SADRŽAJ

1 DEFINICIJA MERENJA 8

1.1 Rezultat merenja 8

1.1.1 Funkcija raspodele verovatnoće i funkcija gustine verovatnoće 14

2 MERNE GREŠKE I MERNA NESIGURNOST 21

2.1 Relativna i apsolutna greška merenja 24

2.2 Merna nesigurnost tipa A 26

2.2.1 Merna nesigurnost tipa A za Gausovu funkciju gustine verovatnoće 30

2.2.2 Merna nesigurnost tipa A za negausovske funkcije gustine verovatnoće 31

2.2.3 Primeri računanja merne nesigurnosti tipa A 42

2.3 Merna nesigurnost tipa B 51

2.3.1 Merna nesigurnost tipa B analognih instrumenata 52

2.3.2 Merna nesigurnost tipa B digitalnih instrumenata 53

2.3.3 Normalizacija rezultata merenja 57

2.4 Kombinovana merna nesigurnost 59

2.4.1 Kombinovana merna nesigurnost nekorelisanih veličina 60

2.4.2 Kombinovana merna nesigurnost korelisanih veličina 63

2.4.3 Kombinovana merna nesigurnost i sistematski efekti 65

2.4.4 Primer računanja kombinovane merne nesigurnosti 66

2.5 Izveštaj rezultata merenja i uticaj merene veličine na mernu nesigurnost 67

2.6 Merna nesigurnost - dodatna razmatranja i rezime 69

2.6.1 Predstavljanje rezultata merenja pomoću medijane i kvartila 71

3 METODE ZA MERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA 74

3.1 Merenje otpornosti 74

3.1.1 Ommetar (digitalni multimetar) 75

3.1.2 U / I metoda za merenje nepoznate otpornosti 78

3.1.3 Merenje otpornosti metodom poređenja i metodom zamene 80

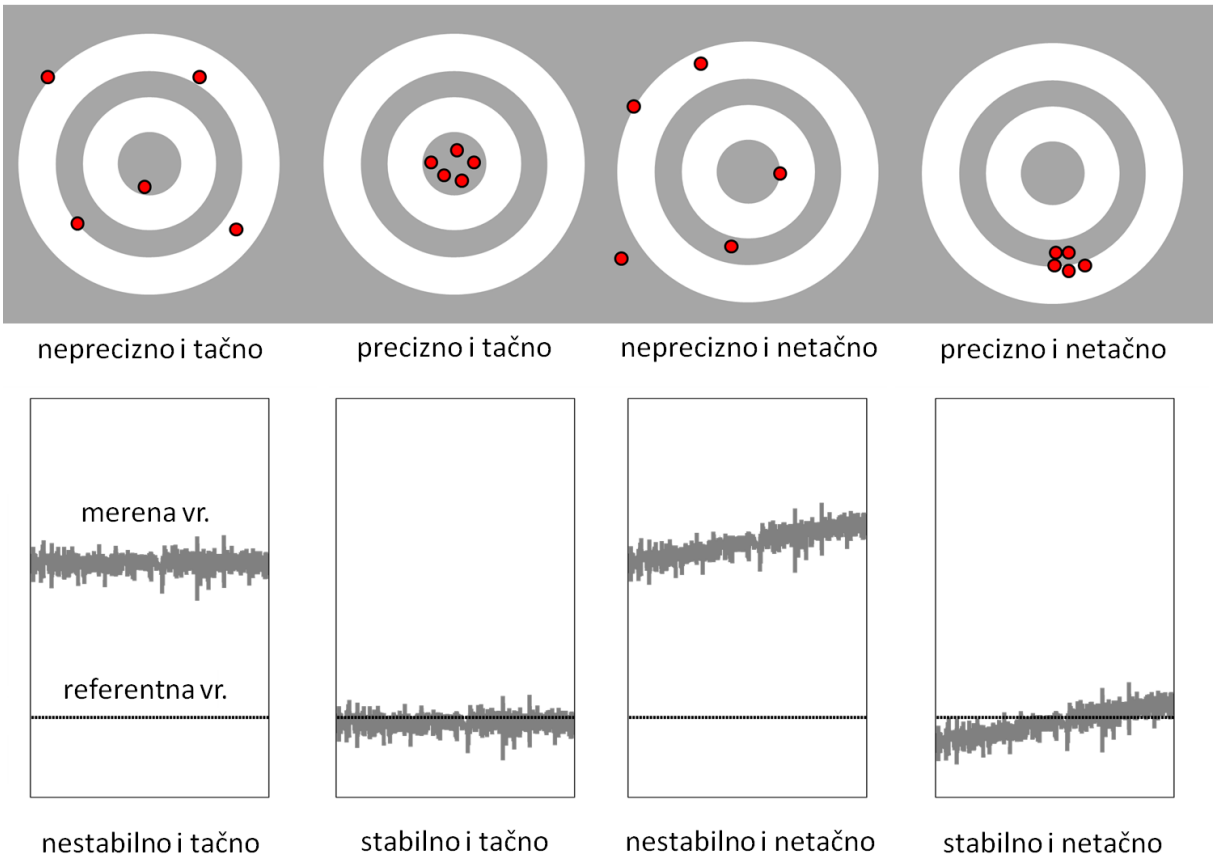
3.1.4 Primer merenja otpornosti 82

3.2 Merenje kapacitivnosti ... 83
3.2.1 Primer merenja kapacitivnosti ... 86
3.3 Merenje induktivnosti ... 89
3.4 Merenje impedanse ... 90
3.4.1 U / I metoda za merenje impedanse ... 95
3.5 Merni mostovi za merenje električnih veličina ... 96
4 INSTRUMENTI ZA MERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA ... 97
4.1 Princip rada osnovnih mernih instrumenata ... 97
4.1.1 Instrument sa pokretnim kalemom ... 98
4.1.2 Instrument sa pokretnim gvožđem ... 111
4.1.3 Princip rada digitalnih instrumenata ... 114
4.1.4 Galvanometri u savremenim električnim merenjima ... 117
4.2 Karakteristike mernih instrumenata ... 119
4.3 Specijalizovani merni instrumenti ... 124
4.3.1 Digitalni multimetar ... 124
4.3.2 Osciloskop ... 126
4.3.3 LCR metar ... 127
5 MERENJE NEELEKTRIČNIH VELIČINA ... 136
5.1 Princip rada senzora / pretvarača ... 137
5.1.1 Merenje promene otpornosti ... 137
5.2 Primeri sa rešenjima ... 139
5.2.1 NTC termistor ... 139
5.2.2 PTC termistor ... 140
5.2.3 Rezistivni senzor sile ... 143
5.2.4 Senzori zasnovani na promeni kapacitivnosti ... 145
5.2.5 Rezistivni ekran osetljiv na dodir ... 147
5.2.6 Kapacitivni ekrani osetljivi na dodir ... 151
6 MERNI INSTRUMENTI ZASNOVANI NA PRIMENI RAČUNARA ... 154
6.1 Električni model ... 156
6.1.1 Primer određivanja električnog modela - PTC termistor ... 157
6.2 Kola za kondicioniranje signala ... 158
6.2.1 Pojačavači ... 158

6.2.2 Filtri 164
6.3 A / D konverzija signala 167
6.4 Obrada signala 168
6.5 Prenos podataka 169
6.6 Softver za akviziciju signala 170
6.6.1 *Ready to run* aplikacija 171
6.6.2 Programsko okruženje opšte namene 172
6.6.3 Virtuelni instrumenti i programska okruženja posebne namene 173
6.6.4 SCADA 179
7 TRENDOVI U SAVREMENIM MERNIM SISTEMIMA 182
7.1 Merenja u dopunjenoj i pojačanoj realnosti 182
LITERATURA 185

2 MERNE GREŠKE I MERNA NESIGURNOST

Dve važne osobine merenja su, kao što je to pokazano u prethodnom poglavlju, preciznost i tačnost merenja. Primer ilustracije preciznosti i tačnosti je prikazan na slici 8. Precizno, a netačno merenje odgovara merenju sa relativno malom mernom nesigurnošću (manje rasipanje ponovljenih merenja oko rezultata merenja) u kome procena srednje vrednosti nije tačna i ima konstanto odstupanje. Suprotno od ovog primera, tačno i precizno merenje je najpoželjnija situacija u kojoj je merna nesigurnost relativno mala (ne postoji veliko odstupanje od tačne vrednosti) i procena tačne vrednosti (srednja vrednost) je relativno dobra.



Sl. 8, Ilustracija preciznosti i tačnosti merenja. Rezultati merenja vremenske serije su prikazani na donjem panelu u odnosu na klasičnu reprezentaciju (pikado) tačnosti i preciznosti (gornji panel).

Međunarodna referenca za predstavljanje mernih nesigurnosti rezultata merenja je Guide to Expression of Uncertainty in Measurement [9]. U cilju uniformisanog prikaza rezultata merenja na međunarodnom nivou 1993. godine je objavljeno objedinjeno Uputstvo za izražavanje merne nesigurnosti [9].

Merna nesigurnost određuje širinu intervala u kojoj se može naći merena vrednost sa određenom verovatnoćom i vrednost merne nesigurnosti je uvek pozitivnog znaka. Pri ponovljenim merenjima, merna nesigurnost se javlja iz sledećih razloga: 1) izvor greške nije poznat ili 2) izvor greške nije jednostavno jednoznačno odrediti (npr. ima ih više). Na tačnost merenja, osim merne nesigurnosti ponovljenih merenja, utiču i greške prilikom merenja. Klasična podela grešaka je na: 1) grube greške, 2) sistematske greške i 3) slučajne greške [20, 29].

Pod greškom merenja se podrazumeva razlika između merene i tačne vrednosti. Greška merenja može biti ili pozitivnog ili negativnog znaka. Podela grešaka na sistematske i slučajne je na osnovu fizičkih uzoraka tih grešaka.

Grube greške (eng. *blunder*) su rezultat nestručnosti i nepažnje koje vode izboru neodgovarajućeg mernog postupka ili pogrešnog korišćenja instrumenta. Nisu predmet razmatranja u ovom udžbeniku, jer se pretpostavlja da su stručnost i obazrivost svakog inženjera (kao i budućeg inženjera) na prvom mestu prilikom rukovanja laboratorijskom opremom.

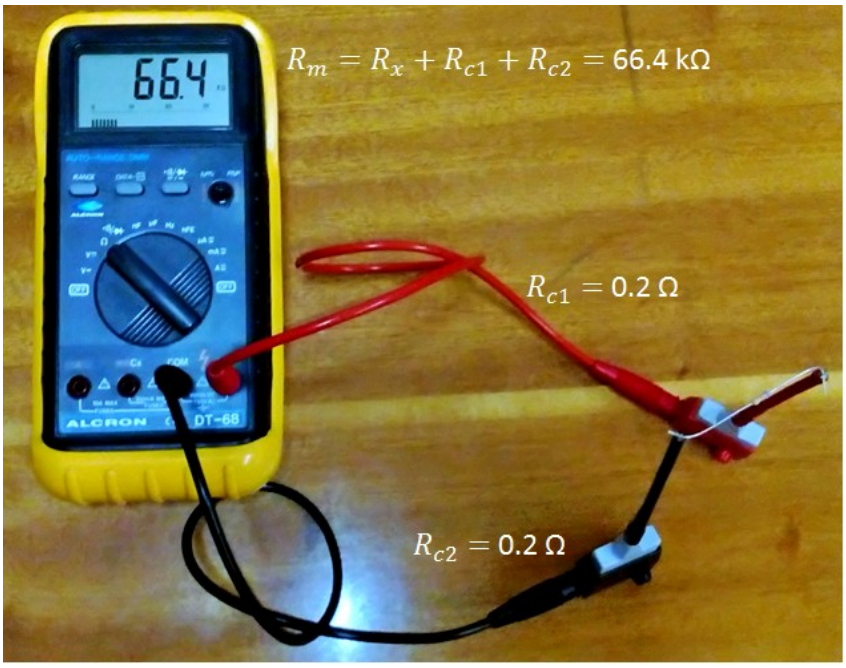
Sistematske greške su najčešće invarijantne (nepromenljive u vremenu) ili se menjaju po određenom zakonu prilikom svakog merenja. Na primer, do sistematske greške dolazi ako instrument nije adekvatno baždaren tj. kalibrisan za merenje odgovarajuće električne (u opštem slučaju fizičke) veličine. Sistematske greške se mogu izbeći pravilnim izborom metode merenja, redovnom kontrolom tačnosti instrumenta i eliminisanjem uticaja spoljnih faktora. Nekada se, radi eliminisanja uticaja sistematske greške, uvodi korekcija merenja.

