

OSNOVE METROLOGIJE I MERENJA

DR MIODRAG STEVIĆ, DIPL. INŽ. MAŠ.

UVOD

Merenje i kontrola je prateći i nerazdvojni deo proizvodnje, razmene rada i dobara i postojalo je na svim civilizacionim nivoima ljudskog društva. Sa razvojem nauke i tehnike razvijali su se i unapredjivali instrumenti i uređaji za merenje, merne metode i merni sistemi. Metode i sredstva merenja u proizvodnji su, pri tome, usaglašeni sa tehnologijom obrade, proizvodnim sistemima i proizvodnim organizacionim metodama.

UVOD

Svako merenje je povezano sa određivanjem brojnih vrednosti fizičkih veličina uz pomoć kojih se ostvaruju zakonitosti pojava koje se ispituju. Izmeriti neku veličinu, znači utvrditi njen brojni odnos sa nekom drugom istorodnom veličinom, pri čemu je usvojena merna jedinica. Pri merenju je potrebno obezbediti podatke o različitim fizičkim veličinama: diskretnim i neprekidnim, konstantnim i promenjivim, zavisnim i nezavisnim.

Osnovne veličine su npr.: dužina, vreme, masa, jačina svetlosti itd. Izvedene veličine su: površina, brzina, zapremina itd.

UVOD

Zbog toga, merenje se smatra procesom fizičkog izjednačavanja date veličine sa njenom fizičkom vrednošću koja je uzeta za jedinicu mere. Polazeći od ovakvog stava i ako se uvedu oznake Q za merenu veličinu, $[Q]$ za mernu jedinicu i q za brojnu vrednost veličine koja se meri u usvojenim mernim jedinicama, može se napisati izraz:

$$Q = q [Q]$$

Na taj način rezultat merenja se predstavlja kao kvantitativna informacija o osnovnim svojstvima mernog objekta, dobijena kao rezultat fizičkog procesa sa određenim stepenom tačnosti.

UVOD

Problem mera i merenja je dosta kompleksan i njime se bavi nauka o jedinstvu mera i tačnosti merenja – metrologija (od reči grčkog porekla: metro - mera, logos – učenje).

Jedinstvo merenja je stanje merenja kod koga su rezultati merenja i merna nesigurnost poznati sa odredjenom verovatnoćom. Mere moraju, pri tome biti izražene u zakonskim jedinicama. Jedinstvo merenja je neophodno da bi se rezultati merenja sa različitim instrumentima, u raznim regijama i vremenskim razdobljima mogle uporedjivati. Jedino će na taj način biti moguća zamenljivost delova i razmena u nacionalnoj i medjunarodnoj podeli rada.

UVOD

Savremena metrologija je nauka o merenjima, metodama i sredstvima obezbeđenja njihovog jedinstva i načina postizanja potrebne tačnosti.

Metrologija se deli na opštu (teorijsku i eksperimentalnu) i primenjenu. Opšta metrologija se bavi fundamentalnim istraživanjima i stvaranjem sistema mernih jedinica, etalona i fizičkih konstanti, dok primenjena metrologija rešava praktične probleme merenja.

Proizvodna metrologija je deo primenjene metrologije koja se bavi tehnikom izvođenja merenja i izučavanjem skupa pravila, mernih uređaja i neophodnih mera za obezbeđenje potrebne tačnosti merenja.

UVOD

Ovde se navodi kratak istorijski pregled proizvodno-metroloških sistema koji je urađen prema [Kamp86, Wern81, Wern 82]. Do sada se mogu izdvojiti pet razvojnih etapa:

- ✓ Prva etapa je uzeta zaključno sa 1920. godinom. Osnovna karakteristika ovog perioda je da se u industrijsku proizvodnju i primenu uvode jednostruka merila, a otvorene su i prve fabrike proizvođači metrološke opreme.
- ✓ Druga etapa obuhvata period od 1920.-1940. u ovom periodu razvijeno je nekoliko tipova metroloških sistema kao što su: optimetar, ultra optimetar, ABBE-ova merna mašina, interferometar, Schmaltz-ov mikroskop za merenje hrapavosti i drugi. Ovaj period se posebno karakteriše po tome što je u merno kontrolne sisteme uvedena optika. Svi najznačajniji razvijeni metrološki sistemi bazirani su na zakonima optike.

