

Univerzitet u Zenici



Mašinski fakultet

Katedra za automatizaciju i metrologiju

Mjerna tehnika

r.prof.dr. Nermina Zaimović-Uzunović

Zenica, 2006

**Besplatan
primjerak!**

Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1.	Metrologija-nauka o mjerenju i njen značaj	1
1.2.	Zadaci i podjela metrologije	3
1.2.1.	Podjela metrologije	4
1.2.2.	Međunarodne organizacije u području metrologije.....	11
1.3.	Historijski razvoj mjerenja i jedinica mjernih veličina.....	13
1.3.1.	Metarski sistem mjernih jedinica.....	15
1.4.	Međunarodni sistem mjernih jedinica - SI sistem	18
1.4.1.	Jedinice međunarodnog sistema	19
1.4.2.	Definicije osnovnih jedinica SI:	19
1.4.3.	Tvorba izvedenih mjernih jedinica	25
1.4.4.	Tvorba decimalnih jedinica:	25
1.5.	VIM i osnovni termini u metrologiji.....	27
2.	MJERENJE FIZIČKIH VELIČINA	34
2.1.	Principi mjerenja i kontrole	34
2.1.1.	Proces mjerenja	34
2.1.2.	Postulati mjerenja	35
2.1.3.	Kontrola (DIN 1319, DIN 2257, DIN 19222, ISO 286-1).....	38
2.1.4.	Princip mjerenja	39
2.2.	Podjela metoda i sredstava mjerenja	40
2.3.	Mjerni sistemi.....	50
2.3.1.	Karakteristike mjernih, sistema, pribora i instrumenata.....	51
2.3.2.	Osnovni principi mjerenja	58
2.3.3.	Problemi i ograničenja u mjerenju	59
2.4.	Električna mjerenja neelektričnih veličina.....	61
2.4.1.	Električni mjerni sistem.....	61
2.4.2.	Elektromehanička analogija.....	62
2.4.3.	Ulazne veličine.....	68
3.	MJERNA NESIGURNOST	74
3.1.	Uvod u mjernu nesigurnost.....	74
3.2.	Analiza grešaka mjerenja	75
3.2.1.	Srednja vrijednost mjerne veličine i greške	75
3.2.2.	Vrste mjernih grešaka.....	78
3.3.	Obrada rezultata mjerenja	90
3.3.1.	Obrada rezultata direktnih mjerenja	90
3.3.2.	Obrada rezultata posrednih mjerenja	91
3.3.3.	Granice nepouzdanosti rezultata posrednih mjerenja.....	93
3.3.4.	Obrada rezultata parametarskih mjerenja	94
3.4.	Uzroci mjerne nesigurnosti i pojave grešaka.....	96
3.4.1.	Uticaj okoline na mjernu nesigurnost.....	98
3.4.2.	Utjecaji mjernog objekta na mjernu nesigurnost	103
3.4.3.	Uticaj mjernog sredstva na mjernu nesigurnost (greška prvog i drugog reda, Abbe'ov princip).....	105
3.5.	GUM i procedure određivanja mjerne nesigurnosti	107

3.5.1.	Kako odrediti mjernu nesigurnost?	108
3.5.2.	Procjena standardne nesigurnosti	109
3.5.3.	Određivanje kombinovane nesigurnosti	111
3.5.4.	Određivanje proširene nesigurnosti	114
3.5.5.	Izveštaj o nesigurnosti	116
4.	SENZORI	119
4.1.	Uvod	119
4.2.	Klasifikacija senzora	120
4.2.1.	Klasifikacija prema vrsti izlaznog signala	120
4.2.2.	Klasifikacija prema prirodi mjerene veličine	121
4.2.3.	Klasifikacija senzora prema principu rada	121
4.2.4.	Klasifikacija senzora prema gabaritima	122
4.2.5.	Klasifikacija prema prirodi izlazne veličine	123
4.2.6.	Klasifikacija senzora prema uslovima rada	123
4.2.7.	Klasifikacija prema načinu upotrebe	123
4.2.8.	Klasifikacija prema unutrašnjoj strukturi	123
4.2.9.	Klasifikacija prema pouzdanosti u eksploataciji	123
4.2.10.	Aktivni i pasivni senzori	123
4.3.	Fizikalni principi rada senzora	125
4.4.	Vrste senzora	125
4.4.1.	Magnetnoelektrični senzori	125
4.4.2.	Piezoelektrični senzori	129
4.4.3.	Fotoelektrični senzori	132
4.4.4.	Termoelektrični senzori	134
4.4.5.	Induktivni senzori	135
4.4.6.	Kapacitivni senzori	137
4.4.7.	Otpornički senzori	141
4.4.8.	Ostali otpornički senzori za mjerenje mehaničkih i procesnih veličina	146
4.5.	Prijenos i registracija mjerenih veličina	148
4.5.1.	Prijenos mjernih veličina	148
4.5.2.	Registriranje mjernih veličina	149
5.	MJERENJE TEMPERATURE	152
5.1.	Opći pojmovi u mjerenju temperature	152
5.1.1.	Uvod	152
5.1.2.	Uslovi za mjerenje temperature	153
5.1.3.	Historija uređaja za mjerenje temperature	154
5.1.4.	Temperatura i temperaturne skale	155
5.2.	Vrste termometara	158
5.2.1.	Stakleni termometri	159
5.2.2.	Opružni termometri sa cijevnom oprugom	161
5.2.3.	Plinski termometri	161
5.2.4.	Mehanički dodirni termometri	163
5.2.5.	Električni dodirni termometri	165
5.3.	Termometri zračenja	168
5.3.1.	Mjerni postupak	170
5.4.	Specijalne metode mjerenja temperature	174

8.6.1.	Vibracioni pobudni sistemi	232
8.6.2.	Udarna ispitivanja	235
9.	AKUSTIČKA MJERENJA	237
9.1.	Uvod	237
9.2.	Postavke o zvuku.....	238
9.2.1.	Pojam buke	239
9.2.2.	Izvori buke	240
9.2.3.	Karakteristike i klasifikacija buke	242
9.2.4.	Ciljevi mjerenja buke.....	243
9.3.	Instrumenti, metode i standardi za mjerenje buke.....	244
9.3.1.	Standardi za mjerenje buke	244
9.3.2.	Uticaji na mjerenja buke	246
9.3.3.	Instrumenti za mjerenje buke	247
10.	MJERENJE PRITISKA	252
10.1.	Uvod	252
10.1.1.	Statički i zaustavni pritisak.....	253
10.1.2.	Priključna veza sonde i manomatra.....	257
10.2.	Instrumenti za mjerenje pritiska.....	258
10.2.1.	Hidrostatički manometri	258
10.2.2.	Mehanički manometri.....	266
10.2.3.	Elektronski manometri	267
10.3.	Senzori pritiska	273
10.3.1.	Podjela senzora pritiska	274
11.	MJERENJE SILE	283
11.1.	Uvod	283
11.1.1.	Metodi i principi određivanja mase i sile	284
11.1.2.	Kriteriji za uravnotežavanje masa.....	284
11.1.3.	Greške pri mjerenju	285
11.2.	Instrumenti i uređaji za mjerenje sile	286
11.2.1.	Mehanički dinamometri.....	287
11.2.2.	Elastični mjeri pretvarači.....	289
11.2.3.	Elektrootporni tenzometarski dinamometara.....	294
11.2.4.	Elektromagnetni dinamometri.....	297
11.2.5.	Kapacitivni dinamometri	298
11.2.6.	Hidraulički i pneumatski dinamometri.....	299
11.3.	Kalibriranje dinamometara.....	300
11.3.1.	Kalibriranje mehaničkih dinamometara	300
11.3.2.	Kalibriranje električnih dinamometara	301
11.4.	Mjerni lanac za mjerenje mase.....	302
12.	PROIZVODNA MJERENJA.....	303
12.1.	Ciljevi i zadaci proizvodnih mjerenja.....	303
12.2.	Razvoj proizvodnih mjerenja	304
12.3.	Podjela proizvodnih mjerila.....	304
12.3.1.	Jednostruka mjerila.....	305

13.	OPTIČKA MJERENJA.....	326
13.1.	Uvod	326
13.1.1.	Osnove optike.....	327
13.1.2.	Karakteristike svjetlosti	329
13.2.	Podjela optičkih mjerenja u proizvodnji	330
13.3.	Mjerni uređaji na bazi nekoherentnog svjetla	335
13.3.1.	Profil projektori i mjerni mikroskopi.....	335
13.3.2.	Teleskopi	337
13.3.3.	Tehnike silueta.....	339
13.4.	Mjerenja na bazi optoelektronike.....	340
13.4.1.	Optičko elektronički mjerni uređaj.....	342
13.4.2.	Princip trokuta.....	343
13.4.3.	Optičke skale	345
13.4.4.	3D Moiré procedura i projektovanje linija	345
13.4.5.	3D fotogrametrija	347
13.5.	Laserska metrologija.....	349
13.5.1.	Osnove rada lasera	349
13.5.2.	Podjela lasera	350
13.5.3.	Primjena lasera u mjerenju	350
13.5.1.	Određivanje rastojanja na bazi izmjerenog vremena	351
13.5.2.	Procedura autofokusa za linearna mjerenja	352
13.5.3.	Interferometrija.....	354
13.5.4.	Laserski skeneri	356
14.	KOORDINATNA METROLOGIJA	358
14.1.	Principi koordinatne metrologije	358
14.2.	Koordinatne mjerne mašine.....	363
14.2.1.	Tipovi koordinatnih mašina	364
14.2.2.	Vođice, pogon, ležajevi.....	367
14.2.3.	Sistem sondi	369
14.2.4.	Softver za koordinatne mjerne mašine	372
14.3.	Mjerenje na koordinatnoj mjernoj mašini	374
14.3.1.	Postupak mjerenja	377
14.3.2.	Mjerni rezultati	379
14.4.	Mjerna nesigurnost	383
14.4.1.	Kako ocijeniti mjernu nesigurnost?.....	385
14.4.2.	Temperatura i mjerna nesigurnost.....	386
14.4.3.	Termički stabilne CMM	386
14.5.	Primjena koordinatne metrologije	387
14.5.1.	Ekonomska isplativost CMM	388
14.5.2.	Standardi u koordinatnoj metrologiji	388
15.	Literatura.....	390