Jedan od najčešćih izvora sistematskih greški prilikom merenja je neadekvatna kalibracija instrumenta. Na primer, ako se za merenje otpornosti koristi ommetar, onda kablovi koji se koriste da bi se otpornik doveo na ulaze ommetra imaju neku otpornost koja nije zanemariva ($R_c \neq 0$). Kako se koriste dva kabla to je izmerena vrednost R_m jednaka zbiru $2R_c$ i nepoznate otpornosti otpornika R_x. Ilustracija nepravilno kalibrisanog instrumenta za merenje otpornosti je predstavljena na slici 9.

Pod kalibracijom, u opštem slučaju, podrazumeva se skup operacija koje pod određenim uslovima omogućavaju određivanje relacije između fizičke veličine koja se meri i mernog rezultata (koji je opisan procenjenom merenom vrednošću i mernom nesigurnošću). U slučaju merenja nepoznate otpornosti R_x ta relacija je: $R_m = R_x + 2R_c$. Korekcija se može uvesti, ako se kablovi kratko spoje i izračuna otpornost $2R_c$ koja se kasnije oduzima od merene vrednosti kako bi se dobila nepoznata otpornost koja nije rezultat sistematske greške. U opštem slučaju, otpornosti kablova mogu da se razlikuju, pa su na slici 9 korišćene oznake R_{c1} i R_{c2}, odnosno kablovi su pojedinačno obeleženi.

Pod kalibracijom (eng. *calibration*) se podrazumeva širok skup operacija, koje nisu predmet razmatranja u ovom udžbeniku, a koje se primenjuju kako za merenje električnih veličina, tako i za merenje bilo koje fizičke veličine. Međunarodni metrološki rečnik (International Vocabulary of Metrology, ©JCGM 200:2012) kalibraciju definiše kao operaciju za koju se pod određenim uslovima, u prvom koraku, određuje relacija između merene vrednosti i nesigurnosti primenom odgovarajućih mernih standarda i indikacija, a u drugom koraku, koristi se informacija iz prvog koraka kako bi se odredio rezultat merenja

tj. njegova korekcija. Upravo je ova procedura i primenjena u goreprikazanom primeru merenja nepoznate otpornosti ommetrom.



Sl. 9, Primer kalibracije ommetra za merenje nepoznate otpornosti. Sa R_m je označena merena vrednost, sa R_x nepoznata otpornost koja se meri i sa R_{c1} i R_{c2} su označene otpornosti kablova i štipaljki (hvataljki) koji su povezani sa otpornikom. Za merenje je korišćen ALCRON DT-68 digitalni multimetar sa automatskim podešavanjem opsega za merenje otpornosti.

U slučaju kada postoje sistematske greške odnosno efekti koji utiču na rezultat merenja, potrebno je odrediti sam efekat i sprovesti proceduru kompenzacije merene veličine. To se najčešće može obaviti na dva načina:

1. korekcijom rezultata merenja (kao u prethodnom primeru oduzimanjem $2R_c$ od merene vrednosti nepoznate otpornosti) ili
2. uvođenjem korekcionog faktora (množenjem merene vrednosti nekom konstantom).

Sistematske efekte nikada nije moguće u potpunosti otkloniti, ali ih je moguće smanjiti na razumnu meru tako da se u daljim merenjima predloženom metodom ili instrumentom sistematske greške mogu smatrati zanemarivim.

Treću grupu grešaka čine slučajne greške. Na početku ovog poglavlja pomenuto je da je klasična podela mernih grešaka na 1) grube, 2) sistematske i 3) slučajne greške. Nakon konstituisanja Pravilnika o merenju i prikazu merenih veličina 1993. godine, podela mernih grešaka je nešto drugačija. Kako bi se na odgovarajući način predstavila merena veličina, uvedeno je računanje merne nesigurnosti (eng. *uncertainity*) koje se ne sme pogrešno tumačiti kao merna greška (eng. *error*).

Sam pojam nesigurnosti se najjednostavnije može opisati sinonimom sumnja. Prema tome, merna nesigurnost (eng. *uncertainity of measurement*) je sumnja u validnost rezultata merenja. To je kvanitativni parametar koji se pridružuje rezultatu merenja i kojim se karakteriše disperzija rezultata merenja (rasipanje pojedinačnih vrednosti merenja oko rezultata merenja) [9]. Termin nesigurnost se i koristi, jer se odstupanje rezultata koje je uračunato kroz mernu nesigurnost ne može predstaviti matematičkim modelom neke pojave niti se uzrok nastanka merne nesigurnosti može jednoznačno odrediti. S druge strane, greška je idealizovan koncept i ne može biti poznata u potpunosti, jer poznavanje greške podrazumeva i poznavanje tačne vrednosti koja praktično nije dostupna. Sistematske greške, koje su opisane ranije, ne ulaze u proračun merne nesigurnosti i po novoj klasifikaciji se smatraju sistematskim efektima. Prema tome, ako nije eksperimentalno ili teorijski određen sistematski efekat, on neće biti uključen u mernu nesigurnost, ali će doprineti ukupnoj greški rezultata merenja. Merna nesigurnost definiše disperziju rezultata oko srednje vrednosti, a sistematski efekti mogu da utiču na procenu srednje vrednosti.

Na osnovu odabira metode koja se koriste prilikom određivanja merne nesigurnosti, dogovorena je podela na mernu nesigurnost tipa A i mernu nesigurnost tipa B. Nekada na rezultat merenja utiču i merna nesigurnost tipa A i tipa B ili više mernih nesigurnosti tipa B, pa se računa ukupna kombinovana merna nesigurnost. Merna nesigurnost tipa A se određuje statističkom obradom rezultata, a merna nesigurnost tipa B određuje se primenom svih ostalih metoda [9, 34].

2.1 Relativna i apsolutna greška merenja

U prethodnom poglavlju je pokazano da će slučajne i grube greške, a prema novoj klasifikaciji samo greške (eng. *error*) dovesti do netačnog merenja bez obzira na mernu nesigurnost. Iz tog razloga, važno je raspolagati odgovarajućim matematičkim aparatom koji omogućava da se procene ove greške tj. efekti. Praktično, tačna vrednost neke merene veličine x_t nije unapred poznata, pa se ove greške ne mogu ni izračunati.

Tačna vrednost (eng. *true value*) je vrednost koja bi se dobila savršenim mernim postupkom koji ne postoji. Međutim, nekada se kvantitet (određena brojna vrednost) neke veličine smatra tačnom vrednošću na osnovu usvojene konvencije. Ovo ima praktični značaj na primer pri definisanju referentnog standarda kojim se neka vrednost usvaja kao tačna vrednost[5]. Najčešće se takva referenta vrednost usvaja nakon velikog broja ponovljenih merenja koju sprovode različite institucije i pri tome primenjuju različite merne metode.

Merenje se, generalno gledano, vrši sa ciljem procene tačne vrednosti $\hat{x}$. Dva praktična slučaja kada su dostupne nominalne vrednosti merene veličine x_n su:

[5] Ovako usvojen referentni standard najčešće se ne naziva tačna, već nominalna vrednost.

1. kada se ocenjuje merna metoda, pa se meri unapred poznata veličina i
2. prilikom kalibracije instrumenta.

Apsolutna greška u oznaci Δ se definiše kao apsolutna razlika između procenjene merene veličine i njene unapred poznate nominalne vrednosti:

$$\Delta = |\hat{x} - x_n| \qquad \text{Relacija 20}$$

Vrlo često se umesto apsolutne greške, koja ne sadrži informaciji o kvantitetu procenjene i / ili nominalne merene veličine, koristi relativna greška u oznaci r_d. Relativna greška se definiše kao odnos apsolutne razlike i nominalne vrednosti merene veličine, pa nema jedinicu:

$$r_d = \frac{|\hat{x} - x_n|}{x_n} \qquad \text{Relacija 21}$$

Množenjem relativne greške, koja se računa prema relaciji 21, sa 100, ova greška se može izraziti u procentima. Mana ove relacije je što ovu relativnu grešku nije moguće odrediti u slučaju kada je nominalna vrednost jednaka 0 ($x_n = 0$), jer deljenje sa nulom nije moguće. Ova greška se nekada naziva i relativna promena (meri se promena u odnosu na nominalnu / referentnu vrednost), ali i relativna razlika (u tom slučaju se meri razlika između dve veličine od kojih nijedna nije referentna, najčešće sa ciljem da se ispita da li je apsolutna vrednost greške bliska 0). Postoji više načina da se ograničenje ove metode (nije moguće deljenje nulom) prevaziđe. Osim u odnosu na nominalnu tj. referentnu merenu vrednost, apsolutna razlika se može posmatrati i u odnosu na srednju vrednost procenjene veličine i nominalne veličine ili u odnosu na veću vrednost od ove dve:

$$r_d = \frac{|\hat{x} - x_n|}{\left(\frac{|\hat{x}| + |x_n|}{2}\right)} \qquad \text{Relacija 22}$$

$$r_d = \frac{|\hat{x} - x_n|}{max(|\hat{x}|, |x_n|)} \qquad \text{Relacija 23}$$

Praktična primena relativne greške je i za realizaciju provere da li je neka vrednost dovoljno bliska unapred definisanoj drugoj vrednosti. U tom slučaju se usvaja neki prag koji definiše da li je relativna razlika dva broja dovoljno velika ili mala u odnosu na tako definisan prag.

Osim apsolutne i relativne greške, nekada se računa i opseg rg (eng. *range*) u kome se nalazi neka merena veličina (kao razlika maksimalne i minimalne vrednosti merenja):

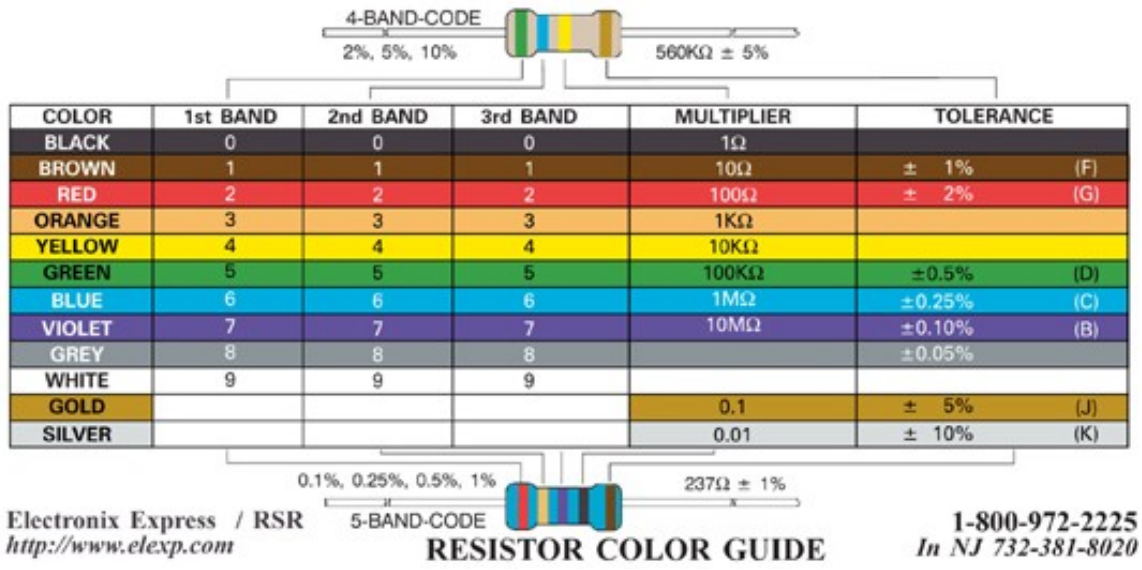
$$rg = x_{max} - x_{min} \qquad \text{Relacija 24}$$

Međutim, rezultat ponovljenih merenja može biti takav da se baš ova ekstremna merenja (x_{max} i x_{min}) značajno razlikuju od susednih vrednosti i da kao ekstremne vrednosti merenja nisu od značaja za rezultat merenja (eng. *outlier*), pa se predstavljanje opsega merenja ne koristi često u praksi.