UVOD

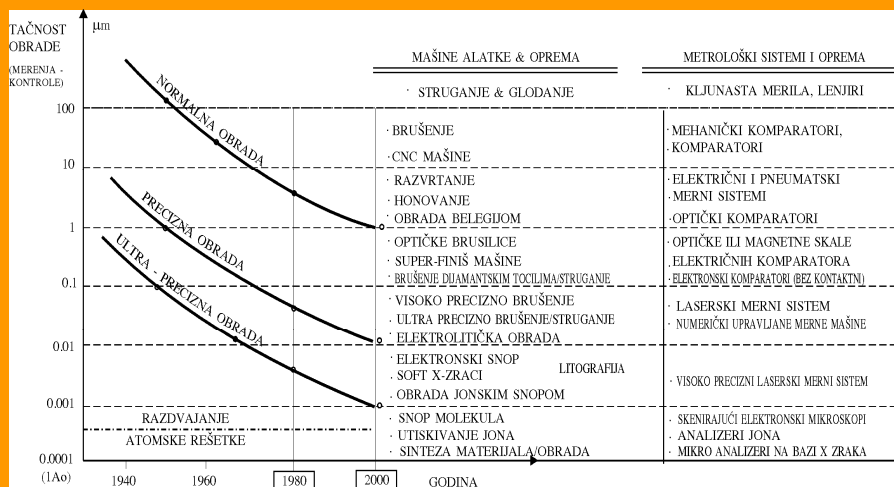
- ✓ Treći period je od 1940-1960. godine. U njemu je razvijen i primenjen interferentni mikroskop i induktivni merni sistemi. Otpočela je i proizvodnja metroloških sistema za hrapavost čiji princip rada nije bio zasnovan na optici. Ovaj period se posebno karakteriše otpočinjanjem industrijske proizvodnje metroloških sistema na bazi pneumatike.
- ✓ Četvrta etapa obuhvata period od 1960.-1980. godine. Ovaj period se karakteriše time što se u metrološkim sistemima primenjuje elektronika: tranzistori, integralna kola, počeci primene mikroprocesora i mikroračunara.

UVOD

- ✓ Poslednja etapa je od 1980. godine. Njena osnovna karakteristika je: Integracija metroloških procesa sa drugim procesima (obrada, manipulacija, transport, kontrola) u tehnološkim sistemima na bazi računarske podrške. Razvijene su NUMM četvrtog i petog tehnološkog nivoa sa mašinskim programiranjem. Razvijaju se metrološki sistemi na bazi digitalne obrade slike. Vrše se intenzivna istraživanja u oblasti inteligentnih metroloških sistema.

Danas možemo reći da je pod uticajem veštačke inteligencije otpočela nova etapa razvoja proizvodno metroloških sistema koji u inženjerskom merenju omogućavaju dalje korake ka inteligentnom naučno zasnovanom (uz pomoć baze znanja) i potpuno asocijativnom merenju.

RAZVOJ OBRADNE METALA REZANJEM I METROLOŠKIH SISTEMA



GREŠKE REZULTATA MERENJA

Svaki proces merenja praćen je neizbežnim greškama merenja. U zavisnosti od stepena savršenstva znanja, sredstava merenja i uslova u kojima se sprovodi merenje različita je i veličina ovih grešaka.

Rezultat svakog merenja javlja se kao funkcija dve nezavisne veličine, jedne koja odražava pravu vrednost merene veličine, i druge, koja predstavlja grešku njenog merenja. Prema tome, pod greškom merenja neke veličine treba smatrati razliku između rezultata merenja i prave vrednosti izmerene veličine.

Ako se prava vrednost izmerene veličine označi sa Q , a greška njenog merenja sa δx , tada se rezultat merenja x može predstaviti relacijom $x = f(Q, \delta x)$, odnosno $x = Q + \delta x$, odakle, sledi:

$$\delta x = x - Q$$

U tehnici merenja prava vrednost merene veličine je nepoznata. Razlog za to je nesavršenost merila. Smanjenjem greške merenje mi se sve više približavamo pravoj vrednosti merene veličine.

KLASIFIKACIJA GREŠAKA MERENJA

Klasifikacijom grešaka merenja prema određenim kriterijumima olakšava se njihova analiza, a takođe i matematička obrada rezultata merenja.

