajuć opis kvalitete mjerenja bez uvođenja dinamičkih opisa. Neke od statičkih karakteristika instrumenata su točnost, osjetljivost, ponovljivost, preciznost, pogreška preciznosti, statička pogreška, mrtva zona, histereza i rezolucija. Statičke karakteristike nam je najlakše promatrati na primjeru u stvarnom životu, recimo da nas zanima temperatura prostorije u kojoj boravimo i želimo je izmjeriti.[2] Očitamo temperaturu od 25°C, u tom slučaju nije bitno ako je stvarna temperatura prostorije 24°C ili 26°C jer male varijacije u tom slučaju ne utječu na to kako se mi osjećamo. Naše tijelo ne razlikuje tako bliske razine temperature i s toga termometar s netočnošću od $\pm 1^\circ\text{C}$ prikladan za radnju koja nam je potrebna. Dolazimo do problema ako isti termometar koristimo za mjerenje temperature određenih kemijskih procesa tada varijacija od $\pm 1^\circ\text{C}$ ima značajan učinak na brzinu reakcije ili čak na proizvode procesa. Iz tog razloga potrebna nam je mjerna nepreciznost višestruko manja od $\pm 1^\circ\text{C}$. Prema navedenom primjeru točnost mjerenja je jedan od kriterija koje razmatramo pri odabiru instrumenta kao i parametre poput osjetljivosti, linearnosti, preciznosti, histereze.



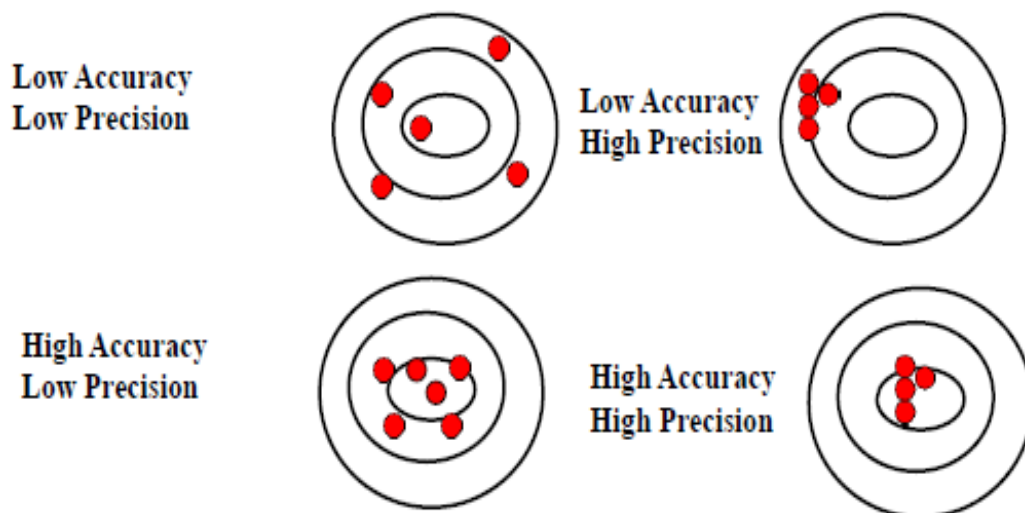
Slika 3.1 Prikaz karakteristika mjernog instrumenta [2]

3.1. Točnost

Točnost mjernog instrumenta je blizina kojom se očitavanje instrumenta približava pravoj vrijednosti izmjerene količine. To je izlazno očitavanje instrumenta blizu točne vrijednosti. Određena je razlikom izmjerene vrijednosti u odnosu na njezinu pravu vrijednost. Ovaj parametar je prisutan u tehničkim karakteristikama mnogih uređaja koji imaju referentne izlazne parametre. Klasa točnosti je glavna karakteristika mjerne opreme. Točnost se poboljšava kada su instrumenti pravilno kalibrirani. U praksi je češće izražavamo u obliku netočnosti ili granice pogrešaka i može biti izražena na sljedeće načine. [11] Točnost točke je točnost instrumenta u jednoj točki, ne daje nikakve informacije o točnosti na drugim točkama na ljestvici kao ni informacije o općoj točnosti instrumenta.[5] Točnost kao postotak raspona ljestvice je kada instrument ima ujednačenu ljestvicu, njegova se točnost može izraziti u smislu raspona ljestvice. Točnost kao postotak stvarne vrijednosti je najbolji način da zamislite ideju točnosti i da je odredimo u smislu stvarne vrijednosti veličine koja se mjeri unutar $\pm 0,5\%$ stvarne vrijednosti.

3.2. Preciznost

Pojam koji opisuje stupanj slobode instrumenta od slučajnih pogrešaka. Preciznost se često miješa sa točnosti mjerenja iako ta dva pojma povezana međusobno. Visoka preciznost ne podrazumijeva točnost mjerenja i obrnuto. Preciznost možemo izraziti kao stupanj do kojeg ponovljena mjerenja pokazuju jednake rezultate.[5] Ukoliko instrumentom velike preciznosti izvršimo veći broj očitavanja iste fizičke varijable tada će raspon očitavanja biti vrlo mali. Ukoliko se događaju mjerenja niske točnosti visokopreciznog instrumenta tada je obično rješenje problema u ponovnom kalibriranju instrumenta. Razliku između preciznosti i točnosti najbolje možemo vidjeti na slici 3.2.



