



Telekomunikaciona merenja TM P03 2018

Profesor dr Miroslav Lutovac

"This project has been funded with support from the European Commission. This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein"

Kalibracija

- Kalibracija podrazumeva širok skup operacija
- Operacija za koju se pod određenim uslovima,
 - u prvom koraku, određuje relacija između merene vrednosti i nesigurnosti primenom odgovarajućih mernih standarda i indikacija
 - u drugom koraku, koristi se informacija iz prvog koraka kako bi se odredio rezultat merenja
- Primer kalibracija ommetra za merenje nepoznate otpornosti

✓ korekcija

Kratko-spojene sonde ommetra, $R = 0 \, \Omega$

Sistematske greške - efekti

- Potrebno odrediti sam efekat i sprovesti **proceduru kompenzacije merene veličine:**
 1. korekcija rezultata merenja (na primer **oduzimanjem** od merene vrednosti nepoznate otpornosti)
 2. uvođenjem korekcionog faktora (**množenjem** merene vrednosti nekom konstantom)

Slučajne greške - nesigurnost

- računanje merne nesigurnosti (***uncertainty***) ne sme se tumačiti kao merna greška (***error***)
- **Nesigurnost** je sinonimom za **sumnja**
- sumnja u validnost rezultata merenja
- Nesigurnost je **kvanitativni parametar** koji se pridružuje rezultatu merenja i kojim se karakteriše disperzija rezultata merenja (**rasipanje pojedinačnih vrednosti merenja oko rezultata merenja**)

Tačna vrednost

- Tačna vrednost (*true value*) je vrednost koja bi se dobila savršenim mernim postupkom, koji ne postoji
- Kvantitet (određena brojna vrednost) neke veličine može se smatrati tačnom vrednošću na osnovu usvojene konvencije
- Referentni standard, neka vrednost se usvaja kao tačna vrednost
- Referenta vrednost se usvaja nakon velikog broja ponovljenih merenja koju sprovode različite institucije i pri tome primenjuju različite merne metode

Procena tačne vrednosti

- Merenje se vrši sa ciljem procene tačne vrednosti
 1. kada se ocenjuje merna metoda,
pa se meri unapred poznata veličina
 2. prilikom kalibracije instrumenta

Apsolutna greška

- Apsolutna greška se definiše kao apsolutna razlika između procenjene merene veličine i njene unapred poznate nominalne vrednosti

$$\Delta = |\hat{x} - x_n|$$

Relativna greška

- Relativna greška se definiše kao odnos apsolutne razlike i nominalne vrednosti merene veličine (nema jedinicu)
- sadrži informaciji o kvantitetu procenjene

$$r_d = \frac{|\hat{x} - x_n|}{x_n}$$

Relativna greška u %

- Množenjem relativne greške sa 100, greška se može izraziti u procentima
- relativnu grešku nije moguće odrediti u slučaju kada je nominalna vrednost jednaka 0

$$r_d = \frac{|\hat{x} - x_n|}{\left(\frac{|\hat{x}| + |x_n|}{2}\right)}$$

$$r_d = \frac{|\hat{x} - x_n|}{\max(|\hat{x}|, |x_n|)}$$

Opseg greške

- Opseg greške (*range*) u kome se nalazi neka merena veličina (kao razlika maksimalne i minimalne vrednosti merenja):
- ne koristi se često u praksi

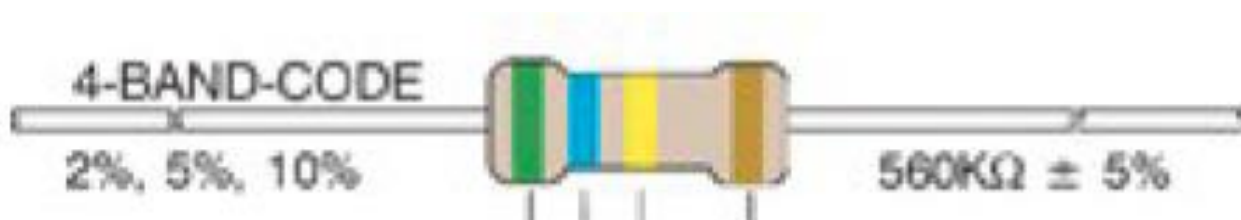
$$rg = x_{max} - x_{min}$$

Merna nesigurnost tipa A

- pri merenjima fizičke veličine i pri ponovljenim uslovima (isti operater, ista metoda, isti instrumenti, isti spoljni uslovi) dobijaju različiti rezultati
- varijacije su rezultat slučajnih procesa i za njihov opis se koristi merna nesigurnost
- Ne postoji način da se merna nesigurnost merenja izbegne
- Moguće je jedino smanjiti mernu nesigurnost ponavljanjem merenja i predstavljanjem procenjene merene veličine
- koriste se statističke metode i metode teorije verovatnoće

Primer

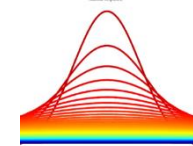
- proizvođač za otpornik od 560 k Ω garantuje:
- otpornost otpornika je 560 k Ω
- sa tolerancijom od 5% (28 k Ω),
- otpornost je 560 ± 28 k Ω
- proizvođač garantuje da se kupljena otpornost nalazi u opsegu od 532 k Ω do 588 k Ω



Primer

COLOR	1st BAND	2nd BAND	3rd BAND	MULTIPLIER	TOLERANCE
BLACK	0	0	0	1 Ω	
BROWN	1	1	1	10 Ω	$\pm 1\%$ (F)
RED	2	2	2	100 Ω	$\pm 2\%$ (G)
ORANGE	3	3	3	1K Ω	
YELLOW	4	4	4	10K Ω	
GREEN	5	5	5	100K Ω	$\pm 0.5\%$ (D)
BLUE	6	6	6	1M Ω	$\pm 0.25\%$ (C)
VIOLET	7	7	7	10M Ω	$\pm 0.10\%$ (B)
GREY	8	8	8		$\pm 0.05\%$
WHITE	9	9	9		
GOLD				0.1	$\pm 5\%$ (J)
SILVER				0.01	$\pm 10\%$ (K)





Srednja vrednost

- Srednja vrednost merenja je aritmetička sredina više merenja
- To je procena tačne vrednosti

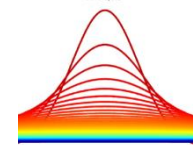
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$x_0 = \bar{x} \pm \varepsilon$$

Standardna devijacija

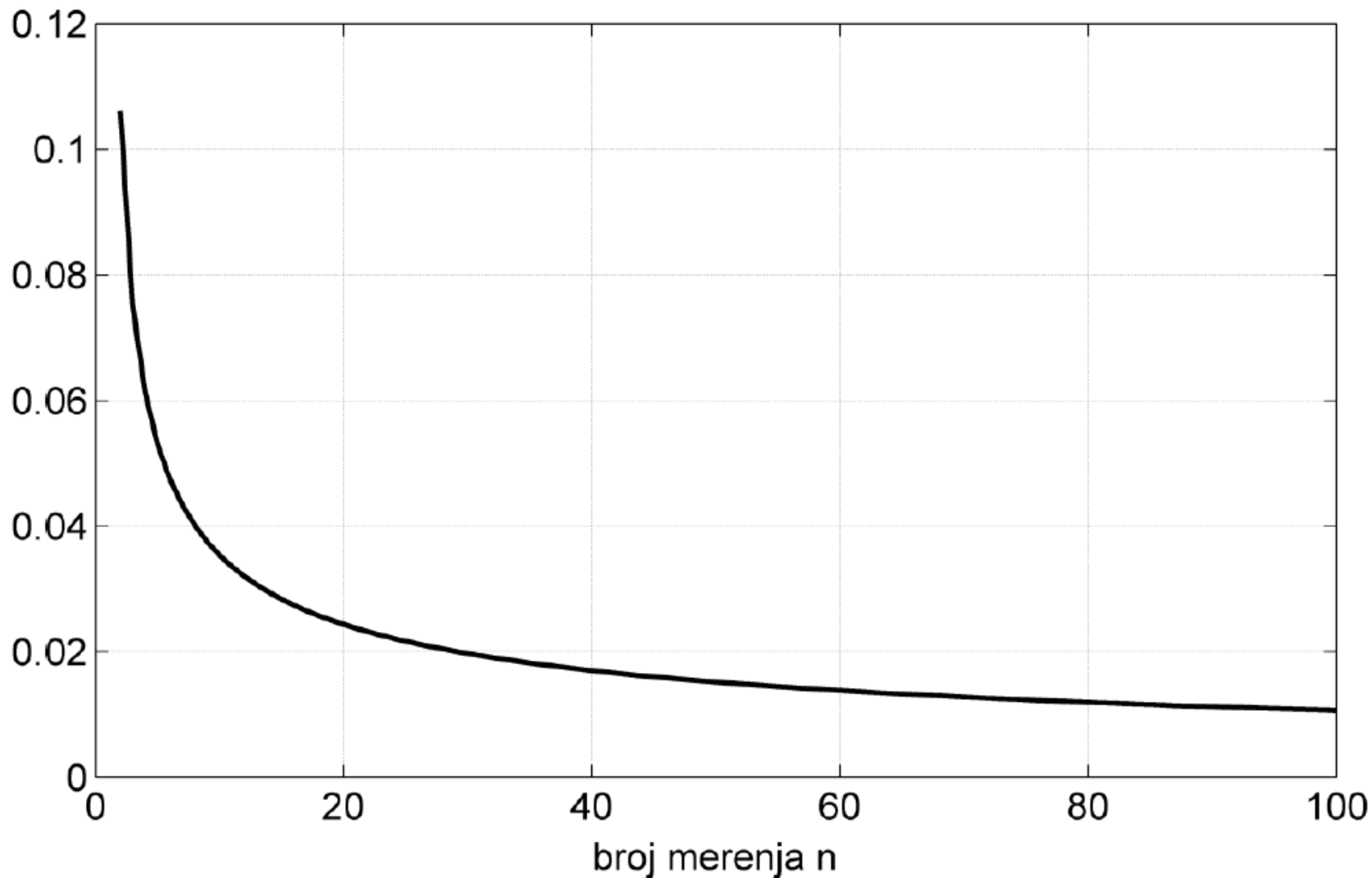
- Merna nesigurnost tipa A ili standardna devijacija
- opisuje kako su greške raspodeljene oko srednje vrednosti
- u kom opsegu se nalaze oko srednje vrednosti
- σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$