2.2 Merna nesigurnost tipa A

Već je pokazano da se pri merenjima fizičke veličine i pri ponovljenim uslovima (na primer: isti operater, ista metoda, isti instrumenti, isti spoljni uslovi, ...) dobijaju različiti rezultati. Ove varijacije su rezultat slučajnih procesa i za njihov opis se koristi merna nesigurnost. Ne postoji način da se ova posledica slučajnih procesa tj. merna nesigurnost merenja izbegne. Moguće je jedino smanjiti mernu nesigurnost ponavljanjem merenja i predstavljanjem procenjene merene veličine. Za procenu merne nesigurnosti koriste se statističke metode i metode teorije verovatnoće koje su već ranije prikazane.

Statističke metode su od značaja, jer se u tom slučaju konačan rezultat (procenjena tačna vrednost tj. procenjena srednja vrednost merenja) predstavlja sa pridruženom mernom nesigurnošću čiji je fizički značaj da sa određenom verovatnoćom garantuje u kom se opsegu nalazi rezultat merenja. Na primer: proizvođač za otpornik od 560 kΩ garantuje sledeće: otpornost otpornika je 560 kΩ sa tolerancijom od 5% (28 kΩ), odnosno otpornost je 560 ± 28 kΩ. Na ovaj način, proizvođač garantuje da se kupljena otpornost sa bojama kao na slici 10 sa određenom verovatnoćom nalazi u opsegu od 532 kΩ do 588 kΩ.



Sl. 10, Primer računanja otpornosti otpornika preko *Color Code* šeme. Na gornjem panelu je dat primer procenjene otpornosti otpornika od 560 kΩ, a na donjem panelu za otpornik otpornosti 237 Ω i njihove tolerancije na osnovu boja na otporniku. Courtesy of Electronix Express www.elexp.com (uz dozvolu od Electronix Express www.elexp.com).

Praktično, ovo znači da prilikom ponovljenog merenja otpornosti ovog otpornika, rezultat koji se dobija će najverovatnije biti u opsegu 560 ± 28 kΩ. Treba imati na umu, da je praktično moguće izvršiti konačan broj merenja i da je srednja vrednost samo procena merene veličine.

2.3 Merna nesigurnost tipa B

Osim merne nesigurnosti tipa A (uobičajena je oznaka u_A), postoji i merna nesigurnost tipa B (uobičajena oznaka u_B). Obe merne nesigurnosti su kvantitativni pokazatelji greške merenja i uzimaju se u obzir za računanje ukupne merne nesigurnosti u. Merna nesigurnost tipa B se procenjuje na osnovu znanja o mernoj metodi i postupku merenja, o karakteristikama instrumenata i svim ostalim podacima (osim onog što je uračunato kroz proceduru računanja merne nesigurnosti tipa A) [34].

Za mernu nesigurnost tipa A je pokazano da može biti standardna devijacija ili neki njen umnožak, odnosno odgovara širini intervala funkcije gustine verovatnoće koji karakteriše neka verovatnoća tj. nivo poverenja (eng. *level of confidence*). Treba imati na umu, da se i merna nesigurnost tipa B procenjuje na isti način s tim što je u slučaju merne nesigurnosti tipa A, raspodela dobijena na osnovu ponovljenih merenja (eksperimentalnih rezultata), a da u slučaju merne nesigurnosti tipa B raspodela se procenjuje na osnovu dostupnih podataka (pretpostavljena raspodela). Vrlo često se u literaturi [9] za funkcije gustine verovatnoće koja je dobijena na osnovu ponovljenih merenja koristi termin objektivna raspodela (merna nesigurnost tipa A), a za funkciju gustine verovatnoće koja se pretpostavlja na osnovu dostupnih podataka koristi termin subjektivna raspodela (merna nesigurnost tipa B). Merna nesigurnost tipa B je uvedena, jer nije u svim slučajevima moguće izračunati mernu nesigurnost tipa A i jer je to za neke praktične primene kompleksna procedura.

Da bi se procenila merna nesigurnost tipa B i da bi se pretpostavila odgovarajuća raspodela, u obzir se uzimaju sledeći podaci [9, 38]:

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

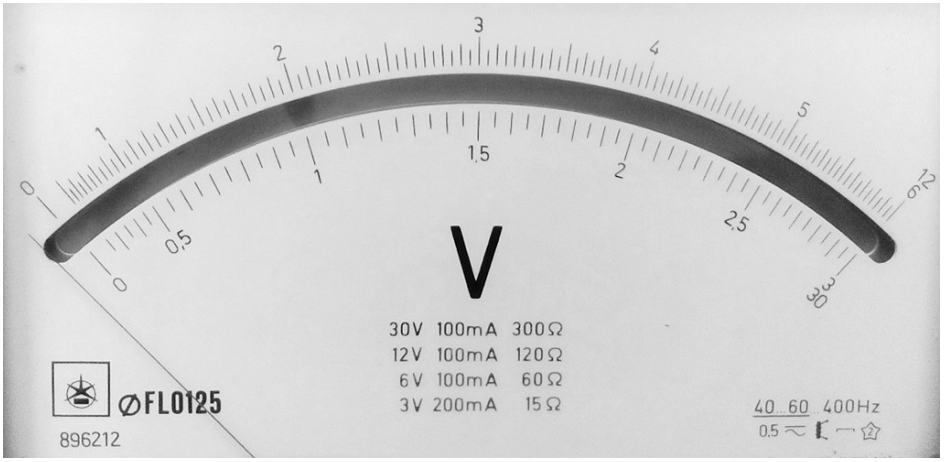
Za procenu merne nesigurnosti tipa B nejčešće se od navedenog koristi specifikacija instrumenta prema uputstvu proizvođača [16]. Treba uzeti u obzir da za većinu mernih instrumenata, proizvođači daju ograničen rok garancije, kada je u pitanju tačnost instrumenta. Kako bi instrument mogao da se koristi i nakon isteka garantnog roka, potrebno ga je kalibrisati (uobičajeno jednom godišnje). U uputstvu proizvođača se nalaze i vrednosti spoljnih uslova pod kojima važi tačnost instrumenta i procenjena merna nesigurnost tipa B. To su najčešće vrednost temperature i vlažnosti vazduha u prostoriji u kojoj se koristi instrument. Za potrebe industrijskih merenja, gde je potrebno da merni instrument radi u širem opsegu temperature i vlažnosti vazduha, najčešće se proizvode specijalizovani instrumenti [16]. Temperatura kod digitalnih instrumenata najviše utiče na LCD displej: oni mogu prestati sa odazivanjem i mogu se isključiti kada su temperature relativno niske. Sa druge strane, za relativno visoke temperature, može se pojaviti "senka" na digitalnom displeju. Osim što se definiše radna temperatura, neki proizvođači mogu navesti i promenu tačnosti za različite opsege temperature unutar radnog opsega.

Na osnovu primera iz prakse biće objašnjeno kako se može proceniti merna nesigurnost tipa B. U opštem slučaju, merna nesigurnost tipa B je dobijena ili na osnovu neke unapred dostupne informacije o merenju i instrumentu ili na osnovu usvojenih pretpostavki.

2.3.1 Merna nesigurnost tipa B analognih instrumenata

Kod analognih instrumenata se tačnost najčešće izražava kao procenat od pune skale prilikom čitanja vrednosti merenja (relativna greška). Kada je merena vrednost kod analognog instrumenta blizu cele skale (ili se bar nalazi u drugoj trećini skale), onda merna nesigurnost koja se računa ima smisla. Što je očitavanje merene vrednosti "dalje" od pune skale, onda je veće odstupanje od tačne vrednosti. Primer skale analognog voltmetra prikazan je na slici 22.

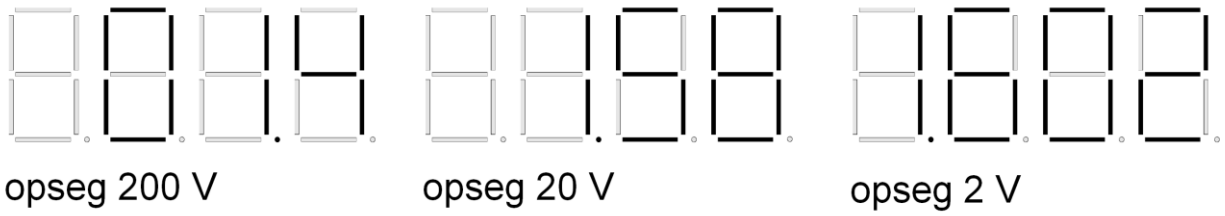
Ako je, na primer, dat analogni voltmetar koji ima tačnost ±3% u opsegu [0 100] V [16], tada se na osnovu ovog podatka, zaključuje da je greška koja se može dobiti merenjem vrednosti u ovom opsegu jednaka ±3 V. U tom slučaju, za tačnu vrednost koja se meri od 90 V, instrument može da pokaže neku vrednost u opsegu od 87 V do 93 V, pa je odstupanje od tačne vrednosti tj. greška jednaka ±3.3%. Međutim, ako se na ovoj skali meri napon čija je tačna vrednost 10 V, onda instrument može da pokaže neku vrednost u opsegu od 7 V do 13 V, pa je greška ±30%. Iz ovog razloga je poželjno da se merenje analognim instrumentima izvrši kada se merena veličina nalazi u poslednjoj trećini opsega. Odnosno, potrebno je odabrati odgovarajući opseg kako bi merenje bilo što tačnije.



Sl. 22, Fotografija skale analognog voltmetra (Iskra, Stegne, Ljubljana) sa 4 merna opsega (3 V, 6 V, 12 V i 30 V).

2.3.2.1 Primer računanja merne nesigurnosti tipa B

Digitalnim voltmetrom sa 3½ cifara meri se napon od 1.6 V. Ako DMM za merenje DC napona ima tačnost definisanu kao ±(0.5% + 3), potrebno je odrediti mernu nesigurnost tipa B za mereni napon [16].



Sl. 23, Za tačno očitavanje vrednosti napona sa digitalnog displeja DMM-a, potrebna je informacija o LSD i potrebno je odabrati najmanji mogući opseg. Na slici je prikazano merenje napona od 1.6 V za tri opsega: 200 V na levom panelu, 20 V na srednjem panelu i 2 V na desnom panelu. Na slici je ilustrovan primer koji je opisan u [16].

Najpre se DMM postavi na najveći opseg (200 V), kako je ranije opisano. Na displeju će se prikazati merena vrednost u oznaci 01.4 (slika 23), pa je merna nesigurnost (prema uputstvu proizvođača) jednaka $\frac{1.6\times0.5}{100} = 0.008$ V - ovu vrednost nije moguće prikazati na ekranu, jer je prikazana samo prva decimala (01.4). Međutim, ako se uzme u obzir da postoji 3 LSD-a, onda se dolazi do zaključka da poslednja cifra na displeju može da varira sa ±3 brojanja. U tom slučaju, DMM može prikazati merenu vrednost sa sledećom nesigurnošću 1.6 ± 0.3 V (ovo je prikaz zaokružen na jednu decimalu kako pokazuje i DMM jer je greška od 0.008 V tada zanemariva) ili u opsegu [1.3 1.9] V. Za manji opseg (20 V) izmerena vrednost je 1.58 (slika 23), a merna nesigurnost $\pm\frac{1.6\times0.5}{100} + 0.03 = \pm0.038$ V i procenjena vrednost se nalazi u opsegu [1.1562 1.638] V. Za najmanji opseg (2 V) izmerena je vrednost (slika 23) i merna nesigurnost $\pm\frac{1.6\times0.5}{100} + 0.003 = \pm0.011$ V, pa se procenjena vrednost merenja nalazi u opsegu [1.1589 1.611] V. Zaključuje se da na tačnost merenja utiče u velikoj meri opseg na kom se meri zadata vrednost, odnosno rasipanje rezultata merenja oko tačne vrednosti je manje za odabir najmanjeg mogućeg opsega.