Slika 3.2 Primjer točnosti i preciznosti [5]

3.3. Tolerancija

Tolerancija je jedno od ključnih statičkih karakteristika instrumenta. Ona igra bitnu ulogu u određivanju točnosti i pouzdanosti mjerenja. Usko je povezana s točnošću i definira najveću pogrešku koja se može očekivati u nekoj vrijednosti. Tolerancija opisuje maksimalno odstupanje proizvedene komponente od neke specificirane vrijednosti. Ona nam pomaže u postavljanju granica i mjerenju kvalitete instrumenta. Nepravilnosti u toleranciji mogu dovesti do netočnih rezultata, s posljedicama koje variraju ovisno o primjeni.

3.4. Raspon instrumenta

Raspon instrumenta definira minimalnu i maksimalnu vrijednost veličine koju instrument može mjeriti. Vrijednosti mjerenog ulaznog i izlaznog signala određene su minimalnim i maksimalnim vrijednostima odnosno najvišim i najnižim očitanjima koje instrument može postići tj. određene su rasponom.

3.5. Rezolucija (razlučivost)

Rezolucija je statička karakteristika instrumenta koja se odnosi na najmanju promjenu u ulaznoj veličini koju instrument može pouzdano razlikovati ili detektirati. Praktično rečeno to je sposobnost razlikovanja bliskih vrijednosti, to je najmanja mjerljiva promjena koja može biti zabilježena na instrumentu bez obzira na njegovu preciznost. Rezoluciju se ne mora nužno odraziti na preciznost mjerenja instrumenta. Preciznost se odnosi na to koliko je mjerenje blisko stvarnoj vrijednosti dok rezolucija odražava najmanju promjenu koju instrument može zabilježiti. Kod

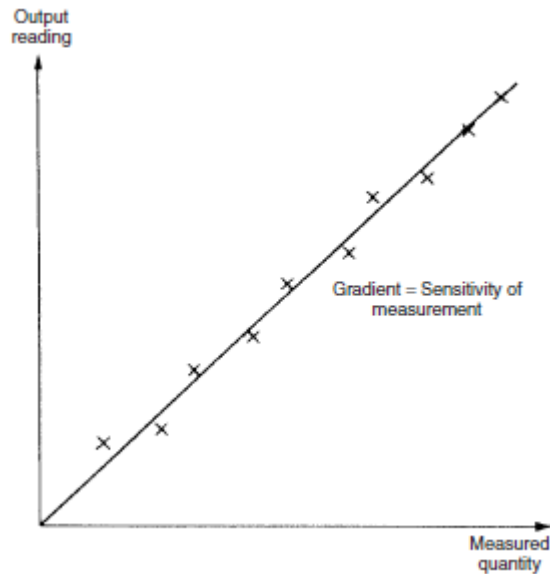
digitalnih instrumenata jedinica posljednje brojke je karakteristika razlučivosti što možemo vidjeti na slici ispod. [4]



Slika 3.3 Razlučivost digitalnog instrumenta [4]

3.6. Linearnost i nelinearnost

Obično je poželjno da izlazno očitavanje instrumenata bude linearno proporcionalno veličini koja se mjeri. Na slici ispod X-ovi prikazuju dijagram tipičnih izlaznih očitavanja instrumenata kada se na njega primijeni niz ulaznih veličina. Uobičajeni postupak je povući ravnu liniju koja dobro pristaje kroz X kao što je prikazano na slici 3.4. Iako je to moguće učiniti s razumnom točnošću pomoću oka uvijek je bolje primijenti matematičku tehniku prilagodbe linijama najmanjih kvadarata. Nelinearnost se definira kao maksimalno odstupanje bilo kojeg od izlaznih očitavanja označenih slovom X s ravne crte. Nelinearnost obično izražavamo kao postotak očitavanja pune skale.