5.4.1.	Segerovi stošci	174
5.4.2.	Metalna tijela za topljenje	174
5.4.3.	Pirometri boje ili pirometri odnosa	174
5.5.	Kontrola i kalibriranje termometara.....	175
6.	MJERENJE UGAONE BRZINE I BROJA OBRTAJA	176
6.1.	Uvod	176
6.2.	Mjerenje ugaone brzine pomoću tahometara.....	176
6.2.1.	Principi rada senzora brzine	177
6.3.	Senzori ugaone brzine	179
6.3.1.	Centrifugalni senzor.....	179
6.3.2.	Magnetni senzor	180
6.3.3.	Tahogeneratori	180
6.3.4.	Tahometarski mostovi	182
6.3.5.	Elektromagnetni senzori.....	183
6.3.6.	Elektromagnetni senzor transformatorskog tipa.....	183
6.3.7.	Piezoelektrični senzori	184
6.3.8.	Žiroskopski senzori ugaone brzine	185
6.3.9.	Optoelektronski senzor.....	186
6.3.10.	Stroboskopski senzor	187
6.3.11.	Magnetorezistivni senzor.....	188
6.3.12.	Senzori na bazi Holovog efekta.....	188
7.	MJERENJE OBRTNOG MOMENTA I SNAGE	190
7.1.	Uvod	190
7.2.	Mjerenje obrtnog momenta pomoću mjernih traka.....	191
7.3.	Mjerenje obrtnog momenta pomoću induktivnog senzora	194
7.4.	Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim torziometrom sa stroboskopskim indikatorom	195
7.5.	Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim dinamometrima	197
7.5.	Transmisioni dinamometri	199
7.6.	Mjerenje snage pomoću kočnica	200
7.7.	Ostali načini mjerenja obrtnog momenta i snage	201
8.	MJERENJE VIBRACIJA	203
8.1.	Uvod	203
8.2.	Uzroci pojave vibracija.....	207
8.2.1.	Uticao vibracija na mašine i opremu.....	208
8.3.	Mjerni lanac za mjerenje vibracija	210
8.3.1.	Mjerni pretvarači vibracija.....	211
8.3.2.	Frekventna analiza	215
8.4.	Kriteriji za ocjenu dozvoljenih vibracija mašina i uređaja	219
8.4.1.	Klasifikacija mašina prema intenzitetu vibracija	221
8.5.	Uklanjanje vibracija uravnoteženjem	223
8.5.1.	Osnovni pojmovi o uravnoteženju	223
8.5.2.	Statičko uravnoteženje	224
8.5.3.	Dinamičko uravnoteženje	226
8.5.4.	Metode uravnoteženja	228
8.6.	Dinamička ispitivanja	231

1. UVOD

Sadržaj lekcije:

1. Metrologija - nauka o mjerenju i njen značaj
2. Zadaci i podjela metrologije
3. Historijski razvoj mjerenja i jedinica mjernih veličina
4. Međunarodni sistem mjernih jedinica - SI sistem
5. VIM i osnovni termini u metrologiji

1.1. Metrologija-nauka o mjerenju i njen značaj

Nauka o mjerenju ili metrologija je specijalizirani dio pojedinih prirodnih i tehničkih nauka koji se bavi metodama mjerenja fizikalnih veličina, razvojem i izradom mjernih uređaja, reprodukcijom i pohranjivanjem mjernih jedinica, te svim ostalim aktivnostima koje omogućavaju mjerenje i usavršavanje mjernih postupaka.

Mjerenje predstavlja skup aktivnosti čiji je cilj dobivanje vrijednosti mjerne veličine (fizičke veličine).

Značaj mjerenja kao praktične tehničke djelatnosti od prvenstvene je važnosti kako u svakodnevnom životu tako i u svim područjima privrede i nauke. Kuda god krenemo susrećemo se sa mjerenjem.

U trgovinama se roba kupuje na komad, po dužini i težini, voda, električna energija i toplota se mjere, a posljedice toga se osjećaju i u našim ličnim finansijama.

Količine aktivnih supstanci u medicini, mjerenja na uzorcima krvi, kao i efekti hirurškog lasera moraju biti precizni kako zdravlje pacijenta ne bi bilo ugroženo.

Skoro da je nemoguće opisati bilo koju pojavu bez oslanjanja na mjerenje: mjeri se težina pisma, sobna temperatura, pritisak u gumama itd.

Postoje različite djelatnosti koje direktno zavise od mjerenja. Pilot pažljivo određuje svoju visinu, pravac, potrošnju goriva i brzinu i druge parametre neophodne za sigurnost leta. Kontrolori kvaliteta živežnih namirnica mjere kvalitet hrane na osnovu sadržaja bakterija, masnoće, što je bitno za zdravlje ljudi. Značaj mjerenja kao praktične tehničke djelatnosti od prvenstvene je važnosti kako u svakodnevnom životu tako i u svim područjima privrede i nauke. Tako npr. u USA u 1978. godini je procijenjeno da je izvršena $2 \cdot 10^9$ mjerenja svakog dana, odnosno 100 mjerenja po stanovniku. U Evropi i USA se za procese mjerenja potroši 6 % bruto nacionalnog dohotka (GDP). Metrologija je postala dio naše svakodnevnice. Kuda god se krene susreće se mjerenje. Pogledom na sat

očitava se vrijeme, u trgovini se kupuje roba na komad, po težini ili dužini, svi mediji kao voda, struja i toplota se mjere kako bi se naplatili ili kontrolirali, a efekti nekih pojava se uočavaju subjektivnim mjerilima.

Nemoguće je opisati bilo što bez navođenja težina ili mjera, sunčani sati, procenat alkohola, sobna temperatura, pritisak u gumama itd. Čak je teško voditi i bilo koji razgovor u kom nema riječi koje su u vezi sa mjerenjem.

Industrijska proizvodnja zahtijeva česta mjerenja. U tehničkoj dijagnostici se vrše mjerenja u cilju utvrđivanja stanja tehničkih sistema. Nakon konstrukcije novog proizvoda vrše se ispitivanja karakteristika prototipnog rješenja. Kontrola i mjerenje se vrše u svrhu automatskog upravljanja procesima. Bez mjerenja se ne može zamisliti kontrola kvaliteta proizvoda kao uslova za njegovu prodaju.

Preduzeća kupuju sirovine koristeći tegove i mjere, a specifikaciju svojih proizvoda izražavaju koristeći iste jedinice. Sistematska mjerenja sa poznatim stepenom nesigurnosti predstavljaju osnov u industrijskom upavljanju kvalitetom, i uopšte govoreći u većini savremene industrije troškovi mjerenja čine 10-15 % ukupnih troškova proizvodnje.

Eksperimentalna ispitivanja i studiozna analiza rezultata ispitivanja, su bitni uslovi za uspješan i brz razvoj nauke. Pomoću eksperimenata formiraju se i nova otkrića u nauci .

U svakom eksperimentu mjerenja imaju veoma značajnu ulogu. Bez mjerenja eksperimenti bi imali daleko manji značaj. Ona daju uslove za daleko bolje i studiozno razmatranje pojava.

Neophodnost velikog broja eksperimenata, zahtjeva uvijek i obimna i mnogobrojna mjerenja. S obzirom na veoma brz razvoj savremene nauke, neophodno je provoditi brojna sistematska mjerenja, koja daju potrebnu tačnost a pored toga i veliku ekonomiju u vremenu i sredstvima. Danas nije pitanje samo izmjeriti neku veličinu, već je isto tako važno i kako je izmjeriti, da bi se rezultati dobili najpovoljnijim putem.

Ogroman progres tehnike i tehničkih nauka zahtijevao je i odgovarajući razvoj metoda mjerenja i instrumenata i prateće opreme koja se koristi za mjerenje. Mnoge oblasti nauke razvile su se tek kada je ostvarena odgovarajuća mogućnost mjerenja. I u tom području ostvaren je ogroman progres. U nastojanju da se u nađu sve mogućnosti istraživači su često pokazivali i vrhunac dovitljivosti ljudskog duhapa su uz vlastite eksperimente često doprinijeli razvoju metoda i tehnika mjerenja.

Novi metodi mjerenja razvijeni u fizici, pokazali su se odlučujućim u razvoju tehnike. Mnoge oblasti savremene tehnike razvile su se zahvaljujući novim mogućnostima mjerenja. Mjerenje je povezano sa proizvodnim procesima. U tehničkoj dijagnostici mjerenja se vrše u cilju utvrđivanja stanja tehničkih

sistema. Zavisno od vrste i cilja mjerenja, koriste se različiti mjerni instrumenti i prateća oprema. Mjerenje određenih parametara zahtjeva i korištenje odgovarajuće metode i primjerene opreme.

Osnovna djelatnost laboratorija je mjerenje, iz čega proizilaze nova naučna saznanja u različitim oblastima djelatnosti. Mjerenja čiji se rezultati koriste u naučne svrhe treba ponavljati određeni broj puta. Laboratoriji služe da bi se mjerenjem potvrdile ili provjerile odabrane ili željene veličine nekog proizvoda.

Na rezultat mjerenja mogu uticati i spoljni faktori. Zato ih je potrebno održavati na konstantnom nivou.

Mjerenja koja se provode u svrhu kontrole ili utvrđivanja kvantitativnog nivoa nekog radnog parametra ili neke veličine gotovog proizvoda ne zahtjevaju isti niz radnji koje se moraju provesti kod mjerenja za istraživačke svrhe. Faktori spoljne okoline kod proizvodnih mjerenja mogu se zanemariti ukoliko ne utiču na rezultat mjerenja.

Industrijska proizvodnja zahtijeva česta i različita mjerenja . Nakon konstrukcije novog proizvoda vrši se ispitivanje karakteristika prototipnog rješenja. Praćenje toka proizvodnje i određivanje škartu određuje se korištenjem mjerenja uz korištenje namjenske namjenske konvencionalne ili specijalne mjrene opreme. Bez mjerenja se ne može zamisliti kontrola kvaliteta proizvoda kao osnovnog uslova za njegovu prodaju i zadovoljenje potreba i želja kupca.