Greške merenja mogu se podeliti prema:

Zakonomernosti nastajanja grešaka:

- sistematske greške,
- slučajne greške i
- grube greške.

Karakteru vremenske promene veličine na:

- statičke greške i
- dinamičke greške.

KLASIFIKACIJA GREŠAKA MERENJA

Izvorima ili poretku nastanka na:

- greške mernog uređaja,
- methodske greške,
- subjektivne greške i
- greške vezane za stanje i uticaj spoljašnje okoline (temperatura, vlaga, vibracije, udari i sl.) na proces i rezultate merenja.

TAČNOST I PRECIZNOST MERENJA

Sa pojmom greške merenja neke veličine, direktno je povezana tačnost (T) i preciznost (P) merenja.

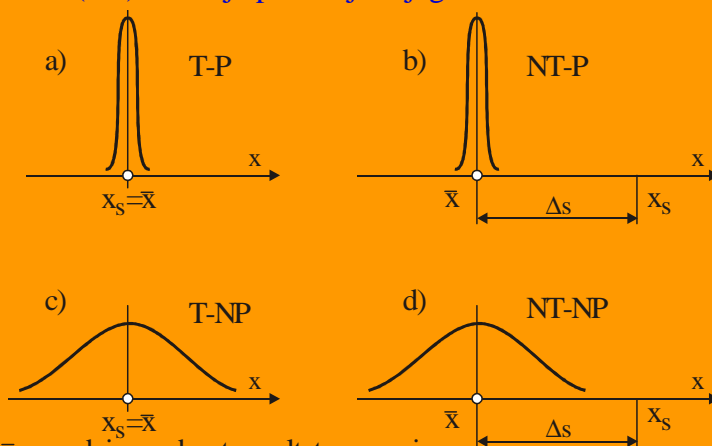
Pod tačnošću merenja podrazumeva se, u opštem slučaju, kvalitet ili valjanost merenja, tj. stepen bliskosti (slaganja) između rezultata merenja i prave vrednosti merene veličine.

Tačnost merenja neke veličine utoliko je veća, ukoliko je manja greška njenog merenja. Otuda se preko greške merenja kvantitativno izražava tačnost merenja date veličine.

Preciznost merenja definiše se ponovljivošću mernih rezultata, odnosno stepenom rasipanja ili uzajamnog podudaranja pojedinih mernih rezultata. Ti rezultati dobijeni su uzastopnim, višestrukim ponavljanjem merne operacije nad nekom mernom veličinom, čija je vrednost vremenski nezavisna (konstantna). To znači da je preciznost nekog merenja veća, ukoliko je manje međusobno rasipanje pojedinih vrednosti rezultata merenja u skupu rezultata ponovljenih merenja, ili ukoliko je međusobno podudaranje ovih vrednosti veće.

TAČNOST I PRECIZNOST MERENJA

Osnovne razlike između tačnosti, preciznosti, netačnosti (NT) i nepreciznosti (NP) merenja pokazuju dijagrami na slici



\bar{x} - srednja vrednost rezultata merenja
 x_s - prava vrednost merene veli-ine
 Δs - greška merenja

TAČNOST I PRECIZNOST MERENJA

Karakteristika rasipanja rezultata merenja, definisana graničnim greškama predstavlja mernu nesigurnost. Granične greške jednog merenja proračunavaju se kao proizvod srednjeg kvadratnog odstupanja jednog merenja s , iz niza merenja i broja t , utvrđenog u funkciji verovatnoće da greška neće premašiti granične vrednosti.

Srednje kvadratno odstupanje se određuje se prema obrascu:

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

gde je:

x_i – i-ti rezultat merenja i

\bar{x} – aritmetička sredina n rezultata merenja.

ETALONI MERNIH JEDINICA

Etalon jedinice je sredstvo merenja, ili kompleks sredstava merenja, koje obezbedjuje reprodukovanje i čuvanje jedinice sa ciljem da se ona prenese na merila niže klase tačnosti, odnosno na merila koja stoje niže na hijerarhijskoj šemi merila. U proizvodnoj metrologiji najvažniji etaloni su za merenje dužine (1 m) i ugla.