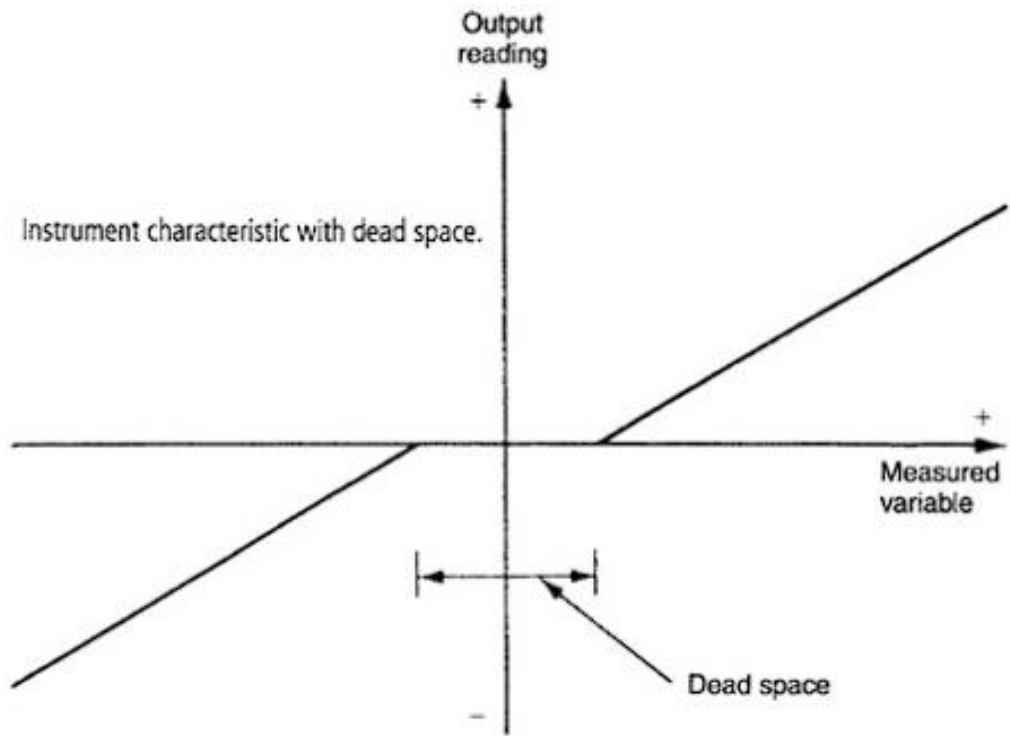
Slika 3.4 Primjer linearnosti [2]

3.7. Osjetljivost

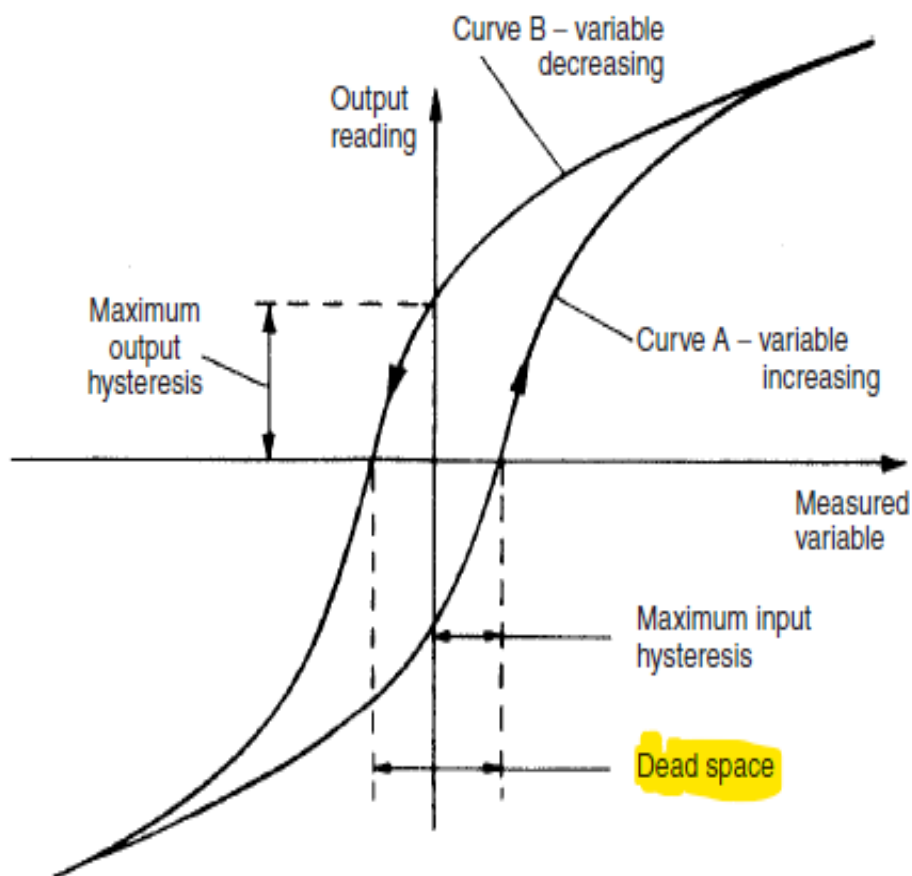
Osjetljivost instrumenta definira se kao odnos promjene pokazivanja kazaljke instrumenta i istovremene promjene mjerene veličine. Najčešće se koristi se promjena kuta kazaljke zbog čega se osjetljivost definira kao odnos promjene otklona kuta i promjene mjerene veličine. Često se osjetljivost definira kao odnos konačnog prirasta otklona i konačnog prirasta mjerene veličine. $S = \frac{d\alpha}{dx} = f(x)$. [12]

3.8. Mrtvi prostor i vrijeme

Mrtvi prostor možemo definirati kao raspon različitih ulaznih vrijednosti kod kojih nema promjene izlazne vrijednosti. Instrumenti koji imaju značajniju histerezu također imaju i mrtvi prostor što možemo vidjeti na slici 3.5.[2] Također neki instrumenti mogu pokazivati mrtvi unatoč nepostojanju histreze zbog raznih mehaničkih problema. Mrtvo vrijeme je vrijeme potrebno instrumentu da počne reagirati nakon promjene vrijednosti ulaznog signala (varijable).