U prethodnom primeru prikazan je značaj odabira odgovarajućeg opsega i njegov uticaj na tačnost merenja digitalnim instrumentom. Kada se određuje merna nesigurnost tipa B digitalnih instrumenata, trebalo bi napomenuti da ne postoji standardizovan način na koji proizvođači navode podatke o tačnosti merenja.

Često se u praksi amplituda naponskih signala meri osciloskopom. Za računanje merne nesigurnosti tipa B potrebno je iz specifikacije osciloskopa pročitati podatke o broju bita A / D konverzije (rezolucija A / D konverzije) i podatke o tačnosti naponskog pojačanja [3].

2.3.3 Normalizacija rezultata merenja

Merena veličina i parametri okoline imaju imaju određenu brzinu promene [9]. Većina laboratorijskih merenja ima statički karakter, odnosno merenje se obavlja nakon što se uspostavi stacionarno tj. ustaljeno stanje. Praktično nije moguće održati apsolutno stacionarno stanje i dinamička greška merenja je uvek prisutna.

U slučaju da je više ponovljenih merenja izvršeno na različitim skalama, potrebno je izvršiti normiranje tj. normalizaciju podataka pre dalje obrade tih podataka (na primer: pre računanja srednje vrednosti). Normalizacija se u opštem slučaju može odnositi na odgovarajuće proceduralne metode koje omogućavaju međusobno poređenje određenih podataka. U praksi, radi lakšeg računa, Gausovski raspodeljeni rezultati merenja se najčešće normalizuju tako da im je srednja vrednost 0, a varijansa 1. Na ovakvim signalima se dalje primenjuju različite metode obrade signala (bez umanjenja opštosti nakon normiranja srednje vrednosti i standardne devijacije). Slučajna promenljiva čije je matematičko očekivanje jednako 0 se takođe naziva i centrirana slučajna promenljiva.

Jedan praktičan primer normalizacije[10] signala je za potrebe merenja biomedicinskih signala na osnovu kojih se vrši procena mišićne aktivnosti. Ova metoda merenja električnih signala mišića se naziva elektromiografija (EMG). Na primeru ovog signala biće objašnjena praktična potreba za normalizacijom signala.

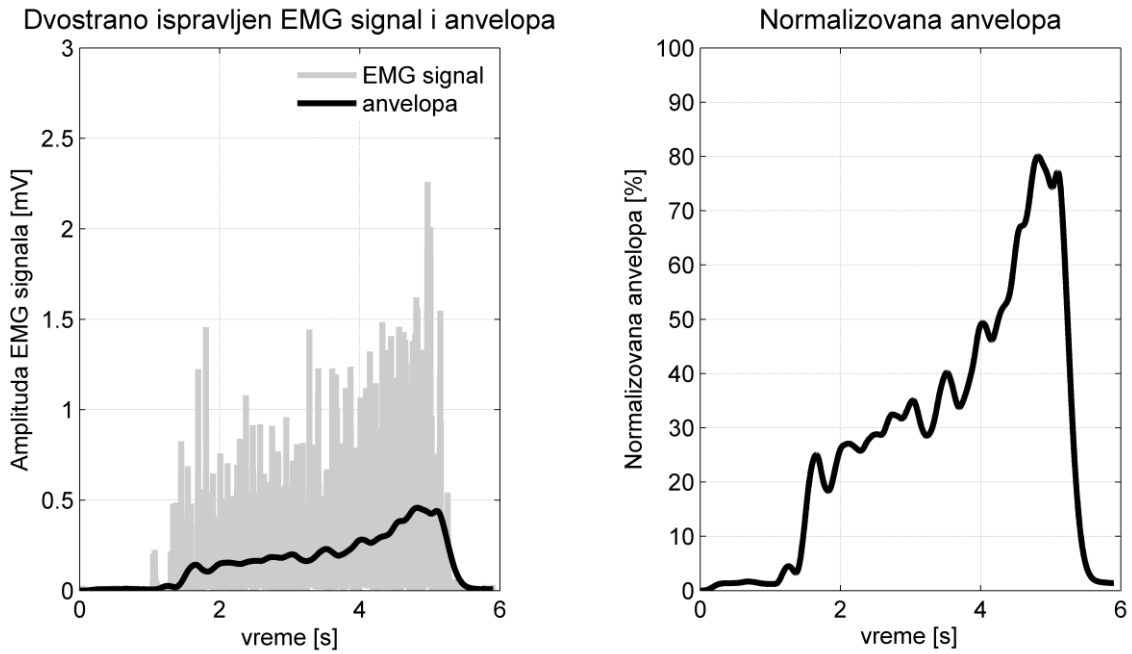
2.3.3.1 Praktični primer normalizacije signala

U biomedicinskoj tehnici je uobičajena normalizacija elektrofiziološkog EMG (elektromiografskog signala). Ovaj signal se meri primenom površinskih senzora koji se postavljaju na kožu ispitanika iznad mišića od interesa. Amplituda ovako izmerenog signala je u korelaciji sa mišićnom kontrakcijom. EMG signali imaju relativno malu amplituda (reda mV) i za njihovo merenje potrebno je primeniti odgovarajuće filtre i odgovarajuća pojačavačka kola kako bi se amplituda signala snimila korišćenjem A / D konvertora. Vrlo često se za prikaz ovih signala koristi i dvostrano ispravljanje, jer im je srednja vrednost jednaka 0. Na slici 24 na levom panelu dat je primer snimljenog i dvostrano ispravljenog EMG signala na zdravom ispitaniku na mišiću *Tibialis anterior* (latinski naziv). Metoda kojom je snimljen ovaj signal je detaljno opisana u [23]. Poseban praktični značaj merenja ovih signala je u poređenju signala koji su mereni na zdravim ispitanicima i na pacijentima kako bi se u kliničkim uslovima dijagnostikovao poremećaj u radu mišića.

[10] U literaturi su podjednako zastupljeni termini normalizacija i normiranje signala. Normiranje se češće koristi kada je reč o Gausovoj raspodeli čija se srednja vrednost normalizuje na vrednost 0 i varijansa na vrednost 1.

Poznato je u biomedicinskoj tehnici da postoji relativno veliki broj faktora koji mogu da utiču na amplitudu EMG signala, pored intenziteta mišićne kontrakcije. Postoji relativno veliki broj "spoljašnjih" i "unutrašnjih" faktora koji utiču na amplitudu ovog signala [10]. Neki od tih parametara su: konfiguracija elektroda (njihov oblik, veličina, međusobna udaljenost), pravac postavljanja elektroda na kožu u odnosu na pravac prostiranja električnih potencijala mišića, impedansa kože, vlažnost i temperatura kože, anatomska dimenzija i pozicija mišića, debljina masnog tkiva (izolatora) na mestu merenja i drugi. Svi ovi faktori su promenljivi u zavisnosti od eksperimentatora koji vrši merenje, u zavisnosti od primenjene merne opreme i u zavisnosti od ispitanika na kome se meri. Zbog svih ovih varijabilnih faktora, nije moguće porediti amplitude ovih signala. Zato se uvode posebni protokoli u kojima se definišu takvi uslovi merenja da se uticaj spoljašnjih faktora svodi na minimum. Kako se ne može uticati na unutrašnje faktore kao što du impedansa kože, debljina masnog tkiva na mestu merenja i slično, to se uvodi normalizacija signala.

Postoji niz predloženih metoda koje se koriste za normalizaciju EMG signala, ali je najrasprostranjeniji pomoću maksimalne voljne kontrakcije (MVK, eng. *Maximal Voluntary Contraction* - MVC). Normalizacija se sprovodi dodatnim referentnim merenjem MVK.



Sl. 24, Primer normalizacije EMG (elektromiografskog) signala. Na levom panelu prikazan je dvostrano ispravljen EMG signal zajedno sa anvelopom (obvojnicom) u mV. Kako bi se ovako snimljen signal mogao porediti sa signalima merenim u ponovljenim sesijama ili sa signalima merenim na drugim ispitanicima primenjuje se normalizacija u odnosu na maksimalnu voljnu kontrakciju i izražava u procentima (panel desno). U ovom primeru $v_{RMS} = 0.57$ mV.

U ovoj metodi, ispitanik izvodi MVK mišića koji se meri i na osnovu tog signala računa se RMS (eng. *Root Mean Square*) vrednost u mV, prema sledećoj formuli:

3 METODE ZA MERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA

Električni merni instrumenti se koriste sa ciljem neposrednog merenja električnih veličina ili njihovog odnosa [29]. Princip rada ovih instrumenata zasniva se na električnim pojavama koje će biti prikazane u ovom poglavlju i objašnjene na praktičnim primerima.

3.1 Merenje otpornosti

Otpornik (slika 27) je pasivni element (sa dva terminala / kraja) koji u električno kolo unosi električnu otpornost. Otpornici imaju karakteristiku elementa prema kojoj su napon i struja proporcionalni (Omov zakon):

$$R = \frac{U}{I} \qquad \text{Relacija 78}$$

Postoje otpornici koji imaju fiksnu (konstantnu) vrednost, ali i promenljivi otpornici (potenciometri, reostati). Otpornik je idealizovan element koji u potpunosti zadovoljava Omov zakon. Međutim, u praksi, otpornici uvek imaju i neke "parazitne" elemente.

Danas se u većini elektronskih kola i uređaja koriste SMD (eng. *Surface-Mount Components*) otpornici. Oni su manjih dimenzija i njihova dužina je u opsegu od 0.6 mm do 6.3 mm. Postoje i druge vrste otpornika. Otpornici koji postoje na tržištu se razlikuju, osim po dimenzijama i obliku, i po materijalima od kojih su napravljeni. Dva osnovna tipa otpornika su linearni i nelinearni. Kod nelinearnih otpornika, otpornost ne zavisi samo od napona i struje, već i od nekog drugog (spoljnjeg) električnog ili magnetnog polja. Na primer, termistori su nelinearni otpornici kod kojih otpornost zavisi i od temperature, a fotootpornici su otpornici kod kojih otpornost zavisi i od osvetljenja. Detalji o tipovima otpornika mogu se pogledati u [32].