Primer

Zavisnost standardnog odstupanja MN od broja merenja



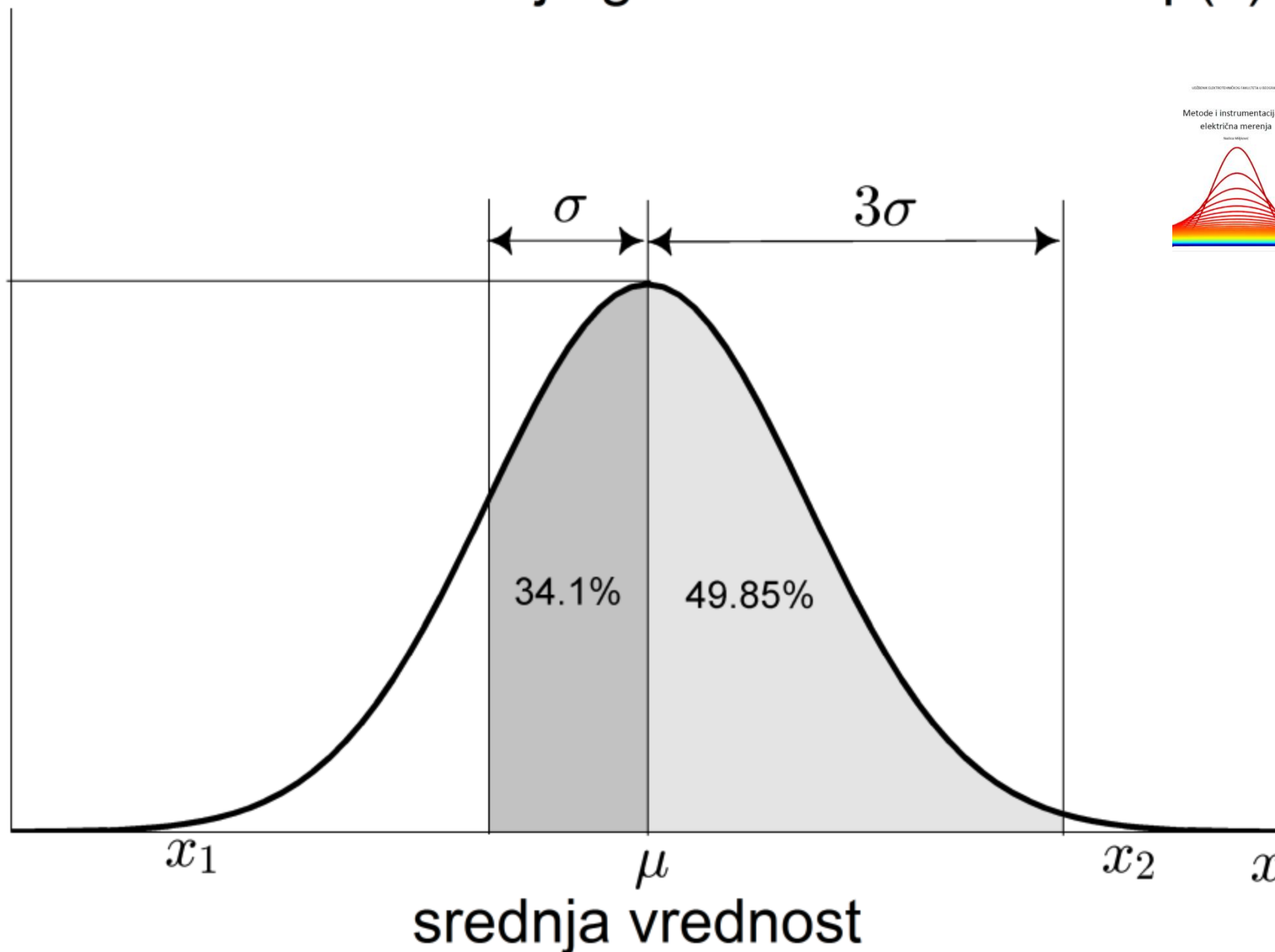
Najčešća pretpostavka funkcija gustine

- Najčešća pretpostavka je da je funkcija gustine verovatnoće Gausova
- Rezultati su raspodeljeni oko srednje vrednosti i funkcija gustine verovatnoće je u obliku zvona
- Verovatnoća pojavljivanja / merenja vrednosti koje se nalaze relativno bliže procenjenoj srednjoj vrednosti je veća od onih koje se nalaze relativno blizu ekstremuma funkcije gustine verovatnoće
- Varijansa i standardna devijacija su kvantitativni pokazatelji koliko "daleko" od procenjene vrednosti postoji "rasipanje" rezultata merenja

Gausova faktor proširenja

- 1σ 68%
- 2σ 95%
- 3σ 99.7%
- brojna vrednost faktora proširenja (coverage factor)
- zajedno sa podatkom vrednosti merne nesigurnosti definiše interval u kome se sa određenom verovatnoćom (sigurnošću) nalazi merena veličina

Gausova funkcija gustine verovatnoće $p(x)$



Interval poverenja

- Interval poverenja (*confidence interval*) i nivo poverenja (*confidence level*) se odnose na verovatnoću i izražava u procentima
- Oni u potpunosti definišu rezultat merenja

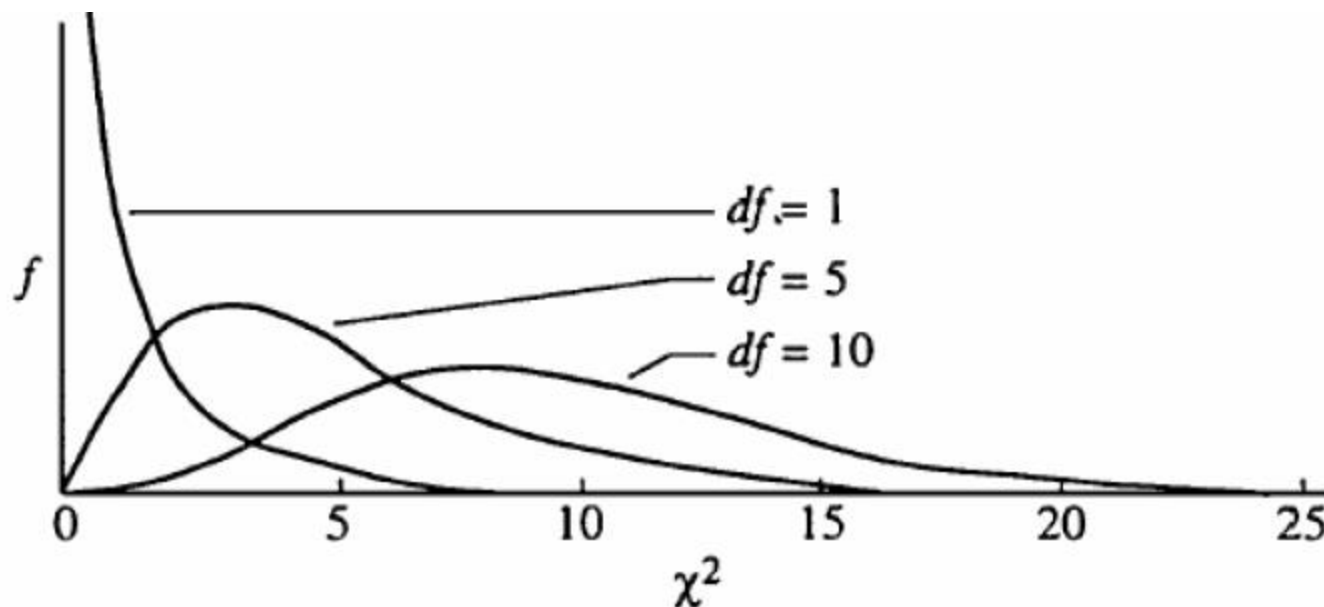
Merna nesigurnost tipa A za negausovske funkcije gostine verovatnoće

- Pri određivanju merne nesigurnosti, koriste se raspodele:
 1. ravnomerna (uniformna)
 2. trougaona
 3. trapezoidna
 4. Gausova (normalna)

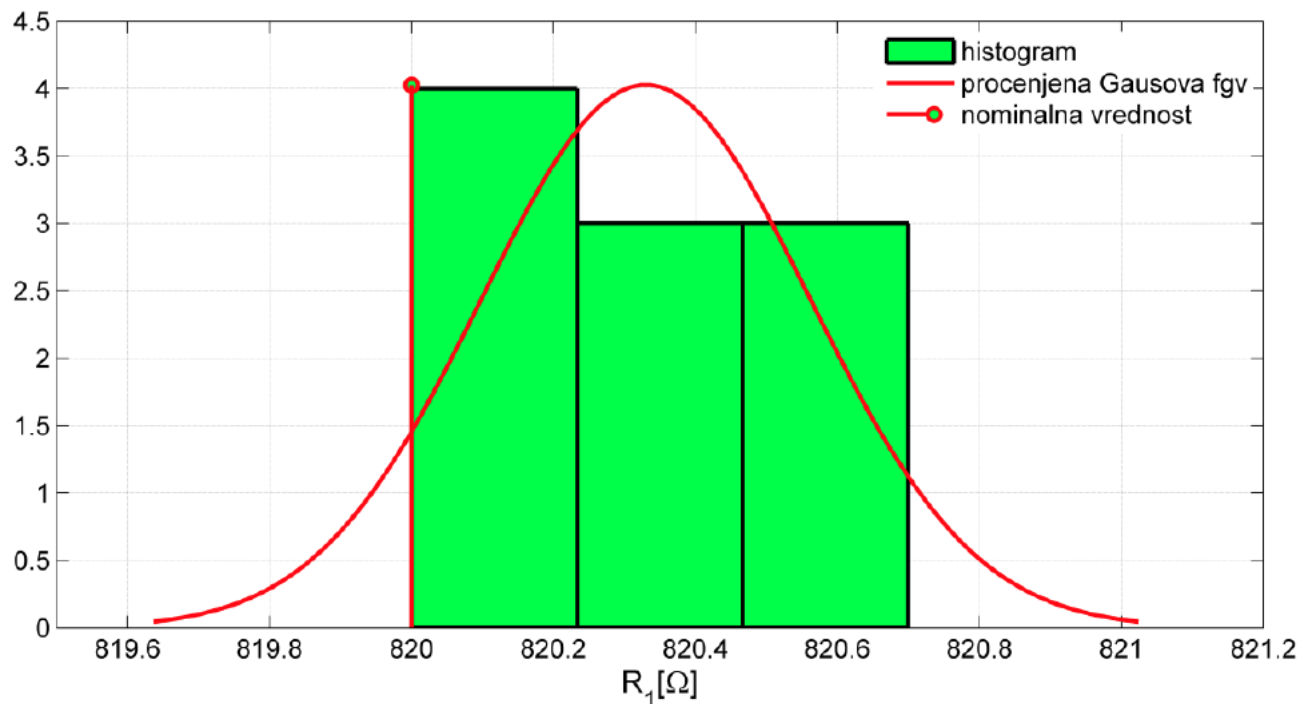
- Uniformna funkcija gustine verovatnoće ima najmanju statističku sigurnost u intervalu i najmanji koeficijent proširenja.
- Kod Gausove funkcije gustine verovatnoće postoji veća razlika između vrednosti koeficijenta proširenja u odnosu na uniformnu funkciju za različite statističke sigurnosti: na primer za 3 i 2.58 odgovarajuće statističke sigurnosti su 99.7% i 99%
- Trougaona i Gausova funkcija gustine verovatnoće imaju bliske vrednosti koeficijenata proširenja, odnosno standardnog odstupanja pri istoj ekvivalentnoj poluširini intervala
- Studentova funkcija gustine verovatnoće ima značajno proširenje intervala za relativno mali broj izmerenih uzoraka (relativno mali broj ponovljenih merenja) i relativno visoku verovatnoću koja se priključuje mernoj nesigurnosti.