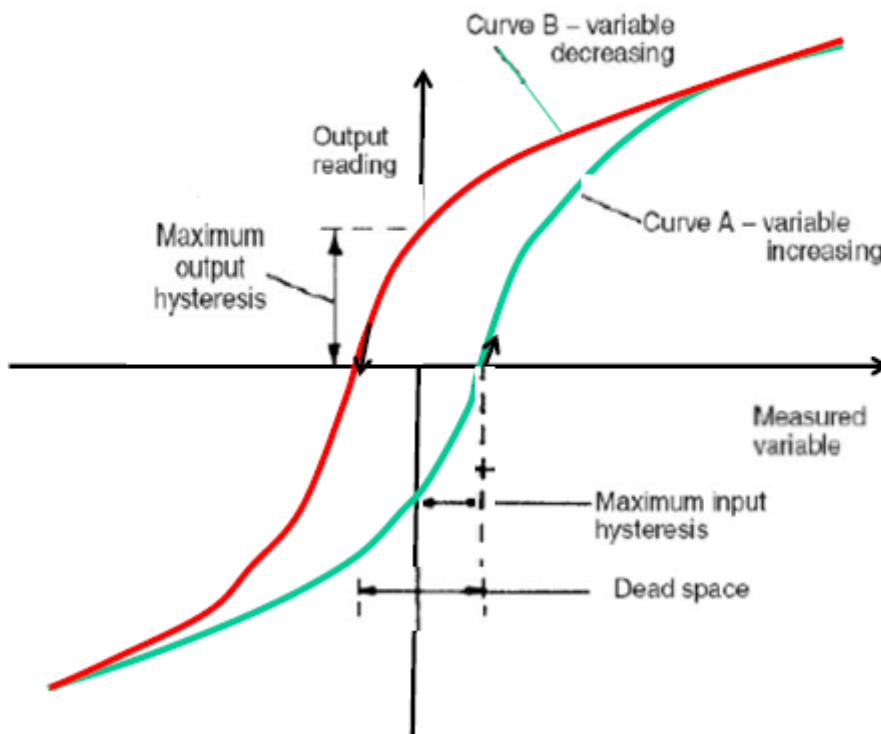
Slika 3.5 Prikaz karakteristike instrumenta sa mrtvim prostorom [2]



Slika3.6 Prikaz petlje histereze i mrtvog *prostora* [2]

3.9. Histereza

Histereza je pojava koja dovodi do neponovljivog pokazivanja instrumenta u ovisnosti o načinu promjena ulazne veličine pri mjerenju. Mjera histereze je maksimalna razlika izlaznih vrijednosti koje se dobivaju za istu ulaznu vrijednost. Pažljivo promatranje odnosa ulaza i izlaza bloka ponekad će otkriti različite rezultate jer se signali razlikuju u smjeru kretanja.[4] Mehanički sustavi često pokazuju malu razliku u duljini jer je smjer primijenjene sile obrnut. Isti učinak nastaje kada je magnetsko polje u magnetskom materijalu obrnuto. Ova karakteristika naziva se histereza. Na slici ispod je generalizirani dijagram odnosa izlaz/ulaz koji pokazuje da dolazi do zatvorene petlje. Učinak obično postaje manji kako se amplituda uzastopnih izleta smanjuje, što je jedan od načina da se kontrolira učinak histereze. Ovaj učinak prisutan je u većini materijala zbog toga su razvijeni posebni materijali koji pokazuju nisku histerezu za svoju primjenu. Primjeri takvih materijala su žica satne opruge ili lamele željeznog transformatora.



Slika 3.7 Petlja histereze [7]