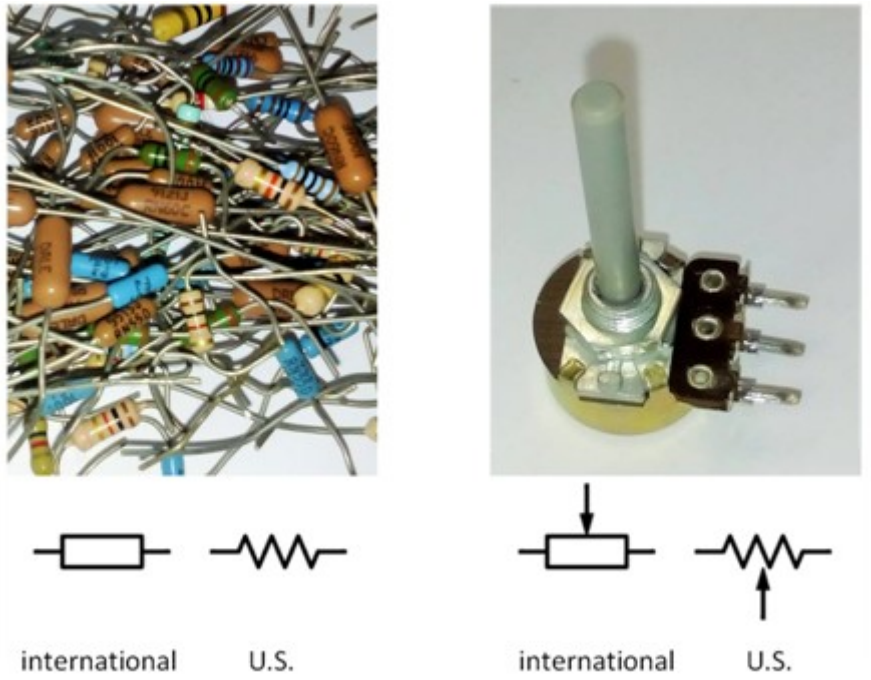
Prilikom odabira otpornika, treba voditi računa, osim o tome kolika je njegova otpornost i o tome kolika je snaga otpornika koji se koristi u električnom kolu. Otpornici se proizvode za različite maksimalne snage disipacije. Uobičajeno, za većinu kola, koriste se otpornici sa snagom disipacije od 0.25 W i 0.5 W.

Na primer, ako se na krajeve otpornika otpornosti od 250 Ω dovodi napon od 9 V, u tom slučaju, potrebno je upotrebiti otpornik snage:

$$P = \frac{V^2}{R} \qquad \text{Relacija 79}$$

odnosno otpornik snage $P = 0.324$ W ili veće.

Otpornost je moguće meriti sledećim metodama: 1) ommetrom, 2) U/I metodom – korišćenje ampermetra i voltmetra, 3) metodom poređenja i 4) mernim mostovima.



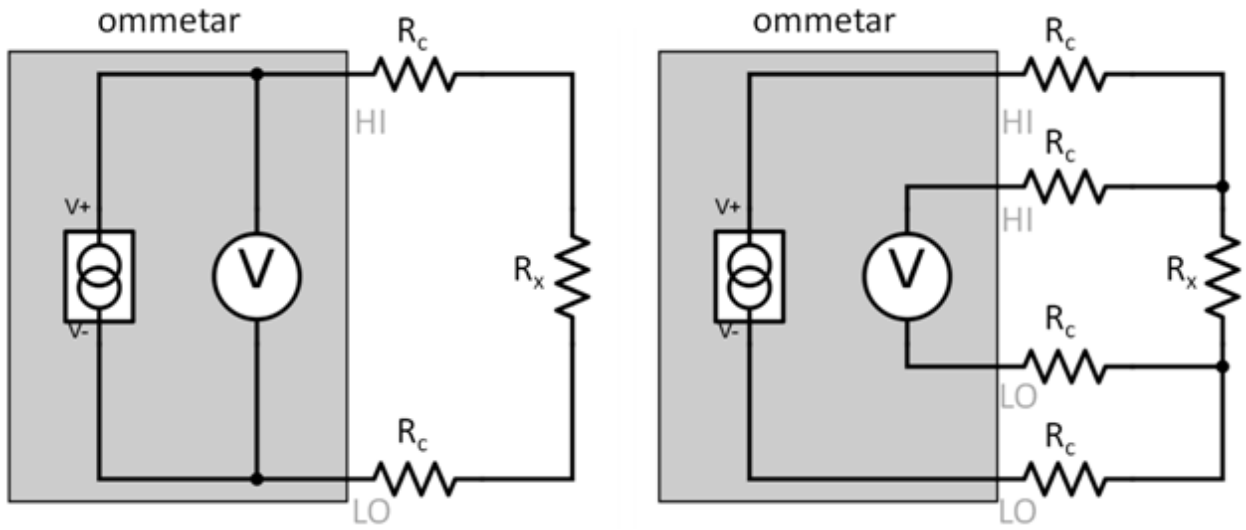
Sl. 27, Na levom panelu prikazana je fotografija otpornika i oznaka za otpornik po internacionalnoj (Int.) i U.S. nomenklaturi. Slično, na desnom panelu prikazana je fotografija potenciometra sa odgovarajućim oznakama.

3.1.1 Ommetar (digitalni multimetar)

Ommetar je najčešće korišćen instrument za merenje otpornosti otpornika. Ne koristi se kao poseban instrument i najčešće se ommetar nalazi u okviru digitalnog multimetra (unimer). Uobičajeno se projektuje tako da jedno elektronsko kolo unutar ommetra proizvodi konstantu struju kroz otpornik, a drugo elektronsko kolo meri napon na otporniku. Otpornost se meri tako što se ommetar vezuje na krajeve / terminale otpornika.

Praktično, uvek postoji neka otpornost kablova R_c kojima se povezuje otpornik sa instrumentom, čija se otpornost meri. Na ovaj način nastaje sistematska greška u merenju, što je ranije već objašnjeno. Tu grešku je moguće zanemariti ako je otpornost koja se meri R_x mnogo veća od otpornosti kontakta $R_x \gg R_c$. Zbog toga, za merenja visoke preciznosti i tačnosti relativno malih otpornosti, ova metoda nije pogodna, jer se na ovaj način meri i otpornost kontakta (kablova) $R_x + 2R_c$. Da bi se izbegla ova sistematska greška, često je u praksi u upotrebi merenje sa 4 kontakta tj. sa Kelvinovim kontaktima (ovi kontakti ime su dobili po irskom matematičaru i inženjeru Williamu Thomsonu, Lordu Kelvinu). Lord

Kelvin je 1861. projektovao Kelvinov most za merenje otpornosti manjih od 1 Ω. Ovaj most je kasnije promenjen i projektovan za merenje sa 4 kontakta (slika 28). Ova metoda se sastoji u tome da se napon ne meri kroz iste kontakte kroz koje prolazi struja iz strujnog izvora, već postoje odvojeni kontakti. Na ovaj način, primenom Omovog zakona, otpornost kablova R_c može se zanemariti prilikom merenja nepoznate otpornosti.



Sl. 28, Merenje otpornosti ommetrom bez i sa Kelvinovim kontaktima je prikazano na levom i desnom panelu, respektivno. Sa HI (eng. *high*) i LO (eng. *low*) su označeni krajevi / terminali ommetra. Bez obzira na oznake HI i LO, za merenje otpornosti nije važan smer vezivanja otpornika u kolo. Ove oznake su standardizovane u većini multimetara koji imaju opciju za merenje otpornosti (ommetar). Sa R_x je označena nepoznata otpornost, a sa R_c je označena otpornost kontakta.

Većina portabilnih (prenosivih) digitalnih multimetara (DMM od eng. *digital multimetar*) nema mogućnost vezivanja LO (eng. *low*) i HI (eng. *high*) ulaza sa 4 kontakta za precizno merenje relativno malih otpornosti. Međutim, u većini slučajeva, DMM imaju posebnu opciju za kalibraciju. Ta opcija je označena sa NULL dugmetom, koje se u nekim uređajima naziva i "Zero" ili "Delta". NULL dugme služi za kalibraciju instrumenta (u žargonu za nulovanje, podešavanje nule instrumenta) i NULL otpornost R_{null} se računa za kratko spojene krajeve HI i LO ($R_{null} = 2R_c$). Ta vrednost se "pamti"[12] u memoriji uređaja i prilikom merenja nepoznate otpornosti, vrednost merene otpornosti R_x koja se ispisuje na ekranu je jednaka:

$$R_x = R_{mereno} - R_{null}$$

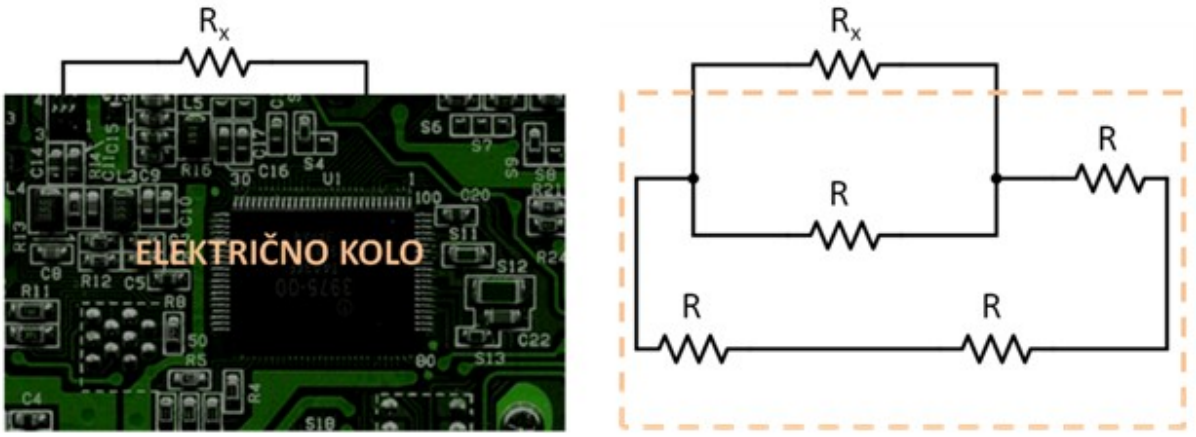
NULL dugme omogućava kalibraciju DMM-a za merenje ne samo otpornosti već i struje, induktivnosti, kapacitivnosti i napona.

[12] U većini uređaja, vrednost se memoriše dok je uređaj uključen ili dok je odabrana opcija za merenje otpornosti na DMM-u.

Jednostavno se dolazi do zaključka da je prilikom realizacije kalibracije potrebno postaviti HI i LO krajeve na sledeći način:

- za merenje struje: NULL vrednost se meri pri otvorenim krajevima HI i LO,
- za merenje induktivnosti: NULL vrednost se meri pri kratko spojenim krajevima HI i LO,
- za merenje kapacitivnosti: NULL vrednost se meri pri otvorenim krajevima HI i LO i
- za merenje napona: NULL vrednost e meri pri kratko spojenim krajevima HI i LO instrumenta.

Ako se krajevi DMM-a, koji je podešen za merenje napona, kratko spoje radi kalibracije, tada će se primetiti da (za razliku od merenja otpornosti) postoji neki relativno mali napon (reda μV) koji je različit od nule [35]. Ta pojava se naziva "kratkotrajna nestabilnost nule" i ako bi se duže posmatralo pokazivanje instrumenta moglo bi se uočiti dodatno sporije pomeranje nule tzv. *drift* instrumenta. Ovo je dokaz da se sistematska greška ne može u potpunosti ukloniti i najčešće se pretpostavlja da deo greške koji nije otklonjen ima slučajni karakter koji odgovara mernoj nesigurnosti tipa B. Za ovakvo pokazivanje voltmetra najčešće se pridružuje uniformna raspodela mernoj nesigurnosti tipa B, kako je ranije i pokazano [35]. U ovom merenju, najverovatnije poreklo *drift*-a je od šuma napajanja (50 Hz) koji se indukuje na krajevima instrumenta. Treba imati na umu da će se slična "kratkotrajna nestabilnost nule" i *drift* instrumenta desiti i prilikom kalibracije DMM-a za merenje stuje.



Sl. 29, Ilustracija merenja otpornosti otpornika koji je vezan u kolo.

Otpornost otpornika se ne meri, ako je otpornik vezan u kolo. Greška koja nastane ovakvim merenjem je gruba greška, jer je rezultat nestručnosti osobe koja rukuje instrumentom. Prvi razlog, zbog koga se otpornost otpornika koji je vezan u kolo ne meri je što u kolu može postojati izvor napajanja, a ommetar meri napon kada na krajeve otpornika dovede struju, pa će rezultujući napon biti jednak proizvodu nepoznate otpornosti i zbira struja u kolu i struje koju daje ommetar. Takvo merenje bi uticalo na tačnost merene vrednosti. Drugi slučaj je kada je otpornik vezan u kolo u kome nema napajanja. U opštem

slučaju nije poznato električno kolo u kome se otpornik nalazi (eng. *black box*), pa je velika verovatnoća da će doći do greške, odnosno da merena vrednost neće biti ista kao vrednost otpornika koji se meri $R_{mereno} \neq R_x$. Na slici 29 je dat primer merenja otpornika koji je vezan u električno kolo. Obzirom da je električno kolo *black box*, postoji mogućnost da je merena vrednost jednaka $R_{mereno} = R_x || \left(\frac{3}{4}R\right)$. Generalno, ovo pravilo se primenje i na ostale pasivne komponenete. Prema tome, ne treba meriti ni kapacitivnost kondenzatora ni induktivnost kalema kada su ti elementi vezani u kolo.