Kao i svaki odgovoran posao, tako i poslove mjerenja, mogu ispravno vršiti lica teorijski i praktično kvalificirana za takve poslove .

Mjerenja mogu biti vrlo jednostavna i rutinska. Za takva mjerenja nije potrebna posebna obuka. Međutim, za složena mjerenja sa sofisticiranom opremom vršiocu moraju proći obuku i dobro poznavati metode i principe mjerenja. Posebno je važno da poznaju oblast u kojoj se vrše mjerenja.

1.2. Zadaci i podjela metrologije

U tehnici i tehnologiji proizvodnje različitih mašina i uređaja koriste se različite metode i sistemi ocjene karaktera proizvoda. Kvalitet proizvoda može se ogledati kroz geometrijsku tačnost, kvalitet površina, hemijskog sastava i mehaničkih karakteristika materijala. Kvalitet proizvoda je i direktna posljedica tačnosti tehnoloških procesa. Osnovne fizičke veličine se koriste za identifikaciju i kvalifikaciju kvaliteta proizvoda (dužina, masa, vrijeme, sila, pritisak).

U različitim granama nauke i tehnike treba mjerenje istih fizičkih veličina provoditi jedinstvenim postupcima mjerenja i kontrole.

Metrologija je nauka o mjerenju (metron - mjerenje, logos - nauka). Nauka o mjerenju, u principu, obuhvata:

- principe i metode mjerenja,
- sredstva za izvođenje mjerenja i kontrole.

To su potrebni uslovi kojima se obezbjeđuje jedinstvo mjera i mjerenja, tačnost izrade proizvoda i stabilnost i tačnost proizvodnih procesa.

Osnovni zadaci metrologije mogu se razvrstati na slijedeće:

- razvoj generalne teorije mjerenja,
- utvrđivanje jedinica fizičkih veličina i njihovih sistema,
- razvoj pouzdanih etalona mjernih jedinica metoda i postupaka njihovog čuvanja i reproduciranja,
- razrada metoda, postupaka, tehnika i sredstava izvođenja mjerenja i kontrole fizičkih veličina,
- razrada metoda ocjene greške mjerenja, stanja i tačnosti sredstava mjerenja i kontrole,
- razvoj ekspertnih sistema obezbjeđenja potrebne tačnosti mjerenja i kontrole i upravljanja proizvodnim procesima,
- razvoj metoda postizanja jedinstva mjera i mjerenja i realizacija aktivnosti usmjerenih ka povećanju tačnosti, pouzdanosti i proizvodnosti mjerenja i kontrole.

Informacije o proizvodu ili procesu dobiju se mjerenjem u toku faza izrade proizvoda ili odvijanja procesa. To se može ostvariti različitim metodama i primjenom različitih mjernih sredstava i uređaja.

1.2.1. Podjela metrologije

Podjela metrologije može se izvršiti prema različitim kriterijima. U procesu proizvodnje teži se većoj tačnosti, preciznosti i pouzdanosti proizvoda (mašina, alata i uređaja). Jednostavno želi se postići viši kvalitet proizvoda i usluga. Zbog toga se razvijaju tehnike i tehnologije mjerenja i kontrole proizvoda i metoda postupaka metrološkog obezbjeđenja proizvodnje.

Prema oblastima kojima se bavi metrologija se dijeli na:

- metrologiju dužina, površina i uglova,
- metrologiju mase, sile i pritiska,
- metrologiju fizičko - hemijskih veličina,
- metrologiju električnih veličina.

Unutar ovakve opće podjele može se govoriti i o metrologiji dužina, vremena i frekvencije, metrologiji zapremine itd.

Metrologija se može podijeliti na:

- opću i
- primjenjenu

Opća metrologija bavi se problemima mjerenja i kontrole povezanim sa svim metrološkim oblastima bez obzira koje se fizičke veličine mjere i koja se mjerna sredstva koriste. Opća metrologija se bavi pojmovima, pravilima i principima. Tako da su oblasti proučava: sistem jedinica mjerenja, greške mjerenja, metrološke karakteristike mjernih sredstava, teorije i informacije o mjerenju.

Primjenjena metrologija se bavi problematikom mjerenja u jednoj jedinoj karakterističnoj oblasti. Tu spada mjerenje i kontrola poznate i definirane jedne ili više fizičkih veličina.

Prema oblasti primjene metrologija može biti:

- tehnička,
- industrijska,
- medicinska,
- astronomska itd.

Tehnička metrologija obuhvata probleme mjerenja u tehnici u kojoj su zastupljene sve metrološke oblasti sa odgovarajućim mjernim sredstvima i mjernim metodama.

Medicinska metrologija se bavi problemima mjerenja u medicinske svrhe (dijagnostika u medicini je nezamisliva bez mjerenja).

Industrijska metrologija se bavi problemima mjerenja (postupcima, tehnikama, tehnologijama i sredstvima) različitih veličina u industriji. To su veličine koje pripadaju jednom ili većem broju metroloških oblasti (dužina, masa, zapremina, električne veličine).

Metrologija se može posmatrati i kao:

- naučna,
- industrijska i
- zakonska (legalna).

Naučna metrologija nema internacionalnu definiciju ali označava najviši nivo tačnosti u okviru datog područja. Fundamentalna metrologija može se označiti i kao naučna sa dodatkom zakonske i industrijske koje imaju naučnu kompetentnost. Naučna metrologija ima zadatak da ostvari održavanje etalona čiji rang odgovara stvarnim potrebama i mogućnostima jedne zemlje, regije ili područja djelatnosti, da ostvari validaciju etalona. Sve te aktivnosti se odvijaju u okviru raznih institucija i učešćem u procesima akreditacije, održavanja sljedivosti etalona prema međunarodnim standardima i ostvarivanjem međunarodne saradnje.

Područja aktivnosti naučne metrologije

Fundamentalna (naučna) metrologija nema svoju internacionalnu definiciju, ali označava najviši nivo tačnosti u okviru datog područja. Fundamentalna metrologija može zbog toga biti označena i kao naučna metrologija sa dodatkom zakonske i industrijske metrologije koje takođe zahtijevaju naučnu kompetentnost.

Fundamentalna ili naučna metrologija se dijeli u 11 oblasti:

- masa,
- elektricitet,
- dužina,
- vrijeme i frekvencija,
- temperatura,
- jonizirajuće zračenje i radioaktivnost,
- fotometrija i radiometrija,
- protok,
- akustika,
- količina supstance i
- interdisciplinarna metrologija.

Oblast razmatranja, subpodručja i mjerni etaloni u oblasti metrologije dati su u tabeli 1.1.

Oblast	Subpodručje	Važni mjerni standardi (etaloni)
1. Masa i pripadajuće veličine	Mjerenje mase Sila i pritisak	Standardi mase, standardi za balans-vage, ćelije opterećenja, momenta i momenta uvijanja sa uljem, gasom podmazivanim, sklop klipa i cilindra, mašine za testiranje silom
	Zapremina i gustoća Viskozitet	Stakleni areometri, laboratorijske posude, vibracioni densimetri, stakleni kapilani, viskozimetri, rotacioni viskozimetri, viskozimetarske skale
2. Elektricitet i magnetizam	Istosmjerne struje (digitalni konvertori)	Kriogeni strujni komparateri Džozefson i Klitzing Hallov efekat, referentne potenciometerske metode, komparatorski mostovi
	Naizmjenične struje	AC/DC konvertori, standardni kapacitori zračni kapacitori, standardni induktori, kompenzatori
	HF	Termalni konvertori, kalorimetri, bolometri
	Visoka struja i visoki napon	Mjerni transformatori struje i napona, referentni visokonaponski izvori
3. Dužina	Talasna dužina i interferometrija	Stabilizirajući laser, interferometri, laserski interferometerski mjerni sistemi, interferometerski komparatori
	Dimenzionalna metrologija	Mjerne pločice, linijska skala, prstenovi, masteri, mjerni mikroskopi, optički standardi, CMM, laserski skenirajući mikroskopi, dubinski mikrometri
	Ugaona mjerenja	Autokolimatori, rotirajući stolovi, ugaoni blokovi, poligoni, nivelatori-libele
	Oblik	Upravnost, paralelnost pravougaonost, standardi za okruglost, cilindričnost
	Kvalitet površine	Standardi za hrapavost, mjerna oprema za hrapavost
4. Vrijeme i frekvencija	Mjerenje vremena	Cezijum atomski sat, oprema za mjerenje vremenskog intervala
	Frekvencija	Atomski sat, kvarcni oscilatori, laseri, elektronski brojači i sintetiseri (alati za geodetsko mjerenje dužine)
5. Termometri	Mjerenje temperature kontaktom	Gasni termometri, ITS 90, otpornički termometri, termoelementi
	Bez-kontaktno mjerenje temperature	Visokotemperaturna crna tijela, kriogeni radiometri, pirometri, Si-fotodiode

	Vlažnost	Elektronički higrometri, generatori temperaturne vlažnosti dvostrukog pritiska
Oblast	Subpodručje	Važni mjerni standardi (etaloni)
6. Jonizirajuća radijacija i radioaktivnost	Apsorbovana doza - Industrijski proizvodi visokog nivoa	Kalorimetri, kalibrirane doze, Diskromatski dozimetar
	Apsorbovana doza – Medicinski proizvodi	Kalorimetri, jonizirajuće komore
	Zaštita od radijacije	Jonizirajuće komore, nivo radijacionih zraka/polja proporcionalno i drugi brojači TEPC, neutronske spektrometri
7. Fotometrija i radiometrija	Optička radiometrija	Kriogeni radiometar, detektori, stabilizirajući laser, referentni izvori, referentni materijali – Au fiberi
	Fotometrija Kalorimetrija	Detektori vidljivog područja, Si fotodiode, kvantni efikasni detektori
	Optička vlakna	Referentni materijali - Au vlakna
8. Protok	Protok gasa (zapremina)	Rotirajući gas metri, turbinski gas metri, transfer metri sa kritičnim mlaznicama
	Protok vode (zapremina, masa i energija) Protok drugih tečnosti	Standardi zapremine, Coriolisovi standardi za masu, nivo metri, induktivni mjeraci protoka, ultrazvučni mjeraci protoka
	Anemometrija	Anemometri
9. Akustika ultrazvuk i vibracije	Akustična mjerenja	Standardni mikrofoni, kalibratori zvuka, mikrofoni
	Akcelerometri	Akcelerometri, transduceri sile, vibratori, laserski interferometri
	Akustička mjerenja u tečnostima	Hidrofoni
	Ultrazvuk	Ultrazvučni mjeraci snage, radijacioni balanseri sile
10. Količine supstance	Hemija okoliša	Certificirani referentni materijal
	Klinička hemija	
	Hemija materijala	Čisti materijali, certificirani referentni materijali
	Hemija hrane Biologija Mikrobiologija pH mjerenja	Certificirani referentni materijali

Tabela 1.1. Oblast razmatranja, subpodručja i mjerni etaloni u oblasti metrologije

Zakonska metrologija se bavi zakonski reguliranjem područja mjerenja uključujući izradu pravnih propisa, definicija tehničkih zahtjeva kako bi se postigla potrebna tačnost mjerenja i garancija sigurnosti i preciznosti izvršenih mjerenja. Zakonskom metrologijom obezbjeđuje se jasna garancija tačnosti, preciznosti i pouzdanosti izvedenih mjerenja, kroz razradu odgovarajućih međunarodnih i nacionalnih tehničkih i pravnih pravila i propisa u oblasti metrologije obezbjeđuje proizvode. Time se ostvaruje snažan uticaj na transparentnost mjerenja, ekonomske transakcije, zdravlje ljudi, sigurnost u saobraćaju i druge oblasti od značaja za ekonomski i sigurnosni aspekt rada.