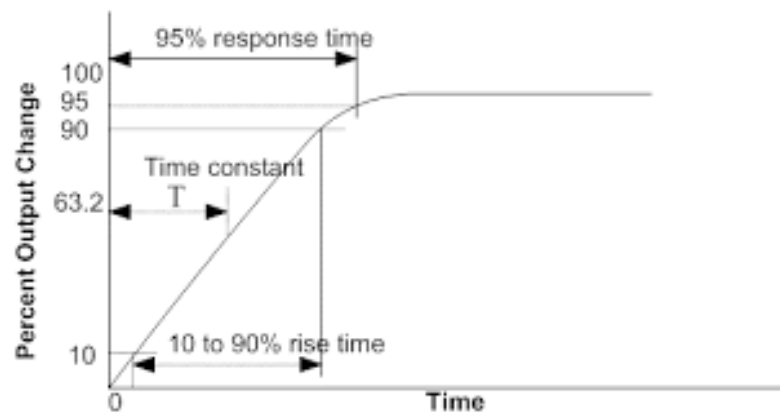
4. Dinamičke karakteristike instrumenta

Rezultati mjerenja rijetko su statični tijekom vremena. Dinamičke karakteristike mjernog instrumenta opisuju njegovo ponašanje između vremena kada izmjerena veličina promjeni vrijednost i vremena kada izlaz instrumenta postigne stabilnu vrijednost. Rezultati mjerenja većinom imaju dinamičku komponentu koju moramo razumijeti kako bi mogli ispravno interpretirati rezultat. Kako bi pravilno razumijeli dizajn instrumenata i njihovu upotrebu potrebno je razviti uvid u tipove dinamičkog odziva koji se najčešće susreću i razviti osnovu matematičkog modeliranja koje nam omogućuje da dajemo sažete izvještaje o odzivima. Ako signal ima linearnu izvedbu tada možemo matematički opisati njegovo gibanje na jednostavan način. Problem nastaje kada je ponašanje samog signala nelinearno tada opis matematičkim modelima postaje težak ili nemoguć. U tom slučaju nelinearno ponašanje trebamo promatrati u više pojedinačnih linearnih segmenata. Tu nam mogu pomoći računala koja su vrlo učinkovita za modeliranje nelinearnih sustava. Naravno to zahtjeva i vrijeme korisnika koje je potrebno utrošiti za razvijanje i postavljanje odgovarajućeg modela. Postoji više kriterija koje uzimamo u obzir kod dinamičkih

karakteristika instrumenata. Neke od njih koje ćemo u ovom radu spomeniti su vrijeme odziva, širina opsega, pouzdanost, kašnjenje mjerenja, vrijeme smirenja.

4.1. Vrijeme odziva

Vrijeme odziva definirano je kao vrijeme potrebno instrumentu da dođe u stabilan položaj nakon što je primio signal. Možemo reći da vrijeme odziva određuje potrebno vrijeme za proizvodnju signala na izlazu nakon što se signal sa ulaza primjeni na instrument. Krivulja koja prikazuje promjenu pokazivanja s vremenom može imati različite oblike ovisno o kapacitivnosti koju treba ispuniti i prigušnim elementima.[13] Na slici 4.1 možemo vidjeti krivulju odziva i kako se signal kreće prije nego dođe u stabilan položaj.



Slika 4.1 Krivulja vremena odziva [14]

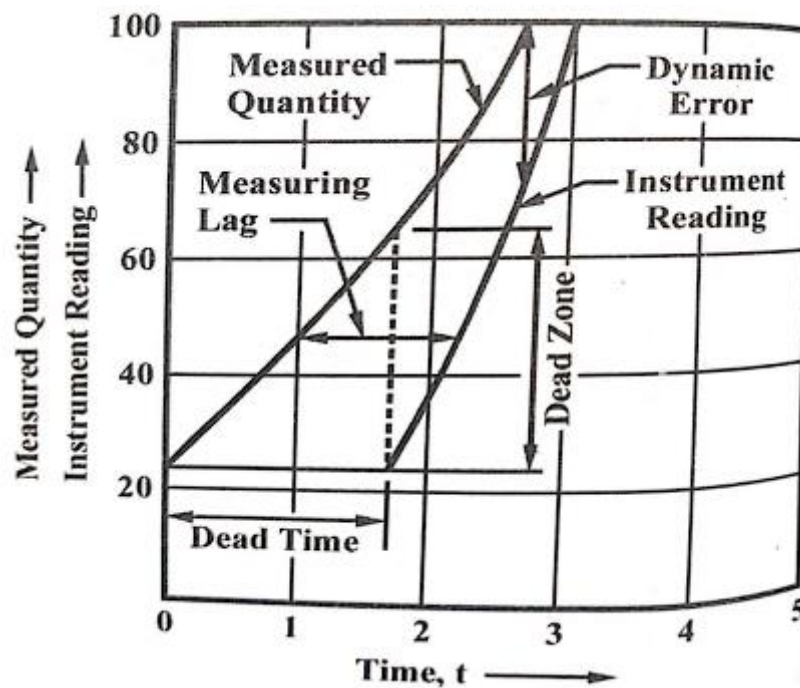
4.2. Brzina odziva

Brzinu odziva možemo definirati kao brzinu kojom instrument reagira na promjene izmjerene količine odnosno brzina kojom će instrument nakon promjene ulazne varijable pokazivati stabilan signal. Možemo reći kako je to sposobnost instrumenta da odgovori na nagle promjene amplitude ulaznog signala. Obično se definira kao vrijeme potrebno instrumentu da se približi stabilnim uvjetima. Brzinu odziva određujemo na temelju znanja o performansama sustava u prijelaznim uvjetima. Ona je vrlo važna dinamička karakteristika instrumenata i usko je povezana sa ostalim karakteristikama poput kašnjenja mjerenja, vremena smirivanja i vremena odziva.

4.3. Kašnjenje mjerenja

Kašnjenje mjerenja definiramo kao kašnjenje u odgovoru odnosno reakciji na promjenu mjerene veličine. Jednostavnije rečeno instrument ne reagira odmah na promjenu ulazne varijable. U

pravilu kašnjenje je vrlo malo, ali postaje bitno ukoliko radimo mjerenja velike brzine. Postoje dvije vrste kašnjenja mjerenja, to su retardacijski tip i tip vremenskog kašnjenja. Kod retardacijskog tipa odziv instrumenta počinje odmah nakon što se dogodi promjena u mjerenoj veličini dok kod vremenskog tipa kašnjenja odgovor počinje kod promjene ulazne varijable, ali nakon mrtve zone što možemo vidjeti na slici ispod. Prilikom dinamičkih mjerenja bitno je da je vremensko kašnjenje svedeno na minimum.