Ako je ipak potrebno izmeriti vrednost pasivne komponente koja je vezana u kolo, tada se ili koristi uputstvo proizvođača za oznake komponenata (u prethodnom poglavlju je bilo objašnjeno kako se *Color Code* koristi za očitavanje vrednosti otpornika) ili se bar jedan terminal komponente razveže (u najčešćem slučaju odlemi iz kola).

3.1.2 U / I metoda za merenje nepoznate otpornosti

Najčešće korišćene metode za merenje vrednosti pasivnih električnih veličina (otpornost, kapacitivnost i iduktivnost) su U / I metode. Ove metode su zasnovane na primeni voltmetra i ampermetra za merenje napona i struje, respektivno. Različita kola koja su u upotrebi omogućavaju da se nepoznata vrednost meri indirektno i da se procenjuje na osnovu odgovarajućeg odnosa električnih veličina i relacija.

Ampermetrom se meri struja I koja prolazi kroz otpornik, a voltmetrom se meri napon U na krajevima otpornika. Primenom Omovog zakona računa se nepoznata otpornost R_x:

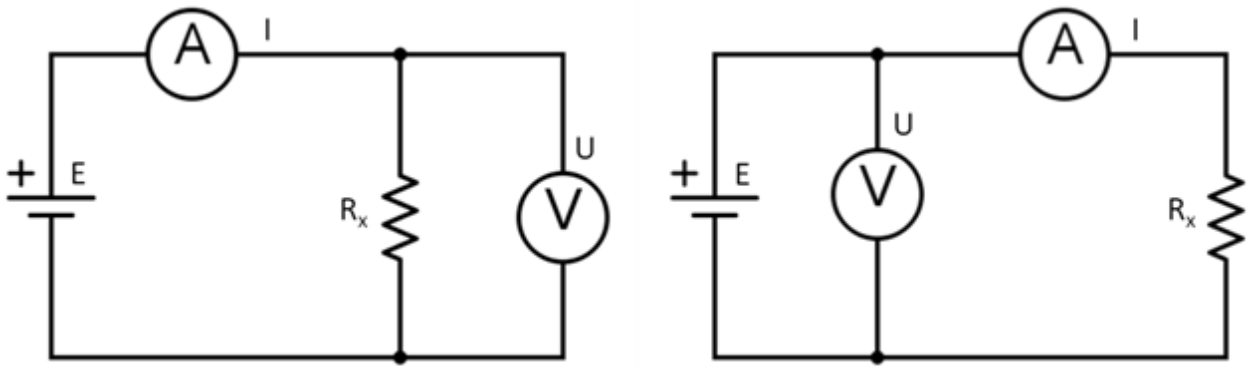
$$R_x = \frac{U}{I} \qquad \text{Relacija 80}$$

Ova metoda se retko koristi u praksi i najčešće je u upotrebi u laboratorijama. Osobine ove metode su:

- potrebna su dva merna instrumenta (ampermetar i voltmetar),
- potrebno je dodatno računanje (primena Omovog zakona),
- postoji pad napona na ampermetru i pad struje na voltmetru (ampermetar i voltmetar imaju realne otpornosti koje unose "parazitne" efekte u kolo),
- jednostavna metoda – zasniva se isključivo na primeni Omovog zakona i
- može da se propusti struja koja bi prolazila kroz otpornik u radnom režimu odnosno može se meriti nepoznata otpornost dok je otpornik u radnom režimu koji odgovara potrebama elektronskog kola koje se projektuje.

Postoje dve šeme koje se koriste za merenje nepoznate otpornosti U / I metodom (slika 30): naponska veza i strujna veza. U naponskoj vezi, ampertmetar se prvo vezuje redno sa izvorom napajanja, a u

strujnoj se prvo vezuje voltmetar paralelno sa izvorom napajanja kao što je prikazano na levom i desnom panelu na slici 30, respektivno.

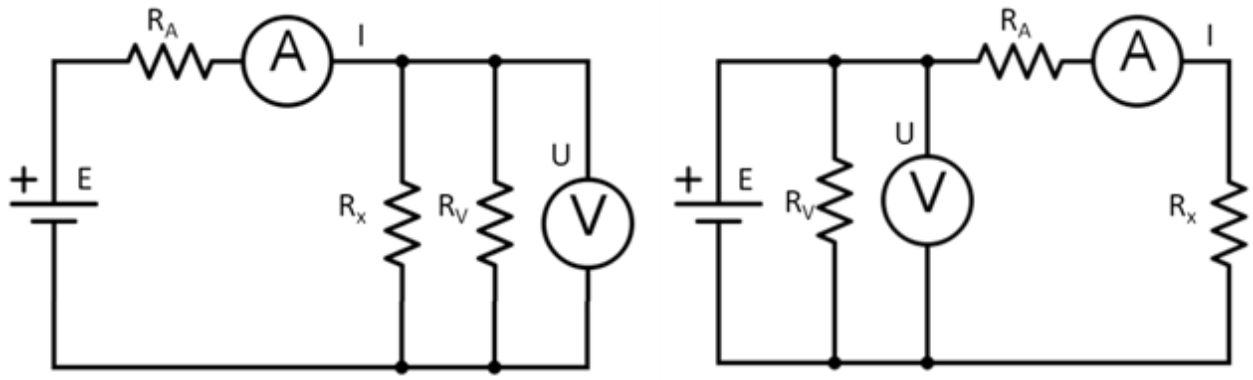


Sl. 30, Naponska veza na levom panelu i strujna veza na desnom panelu za merenje nepoznate otpornosti R_x, respektivno. Ovde treba podsetiti da se ampermetar vezuje redno, a voltmetar se vezuje paralelno u kolo.

Na slici 31 prikazane su realne šeme naponske i strujne veze u kojima unutrašnje otpornosti ampermetra R_A i voltmetra R_v se ne mogu zanemariti. Odnos merenog napona i struje primenom naponske veze je:

$$\frac{U}{I} = \frac{R_v R_x}{R_x + R_v} \qquad \text{Relacija 81}$$

Omov zakon za merenje nepoznate otpornosti R_x se može koristiti, pod uslovom da je unutrašnja otpornost voltmetra mnogo veća od nepoznate otpornosti: $R_x \ll R_v$. Obično se zbog ovog ograničenja kaže da naponska veza služi za merenje "malih otpornosti", gde se misli na otpornosti koje su mnogo manje od unutrašnje otpornosti voltmetra.



Sl. 31, Realna naponska veza na levom panelu i realna strujna veza na desnom panelu sa prikazanim unutrašnjim otpornostima.

Slično, za strujnu vezu se može izvesti odnos merenog napona i struje u zavisnosti od nepoznate otpornosti i unutrašnjih otpornosti instrumenta primenom Kirhofovih zakona:

$$\frac{U}{I} = R_x + R_A \qquad \text{Relacija 82}$$

Iz prethodnog izraza u relaciji 82 se vidi da je merenje tačno jedino u slučaju kada je unutrašnja otpornost ampermetra mnogo manja od otpornosti otpornika koji se meri: $R_x \gg R_A$. Kaže se da se strujna veza koristi za merenje "velikih" otpornosti i ovde se misli na merenje otpornosti koje su mnogo veće od unutrašnje otpornosti ampermetra.

Može se zaključiti da odabir ampermetra tj. unutrašnje otpornosti ampermetra ne utiče na tačnost merenja prilikom korišćenja naponske veze i da odabir unutrašnje otpornosti voltmetra ne utiče na tačnost merenja prilikom korišćenja strujne veze.

U slučaju da nisu ispunjeni uslovi za primenu naponske i strujne veze, moguće je izvršiti korekciju kako ne bi došlo do sistematske greške i primeniti izraze za nepoznatu otpornost koji uključuju unutrašnje otpornosti instrumenata.

3.1.3 Merenje otpornosti metodom poređenja i metodom zamene

Otpornost je moguće izmeriti i koristeći samo jedan instrument (ampermetar ili voltmetar) uz pomoć dodatne unapred poznate etalonske otpornosti R_e kao što je prikazano na slici 32. Ove metode (metoda poređenja i metoda zamene) nisu široko rasprostranjene u praksi, ali imaju edukativni značaj u električnim merenjima. Osnovne osobine ove dve metode su [30]:

- koristi se jedan merni instrument (ili ampermetar ili voltmetar),
- potrebno je dodatno računanje kako bi se dobila tražena vrednost,
- potrebna je dodatna poznata / etalonska otpornost R_e,
- potrebno je zadovoljiti uslov da su etalonska R_e i merena veličina R_x što “sličnije” (istog reda veličine) i
- jednostavne su metode – zasnivaju se na primeni Omovog zakona.

U rednoj vezi (levi panel na slici 32), potrebno je izmeriti napon na oba otpornika i na osnovu ta dva napona i etalonske otpornosti odrediti nepoznatu otpornost. Kako se koristi voltmetar, da bi merenje bilo tačno potrebno je zadovoljiti uslov da unutrašnja otpornost voltmetra bude mnogo veća od etalonske i nepoznate otpornosti: $R_v \gg R_e$ i $R_v \gg R_x$. U opštem slučaju potrebno je da etalonska

4 INSTRUMENTI ZA MERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA

Bilo da se u praksi koriste digitalni instrumenti koji imaju odgovarajući korisnički interfejs (najjednostavniji u obliku numeričkog displeja) sa kog se mogu očitati odgovarajuće brojne vrednosti merene veličine ili analogni instrumenti koji se zasnivaju na elektro-mehaničkom principu i na kojima je kazaljka usmerena ka merenoj vrednosti na skali, svi instrumenti se zasnivaju na istim fizičkim principima [7]. S toga je veoma važno, posebno sa stanovišta obrazovanja, razumevanje osnovnih fizičkih principa na kojima su zasnovani merni instrumenti.

4.1 Princip rada osnovnih mernih instrumenata

Idealan ampermetar ima unutrašnju otpornost 0, a idealan voltmetar ima unutrašnju otpornost koja je beskonačna. Međutim, ovo nisu svojstva realnih instrumenata. Zato se moraju zadovoljiti određena praktična ograničenja, odnosno potrebno je da unutrašnja otpornost ampermetra bude što je moguće manja, a voltmetra što je moguće veća. Kako se voltmetar vezuje paralelno u kolo, a ampermetar redno, to se jednostavno dolazi do zaključka kakvi su aproksimativni modeli ova dva instrumenta u električnim kolima:

1. voltmetar se aproksimira otvorenom vezom (element beskonačne ili što veće otpornosti) i
2. ampermetar se aproksimira kratkim spojem (element nulte ili što manje otpornosti).

Zahvaljujući svojoj konstrukciji, ampermetri i voltmetri (koji se najčešće koriste kao elementi DMM-a) imaju mogućnost prikaza merene struje i napona numerički na ekranu instrumenta ili na displeju sa kazaljkom i graduisanom skalom. U ovom poglavlju biće predstavljeni osnovni fizički i električni principi koji se koriste za konstrukciju ovih uređaja.