Osnove zakonske metrologije su:

1. utvrđivanje mjernih jedinica,
2. razvoj postupaka čuvanja etalona i reproduciranja mjernih jedinica
3. razrada metoda mjerenja,
4. postavljanje metoda za provjeru mjernih sredstava,
5. druge aktivnosti za očuvanje jedinstva mjera i mjerenja u nacionalnim i međunarodnim razmjerama.

U okviru zakonske metrologije donose se u zakonodavnom postupku usvajanja propisi. Propisi za mjerila treba da garantiraju tačne rezultate mjerenja u:

- radnim uslovima,
- tokom cijelog perioda upotrbe mjerila,
- unutar zadatih dopuštenih grešaka.

S tim u vezi zahtjevi definirani zakonskim propisima odnose se na:

- mjerila,
- metode mjerenja,
- pakovane proizvode.

Zakonsko uređenje mjeriteljstva povlači za sobom:

- preventivne
- represivne mjere.

Preventivne mjere

Prije stavljanja mjerila na tržište preduzimaju se *preventivne mjere*, to jest, mjerila prethodno podliježu odobravanju tipa i ovjeravanju.

Proizvođači dobijaju odobrenje od kompetentnog ovlaštenog tijela kada tip mjerila zadovolji sve odgovarajuće zakonske zahtjeve.

Za mjerila koja se proizvode serijski, mora se ovjeravanjem osigurati da svako mjerilo ispunjava sve propisane zahtjeve u proceduri odobravanja.

Za mjerila koja su u upotrebi, pregledi i periodične ponovne provjere se propisuju da bi se garantovalo da je mjerilo usaglašeno sa zakonskim zahtjevima.

Represivne mjere

Nadzor tržišta je represivna mjera kojom se otkriva svaka nezakonita upotreba mjerila. Etaloni upotrebljeni za ovakve preglede i ispitivanja moraju biti sljedivi do nacionalnih ili međunarodnih etalona.

Zaštita potrošača može da se razlikuje u različitim državama pa tako zahtjevi koji regulišu upotrebu mjerila postaju predmet nacionalne zakonske regulative.

svakom nivou lanca sljedivosti može se postići putem međusobnih priznavanja saglasnosti ili uređenosti sistema.

U različitim područjima mjerenja koristi se i različita mjerna tehnika. Mjerna tehnika je dio metrologije.

Mjerna tehnika se može podijeliti na sljedeća osnovna područja:

1. precizna mjerna tehnika (mjerenje mjerila, kontrola etalona)
2. laboratorijska mjerna tehnika (razvoj mjerila i mjernih metoda)
3. industrijska mjerenja (proizvodnja, trgovina, promet itd.).

Mjerenja u mašinstvu su dio ispitivanja koja se vrše u svim fazama proizvodnje. Ispitivanja se mogu podijeliti na:

1. objektivna, čiji se rezultati mogu dokumentovati očitanim ili registrovanim vrijednostima,
2. subjektivna, koja su rezultat osjećaja svakog pojedinca. Ovo su ispitivanja vidom - vizuelna ocjena stanja ili mirisom, dodirom, sluhom (šumovi) i sl.

Ispitivanja u mašinstvu i tehnici mogu se podijeliti na:

1. tehničku dijagnostiku mašina i alata,
2. kontrolu procesa proizvodnje,
3. utvrđivanje stanja tehničkih sistema i
4. sigurnost i zaštita na radu.

Kvalitetna i ekonomična proizvodna, primopredajna ispitivanja, garantna ispitivanja, istraživačka ispitivanja, naučna ispitivanja predstavljaju različita ispitivanja u mašinstvu i tehnici.

Metrologija povezuje različite ljude na različitim geografskim prostorima, a u svemu tome pouzdanost predstavlja temelj svih metroloških aktivnosti. Pouzdanost je sve naglašenija kada raste stepen kooperacije i korištenje uobičajenih jedinica mjerenja i mjernih procedura. Priznavanje akreditacija i međusobno ispitivanje mjernih standarda i laboratorija u različitim zemljama su najvažniji segmenti u metrološkom povezivanju u svijetu.

Čovječanstvo ima pozitivna iskustva koja kazuju da je život postao lakši od kada ljudi sarađuju u području metrologije.

1.2.2. Međunarodne organizacije u području metrologije

Metrološkim problemima i međunarodnom saradnjom u oblasti metrologije bave se međunarodne metrološke organizacije.

1. Međunarodne organizacije za tegove i mjere osnovana na međunarodnoj metrološkoj konvenciji u Parizu 1875. Njena radna tijela su:
 - Generalna konferencija za tegove i mjere CGMP
 - Međunarodni komitet za tegove i mjere CIMP
 - Međunarodni biro za tegove i mjere BIMP
2. Međunarodna organizacija za zakonsku metrologiju je osnovana na međunarodnoj konvenciji za zakonsku metrologiju u Parizu 1955. godini. Sastoji se od tri tijela:
 - Međunarodne konferencije za zakonsku metrologiju OIML
 - Međunarodnog komiteta za zakonsku metrologiju CIML
 - Međunarodnog biroa za zakonsku metrologiju BIML

Međunarodna organizacija za tegove i mjere rješava metrološke probleme od značaja za sve zemlje potpisnice "Konvencije za metar".

Generalna konferencija za tegove i mjere ima zadatak da:

- donosi, podstiče i sprovodi mjere vezane za unapređenje međunarodnog sistema mjernih jedinica i etalona
- sankcioniše metrološke odredbe i rezolucije od međunarodnog značaja.

Međunarodni komitet za tegove i mjere:

- obavlja nadzor rada biroa,
- podstiče saradnju nacionalnih metroloških laboratorija,
- formira unapređuje rad konstitutivnih komiteta za definiciju metra i ostalih jedinica za druge fizičke veličine. Međunarodni biro smješten je u Parizu i obavlja sljedeće zadatke:
 - utvrđuje osnovne etalone i skalu fizičkih veličina
 - čuva prototipove etalona
 - vrši provjeru i nacionalnih etalona
 - obezbjeđuje koordinaciju u oblasti mjerne tehnike i realizaciju drugih zadataka na unapređenju metrološke službe.

Međunarodna organizacija za legalnu metrologiju:

- razvija međunarodnu saradnju u oblasti zakonske metrologije
- omogućava da se rezultati naučne metrologije koriste za međunarodnu trgovinu (omogućava razmjenljivost dijelova)

svoju značajnu ulogu realizira preko konferencija, komiteta i biroa.

Međunarodni biro za zakonsku metrologiju je izvršni organ organizacije tj. centar u koji se šalju dokumenta o zakonskoj metrologiji i određuje međunarodne preporuke:

- ocjena greške mjerenja,
- metode mjerenja,
- metode provjere mjernih sredstava,
- unifikacija metroloških izraza, oznaka i definicija,
- realizacija drugih zadataka na unapređenju saradnje u oblasti zakonske metrologije.

Postoji niz metroloških organizacija koje pomažu da se uspostavi mjeriteljsko jedinstvo u cijelom svijetu i da bi de sigurno i brzo razmjenjivale robe i usluge. U postupku je i osnivanje drugih organizacija koje nastaju sa naraslim potrebama privrede i naule u cijelom svijetu.

Pored metroloških postoje i nemetrološke organizacije koje se bave mjerenjem npr: ISO-međunarodne organizacije za standardizaciju, IEC-međunarodna elektrotehnička, Međunarodna unija za čistu i primjenjenu hemiju i mnoge druge.

1. 3. Historijski razvoj mjerenja i jedinica mjernih veličina

Smrtnom kaznom su kažnjavani svi koji su bili zaduženi za umjeravanja i kontroliranje mjernih sredstava ukoliko su zaboravili da izvrše svoja zaduženja. Mjerila koja su se kontrolirala umjeravanjem su bila mjerila za dužinu, a to se radilo svakoga punog mjeseca. Takva je kazna prijetila graditeljima na kraljevskome gradilištu odgovornim za gradnju faraonskih hramova i piramida u Egiptu, 3000 godina p. n. e.

Tokom cijele historije postojala je želja da ljudi radi što boljeg međusobnog razumijevanja razmjenjuju podatke o materijalnom svijetu. To su mogli raditi samo ako su te podatke izražavali na svima podjednako razumljiv način. Bilo je potrebno tokom hiljada godina razvijati sistem međusobnog razumijevanja uz navođenje konkretnih podataka mjerenja.

U vrijeme koje se može smatrati početkom mjerenja nije bilo mjeriteljskih instituta i mjeriteljstva kao naučne discipline. U svakodnevnom životu jednoznačno prenošenje informacija o mjerenju, tj. mjernih podataka se koristilo da bi se opisao svijet i dešavanja oko nas. Od predhistorijskog doba kada je predhistorijski čovjek na osnovu broja kamenčića u ruci prenosio drugima informaciju o broju životinja koje treba loviti, pa nadalje informacija o mjerenju igra važnu ulogu. Na osnovu starih, sačuvanih, pisanih spomenika koji postoje u zadnjih deset hiljada godina, ljudi su se dogovarali oko mjerenja.