PODELA ETALONA PREMA KLASI TAČNOSTI

- **Primarni etaloni**

etalon koji je označen ili široko priznat da ima najviše metrološke kvalitete i čija je vrednost prihvaćena bez upućivanja na druge etalone iste veličine.

- **Sekundarni etaloni**

etalon čija je vrednost propisana poređenjem sa primarnim etalom iste veličine.

- **Referentni etalon**

etalon, koji uglavnom ima najviši metrološki kvalitet raspoloživ u datom mestu ili u datoj organizaciji, iz koga se izvode merenja koja se vrše.

- **Radni etalon**

etalon koji se redovno koristi za etaloniranje ili kontrolu materijalizovanih mera, merila ili referentnih materijala.

Transfer etalon (posrednik) i Putujući etalon (za transport).

PODELA ETALONA PREMA PRIPADNOSTI

- **Međunarodni etaloni**

etalon priznat međunarodnim sporazumom da na međunarodnom nivou služi kao osnova za pripisivanje vrednosti odnosno veličine drugim etalonima.

- **Nacionalni etaloni**

etalon priznat nacionalnom odlukom da služi, u državi, kao osnova za pripisivanje vrednosti odnosno veličine drugim etalonima.

Primarni etalon u svakoj zemlji, međutim, ne mora biti isti, niti jednak po klasi tačnosti sa međunarodnim etalom. Tačnost etalona zavisi od tehničkih i drugih potencijala svake zemlje, njihovih potreba i razvijenosti. Zato svaka zemlja donosi svoje etalone i hijerarhijsku šemu prenošenja mernih jedinica sa nivoa višeg na niže klase tačnosti.

PODELA ETALONA PREMA TIPU

- **Kolektivni etaloni**

Skup sličnih materijalizovanih mera ili merila koji, zajednički korišćeni, čine etalon zove se kolektivni etalon.

- **Grupni etalon**

Skup etalona izabranih vrednosti koji, pojedinačno ili u kombinaciji, obezbeđuju niz vrednosti veličina iste vrste, zove se grupni etalon.

- **Individualni etalon**

Etalon koji može sam da meri.

PODELA ETALONA PREMA MERNOJ VELIČINI

- Za dužinu
- Za masu
- Za temperaturu
- Električni etaloni
- Fotometrijski i radiometrijski etaloni, itd.

ETALONI U PROIZVODNOJ METROLOGIJI

Nova definicija metra zato glasi: *Metar je dužina putanje koju u vakuumu predje svetlost za vreme od 1/299 792 458 sekunde.* Za praktično ostvarenje ove definicije potrebne su instrukcije koje mogu da uključe i upotrebu narandžastog zračenja Kr 86.

Relativna merna nesigurnost ovako definisanog metra iznosi $\leq \pm 4 \cdot 10^{-9}$ m, dok je kod upotrebe etalona od platine i iridijuma iznosio $1 \cdot 10^{-7}$ m.

Pošto se talasna dužina menja sa promenom pritiska, a stvarna merenja se ne mogu vršiti u vakuumu, usvojeno je da se pod nominalnom merom podrazumeva mera pri 20°C, 101 324 Pa i 55% vlažnosti.

ETALONI U PROIZVODNOJ METROLOGIJI

U skladu sa SI (System International) u mašinstvu se na konstruktivnoj i tehnološkoj dokumentaciji koristi za dužine milimetar - $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$, a za određivanje tolerancija i hrapavosti mikrometar - $1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.