Princip rada analognih instrumenata može se zasniviati na elektro-mehaničkim ili elektronskim principima. Prednosti elektro-mehaničkih instrumenata su što ampermetri i voltmetri ne zahtevaju dodatan izvor napajanja, pa u nekim primenama klasičan indikator na analognom instrumentu sa kazaljkom može biti prednost. Mane ovakvih instrumenata su što su njihove karakteristike relativno lošije u pogledu tačnosti (klase tačnosti) i ulazne otpornosti u poređenju sa digitalnim instrumentima. Merenje sa ovim instrumentima ne može da se automatizuje. Postoji više realizacija elektro-mehaničkih instrumenata [29]:

1. sa pokretnim kalemom,
2. sa pokretnim gvožđem,
3. sa pokretnim magnetom,
4. sa unakrsnim kalemima,
5. elektrodinamički,

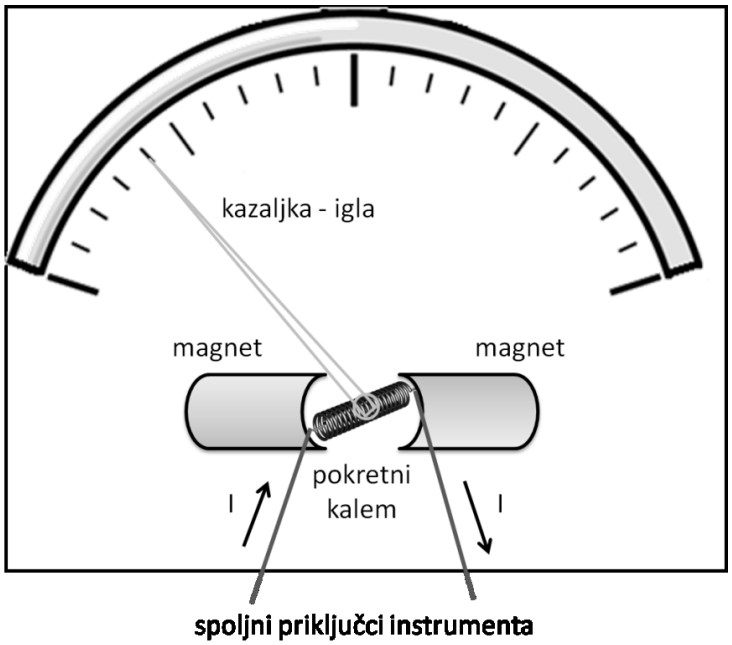
6. elektrostatički i
7. termoelektrični.

U ovom udžbeniku biće prikazani i objašnjeni principi rada instrumenata sa pokretnim kalemom i instrumenata sa pokretnim gvožđem, kako su to najčešće korišćeni principi za projektovanje instrumenata u električnim merenjima.

4.1.1 Instrument sa pokretnim kalemom

Ako se na krajeve metalne žice dovede struja, u tom slučaju će se stvoriti neko magnetsko polje u okolini provodnika (metalne žice) kroz koji teče struja. Indukovano magnetno polje jednostavno se može detektovati ako se u okolini žice kroz koju teče struja postavi kompas. Usled dejstva magnetnog polja igla kompasa će skretati [24]. Na ovom principu moguće je meriti struju kroz provodnik. Prilikom projektovanja ovih instrumenata se ne koristi metalni provodnik, već kalem koji omogućava indukovanje magnetnog polja veće magnetne indukcije u odnosu na magnetno polje indukovano metalnom žicom.

Instrumenti koji su projektovani za rad na ovom principu, nazivaju se instrumenti sa pokretnim kalemom. Najčešće se projektuju pomoću bakarne žice koja je obmotana oko jezgra od gvožđa i postavljena između polova magneta kao što je prikazano na slici 46.



Sl. 46, Prikazana je pojednostavljena šema ampermetra sa pokretnim kalemom sa označenim osnovnim elementima i strujom *I* koju meri ampermetar.

5 MERENJE NEELEKTRIČNIH VELIČINA

U ovom poglavlju objašnjeno je merenje neelektričnih veličina primenom metoda i instrumentacije za merenje električnih veličina. Najčešće se pre primene prethodno opisanih metoda i instrumenata vrši konverzija neke fizičke veličine u električnu veličinu primenom posebno za to namenjenih uređaja.

Pretvarač je uređaj koji omogućava konverziju jedne u drugu fizičku veličinu. Senzor je pretvarač koji omogućava pretvaranje neke fizičke veličine u električnu. Da bi se izmerila fizička veličina, neophodno je primeniti metode merenja električnih veličina i odgovarajuće transformacije koje su rezultat odabira senzora. Postoji relativno veliki broj senzora koji se koriste u različitim primenama i koji se zasnivaju na različitim principima detekcije. Primer senzora rastojanja koji se koristi u automobilskoj industriji dat je na slici 76.

Ako za funkcionisanje senzora (pretvaranje neke fizičke veličine u električnu) nije potrebno dodatno ulaganje energije, tada se takav senzor naziva pasivni senzor. Međutim, ako je potrebno dodatno ulaganje energije (izvor napajanja), onda je senzor aktivan. Pasivni senzori mogu biti i neki od osnovnih pasivnih elemenata električnih kola čiji je princip merenja opisan u prethodnim poglavljima. Na primer, senzor može biti i otpornik koji promenu električne veličine otpornosti pretvara u fizičku veličinu promenu toplote. Takav senzor se naziva termistor.



Sl. 76, Primer primene senzora rastojanja u automobilima. Slika je preuzeta sa sajta uz dozvolu i zahvalnost Volkswagen-u UK (With thanks to Volkswagen UK).

Neke osnovne statičke karakteristike senzora su:

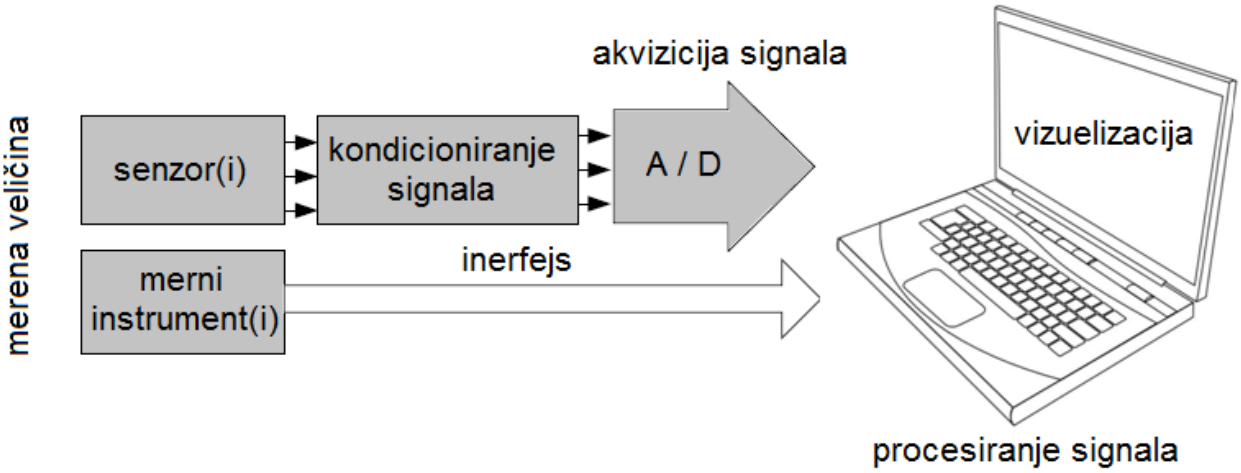
1. radni opseg (minimalna i maksimalna vrednost koju senzor može da meri),
2. stabilnost,
3. tačnost i preciznost,
4. histerezis,

6 MERNI INSTRUMENTI ZASNOVANI NA PRIMENI RAČUNARA

Merni eksperiment se obavlja sa ciljem da se eksperimentalna pretpostavka usvoji ili odbaci ili sa ciljem određivanja kvantitativne karakteristike neke električne (u opštem slučaju fizičke) veličine. Uobičajena procedura u mernim eksperimentima uključuje sledeće korake:

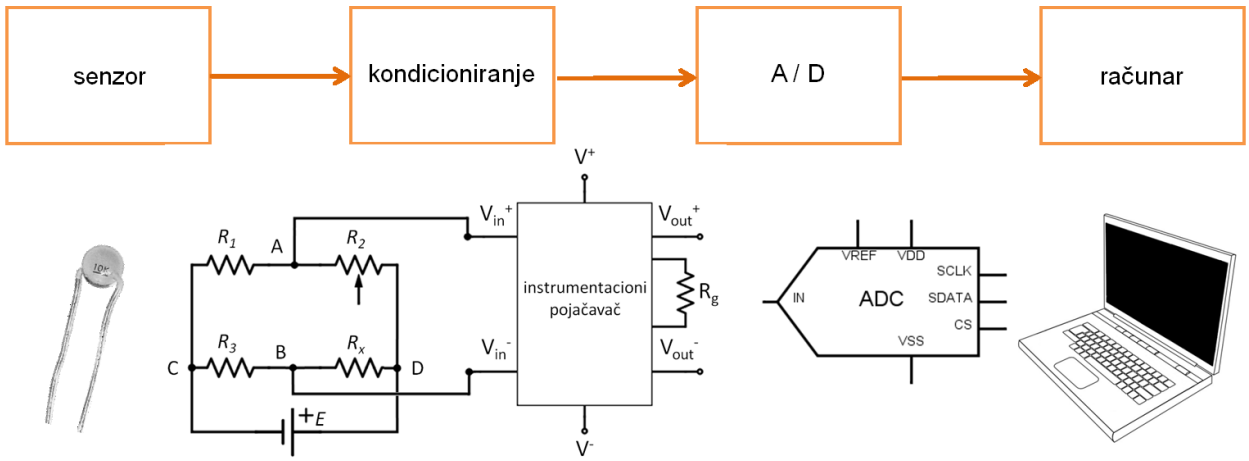
1. postavka električnog (u opštem slučaju fizičkog) i/ili matematičkog modela posmatranog procesa,
2. konverzija merene vrednosti u električnu veličinu (u slučaju kada se ne meri električna veličina direktno),
3. kondicioniranje signala (na primer: pojačanje, filtriranje),
4. akvizicija podataka (multipleksiranje podataka i A / D (eng. *analog to digital*) konverzija, prenos signala),
5. procesiranje signala (na primer: određivanje parametra od interesa, određivanje merne nesigurnosti, određivanje Furijeove transformacije) i
6. vizuelizacija i/ili prenos podataka (*online* ili *offline*).

Većina ovih operacija može biti automatizovana uz pomoć računara. Primer mernog sistema dat je na slici 92 sa osnovnim delovima (senzor, kola za kondicioniranje signala, akcizicija signala, interfejs i računar na kome se vrši vizuelizacija signala i obrada signala).

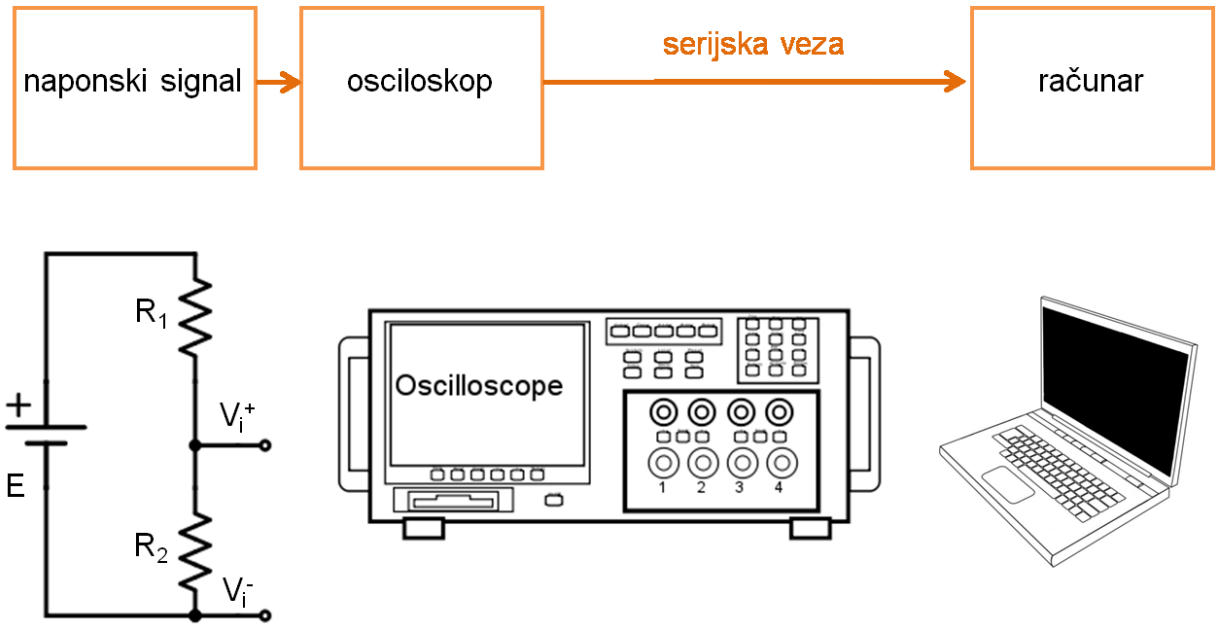


Sl. 92, Blok dijagram primera mernog sistema koji se zasniva na primeni računara je prikazan na slici. Umesto projektovanog sistema (senzor, kondicioniranje, A / D), može se koristiti i merni instrument koji je povezan direktno sa računarom (kao na slici dole). Umesto računara, moguće je koristiti mikrokontroler itd.