Hi kvadrat test

- bi se omogućila kvantitativna provera funkcije gustine verovatnoće u cilju određivanja merne nesigurnosti

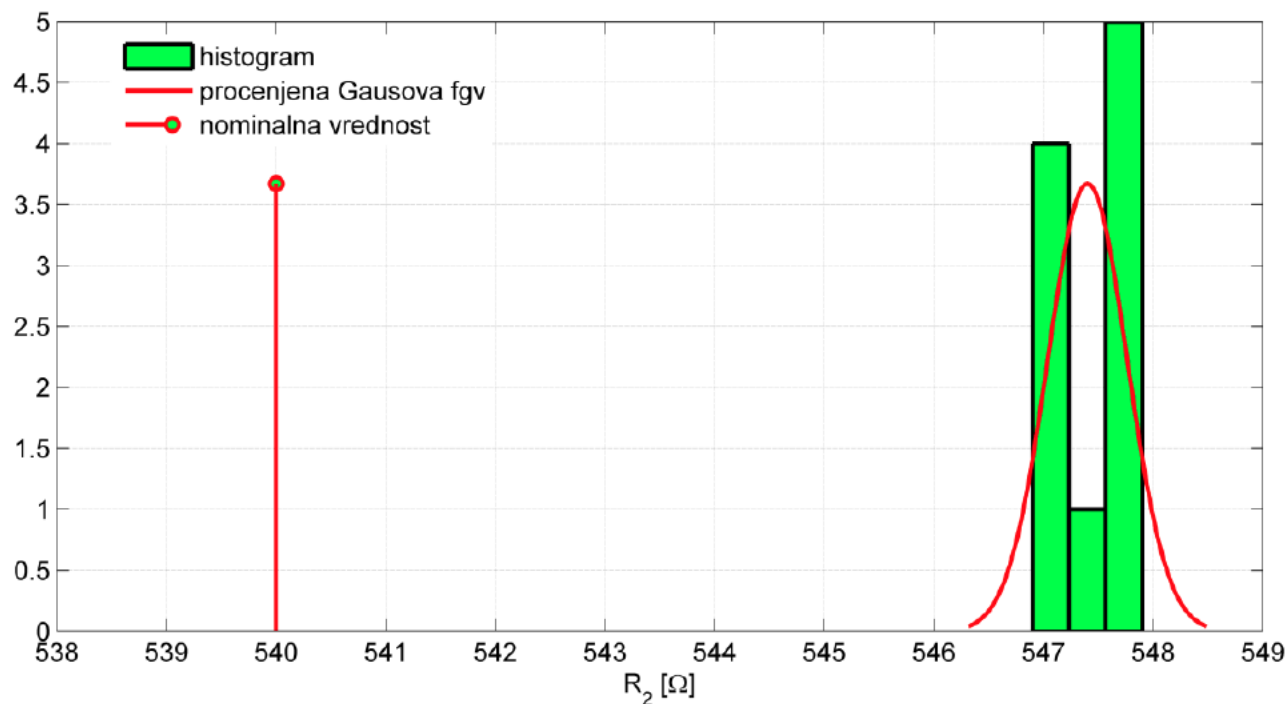


Primer

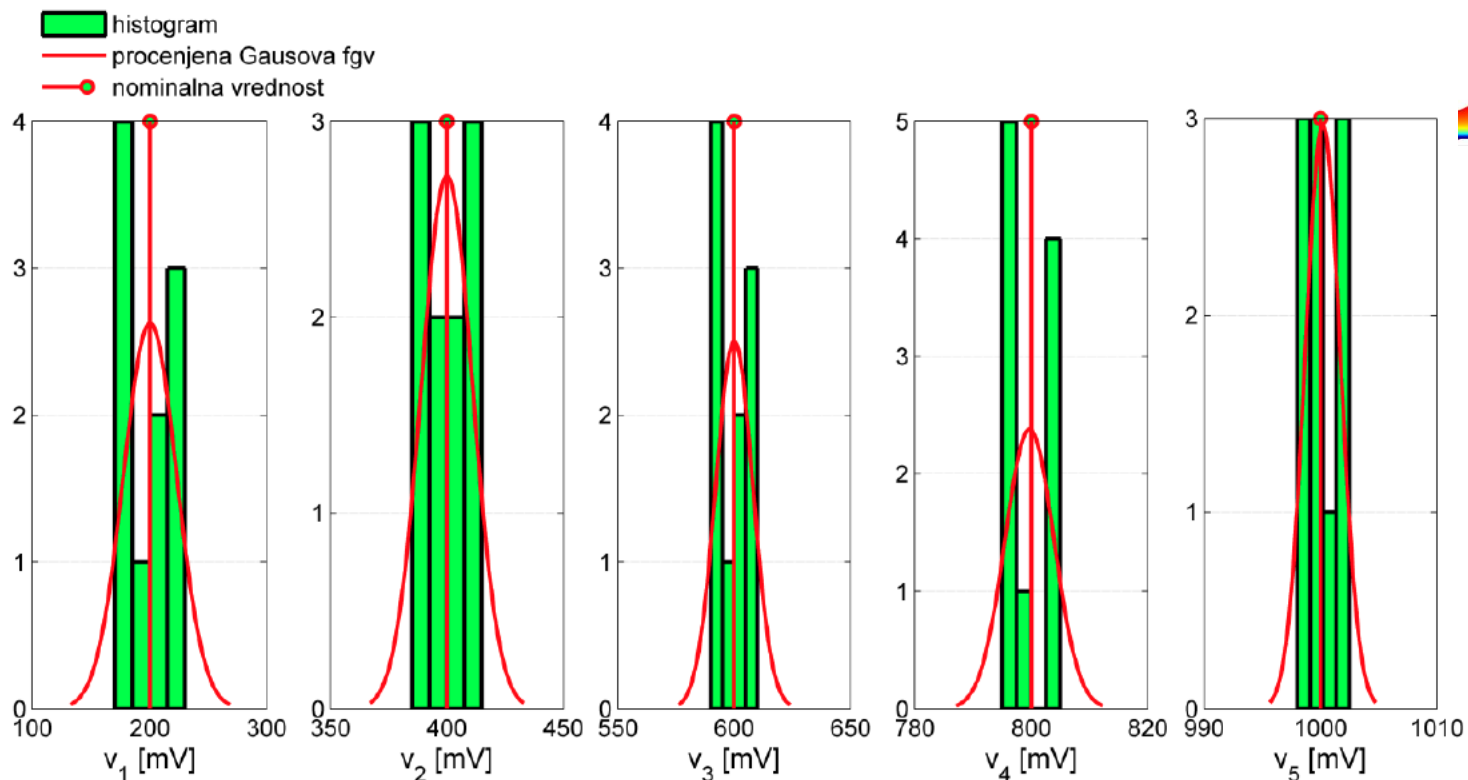
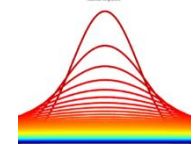


Za 3 intervala, histogrami merenja, procenjene Gausove funkcije gustine verovatnoće i nominalna vrednost u odnosu na srednju vrednost merenja

Primer



Za 3 intervala, histogrami merenja, procenjene Gausove funkcije gustine verovatnoće i nominalna vrednost u odnosu na srednju vrednost merenja



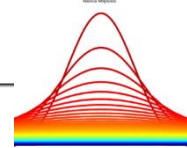
Za 5 ponovljenih merenja, pri kalibraciji, histogrami merenja, procenjene Gausove funkcije gustine verovatnoće i nominalna vrednost u odnosu na srednju vrednost merenja