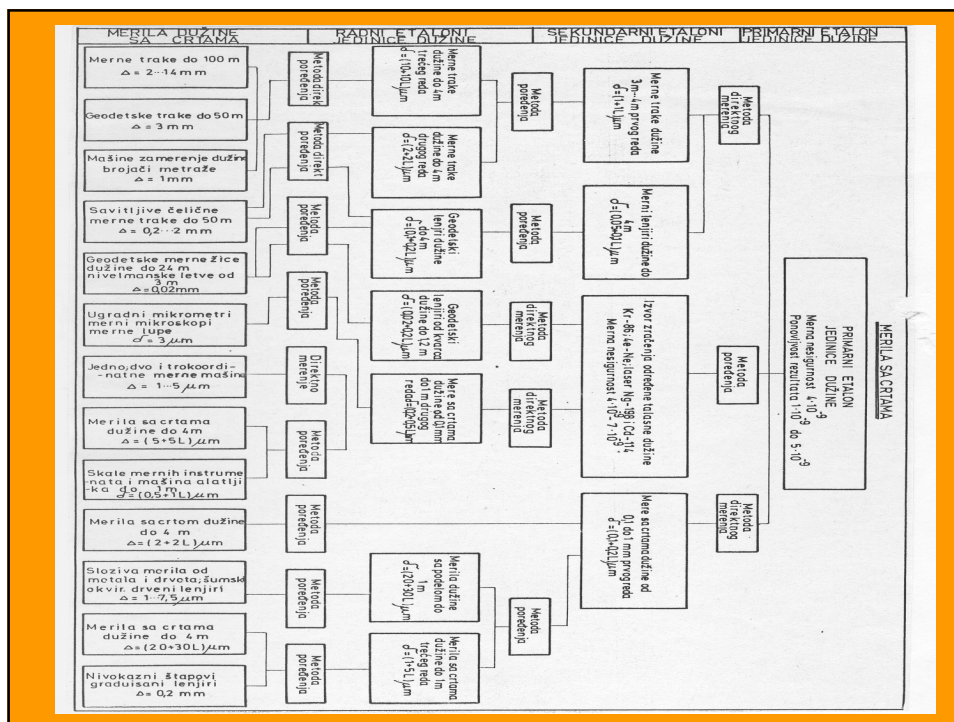
U tehnici merenja ugla imamo sledeće jedinice: prav ugao, radijan i stepen. Prav ugao je definisan kao ugao između dva pravca, koja se seku pod jednakim uglovima. Kako se prav ugao uvek može konstruisati, to nisu potrebni materijalizovani etaloni za njegovo definisanje. Za praktičnu primenu, međutim, etaloni su potrebni.

ETALONI U PROIZVODNOJ METROLOGIJI

Radijan je ugao čiji je vrh u centru kruga, a zahvata luk dužine radijusa. Definicijom radijana, merenje ugla je svedeno na merenje dve dužine.

Stepen je jedinica za merenje uglova, koja iznosi 360-ti deo punog kruga. Pri tome imamo sledeće odnose: $1^{\circ} = \pi/180 \text{ rad}$; $1' = 1^{\circ}/60 = \pi/10\,800 \text{ rad}$; $1'' = 1^{\circ}/3600 = \pi/648\,000 \text{ rad}$.

Na sl. 1.1 prikazana je predložena šema prenošenja sredstava merenja dužina, sa mernim metodama koje treba pri tome koristiti.



METODE MERENJA

Postupak merenja predstavlja niz sukcesivnih eksperimentalnih i drugih operacija koje se izvode u toku odvijanja procesa merenja.

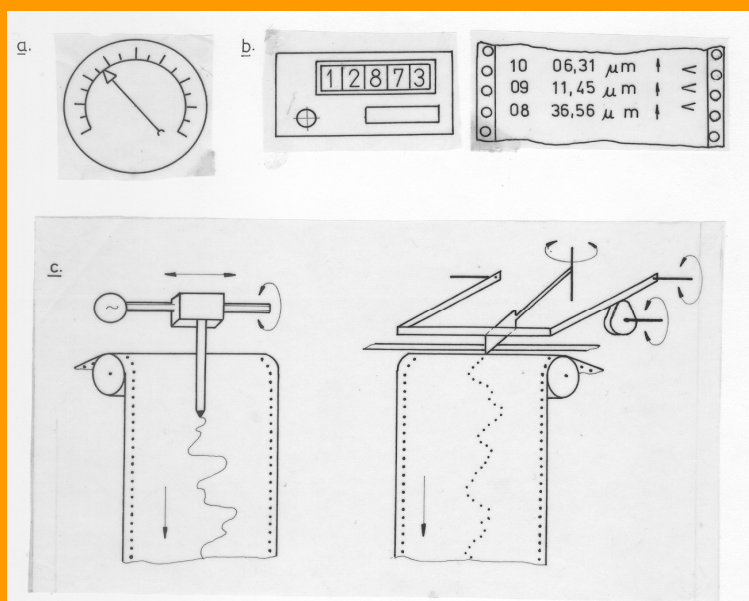
Brojnost kriterijuma usloveli su raznolikost i brojnost metoda merenja koje se koriste u proizvodnoj metrologiji. Medju nima su najpoznatije metode merenja:

- direktna i indirektna metoda,
- metoda skretanja i odbrojanja,
- kontaktna i beskontaktna metoda,
- diferencijalna i kompleksna metoda,
- metoda komparativnog merenja,
- metoda ravnoteže ili nulta metoda,
- kompenzaciona metoda.