U prvim državnim zajednicama zakonima su propisivali upotrebu određenih mjera, tj. tijela koja su bila personifikacija neke fizičke veličine, debljine, obima, težine i sl. Danas se takvi spomenici čuvaju u muzejima, a nekad su bili u hramovima. Nepoštivanje propisa kažnjavalo se vrlo strogo. Često je od ispravnosti mjera i postupaka mjerenja zavisio i državni poredak, pouzdanost trgovinske razmjene, plaćanje poreza, raspodjela zemlje, uroda, ratnog plijena. Sa razvojem tehnike i tehnologije razvijalo se i mjeriteljstvo. Prema razvoju mjeriteljstva u velikoj mjeri cijenio se stepen kulture i civilizacije tog područja.

Kasnije u istoriji razvijeni su različiti načini da se nešto mjeri. Mjerile su se kroz istoriju one veličine koje su bile potrebne pri razmjeni dobara i rada. To su dužina, površina, vrijeme, broj komada itd. Za jedinice svih veličina odabiralo se ono što je bilo pri ruci. Tako se dužina mjerila: prstima, pedljima, laktovima, koracima, zapremina se mjerila šakom, korpom, itd. Težina se mjerila poređenjem sa poznatim predmetima, plodovima, sjemenkama itd. Sve su to bile neke mjere koje su predstavljale posmatranu jedinicu pa se često stare jedinice zovu i mjere.

Najstarije poznate civilizacije (Babilon, Sumer) imale su jako složene i strogim državnim zakonima propisane jedinice. Evropski mjerni sistem u

srednjem vijeku, pa sve do usvajanja metarskog sistema zasniva se na grčkim i rimskim mjernim sistemima koji su za dužinu imali antropološke jedinice (prst, šaka, pedalj itd.). Za zapreminu su se koristile šuplje mjere (predmeti) koje su istodobno ispunjene vodom služile kao osnova raznih utega. Zato su se sve do danas mjerne jedinice zvale i "mjere i tegovi", (pounds and weight).

Te su se jedinice sve do prošlog stoljeća mijenjale od mjesta do mjesta, od vremena do vremena. S razvojem komuniciranja i trgovine te s premještanjem stanovništva nastala je u svijetu u 17. i 18. st. prava zbrka mjernih jedinica. Svaka struka i svaka državnica, ponekad i svaki grad, imali su svoje mjerne jedinice, koje su se mijenjale s promjenom kraljeva i kneževa.

Neke od tih jedinica bile su čisto antropološke, neke su se uzimale iz prirode, a poneke potpuno slučajno odabirale. Kao primjer mogu se pomenuti dvije jedinice angloameričkog mjernog sistema. Jedinica dužine *yard* (jard) svojedobno je bila određena udaljenošću između nosa i palca ispružene lijeve ruke engleskog kralja Henryja I, a *inch* (inč) ukupna dužina tri zrna ječma koje je iz sredine ječmenog klasa izvadio kralj Edward II. Stara jedinica težine u farmaciji bila je *granulum* (zrno). U V. Britaniji se doskora upotrebljavala jedinica težine *stone* (kamen). Jedinica, mase dijamanta, bisera i dragulja, koja se i danas upotrebljava, *karat*, nastala je upoređivanjem sa zrnom ploda rogača (karat je, posve neovisno o tome, i naziv za udio zlata u zlatnoj leguri).

Ista mjera, pa prema tome i ista jedinica, koja je služila za mjerenje zapremine (tzv. šuplja mjera) napunjena nekim sadržajem, najčešće vodom, služila i kao jedinica težine pri vaganju. Na primjer, antička šuplja mjera *litra* ili *libra* bila je i uteg (lat. *pondus*), odakle su nastale razne evropske *funte* (njem. *Pfund*, engl. *pound*). Tako se na engleskom funta zove *pound*, a označava se sa *lb* (prema *libra*). Budući da su služile i za mjerenje težine plemenitih metala, postale su i nazivi novca: *lira*, *pound sterling* (funta sterlinga). Mjera sa ovih prostora nazvana *pinta*, poznatija pod turskim nazivom *oka*, bila je i jedinica zapremine i jedinica težine, a često je i nejasno na što se mislilo. Na primjer, *oka* rakije je sigurno jedinica zapremine, a *oka* olova težine, ali *oka* žita može značiti koliko žita stane u zapreminu od jedne oke, ili žito teško jednu oku (oku napunjenu vodom). Takve nejasnoće izazivale su mnoge poteškoće, a u trgovini vjerojatno su bile prilika za mnoga nadmudrivanja.

Za dužinu su se upotrebljavale antropološke jedinice *vlas*, *palac*, *pedalj*, *lakat*, *korakj*, *hvat* i sl. Za "količinu", tačnije za zapreminu nasutu na određeni način (tresenjem, razom vrhom, "dobre mjere", "slabe mjere") upotrebljavale su se antropološke ili prirodne jedinice: *vagoni*, *bokali*, *oke*, itd. Posebno su zanimljive jedinice zapremine zemljišta: *ral*, *jutro*, *dunum*,

lanac, itd. Srednjovjekovni sistem mjernih jedinica bili su u izravnoj ili posrednoj vezi s rimskim jedinicama kao i u ostalim srednjoevropskim zemljama, ali su se one prilagođavale mjesnim prilikama i usklađivale s originalnim domaćim.

Prvi kraljevski lakat bio je definiran kao dužina podlaktice od lakta do vrha ispruženoga srednjeg prsta vladajućega faraona uvećana za širinu njegove šake. Ta se izvorna mjera prenosila u crni granit i urezivala u njemu. To su bili prvi etaloni. Radnici na gradilištima dobivali su primjerke u granitu ili drvetu, a graditelji su bili odgovorni za njihovo čuvanje. Otada su ljudi bez obzira na mjesto i vrijeme pridavali veliku pozornost ispravnosti mjerenja.

1.3.1. Metarski sistem mjernih jedinica

Jedna od tekovina francuske revolucije bila je i zamisao o stvaranju jedinstvenog mjernog sistema, a *tous les temps, à tous les peuples* za sva vremena, za sve narode), neovisnog o strukama, krajevima, kraljevima i vremenima. Zadatak bio povjeren francuskoj akademiji. Početni su zahtjevi bili da osnovne jedinice budu izvedene iz prirodnih pramjera, da se iz njih na jednostavan način izvode druge jedinice, te da za svaku veličinu postoji samo jedna jedinica, a da se od nje tvore veće i manje jedinice decimalnim putem.

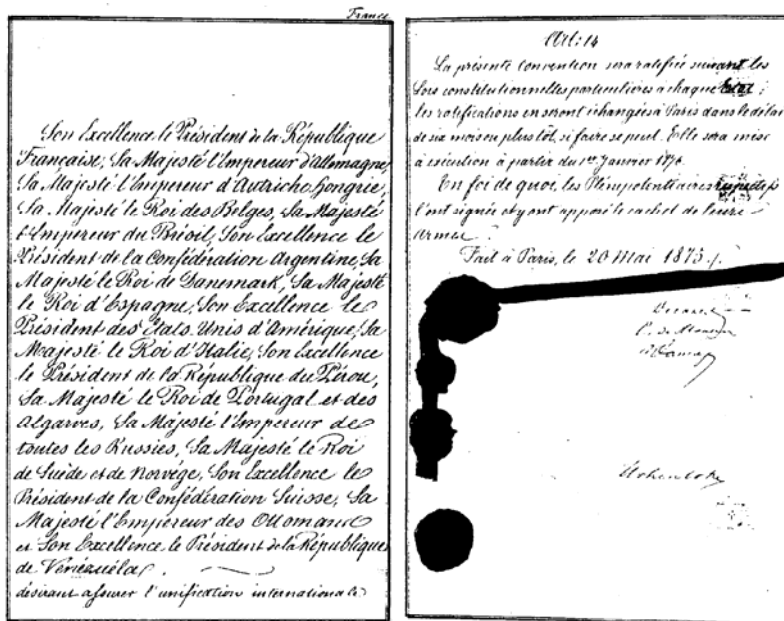
Za jedinicu dužine odabrana je neka dužina svojstvena Zemlji; htjelo se da to bude 40-milijuniti dio duljine meridijana. Nazvali su je metar (grč. *metron* - mjera). Jedinicom dužine određene su jedinica površine *kvadratni metar* i jedinica zapremine *kubni metar*.

Za jedinicu mase zapremine (tada se to još zvala težina) odabrana je određena zapremina određene materije pri određenim uslovima. Bio je to kubni centimetar vode pri temperaturi od 4°C. Ta je jedinica nazvana *gram* (grč. gram - naziv antičke jedinice težine). Gram je za mnoge primjene premalena jedinica, pa se odmah počela primjenjivati njegova decimalna, hiljadu puta veća jedinica nazvana kilogram (grč. *kilioi* - hiljada).