Primer

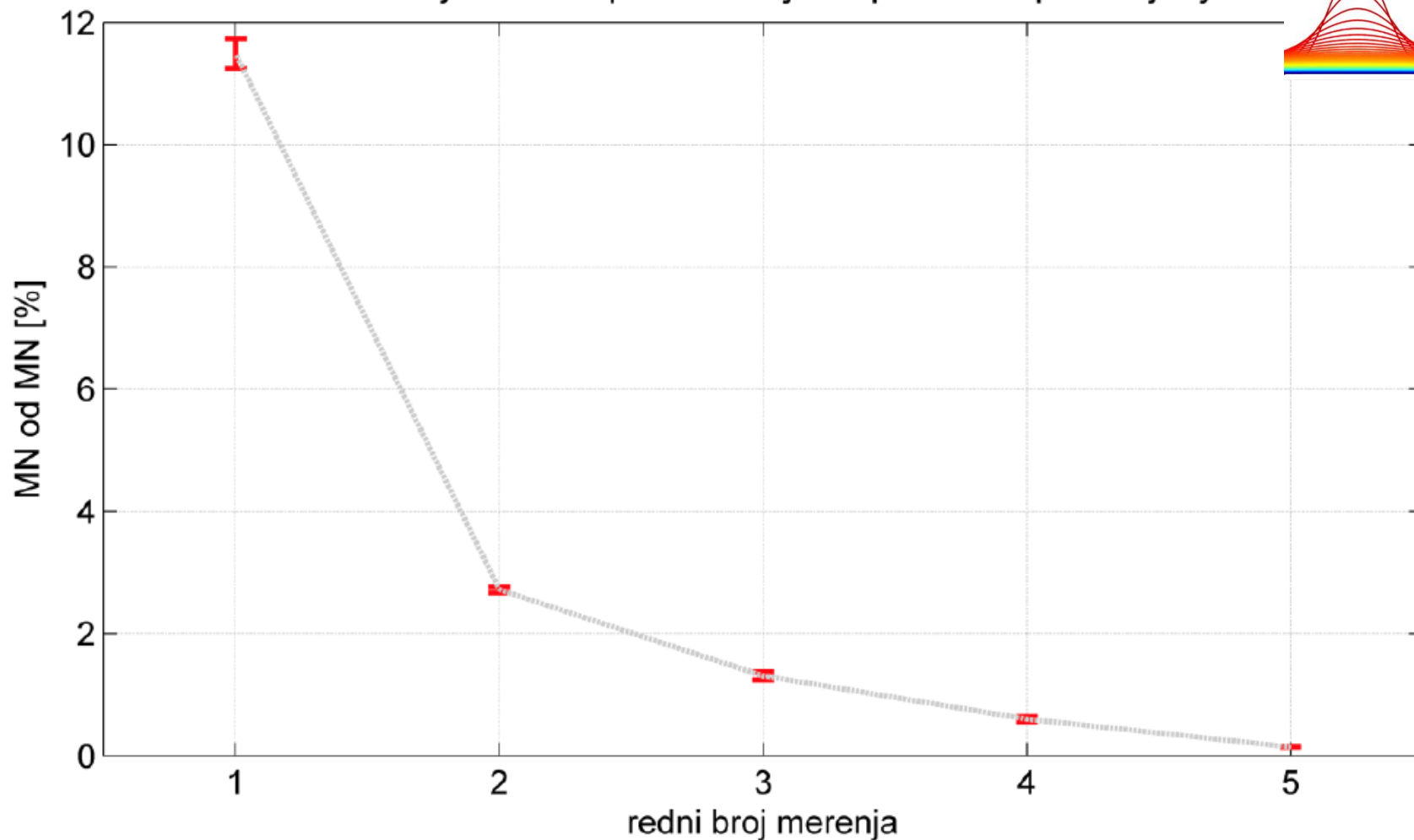
Poređenje MN za pet merenja napona



Bar dijagram mernih nesigurnosti izraženih u % za pet ponovljenih merenja napona pri kalibraciji A/D konvertora



Poređenje MN za pet merenja napona u 7 ponavljanja



Error bar dijagram mernih procenjenih nesigurnosti (MN) za ponovljenih pet merenja prilikom 7 realizacija procedura merenja napona pri kalibraciji A/D konvertora

Merna nesigurnost tipa B

- Merne nesigurnosti tipa A i B su kvantitativni pokazatelji greške merenja
- Uzimaju se u obzir za računanje ukupne merne nesigurnosti
- Merna nesigurnost tipa B se procenjuje na osnovu znanja
 - o mernoj metodi i postupku merenja
 - o karakteristikama instrumenata
 - o svim ostalim podacima (osim onog što je uračunato kroz proceduru računanja merne nesigurnosti tipa A)

tip A - tip B

- merna nesigurnosti **tipa A**, raspodela je dobijena **na osnovu ponovljenih merenja** (eksperimentalnih rezultata)
objektivna raspodela
- merna nesigurnosti **tipa B** raspodela se procenjuje **na osnovu dostupnih podataka** (pretpostavljena raspodela) - subjektivna raspodela
 - nije u svim slučajevima moguće izračunati mernu nesigurnost tipa A
 - za praktične primene procedura je kompleksna

Procena merne nesigurnosti tipa B

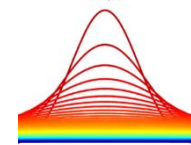
- prethodno znanje o merenoj veličini (odnosi se i na prethodno izvršena merenja)
- iskustvo ili znanje o osobinama korišćenih materijala i instrumenata
- podaci proizvođača
- podaci koji su dobijeni na osnovu kalibracije ili sličnih metoda
- merna nesigurnost koja je dobijena iz priručnika, a odnosi se na referentna merenja

Procena merne nesigurnosti tipa B

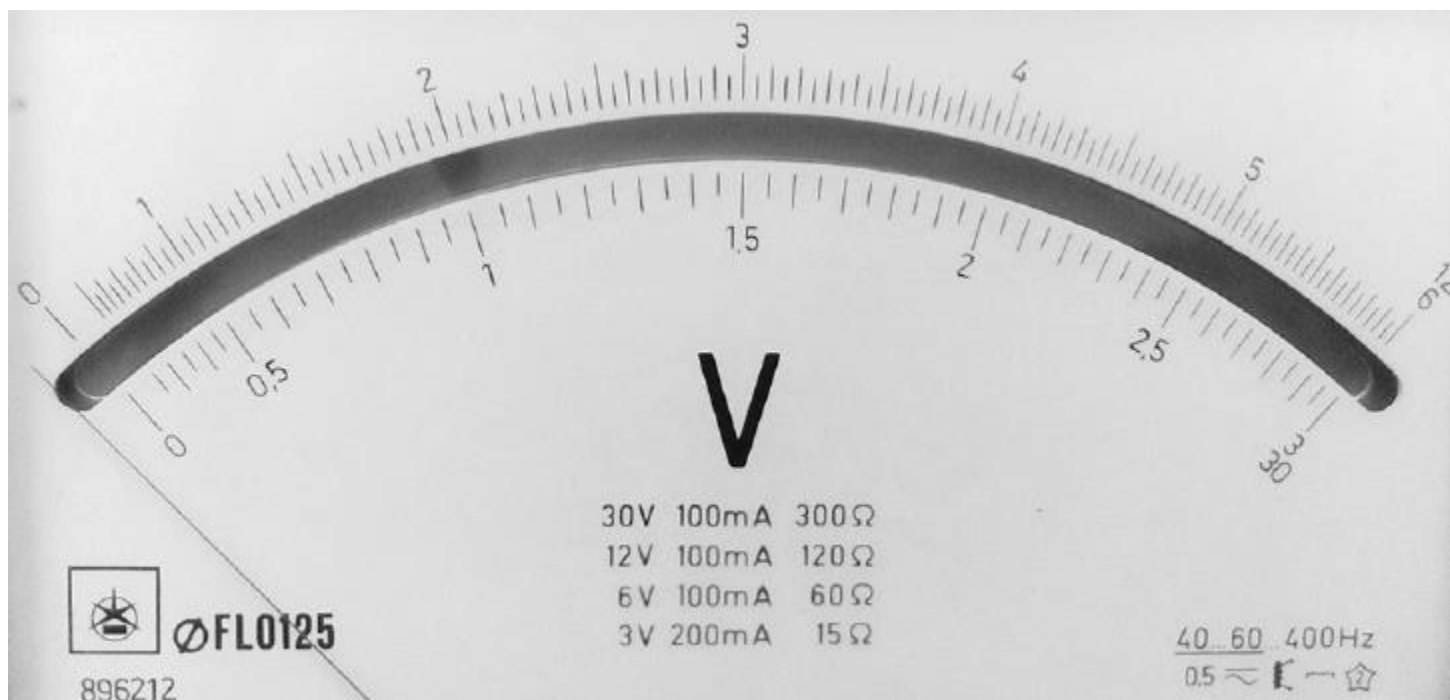
- potrebno je kalibrisati, jednom godišnje?
- vrednosti spoljnih uslova pod kojima važi tačnost instrumenta, temperatura i vlažnost vazduha
- promena tačnosti za različite opsege temperature unutar radnog opsega
- primeri iz prakse
- na osnovu usvojenih pretpostavki

Merna nesigurnost tipa B analognih instrumenata

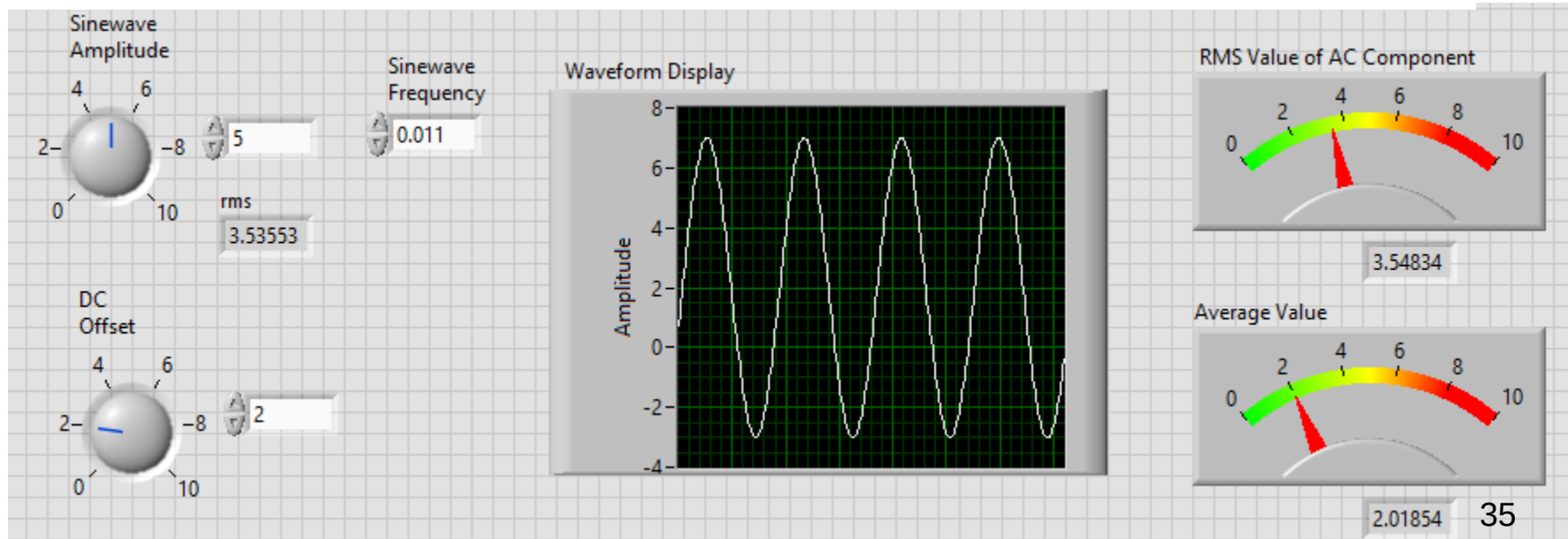
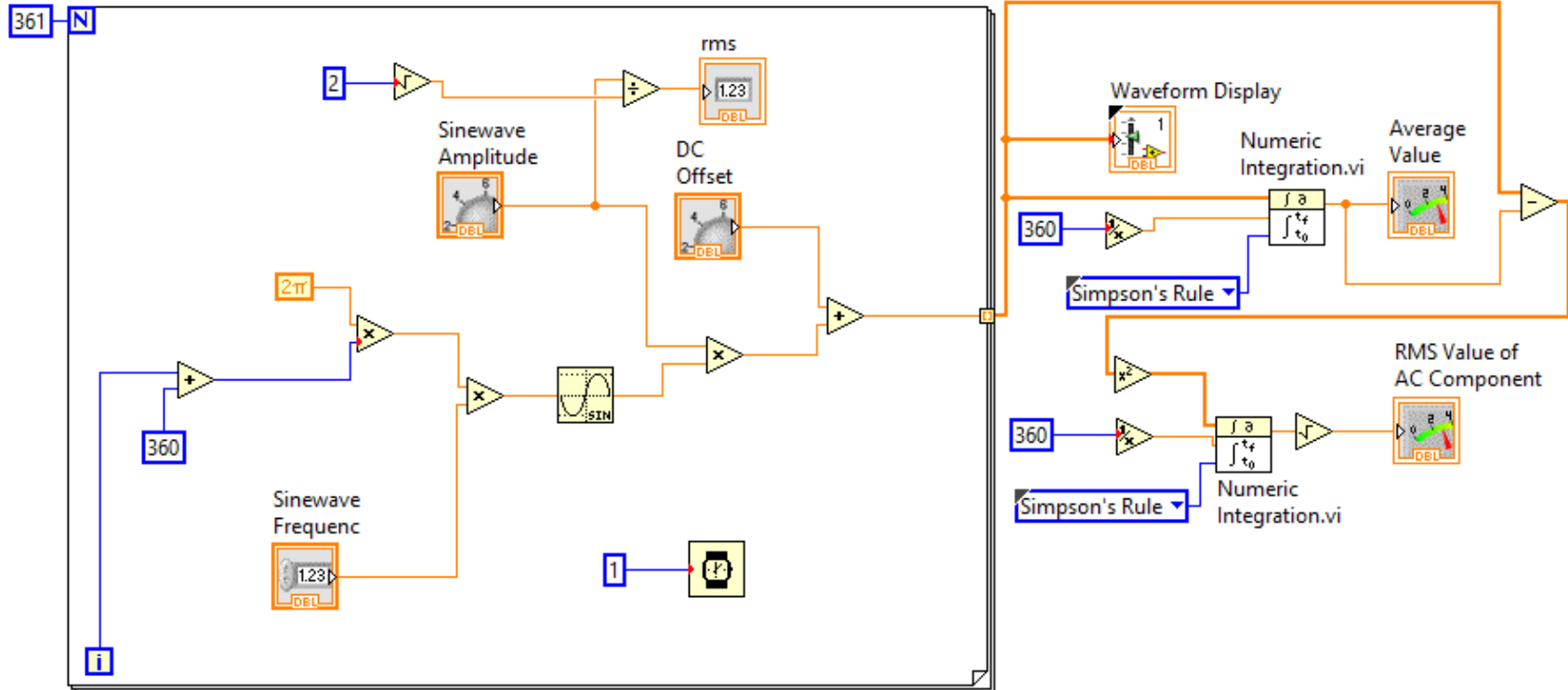
- tačnost se najčešće izražava kao % od pune skale prilikom čitanja vrednosti merenja (relativna greška)
- Kada je merena vrednost blizu cele skale (ili se bar nalazi u drugoj trećini skale), merna nesigurnost koja se računa ima smisla
- Što je očitavanje merene vrednosti "dalje" od pune skale, onda je veće odstupanje od tačne vrednosti