METODE MERENJA

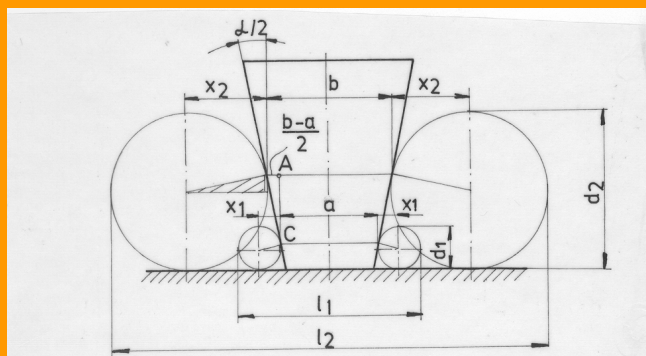
Direktna metoda merenja karakteriše se time da se vrednost merene veličine direktno određuje bez naknadnih preračunavanja. To su merenja uobičajena u proizvodnoj metrologiji - merenja dužina (lenjirima, kljunastim merilima i slično), uglova (uglomerima), itd. Oni omogućavaju očitavanje mere preko skale ili digitalnih pokazivača, zatim pisača i štampača. Ako je očitavanje mere preko skale, onda je to i metoda *skretanja*, a ako je preko digitalnog pokazivača - metoda *odbrojavanja*. Sl. 1.2 prikazuje pokazivače kod direktne metode: skale sa kazaljkom (a), digitalno očitavanje (b), pisače kontinualne i tačkaste (c).

METODE MERENJA



METODE MERENJA

Indirektna metoda se sastoji u tome, što se željena veličina dobija računskim, preko funkcionalne zavisnosti, a varijable predstavljaju merene veličine. Tako se trigonometrijskom metodom merenja uglova (sl. 1.3) mera ugla dobija korišćenjem trigonometrijskih funkcija, a mere se, ustvari, dužine.



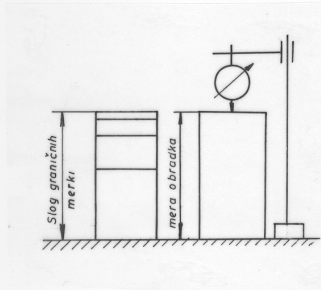
METODE MERENJA

Kontaktna metoda koristi instrumente čiji merni pipak dodiruje predmet u toku merenja, a *bekontaktna* koristi pojavu promene pritiska u zavisnosti od zazora (kod pneumatskih davača), optiku (profilprojektor, mikroskopi) i drugo.

Diferencijalna metoda omogućuje merenje svake dimenzije mernog predmeta pojedinačno, a *kompleksna* kontroliše valjanost predmeta i time omogućuje zamenljivost delova, ne ulazeći u merenje svake pojedine mere. Tako se tolerancijskim merilima za žljebaste osovine, navoje i drugo kontroliše samo da li je komad dobar (i sposoban za montažu i kasnije za remont), ili nije.

M E T O D E M E R E N J A

Komparativna metoda se koristi na dva načina. Jedan je kada se mereni predmet upoređuje (komparira) sa etalonom



Slika 1.4.

(sl. 1.4). Na taj način se u proizvodnji najčešće meri samo odstupanje od nominalne - podešene mere na instrumentu ili se direktno upoređuje sa graničnim merilima ili etalonom.

Ovaj način se po nekim autorima, naziva i diferencijalna metoda. Koriste se diferencijalni pneumatski davači, diferencijalni induktivni davači i slično, a upoređuje se merni predmet sa podešenom merom pomoću etalona.

Drugi način je kad se upoređuje ista mera dobijena sa više, obično različitih, instrumenata i metoda. Ovo se vrši kod vrlo tačnih merenja, obično kontrolisanja etalona i preciznih kontrolnika.