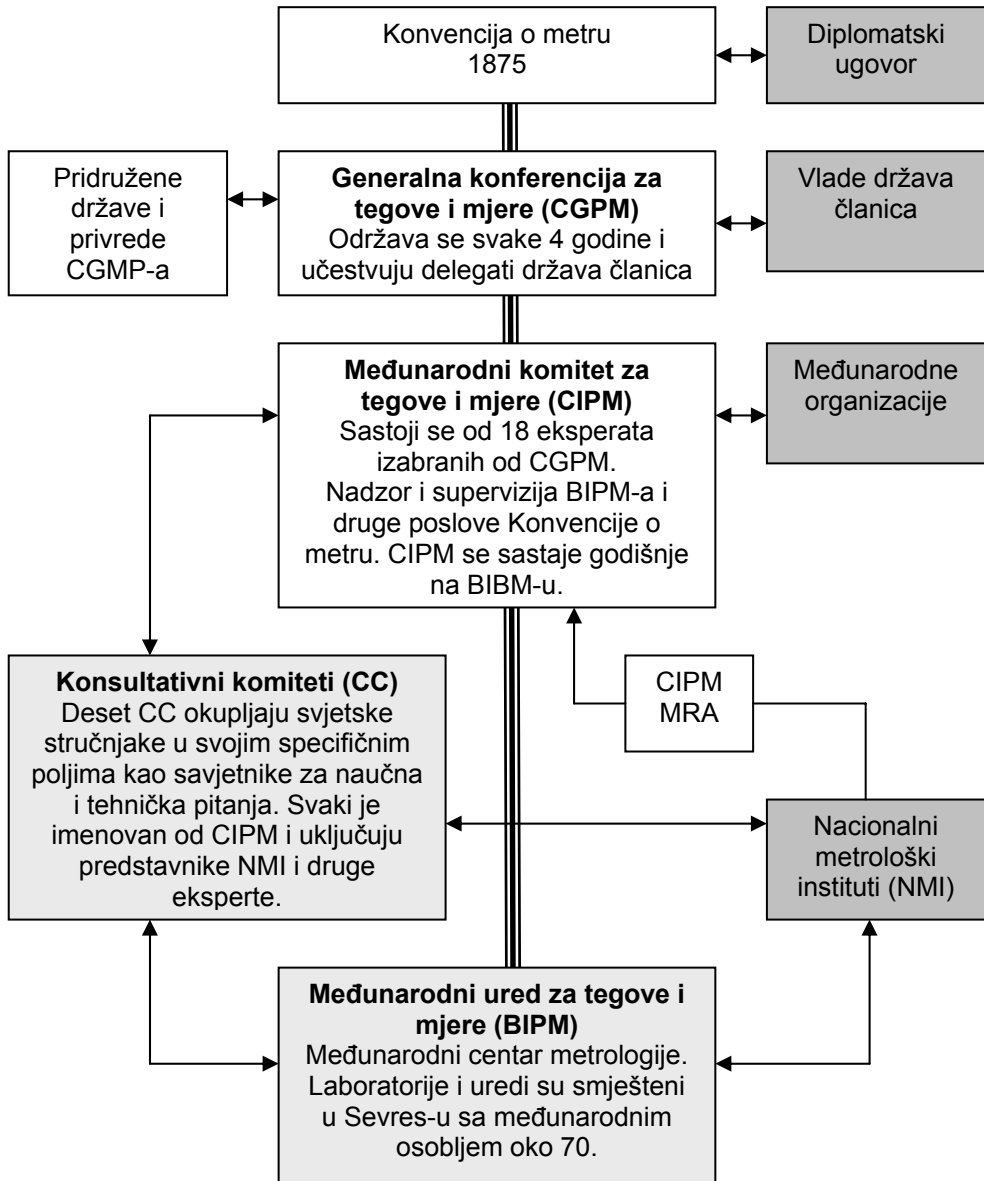
Godine 1799. načinjene su materijalne pramjere (etaloni, prototipovi) tih jedinica i pohranjene u Arhivu Francuske Republike, pa su po tome nazvane arhivski metar i arhivski kilogram.

Ubrzo se, unatoč rascjepkanosti i ratovima u Evropi, uvidjela prednost tzv. francuskih mjernih jedinica. Naučnici, posebno geodeti, uvjeravali su da je potrebno složiti jedinstven mjerni sistem u Evropi, i da je za to najprikladnije uzeti francuske jedinice. Na poticaj Francuske, 1870. godine sazvana je međunarodna konferencija da razmotri taj problem, a 1875. god. predstavnici osamnaest zemalja potpisali su tzv. *Konvenciju o metru*. U njoj su najvažnije dvije činjenice: usvojena jedinica duljine - metar i mase -

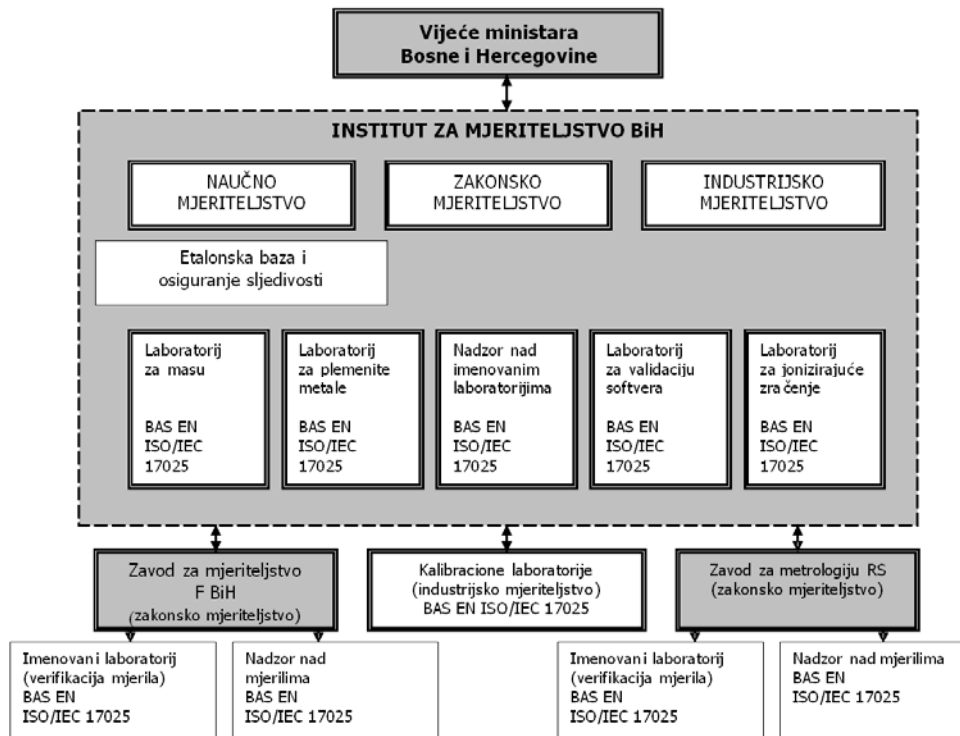
kilogram, te osnovan Međunarodni ured za mjere i tegove, mjere (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), sa sjedištem u Sèvresu kraj Pariza. U njemu su 1899. godine izrađene nove pramjere međunarodnog metra i međunarodnog kilograma, na osnovi francuskih arhivskih pramjera. Sada je 48 država potpisnica Dogovora o metru.



Slika 1.1. Konvencija o metru i etaloni metra i kilograma



Slika 1.2. Konvencija o metru



Slika 1.3. Organizaciona uređenost metrološkog sistema u BiH

1.4. Međunarodni sistem mjernih jedinica - SI sistem

Postojeći sistem jedinica dok nije dobio današnji oblik prošao je kroz faze razvoja. To je bio CGS, MKS, Tehnički sistem, a danas je to SI sistem jedinica. Koristile su se različite jedinice za različite veličine. U nekim najstarijim sistemima koristile su se stare jedinice kao što su za dužinu stopa i jard.

Svaka zemlja, pa i Bosna i Hercegovina, zakonom o mjernim jedinicama regulira upotrebu, oznake i područje primjene mjernih jedinica radi primjene mjernog jedinstva. Odmah po uspostavljanju države Bosne i Hercegovine donesen je Zakon o mjernim jedinicama i mjerilima, Službeni list R BiH br. 14/93; 13/94. Nakon toga je donesen novi zakon, Službeni glasnik BiH, br. 29/2000, u kome stoji:

- Mjerne jedinice su određene na osnovu međunarodnih ugovora koji obavezuju Bosnu i Hercegovinu,

- Pojediniosti o određenju mjernih jedinica i njihovoj upotrebi moraju biti u skladu sa međunarodnim standardima ISO 2955, serije ISO 31. i ISO 1000.

Zakonske mjerne jedinice u Bosni i Hercegovini su jedinice međunarodnog sistema SI.

1.4.1. Jedinice međunarodnog sistema

- osnovne jedinice SI (tabela 1.2)
- dopunske jedinice SI (tabela 1.3)
- izvedene jedinice SI (tabela 1.4)
- neke izvedene jedinice SI (tabela 1.5).

Veličina	Ime	Oznaka
dužina	metar	m
masa	kilogram	kg
vrijeme	sekunda	s
električna struja	amper	A
termodinamička temperatura	kelvin	K
jačina svjetlosti	kandela	cd
količina materije (supstance)	mol	mol

Tabela 1.2. Osnovne jedinice SI

1.4.2. Definicije osnovnih jedinica SI:

Dužina: Jedinica za dužinu je metar. Metar je dužina puta koju u vakuumu napravi svjetlost u vremenu $1/2999\ 792\ 458$ sekunde.

Masa: Jedinica za masu je kilogram. Kilogram je masa međunarodnog etalona kilograma.

Vrijeme: Jedinica za vrijeme je sekunda. Sekunda je trajanje $9\ 192\ 631\ 770$ perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dva nivoa osnovnog stanja atoma cezija 133.

Električna struja: Jedinica električne struje je amper. Amper je jačina stalne električne struje koja među dva paralelna vodiča, neograničene dužine i zanemarivo malim kružnim presjekom, koji su u vakuumu razmaknuti jedan metar, proizvodi među tim vodičima silu od 2×10^{-7} Njutna po metru dužine.

Termodinamička temperatura: Jedinica termodinamičke temperature je kelvin. Kelvin je termodinamička temperatura koja je jednaka $1/273$ dio termodinamičke temperature trojne tačke vode.

Jačina svjetlosti: Jedinica jačine svjetlosti je kandela. Kandela je jačina svjetlosti u određenom smjeru izvora koji odašilje monohromatsko zračenje frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ herca i kojemu je energetska jačina u tom smjeru $1/683$ vata po steradianu.

Količina materije: Jedinica za količinu materije je mol. Mol je količina materija u sastavu koji sadrži toliko elementarnih jedinki koliko ima atoma u 0,012 kilograma ugljika 12.

Napomena: Kada se upotrebljava mol treba navesti elementarne jedinice (atomi, molekule, joni, elektroni i druge čestice ili određene skupine tih čestica).

Veličina	Naziv	Oznaka
ugao (u ravni)	radijan	rad
prostorni ugao	steradian	sr

Tabela 1.3. Dopunske jedinice SI

Definicije dopunskih jedinica SI:

Ugao (u ravni): Jedinica ugla u ravni je radijan. Radian je ugao između dvaju poluprečnika koji na krugu isjecaju luk dužine jednake poluprečniku ($1 \text{ rad} = 1$).