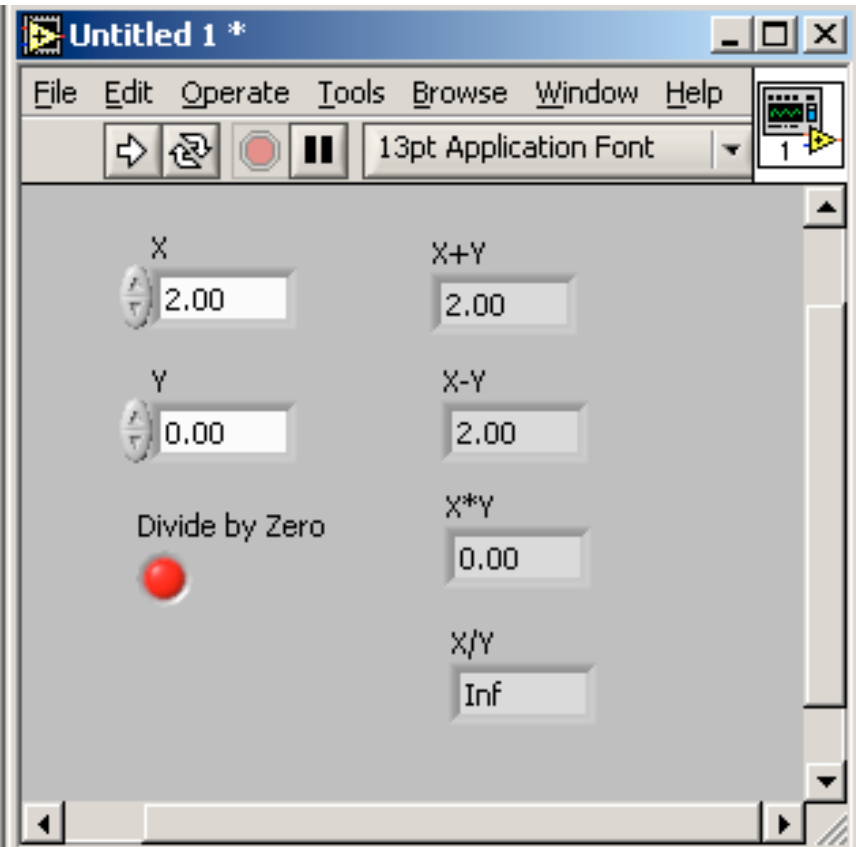
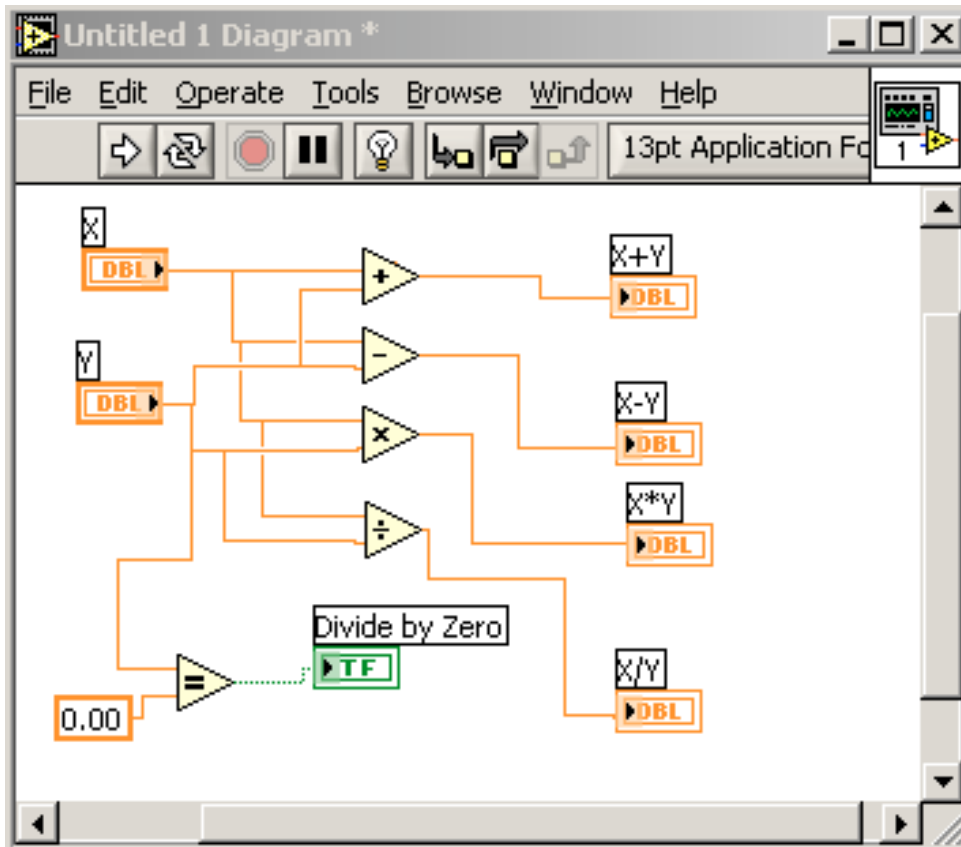


Primer



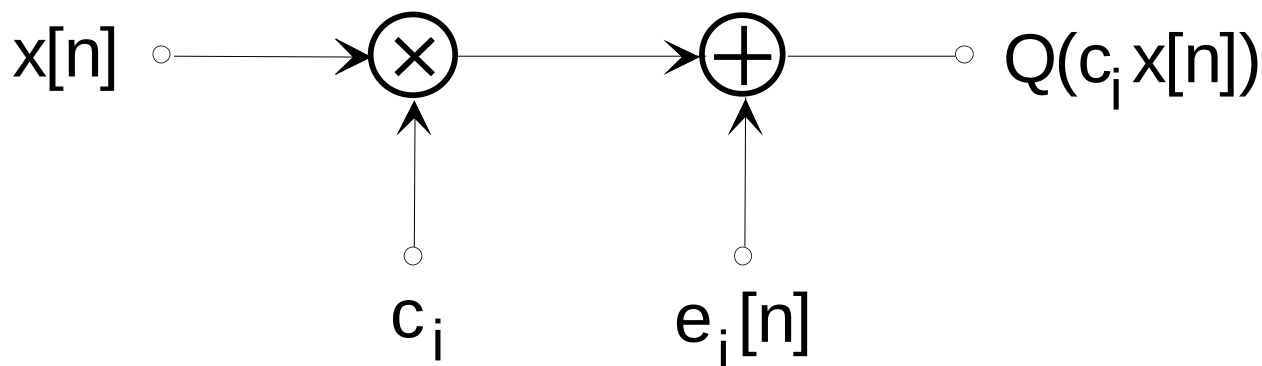
4 merna opsega (3 V, 6 V, 12 V i 30 V)





Model kvantovanja rezultata

- Primenjuje se linearni model šuma, kojim se mogu odrediti osnovne statističke karakteristike (srednja vrednost, varijansa, korelacione funkcije)
- Svakom bloku može se pridružiti izvor šuma, e