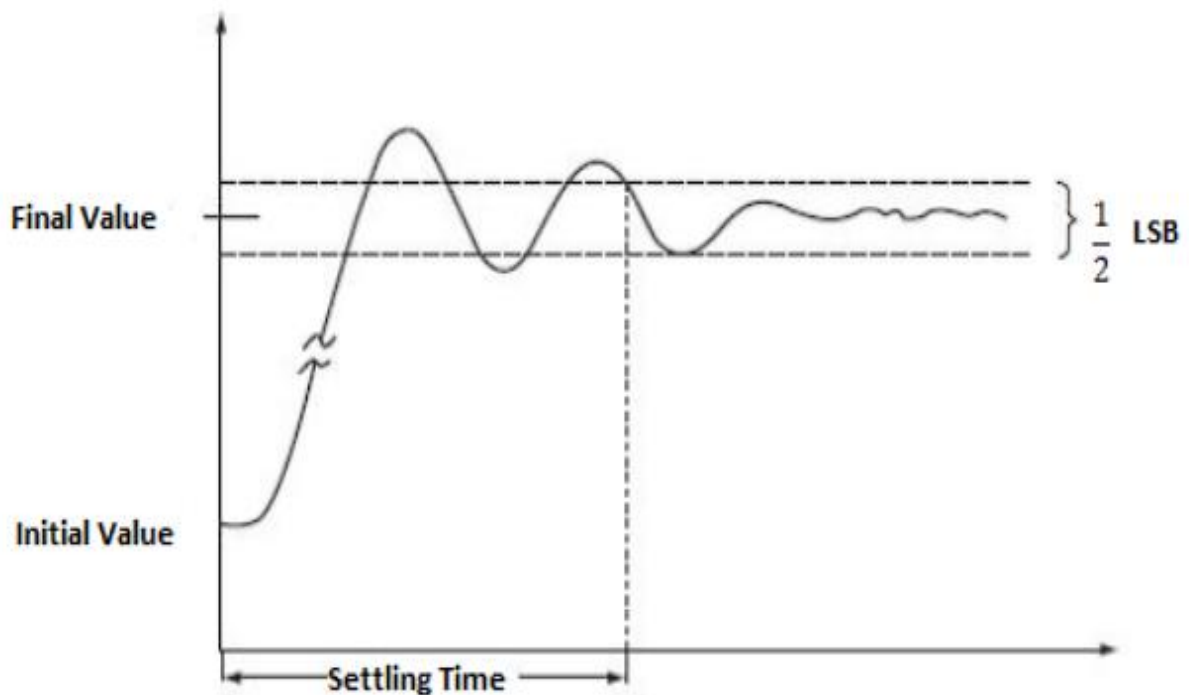


Slika 4.2 Grafički prikaz kašnjenja mjerenja [16]

4.4. Vrijeme smirenja

Vrijeme smirenja definiramo kao vrijeme potrebno instrumentu da se nakon primanja ulaznog signala stabilizira i pruži pouzdane i točne mjere. To je vrlo važan parametar posebno u primjenama gdje su potrebni brza i pouzdana mjerenja nekoliko puta u kratkom vremenu. Vrijeme smirenja obično je navedeno u dokumentaciji instrumenta u obliku postotka. Brojni faktori utječu na vrijeme smirenja, a neki od njih su dinamika sustava, pojam prigušenja i šumovi i poremećaji. Dinamika sustava odnosno karakteristike sustava igraju značajnu ulogu u vremenu smirenja jer je njihovim svojstvima određeno vrijeme smirenja. Sustavi s bržim vremenom odgovora obično imaju kraće vrijeme smirenja pa su takvi sustavi poželjniji i obrnuto. Prigušenja mogu pomoći u smanjenju oscilacija te mogu skratiti vrijeme smirenja. Neki sustavi mogu imati duže vrijeme smirenja zbog nedovoljno prigušenja pa se takvi sustavi ne koriste kod zahtjevnijih mjerenja.

Šumovi i poremećaji također utječu na vrijeme smirenja pa tako oni mogu produžiti vrijeme smirenja jer je samom instrumentu odnosno sustavu mjerenja potrebno dodatno vrijeme za filtriranje i bradu tih poremećaja. Uloga inženjera je uzeti sve smetnje u obzir i prema tome optimizirati i podesiti instrument odnosno sustav mjerenja.[15] Moguće su prilagodbe kontrolnih parametara, ranije spomenute dinamike sustave ili već spomenutog filtriranja šumova i poremećaja.