Prostorni ugao: Jedinica prostornog ugla je steradian. Steradian je ugao kupe sa vrhom u sredini kugle, koja na površini kugle omeđuje površinu jednaku površini kvadrata određenog poluprečnikom kugle ($1 \text{ sr} = 1$).

Veličina	Naziv	Oznaka	Iskazano drugim jedinicama	Iskazano osnovnim jedinicama
frekvencija (učestanost)	herc (hertz)	Hz		s^{-1}
sila	njutn (newton)	N		$m \cdot kg \cdot s^{-1}$
pritisak (naprezanje)	paskal (paskal)	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energija rad toplota	džul (joule)	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
snaga energetski tok toplinski tok	vat (watt)	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
električni naboj	kulon (coulomb)	C		$s \cdot A$
električni napon elektromotorna sila električni potencijal	Volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
električni kapacitet	farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
električna vodljivost	simens (siemens)	S	A/V	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^2 \cdot A$
magnetni tok	veber (weber)	Wb	$V \cdot s = T \cdot m^2$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
magnetna indukcija	tesla	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
induktivnost	henri (henry)	H	$Wb/A = \Omega \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Celzijeva temperatura *	Celzijev stupanj	$^{\circ}C$		K
svjetlosni tok	lumen	lm	$cd \cdot sr$	
osvijetljenost	luks	lx	lm/m^2	
aktivnost radioaktivne tvari	bekerel (becquerel)	Bq		s^{-1}
apsorbirana doza joniziranog zračenja	grej (gray)	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
ekvivalentna doza jonizujućeg zračenja	sivert (sievert)	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

Tabela 1.4. Dopunske jedinice SI sa posebnim nazivima i znakovima

* Celzijeva temperatura t je definisana kao razlika $t = T^{\circ}$ među dvjema termodinamičkim temperaturama T i T° , gdje je $T^{\circ} = 273$ kelvina.

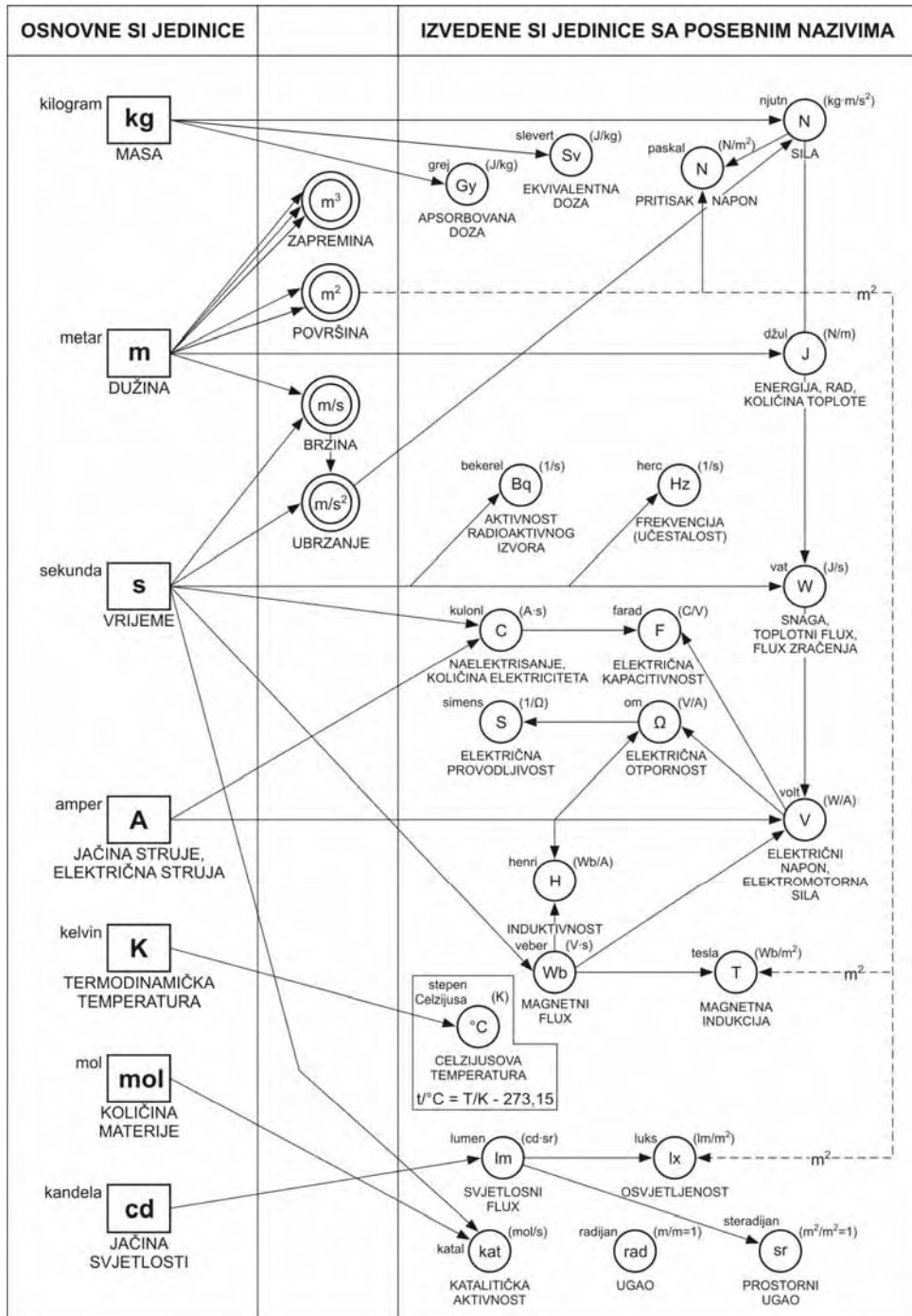
Veličina	Naziv	Oznaka	Iskazano osnovnim jedinicama SI
površina	kvadratni metar	m^2	m^2
zapremina (obujam)	kubni metar	m^3	m^3
brzina	metar u sekundi	m/s	$m \cdot s^{-1}$
ubrzanje	metar u sekundi na kvadrat	m/s^2	$m \cdot s^{-2}$
dužinska masa	kilogram po metru	kg/m	$m^{-1} \cdot kg$
površinska masa	kilogram po kvadratnom metru	kg/m^2	$m^{-2} \cdot kg$
zapreminska masa (gustoća)	kilogram po kubnom metru	kg/m^3	$m^{-3} \cdot kg$
specifična zapremina	kubni metar po kilogramu	m^3/kg	$m^3 \cdot kg^{-1}$
jačina magnetnog polja	amper po metru	A/m	$m^{-1} \cdot A$
gustoća električne struje	amper po kvadratnom metru	A/m^2	$m^{-2} \cdot A$
koncentracija	mol po kubnom metru	mol/m^3	$m^{-3} \cdot mol$
količinska (molarna) masa	kilogram po molu	kg/mol	$kg \cdot mol^{-1}$
luminacija	kandela po kvadratnom metru	cd/m^2	$m^{-2} \cdot cd$
zapreminski protok	kubni metar u sekundi	m^3/s	$m^3 \cdot s^{-1}$
maseni protok	kilogram u sekundi	kg/s	$kg \cdot s^{-1}$
ugaona brzina	radijan u sekundi	rad/s	s^{-1}
ugaono ubrzanje	radijan u sekundi na kvadrat	rad/s^2	s^{-2}
kinematička viskoznost	kvadratni metar u sekundi	m^2/s	$m^2 \cdot s^{-1}$
dinamička viskoznost	paskal sekunda	$Pa \cdot s$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
površinski napon	njutn po metru	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
entropija	džul po kelvinu	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
specifični toplotni kapacitet, specifična entropija	džul po kilogram kelvinu	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
specifična energija	džul po kilogramu	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
toplotna provodnost (vodljivost)	vat po metar kelvinu	$W/(m \cdot K)$	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
zapreminska energija	džul po kubnom metru	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
jačina električnog polja	volt po metru	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A$
permitivnost	farad po metru	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$
permeabilnost	henri po metru	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
količinska (molarna) energija	džul po molu	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
ekspoziciona doza jonizujućeg zračenja	kulon po kilogramu	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
energetska jačina zračenja	vat po steradianu	W/sr	

Tabela 1.5. Neke izvedene jedinice SI

Veličina	Naziv	Oznaka	Iskazano jedinicama SI	Dopuštena upotreba samo
dužina	morska milja		1 morska milja = 1852 m	u pomorskom i zračnom prometu
	astronomska jedinica		1 astronomska jedinica = $1,4959787 \cdot 10^{11}$ m	u astronomiji
površina	ar	A	1 a = 100 m^2	za iskazivanje površine Zemlje
	hektar	ha	1 ha = 10000 m^2	
zapremina	litar	l, L	1 l = 1 L = 10^{-3} m^3	
ugao	stepen ugaoni	1^0	$1^0 = (\pi/180) \text{ rad}$	
	minuta ugaona	1'	1' = $(\pi/10800) \text{ rad}$	
	sekunda ugaona	1"	1" = $(\pi/64800) \text{ rad}$	
	gon	1g	1g = $(\pi/200) \text{ rad}$	
masa	tona		1 t = 10^3 kg	
	atomska jedinica mase		1 u = $1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	u fizici i hemiji
dužinska masa	teks		1 tex = 10^{-6} kg/m	za iskazivanje mase tekstilnog vlakna i konca
masa dragog kamenja	metarski karat		1 metarski karat = $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$	
vrijeme	minuta	min	1 min = 60 s	
	sat	h	1 h = 3600 s	
	dan	d	1 d = 86400 s	
brzina	čvor		1 čvor = $1852/3600 \text{ m/s}$	u pomorskom, riječnom i zračnom prometu
pritisak	bar	bar	1 bar = 10^5 Pa	
	milimetar živinog stupca	mmHg	1 mmHg = 1333,322 Pa	za određivanje pritiska krvi u zdravstvu
energija	elektronvolt**	eV	1 eV = $1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	u specijalnim oblastima
snaga	voltamper	VA	1 VA = 1 W	za određivanje prividne snage
	var	var	1 var = 1 W	za određivanje reaktivne (jalove) električne energije
prelamanje optičkih sistema	dioptrija		1 dioptrija = 1 m^{-1}	u zdravstvu i fizici

Tabela 1.6. Iznimno dozvoljene jedinice van međunarodnog sistema jedinica sa posebnim nazivima

** Atomska jedinica mase jednaka je 1/12 mase atoma nuklida ^{12}C .



Slika 1.4. Veza osnovnih SI jedinica i izvedenih jedinica sa posebnim nazivima (pune linije predstavljaju množenje, isprekidane dijeljenje)

1.4.3. Tvorba izvedenih mjernih jedinica

1. Izvedene jedinice tvore se od drugih jedinica na temelju definicijskih jednačina.
2. Nazivi i oznake izvedenih jedinica tvore se od naziva, odnosno oznaka jedinica od kojih su sastavljene uz upotrebu naziva ili oznaka pripadajućih algebarskih operacija.
3. Samo ograničen broj izvedenih jedinica SI imaju posebne nazive i oznake koji potiču od izvornog načina pisanja naziva.