Pod mernim sistemom koji se zasniva na primeni računara, podrazumeva se skup alata, metoda i operacija (hardver i softver) koji su projektovani tako da mogu da izmere fizičku veličinu. Na primer, ako je potrebno izmeriti temperaturu korišćenjem PTC termistora i ako je pri tom na raspolaganju odgovarajuća akviziciona kartica (A / D kartica) koja omogućava digitalizaciju signala, onda je moguće primenom računara izmeriti signal i prikazati ga na računaru. Merni sistem koji se koristi za ovo merenje je prikazan na slici 93.



Sl. 93, Primer mernog sistema koji koristi PTC termistor (senzor ili u opštem slučaju pretvarač) povezan u Vitstonov merni most čiji se izlaz vodi na instrumentacioni pojačavač (električna kola za kondicioniranje signala), potom na koji se vodi na A / D (ADC - *Analog to Digital Convertor*) karticu koja je povezana sa računarom.



Sl. 94, Primer mernog sistema koji se koristi za merenje napona primenom osciloskopa koji je serijskom vezom povezan sa računarom. Na računaru je moguće prikazati signal i projektovati programski kod koji bi omogućio računanje ukupne merne nesigurnosti za merenje napona.

Ako je na primer potrebno izmeriti napon digitalnim osciloskopom TDS220 (Tektronix), snimiti napon na računaru i izračunati mernu nesigurnost tipa A i tipa B, moguće je koristiti merni sistem prikazan na slici 94. U primeru sa slike 93 prikazano je kako je moguće realizovati merni sistem zasnovan na primeni računara kada je na raspolaganju senzor i odgovarajuća kola za kondicioniranje i digitalizaciju signala. Međutim, na slici 94 je prikazan primer povezivanja mernog instrumenta sa računarom i merenje signala.

Generalizovana šema (slika 92) obuhvata oba slučaja: na gornjem panelu je prikazan merni sistem koji sadrži kola za kondicioniranje kao na slici 93, a na donjem panelu je prikazan primer koji omogućava povezivanje mernog instrumenta sa računarom kao na slici 94.

6.1 Električni model

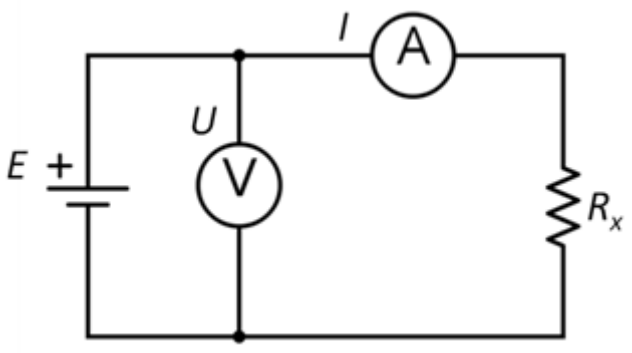
Kako bi se izmerila neka električna veličina, posebno u slučaju kada je merenje nepoznate veličine y indirektno i zavisi od direktnog merenja $x_1,\ x_2, \dots ,\ x_n$ (u opštem slučaju postoji n veličina koje su izmerene primenom direktne metode). Ova relacija se može zapisati kao:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \qquad \text{Relacija 148}$$

Relacija 148 (funkcija $f(\cdot)$) predstavlja električni model koji je potrebno odrediti za merenje nepoznate veličine y. Na primer ako se meri nepoznata otpornost korišćenjem strujne veze, onda se prema električnom modelu (prikazan na slici 95) može koristiti sledeća funkcija za računanje nepoznate otpornosti:

$$R_x = f(U, I) = \frac{U}{I} \qquad \text{Relacija 149}$$

U ovom slučaju direktno merene veličine su napon na krajevima otpornika U i struja koja protiče kroz optornik I. Električni model koji je predstavljen relacijom 149 je dobijen na osnovu Omovog zakona.



Sl. 95, Strujna veza za merenje nepoznate otpornosti R_x.

7 TRENDOVI U SAVREMENIM MERNIM SISTEMIMA

7.1 Merenja u dopunjenoj i pojačanoj realnosti

Za projektovanje aplikacija u dopunjenoj (eng. *augmented*) realnosti koriste se senzori i metode za merenje električnih signala. Dopunjena realnost je modifikovana / pojačana realnost u kojoj postoji direktan prikaz fizičkog, realnog sveta u kome su prikazani elementi "pojačani" informacijama koju su izmerene. Merenja u dopunjenoj realnosti imaju za cilj projektovanje novih i unapređenje postojećih interfejsa između čoveka i računara. Ovi interfejsi su zasnovani na povratnoj informaciji koja se dobija obradom merenih signala. Osnovne prednosti ovih sistema su: olakšano izvršavanje zadataka, pomoć osobama sa invaliditetom, povećanje pouzdanosti i bezbednosti svakodnevnih aktivnosti i proširenje interakcije čoveka i računara i namenskih računarskih sistema (u opštem slučaju okruženja).

Većina elektronskih uređaja koji se koriste pri svakodnevnim aktivnostima pružaju jednostavnu povratnu informaciju korisniku (npr. LED indikator na kućnim aparatima, alfanumerički displej na digitalnom aparatu za merenje krvnog pritiska i drugi).



Sl. 119, Kuhinja sa hiper – realnim elementima, tekuća voda je pojačana svetlom u boji koje ukazuje na merenu temperaturu. Slika je preuzeta iz [6] uz dozvolu od prof. Leonarda Bonanija, MIT Media Laboratory (Courtesy of prof. Leonardo Bonanni, MIT Media Laboratory).

Dopunjena realnost objedinjuje elemente virtuelne realnosti koji su pripojeni elementima realnosti u okruženju. Osim dopunjene realnosti, postoji i pojačana realnost (eng. *hyper-reality*) koja se zasniva na informacijama koje su dobijene sa senzora i koje imaju za cilj da "pojačaju" informacije iz okruženja. Primer pojačane realnosti je baterija za vodu sa LED osvetljenjem, koja omogućava korisniku da osim što

može dodirom da proceni temperaturu vode, da može i vizuelno da proceni temperaturu vode kao što je prikazano na slici 119. Pokazano je u [6] da je prikaz toplije vode crvenom bojom i hladnije vode plavom bojom intiutivan za korišćenje i kod korisnika koji su se prvi put susreli sa ovim interfejsom u praksi.

Dopunjena i pojačana realnost imaju primenu i u projektovanju interfejsa koji služe za pomoć u radu tehničara prilikom popravke štampača, astronautima tokom ekspedicija i hirurzima kao dodatna pomoć u obavljanju hirurških zahvata [6]. Međutim, dopunjena realnost se pokazala i kao nepogodna za veliki broj primena, jer je prikaz informacije u najvećem broju slučajeva u formi teksta i grafika, pa nisu jednostavni za razumevanje i praćenje. Za sada su svi ovi sistemi sa većim uspehom primenjeni u industriji zabave i pametnom okruženju (kao npr. pametna kuća).

Primer ovakvih interfejsa je IonRoad aplikacija koja omogućava da se na osnovu snimka koji se dobija kamerom na pametnom telefonu vrši prepoznavanje objekata u okruženju u vozilu. Na taj način se vozač upozorava na moguće opasnosti na putu. Ovaj softver dodatno omogućava merenje signala sa raznih senzora u automobilu, na osnovu kojih se na primer procenjuje rastojanje između vozila koje se nalazi ispred korisnika. Ovo je aplikacija koja je potpuno besplatna koristi GPS (eng. *Global Positioning System*), žiroskope (senzor ugaone brzine) i video kameru kako bi se odredila pozicija automobila na putu i omogućila povratna informacija korisniku u vidu brojeva, boja ili audio upozorenja. Rezultat merenja može biti dodat video snimku, pa vozač ima mogućnost prikaza pojačane realnosti na mobilnom uređaju u automobilu.

Još jedan primer dopunjene realnosti je opisan u [31] za čije se potrebe mere zapremina i rastojanja karakterističnih tačaka jetre i tumora jetre i to merenje se koristi za prikaz dopunjene realnosti koja ima za cilj planiranje hirurških zahvata. Jedan princip merenja koji se može koristiti za estimaciju zapremine jetre i tumora jetre je vokselizacija. Ova metoda se zasniva na pretpostavci da je 3D prostor predstavljen vokselima kojima u 2D prostoru odgovaraju pikseli, pa se na računarski pogodan način vrši "prebrojavanje" voksela unutar regije od interesa. Sva merenja zasnovana na slici, odnosno procena merenja iz voksela, se mogu svesti pod zajednički termin: vizuelna metrologija [37]. Kako bi se merenja zapremine ili rastojanja omogućila, jer slika ne pruža uvid u dimenzije u praksi se uvode dva značajna modela: 1) pretpostavka matematičkog 3D modela na osnovu koga se vrši merenje i 2) dodavanje referentnog objekta na sceni. Jedna realizacija praktične primene uz dodavanje referentnog objekta (2D marker - papir sa odštampanim crnim markerima) je aplikacija za procenu dimenzija nameštaja i smeštanje nameštaja u prazan prostor primenom dopunjene realnosti. Ovde bi se moglo reći i da se radi o kombinovanoj realnosti jer se komad nameštaja može fotografisati (njegov oblik i dimenzije se procenjuju), pa se onda kao takav dodaje u scenu. Ograničenje ove metode je što se tačnost merenje menja u zavisnosti od položaja referentnog objekta. Autori u [37] su sugerisali da bi dodavanje drugih senzora (npr. senzora rastojanja) u budućnosti moglo da poboljša kvalitet ovakvih merenja i prikaza u dopunjenoj / kombinovanoj ralnosti.

Za merenja u dopunjenoj i merenja u pojačanoj realnosti treba voditi računa o metodama koje se primenjuju za analizu i prikaz signala, jer ovi sistemi rade u realnom vremenu i toleriše se njihovo kašnjenje koje ne sme biti veće od kognicije operatera i korisnika (u praksi do 1 sekunde).

Jedna od medicinskih primena pojačane realnosti je korišćenje merenja na osnovu NIRS (eng. *Near Infrared Spectroscopy*) tehnike za vizuelizaciju krvnih sudova. Uređaj VienVIEWER (Cristie Medical Holdings, Inc., USA) uključuje projekciju slike na površinu kože pacijenta koja se menja u realnom vremenu i koja prikazuje direktno na koži krvne sudove. Ovaj uređaj se koristi za vizuelizaciju i lokalizaciju krvnih sudova prilikom intravenskih intervencija.

Ovi sistemi su još uvek u razvoju, ali njihova ubrzana primena u raznim oblastima ukazuje da je najverovatnije, po mišljenju Autora ovog udžbenika, da će ovi sistemi predstavljati buduću važnu oblast merenja.