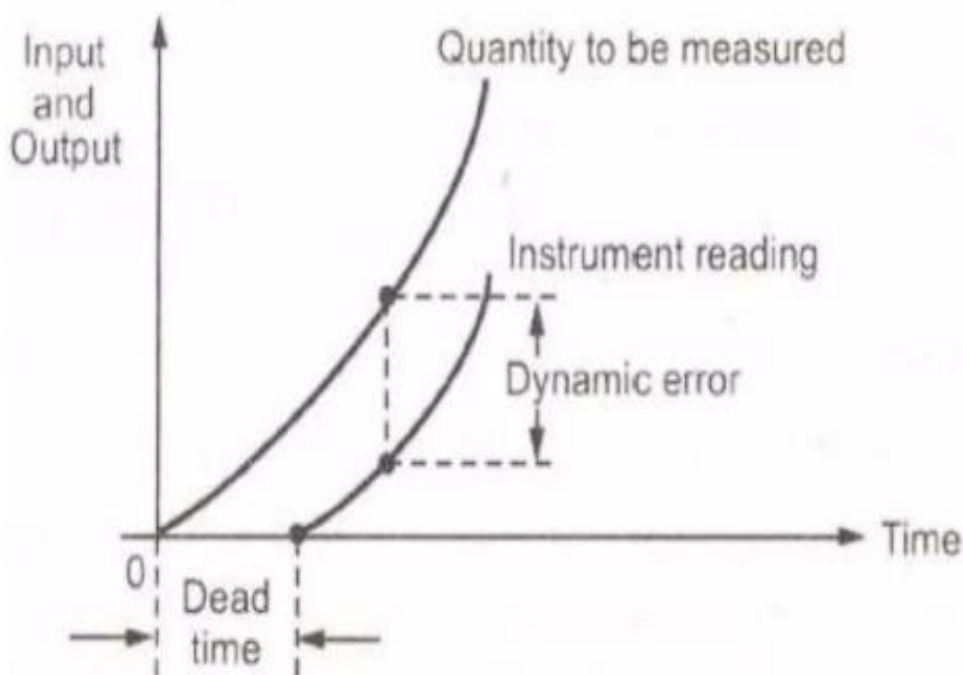
Slika 4.3 Prikaz krivulje vremena smirenja [5]

4.5. Pouzdanost

Pouzdanost sustava ili instrumenta definira se kao sposobnost sustava da reproducira izlaz u istom obliku kao i ulaz. Možemo reći mjeri koliko točno instrument može predstaviti varijablu iz stvarnog svijeta koja je namijenjena za mjerenje. To je stupanj do kojeg mjerni sustav odnosno instrument pokazuje promjene u izmjerenoj veličini bez dinamičke pogreške. Uzmemo li da se linearno promjenjiva primjenjuje na sustav odnosno na ulaz sustava te ako je izlaz također linearno promjenjiva veličina možemo reći da sustav ima pouzdanost 100 posto. U idealnim slučajevima sustav ima pouzdanost 100 posto odnosno izlaz i ulaz imaju isti oblik bez ikakvih izobličenja. [1]

4.6. Dinamička pogreška

Dinamička pogreška je razlika između stvarne vrijednosti količine koja se mijenja s vremenom i vrijednosti koju pokazuje instrument ako se ne pretpostavlja statička pogreška. Ukupna dinamička pogreška instrumenta je kombinacija njegove pouzdanosti i vremenskog odmaka ili fazne razlike između ulaznog i izlaznog signala. [5] Možemo reći kako je to razlika između stvarne vrijednosti varijable koja se mjeri, koja se mijenja s vremenom i vrijednosti koju pokazuje mjerni sustav uz pretpostavku statičke pogreške. Dinamička pogreška instrumenta predstavlja kombinaciju njegove pouzdanosti, vremenskog odmaka i fazne razlike između ulaza i izlaza signala. [16] Na slici ispod možemo na grafu vidjeti dvije krivulje i njihovo kretanje te dinamičku pogrešku.



Slika 4.4 Krivulja s dinamičkom pogreškom [5]

5. Zaključak

U ovome završnom radu prikazao sam detaljno statičke i dinamičke karakteristike instrumenata te kroz njihovo istraživanje dolazimo do nekoliko zaključaka. Prije svega razumijevanje statičkih karakteristike instrumenata kao što su preciznost, točnost, tolerancija, ključno je za omogućavanje pouzdanih i točnih mjerenja. Statičke karakteristike instrumenata pružaju osnovne smjernice za odabir i kalibraciju odgovarajućih uređaja za specifične zadatke mjerenja, a razumijevanje tih karakteristika pomaže nama kao inženjerima u sprječavanju pogrešaka i nesigurnosti u mjerenju. Druga stvar koju smo analizirali su dinamičke karakteristike instrumenata koje uključuju brzinu odziva, vrijeme odziva te sposobnost praćenja brzih promjena u mjerenju. Analiziranjem ovih karakteristika mogli smo uvidjeti važnost mjernih instrumenata u kontekstu dinamičkih procesa također mogli smo vidjeti kako se mjerna oprema ponaša te kako možemo utjecati na razne smetnje i instrumente prilagoditi različitim uvjetima. U ovom radu ističem kako statičke i dinamičke karakteristike iako su odvojeno promatrane međusobno se nadopunjuju i utječu jedna na drugu. Statičke karakteristike postavljaju temelj za pouzdane i precizne rezultate dok nam dinamičke karakteristike omogućuju procjenu ponašanja instrumenata u različitim dinamičkim uvjetima. Razumijevanje njihove interakcije ključno je za odabir i kalibraciju instrumenata koje ćemo koristiti pri različitim mjerenjima. Na samom kraju ovaj rad potvrđuje važnost upotrebe naprednih tehnologija i metoda za analizu i optimizaciju statičkih i dinamičkih karakteristika mjernih instrumenata. To je ključno za unapređenje preciznosti i pouzdanosti mjerenja u znanstvenim istraživanjima, industriji i drugim područjima gdje su precizna mjerenja od suštinskog značaja.