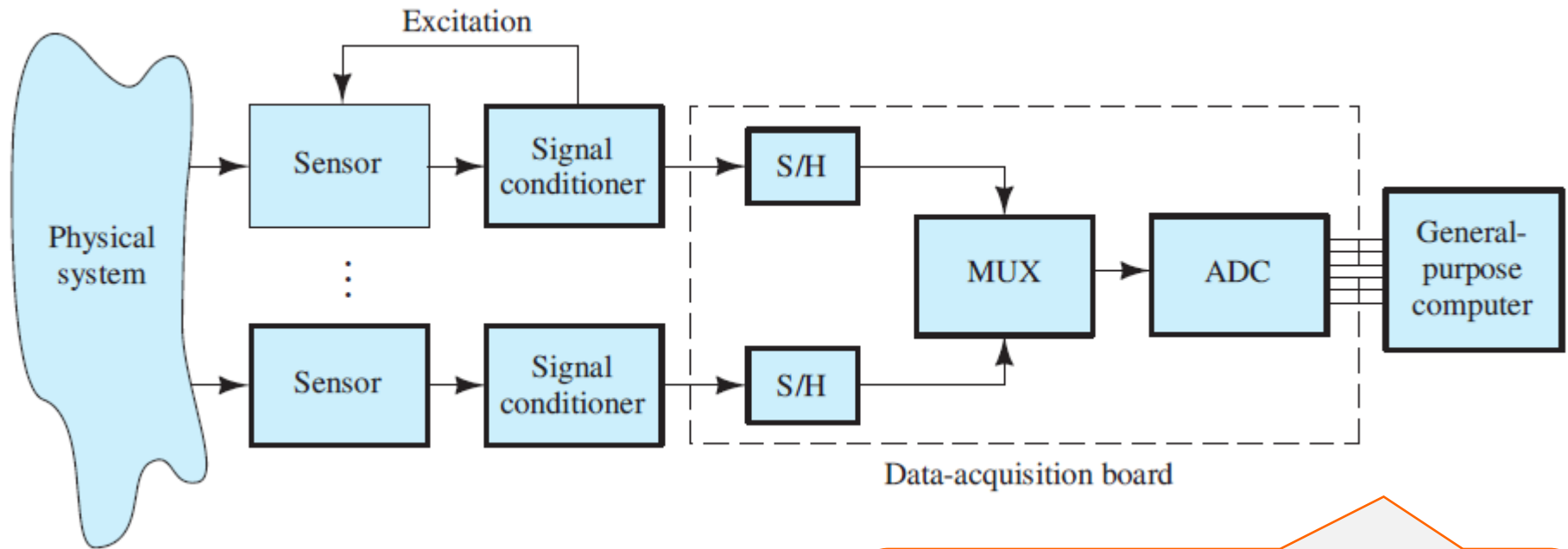
Primer iz:
Electrical Engineering Principles
& Applications, A. R. Hambley,
Pearson Education



LabVIEW SignalExpress



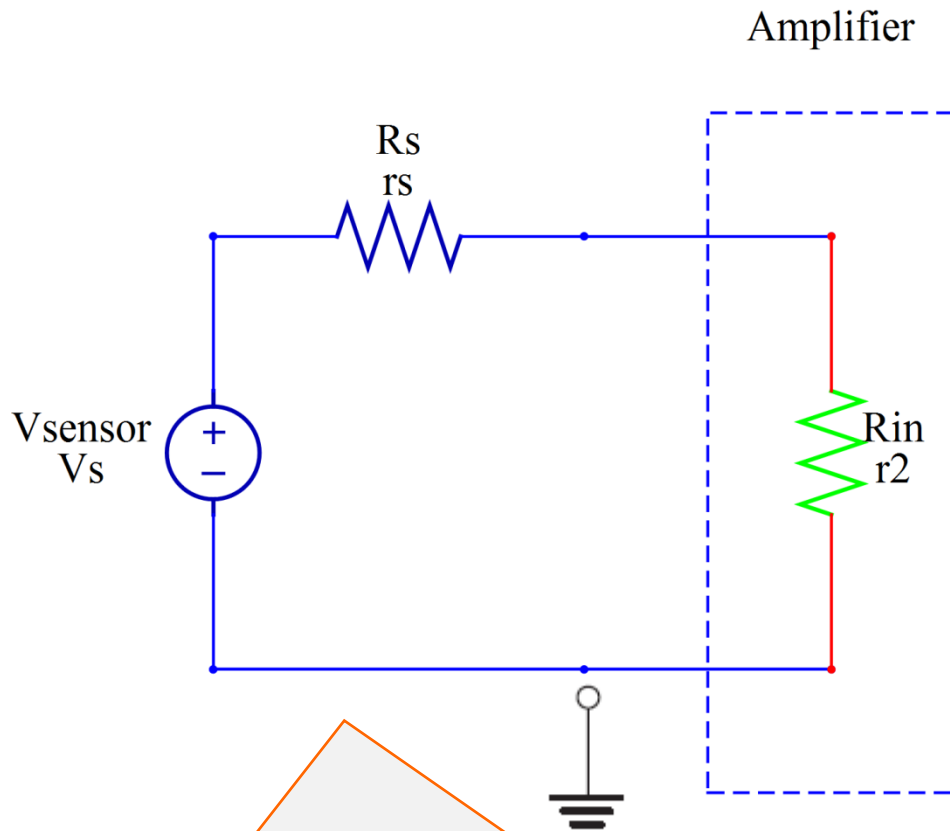
Računarski baziran DAQ sistem



$$V_{\text{sensor}} = k m$$

Electrical Engineering Principles and Applications, Allan R. Hambley, Pearson Education

Model senzora

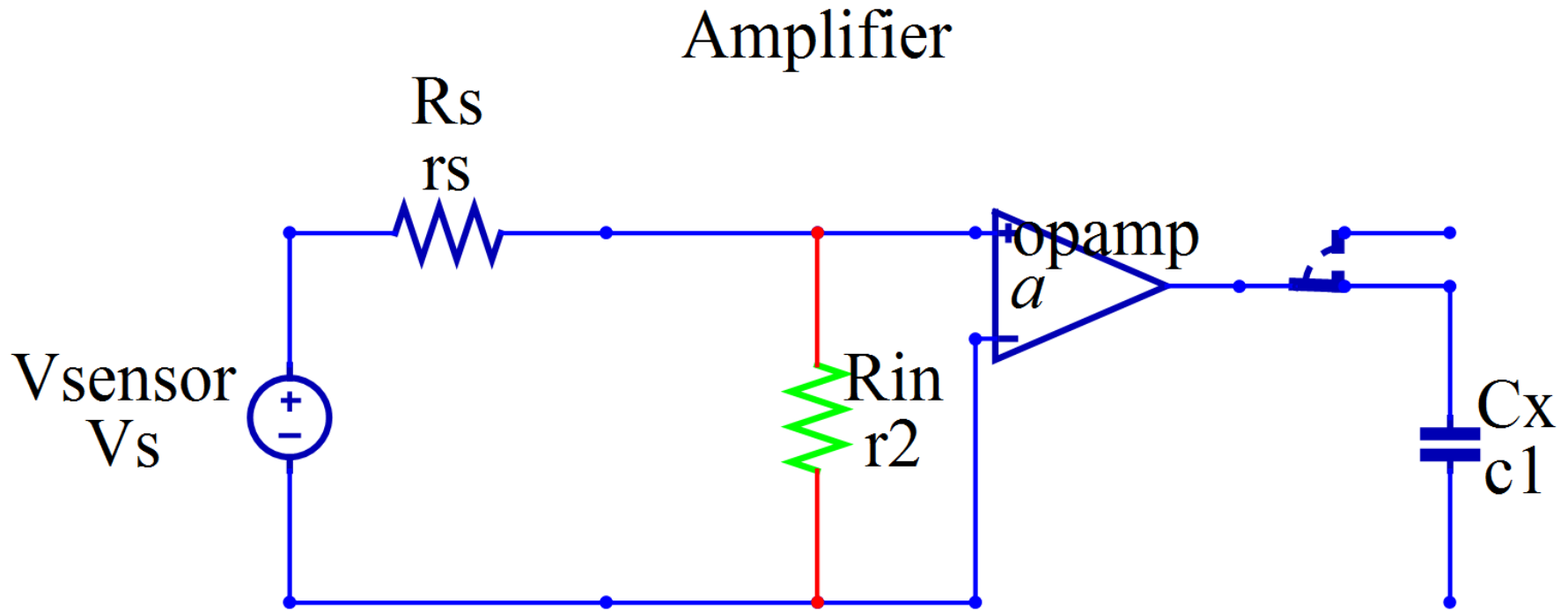


$$V_d = V_1 - V_2$$

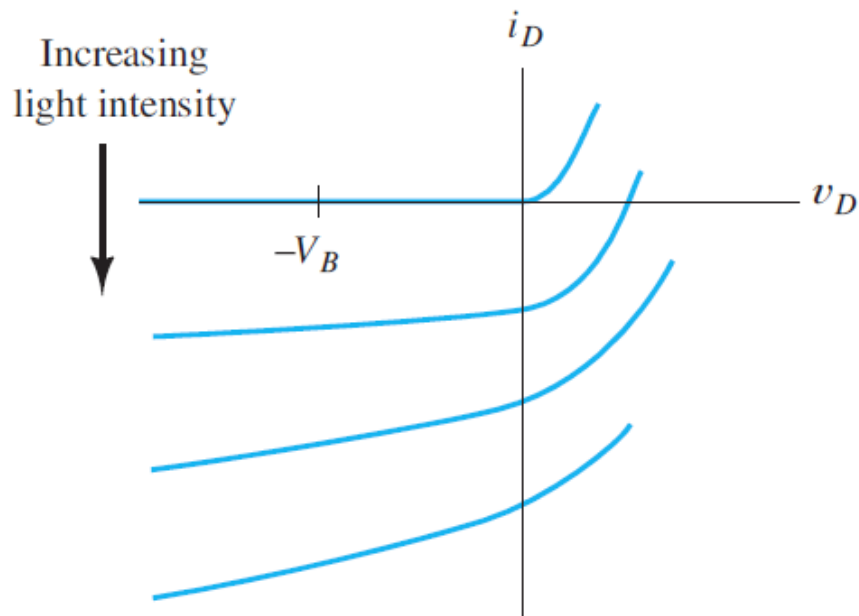
$$V_{cm} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Model senzora povezanog na ulaz pojačavača