METODE MERENJA

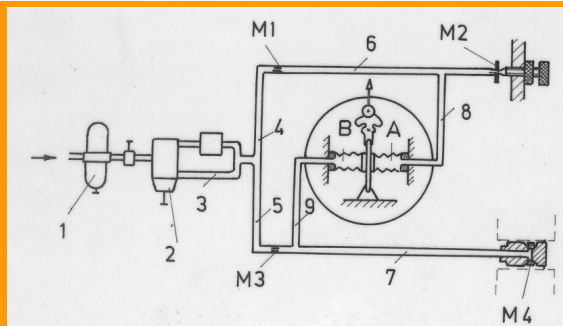
Nulta metoda se sastoji u tome da se razlika između referentne mere i stvarne mere predmeta svede na nulu i uspostavi ravnoteža. To se postiže kod merenja mase na terazijama, gde se kazaljka dovede na nulu, i tada uporedi masa tereta sa poznatom (referentnom) masom tegova.

Ovom metodom se mere i neelektrične veličine električnim putem i spadaju u vrlo tačna merenja. Uredjaji koriste Wheatstone-ove mostove, potencioetre (radi kompenzacije) i drugo.

M
E
T
O
D
E

Kompensaciona metoda merenja predstavlja kombinaciju dve metode - nulte i metode skretanja. Merni pribor se pre početka merenja reguliše (podešava) na primer sa graničnim merkama tako da analogni pokazivač pokazuje nulti položaj. Sa graničnim merkama smo podesili referentnu meru. Pri merenju radnog predmeta kazaljka će skretati od nultog položaja za veličinu δ , pa se izmerena vrednost dobija sabiranjem referentne vrednosti sa odstupanjem δ (sa predznakom).

Na sl. 1.5 prikazan je pneumatski davač koji radi na principu kompenzionog merenja.

M
E
R
E
N
J
A

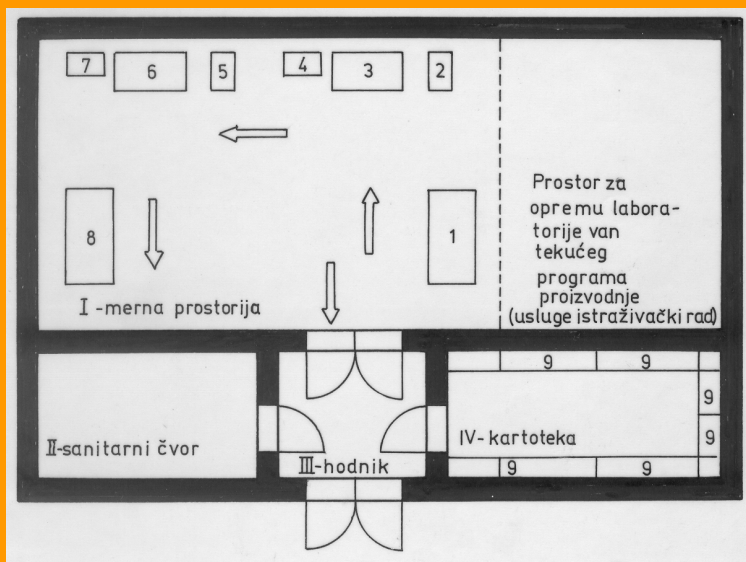
PROPISI PRI PROJEKTOVANJU MERNIH LABORATORIJA

Da bi precizno merenje bilo kvalitetno i da bi se odstranili svi spoljni uticaji koji utiču na kvalitet merenja, ono se mora vršiti u specijalno odabranoj prostoriji - laboratoriji za merenje (oddeljenje precizna kontrola), koja mora da zadovolji sledeće uslove:

Ukoliko postoji odstupanje od predviđenih uslova s obzirom na temperaturu i pritisak imamo da za predmete od čelika sa koeficijentom dilatacije $(11,5 \pm 1,5) 10^{-6}$, korekcija koja treba da se izvrši, iznosi za 1 mm dužine radnog predmeta:

- $10,56 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ pri odstupanju temperature za $+1^{\circ}\text{C}$
- $0,048 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ pri odstupanju za 1 kPa vazdušnog pritiska.

PROPISI PRI PROJEKTOVANJU MERNIH LABORATORIJA



**HVALA NA PAŽNJI
VAŠ
MIODRAG STEVIĆ**