6. Literatura

6.1. Knjige:

- [1]R. John Hansman: Characteristics of Instrumentation
- [2]Alan S Morris: Measurement and Instrumentation Principles
- [3]John G. Webster: The Measurement instrumentation and sensors handbook
- [4] Predrag Krčum: Električna mjerenja
- [5] Mrs K.V. Archana: Static and Dynamic Characteristics of Measuring Instruments
- [6] Gatut Yudoyono: Measurement System
- [7] Static and Dynamic Characteristics of Instruments PMV Subbaro

6.2. Internetski izvori:

- [8] <https://realpars.com/types-of-sensors/>
- [9] https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_1.html
- [10] <https://www.electronics-tutorials.ws/combo/analog-to-digital-converter.html>
- [11] <https://www.electricalengineeringinfo.com/2016/03/static-characteristics-and-dynamic-characteristics-of-electrical-measuring-instruments.html?fbclid=IwAR2ah4irq2JGNcyZOXycRQ-sdPUF0nJJoxXuVtko2c8uihs82EyLpNiaXo8>
- [12] https://www.academia.edu/36690010/ANALOGNI_ELEKTRI%C4%8CNI_MJERNI_INSTRUMENTI
- [13] <https://what-when-how.com/metrology/measuring-instruments-metrology/>
- [14] http://ecoursesonline.iasri.res.in/pluginfile.php/4023/mod_resource/content/1/Lesson_9.htm
- [15] <https://www.electricalandcontrol.com/performance-characteristics-of-digital-measurement-instruments/>
- [16] <https://mediatoget.blogspot.com/2012/01/static-dynamic-characteristics-of.html>

6.3. Popis slika:

Slika 2.1 Jednostavni model instrumenta	2
Slika 2.2 Model instrumenta sa računalom, pretvaračem i pojačalom	3
Slika 2.3 Primjer pasivnog mjernog senzora (RTD)	4
Slika 2.4 Primjer aktivnog mjernog senzora	5
Slika 2.5 Prikaz spoja aktivnog i pasivnog senzora	5
Slika 2.6 Pojačalo	6
Slika 2.7 Sve moguće vrijednosti 3-bitnog A/D pretvarača	7
Slika 2.8 A/D pretvarač	7
Slika 2.9 Primjer nultog mjernog instrumenta (vaga)	9
Slika 2.10 Prikaz krivulje kalibracije	10
Slika 3.1 Prikaz karakteristika mjernog instrumenta	11
Slika 3.2 Primjer točnosti i preciznosti	13
Slika 3.3 Razlučivost digitalnog instrumenta	14
Slika 3.4 Primjer linearnosti	15
Slika 3.5 Prikaz karakteristike instrumenta sa mrtvim prostorom	16
Slika 3.6 Prikaz petlje histereze i mrtvog <i>prostora</i>	17
Slika 3.7 Petlja histereze	18
Slika 4.1 Krivulja vremena odziva	19
Slika 4.2 Grafički prikaz kašnjenja mjerenja	20
Slika 4.3 Prikaz krivulje vremena smirenja	21
Slika 4.4 Krivulja s dinamičkom pogreškom	22

Sažetak

U ovom završnom radu opisuju se statičke i dinamičke karakteristike instrumenata, sama konstrukcija instrumenata i njihova primjena. Izvodi se analiza svake pojedine statičke i dinamičke karakteristike instrumenata. Ta analiza omogućava nam detaljno shvaćanje rada instrumenata i njihovih karakteristika. Također analiza nam omogućuje da uz pomoć naprednih tehnologija i metoda smanjimo mogućnosti pogreške u mjerenju te da razvijemo druge tehnologije i metode. Poznavanjem svih karakteristika instrumenata znati ćemo pravilno odabrati instrumente ovisno o zahtjevima mjerenja te ćemo moći otkloniti smetnje u mjerenjima.

Ključne riječi: statičke karakteristike instrumenata, dinamičke karakteristike instrumenata, točnost, pouzdanost, preciznost, histereza, linernost, vrijeme odziva, brzina odziva

Abstract

This final paper describes the static and dynamic characteristics of the instruments, the construction of the instruments and their application. An analysis of each individual static and dynamic characteristic of the instruments is performed. This analysis enables us to have a detailed understanding of the operation of the instruments and their characteristics. Analysis also allows us to reduce the possibility of measurement errors with the help of advanced technologies and methods and to develop other technologies and methods. By knowing all the characteristics of the instruments, we will know how to correctly choose the instruments depending on the measurement requirements, and we will be able to eliminate interference in the measurements.

Keywords: static characteristics of instruments, dynamic characteristics of instruments, accuracy, fidelity, precision, hysteresis, linearity, response time, response speed

7. Životopis

Autor ovog završnog rada je Ivan Petrović, student Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, rođen 08.05.2001. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu pohađao u Vođincima. Srednju školu Tehnička škola Ruđera Boškovića završava 2020. godine u Vinkovcima. Iste godine na sveučilištu Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Tijekom studiranja odradio praksu u HEP ODS d.o.o u Osijeku na području održavanja kabela i kabelskih mreža.