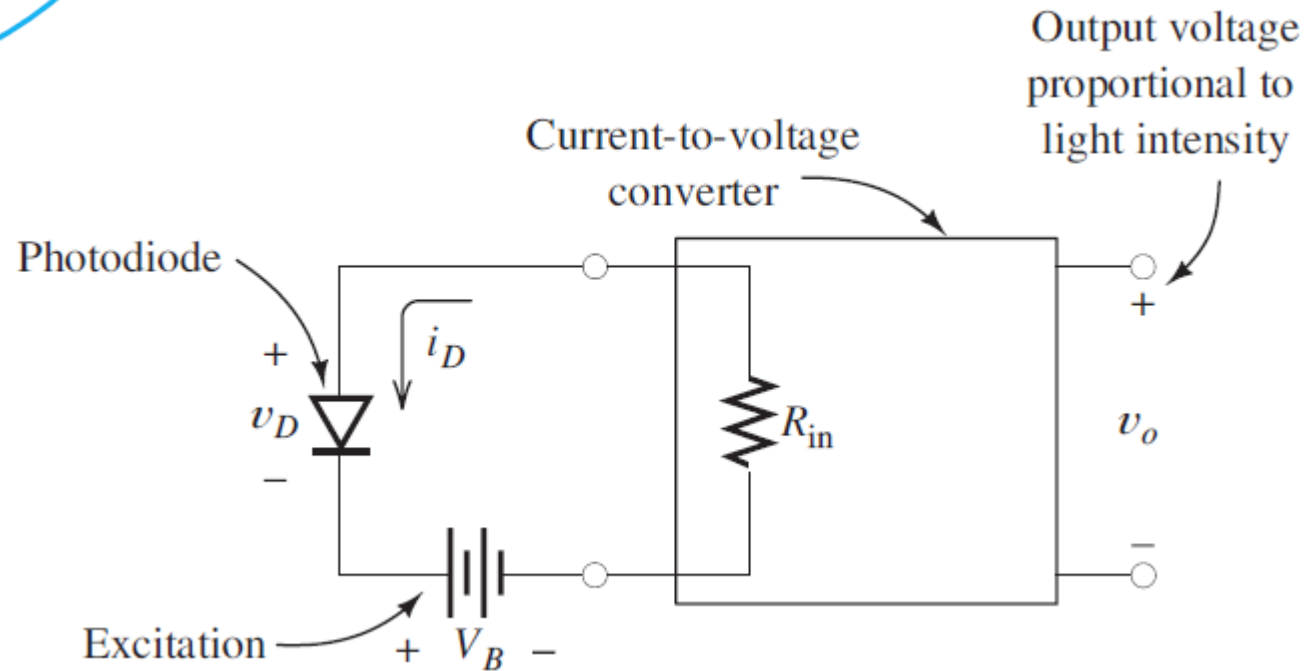
Sample-and-Hold kolo

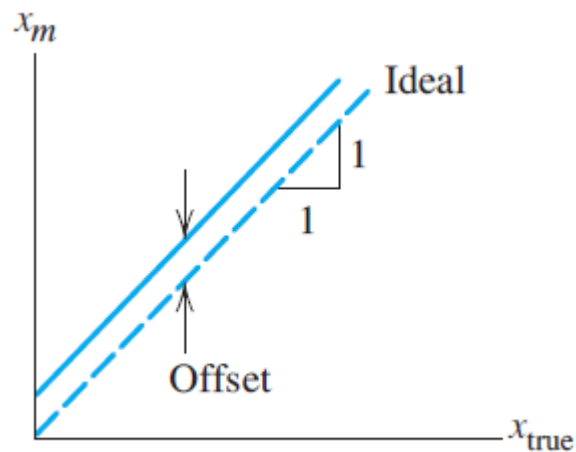


Instrumentacioni pojačavač, diferencijalni signal, common-mode rejection ratio (CMRR)

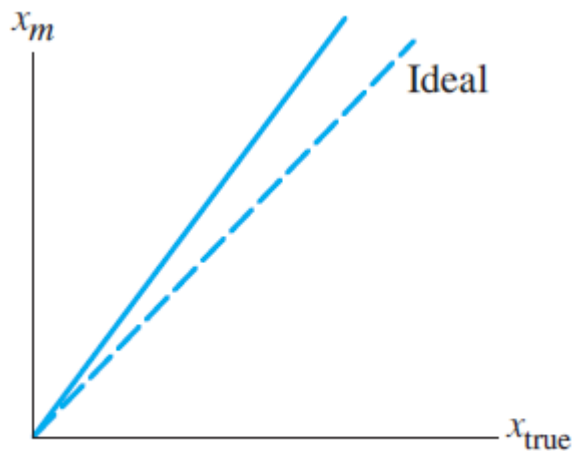


current-to-voltage converter

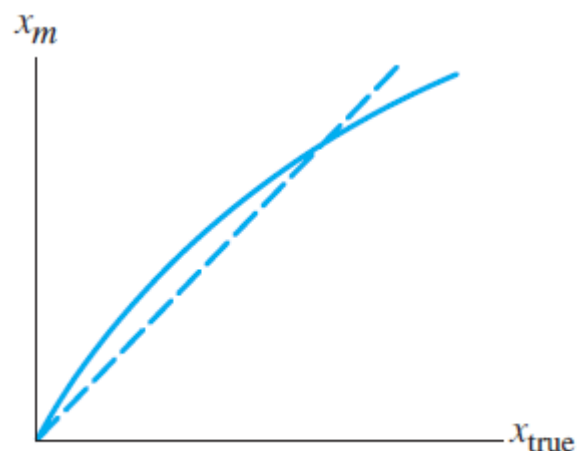




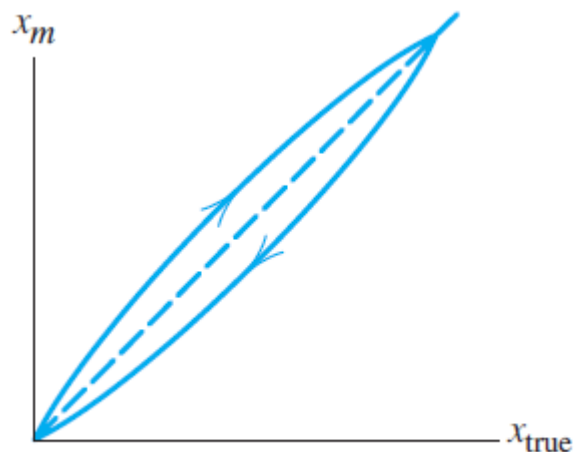
(a) Offset error



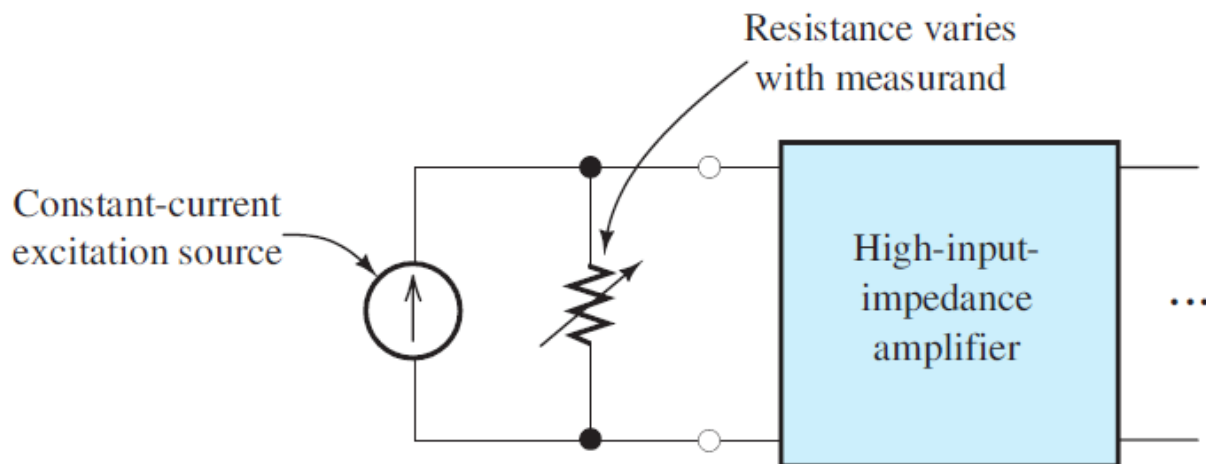
(b) Scale error



(c) Nonlinear error



(d) Hysteresis



Greške mernih sistema

- Izvor greške, merna veličina i merni sistem
- bias greška, sistemska greška, ofset, greška skaliranja, nelinearnost, histereyis, drift, slučajna greška

$$Error = x_m - x_{true}$$

$$Error_r = \frac{x_m - x_{true}}{x_{full}}$$

Performanse instrumentacionih sistema

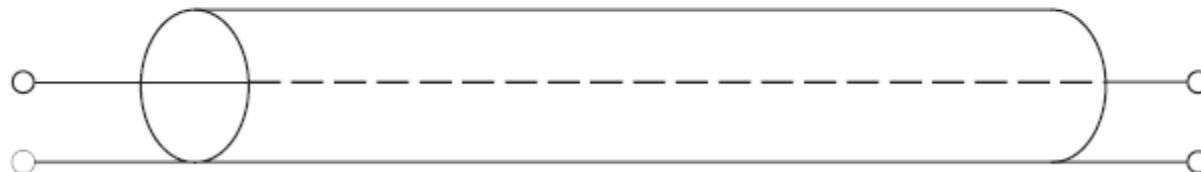
1. Tačnost – maksimalna očekivana razlika u amplitudi između izmerene veličine i stvarne vrednosti
2. Preciznost – Sposobnost instrumenta da ponovi izmerenu veličinu ako je merna veličina konstantna
3. Rezolucija – Najmanja moguća vrednost koja može da prikaže razliku između izmerenih vrednosti
 - Veća rezolucija znači manji inkrement

Šum

Šum može da bude dodat od električnog signala ili elektromagnetnog polja koje stvara susedno kolo



(a) Twisted-pair cable



(b) Coaxial cable

Klasa tačnosti

- Za računanje merne nesigurnosti prilikom merenja analognim instrumentima od značaja je podatak o klasi tačnosti
- Klasa tačnosti je istaknuta na samom instrumentu i daje podatak o maksimalnoj apsolutnoj greški koju instrument pravi na nekom opsegu

$$K_T = 100 \frac{\Delta x}{M}$$

Tipične vrednosti su 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2.5, 5

procenjuje se uniformna raspodela

- Najčešće se prilikom merenja pretpostavlja uniformna raspodela, pa se merna nesigurnost tipa B procenjuje kao standardna devijacija za uniformnu raspodelu



$$u_B = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}}$$

$$u_B = \frac{K_T M}{100\sqrt{3}}$$

Greška rezultat paralakse

- Pogrešno očitavanje merene veličine u zavisnosti od položaja posmatrača u odnosu na skalu na kojoj se očitavaju vrednosti

Digitalnih-analogni

- Prednost digitalnih instrumenata je u
 - automatskoj detekciji polariteta i opsega merenja
 - zaštiti od preopterećenja (dovođenja velikih napona i struja na ulaz instrumenta)
 - mogu biti vodo-otporni

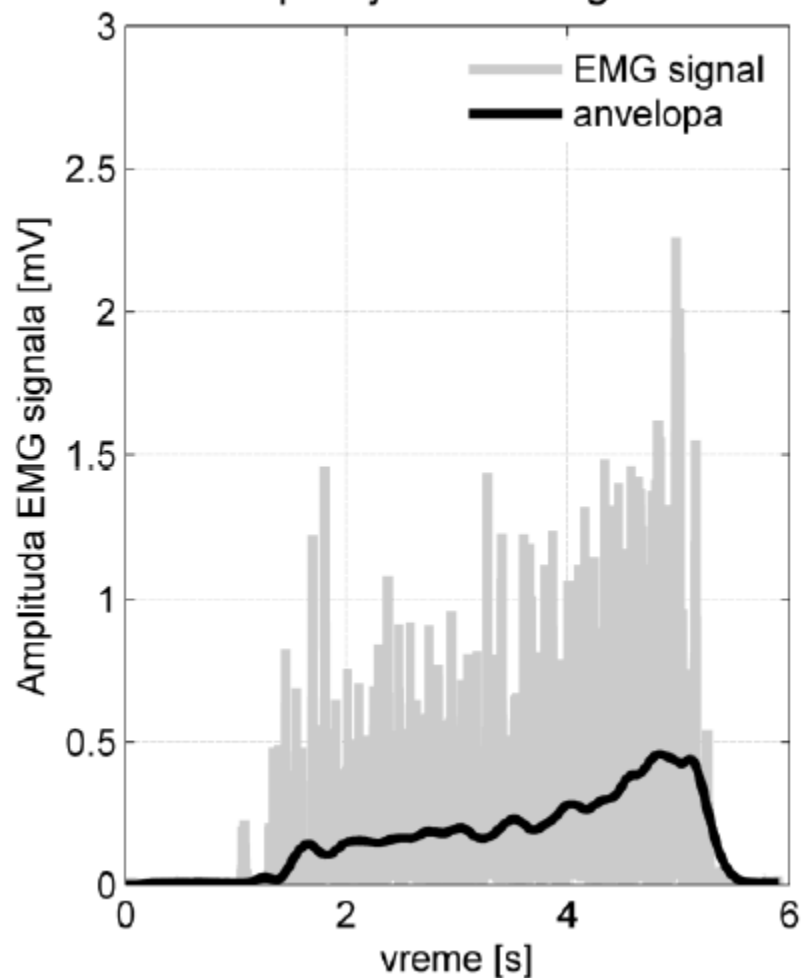
Merna nesigurnost tipa B digitalnih instrumenata

- digitalni displej može da ima $3\frac{1}{2}$ cifara
- $\frac{1}{2}$ označava da najznačajnija cifra koja može imati ili vrednost 0 ili vrednost 1
- Rezolucija (najmanja promena merene veličine koju instrument prikazuje) instrumenta sa $3\frac{1}{2}$ cifara se izražava kao $(100/2000) \%$ što je 0.05%
- rezolucija može da zavisi od rezolucije A/D konvertora
- Za rezoluciju od 24 bita broj koraka je 2^{24}
- Za rezoluciju od 12 bita broj koraka je 2^{12}

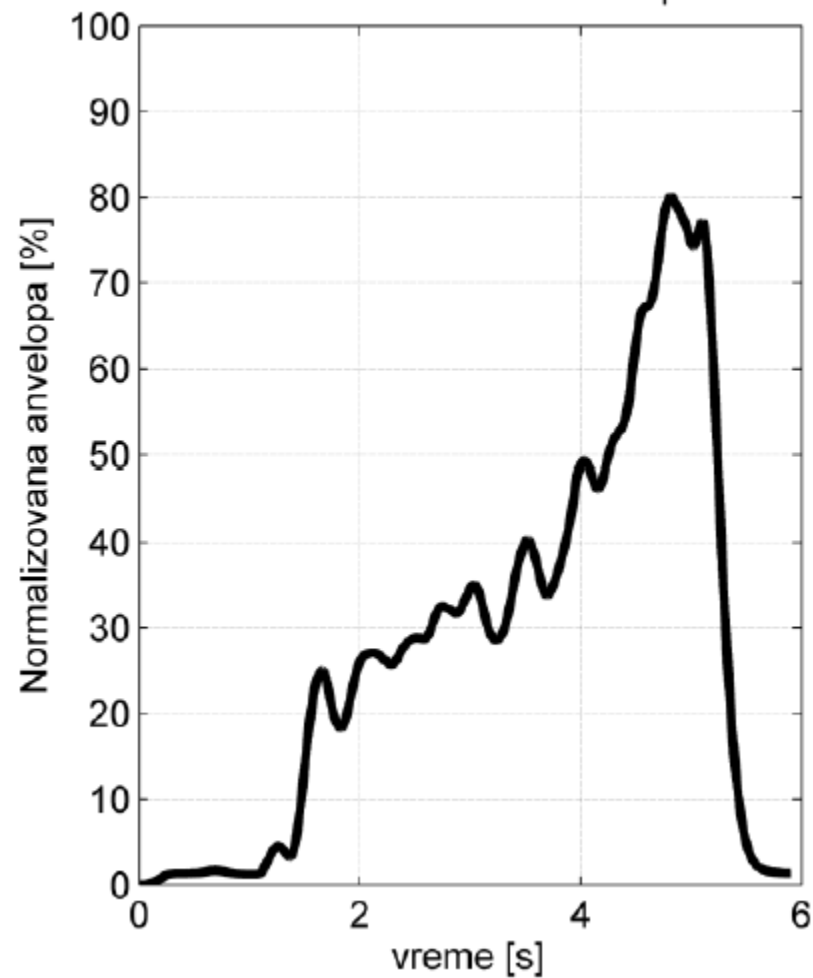
Normalizacija rezultata merenja

- Merena veličina i parametri okoline imaju određenu brzinu promene
- Laboratorijskih merenja ima statički karakter, odnosno merenje se obavlja nakon što se uspostavi stacionarno, ustaljeno stanje
- Praktično nije moguće održati apsolutno stacionarno stanje i dinamička greška merenja je uvek prisutna

Dvostrano ispravljen EMG signal i anelopa



Normalizovana anelopa



Kombinovana merna nesigurnost

- Merenje koje je ponovljeno puta za koje je određena merna nesigurnost tipa A, a iz raspoloživih znanja o merenju (o instrumentu i metodi) je određena i merna nesigurnost tipa B
- Izvršeno je jedno merenje i analizom je utvrđeno da postoji određen broj veličina koje utiču na mernu nesigurnost tipa B
- Kombinovana merna nesigurnost nekorelisanih veličina

Izveštaj rezultata merenja i uticaj merene veličine na mernu nesigurnost

- ulazna otpornost voltmetra
- ulazna otpornost ampermetra
- otpornosti priključnih provodnika
- vremenska nestabilnost struje
- ...

Izveštaj merenja bi trebalo da sadrži

- Opis metode koja je korišćena da se dođe do rezultata merenja i da se izračunaju rezultati merenja i merna nesigurnost iz eksperimentalnih merenja ili na osnovu ulaznih podataka (iz specifikacije proizvođača ili prethodnih saznanja).
- Listu svih mernih nesigurnosti koje su dobijene direktnim merenjem i dodatnim opisima. Dodatni opisi mogu da sadrže i kovarijansne i korelacione matrice u slučaju procene merne nesigurnosti kod indirektnog merenja

Izveštaj merenja bi trebalo da sadrži

- Detaljnu analizu podataka koja je primenjena (na primer opis primenjene metode za normalizaciju rezultata merenja), tako da se omogući jednostavna reprodukcija rezultata merenja i analize sa istom mernom opremom i mernom metodom
- Spisak konstanti i korekcija (na primer prilikom određivanja sistematskih efekata) koje su korišćene u računu, kao i način kako su one dobijene (iz literature ili iz eksperimentalnih opservacija)

Izveštaj merenja bi trebalo da sadrži

- Potrebno je uvek uz rezultat merenja pisati jedinice u kojima je rezultat predstavljen (dnevnik merenja)
- Primer
 - prikaz merenja sa jednim merenim podatkom za koji ne postoje podaci ni o instrumentu ni o načinu na koji je rezultat dobijen
 - ovo merenje predstavlja samo okvirni podatak o merenoj veličini, a nema veliku vrednost jer ne postoje podaci na osnovu kojih se može proceniti merna nesigurnost.

Merna nesigurnost - rezime

- Merna procedura je skup specifičnih operacija koje se koriste kako bi se izvršilo merenje koje odgovara odabranoj mernoj metodi
- Rezultat merenja je kvantitativna vrednost koja se dodeljuje merenoj veličini primenom merne procedure
- Tačnost merenja se definiše kao razlika rezultata i uslovno tačne (referentne, nominalne) vrednosti merene veličine

Merna nesigurnost - rezime

- Tačna vrednost uslovno je tačna jer je ona usvojena nekom konvencijom
- Tačna vrednost je idealizovan koncept (koji u praksi ne postoji)
- Konvencionalno tačna vrednost je dobijena pod takvim uslovima da su sistematski efekti i merna nesigurnost minimalni
- Za veću tačnost manja je greška merenja koja se definiše kao apsolutna razlika merene veličine i tačne vrednosti (apsolutna greška)
- moguće je definisati i relativnu grešku

Merna nesigurnost - rezime

- Ponovljivost rezultata merenja (*repeatability*) definiše slaganje rezultata merenja dobijenih iz više sukcesivnih merenja koji su izvedeni pod istim (ponovljivim) mernim uslovima:
 1. ista procedura merenja
 2. ista osoba koja sprovodi merenja
 3. isti instrument koji se koristi pod istim uslovima
 4. ista lokacija merenja
 5. postignuta ponovljivost u kratkom vremenskom roku (merenja su izvršena unutar granica kalibracije)

Merna nesigurnost - rezime

- Reproduktivnost rezultata merenja (reproducibility) podrazumeva slaganje rezultata merenja iste fizičke veličine pod promenljivim uslovima merenja
- Promenljivi uslovi merenja mogu biti svi navedeni uslovi merenja
- Osim merne nesigurnosti rezultata merenja, nekada se računa i nesigurnost merne metode
- Eksperimentalna procedura se može sprovoditi sa ciljem identifikacije sistematskih efekata koji su svojstveni nekoj metodi

Profesor dr Miroslav Lutovac
mlutovac@viser.edu.rs

Ova prezentacija je nekomercijalna.

Slajdovi mogu da sadrže materijale preuzete sa Interneta, stručne i naučne građe, koji su zaštićeni Zakonom o autorskim i srodnim pravima.

Ova prezentacija se može koristiti samo privremeno tokom usmenog izlaganja nastavnika u cilju informisanja i upućivanja studenata na dalji stručni, istraživački i naučni rad i u druge svrhe se ne sme koristiti –

Član 44 - Dozvoljeno je bez dozvole autora i bez plaćanja autorske naknade za nekomercijalne svrhe nastave:

(1) javno izvođenje ili predstavljanje objavljenih dela u obliku neposrednog poučavanja na nastavi;

- ZAKON O AUTORSKOM I SRODNIM PRAVIMA

("Sl. glasnik RS", br. 104/2009 i 99/2011)