1.4.4. Tvorba decimalnih jedinica:

1. Decimalne jedinice su veće i manje jedinice od neke jedinice (sa posebnim nazivom) nastale množenjem decimalnim višekratnikom ili nižekratnikom.

Naziv	Oznaka	Brojčana vrijednost
jota	J	1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{24}
zeta	Z	1 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{21}
eksa	E	1 000 000 000 000 000 000 = 10^{18}
peta	P	1 000 000 000 000 000 = 10^{15}
tera	T	1 000 000 000 000 = 10^{12}
giga	G	1 000 000 000 = 10^9
mega	M	1 000 000 = 10^6
kilo	k	1 000 = 10^3
hekto	h	100 = 10^2
deka	da	10 = 10^1
deci	d	0, 1 = 10^{-1}
centi	c	0, 01 = 10^{-2}
mili	m	0, 001 = 10^{-3}
mikro	μ	0, 000 001 = 10^{-6}
nano	n	0, 000 000 001 = 10^{-9}
piko	p	0, 000 000 000 001 = 10^{-12}
femto	f	0, 000 000 000 000 001 = 10^{-15}
ato	a	0, 000 000 000 000 000 001 = 10^{-18}
zepto	z	0, 000 000 000 000 000 000 001 = 10^{-21}
jokto	y	0, 000 000 000 000 000 000 000 001 = 10^{-24}

Tabela 1.7. Nazivi predmeta, oznaka i brojčane vrijednosti

2. Decimalni višekratnici i nižekratnici su međunarodnim dogovorom propisani, a njihovi nazivi i oznake dati su u tabeli 1.7.
3. Nazivi decimalnih jedinica tvore se stavljanjem predmeta ispred naziva jedinica.
4. Isto se tvori i oznaka decimalne jedinice stavljanjem oznake predmeta ispred oznake jedinice.
5. Pri tvorbi decimalne jedinice može se istodobno upotrijebiti samo po jedan predmetak.
6. Naziv decimalne jedinice i njena oznaka čine cjelinu.
7. Matematičke operacije primjenjuju se na cijelu decimalnu jedinicu, tako se kubni centimetar označava sa cm^3 , u značenju $(\text{cm})^3$ itd.
8. Decimalne jedinice tvore se:
 - a. od svih jedinica SI, izuzev Celzijeva stepena i kilograma (da se ne bi primjenila po dva predmeta, decimalne jedinice mase tvore se od jedinice gram, $\text{g} = 10^3 \text{ kg}$),
 - b. od sljedećih iznimno dozvoljenih jedinica van SI: litar, tona, teks, bar, elektrovolt i var.

Pisanje i štampanje mjernih jedinica:

1. Nazivi mjernih jedinica i predmetaka decimalnih jedinica pišu se prema pravopisnim pravilima bosanskog jezika.
2. Oznake mjernih jedinica i decimalnih predmetaka pišu se uspravnim slovom latinske abecede, odnosno dvama slovima grčkog alfabeta (μ i O).
3. Svaka se jedinica označava samo jednom oznakom, osim litra koji se označava sa I ili L.
4. Oznake jedinica se pišu bez tačke na kraju, osim redovne interpunkcije.
5. Umnožak jedinica se označava tačkom u sredini retka ili malim, tzv. čvrstim razmakom između oznaka jedinica (redak se na tom mjestu ne može prekidati).
6. Ako se jedinica tvori dijeljenjem drugih jedinica, za oznaku dijeljenja može se upotrijebiti kosa crta ili vodoravna crta ili negativni eksponent. Na primjer:

$$m / s^2 \quad \frac{m}{s^2} \quad m \cdot s^{-2}$$

1.5. VIM i osnovni termini u metrologiji

Precizne definicije termina i pojmova koji se koriste u proizvodnim mjerenjima date su u slijedećim dokumentima:

- VIM (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology)
- ISO 3534-1, Statistics – Vocabulary and symbols Part 1.
- Probability and general statistics terms
- ISO 5725, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results
- ISO 8402, Quality management and quality assurance – Vocabulary
- ISO 10012, Quality assurance requirement for measuring equipment: Part 1.
- Metrological confirmation system for measuring equipment
- EN 45020, General terms and their definitions concerning standardization and related activities.

Postoji čitav niz termina u metrologiji tačno definiranih u VIM. u u kome su date definicije svih termina koji se koriste u međunarodnim relacijama. To je potrebno kako bi se izbjegla zabuna prilikom mjerenja i uspostavljanja pisane dokumentacije u međulaboratorijskim i uopšte međunarodnim relacijama. Za sve pojmove vezane za metrologiju čitalac se upućuje na [].

Termini koji se koriste u metrologiji su:

Tačnost (accuracy) (ISO 5725)

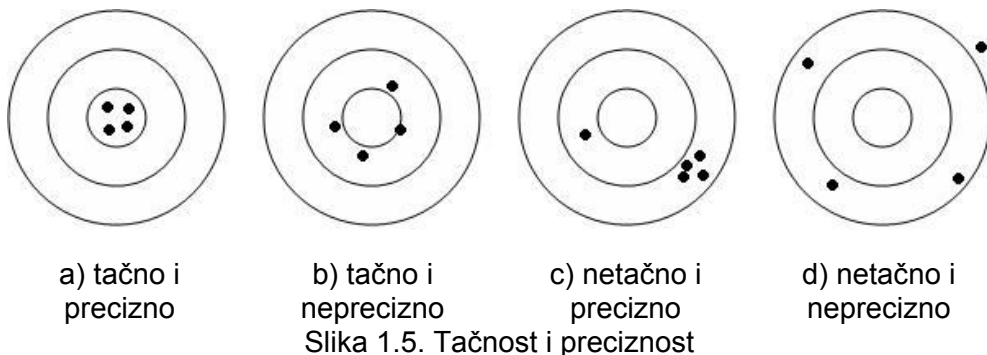
Bliskost rezultata ispitivanja i usvojene referentne vrijednosti.

Ovdje treba razlikovati preciznost (precision) i istinitost (trueness).

Preciznost (ISO 5725) je bliskost između rezultata nezavisnih ispitivanja dobivenih pod određenim uslovima.

Razlika između tačnosti i preciznosti može se pokazati na primjeru streljačkih meta, (slika 1.5).

Na slici a) su prikazane četiri mete. Na prvaj su četiri pogotka u centar (tačno) i rezultati su blizu (precizno). Na slici b) su rezultati tačni (blizu centra) i neprecizni (rastureni i nisu bliski). Na slici c) su rezultati netačni (daleko od postavljenog cilja, ali precizni (bliski). Na slici d) su rezultati netačni (daleko od utvrđene referentne vrijednosti – cilja) i neprecizni (rasuti).



Slika 1.5. Tačnost i preciznost

Istinitost (trueness) (ISO 5725) je bliskost između srednje vrijednosti dobivene za veliku seriju rezultata ispitivanja i usvojene referentne vrijednosti.

Mjera istinitosti se izražava u vidu greške (bias). Greška (bias) je razlika između očekivanih rezultata ispitivanja i usvojene referentne vrijednosti.

Laboratorijska greška je razlika između očekivanih rezultata ispitivanja za određenu laboratoriju i usvojene referentne vrijednosti.

Ispitivanje (testing) je tehničko istraživanje da se utvrdi da li proizvod odgovara specificiranim karakteristikama.

Mjerenje je skup operacija koje se vrše na objektu kako bi se odredile vrijednosti veličine koja se mjeri.

Kalibracija je skup operacija kako bi se uspostavila pod određenim uslovima veza između veličina koje se očitavaju na indikatoru instrumenta i odgovarajuće vrijednosti etalona. Rezultat kalibracije može se dati u vidu dokumenta npr. certifikata kalibracije. Rezultat se može izraziti kao korekcija izvršena u odnosu na pokazivanje instrumenta. Kalibracija ne znači da instrument radi u skladu sa njegovom specifikacijom. Osnovni koncept osiguranja kvaliteta je kalibracija mjernih instrumenata. Kalibrirati mjerni instrument znači odrediti koliko je odstupanje, odnosno greška očitavanja na instrumentu u odnosu na etalon za kojim se upoređuje. Kalibracija obično ne znači poboljšanje. Ona samo daje informaciju o grešci opreme u odnosu na prihvaćenu referentnu vrijednost koju mjerni instrument (sredstvo) treba da ima.

Posljedica kalibracije je odluka koju donosi korisnik mjerne opreme koji odlučuje da li je oprema dovoljno dobra da se sa njom mogu vršiti sigurna mjerenja.

Sistem kvaliteta zahtijeva da se vrši kalibracija mjernih sredstava u odnosu na etalone čija je tačnost veća od tačnosti opreme koja se kalibrira.

Postupak kalibracije izvodi se po određenoj proceduri i u korištenje izabраниh metoda.

Kalibracijom, ukoliko se vrši u odnosu na odgovarajući etalon ostvaruje se sljedivost mjernog sredstva u odnosu na taj etalon. Kalibracija predstavlja osnovno sredstvo u obezbjeđenju sljedivosti mjerenja. Kalibracijom se određuju metrološke karakteristike mjernog uređaja.

Sljedivost

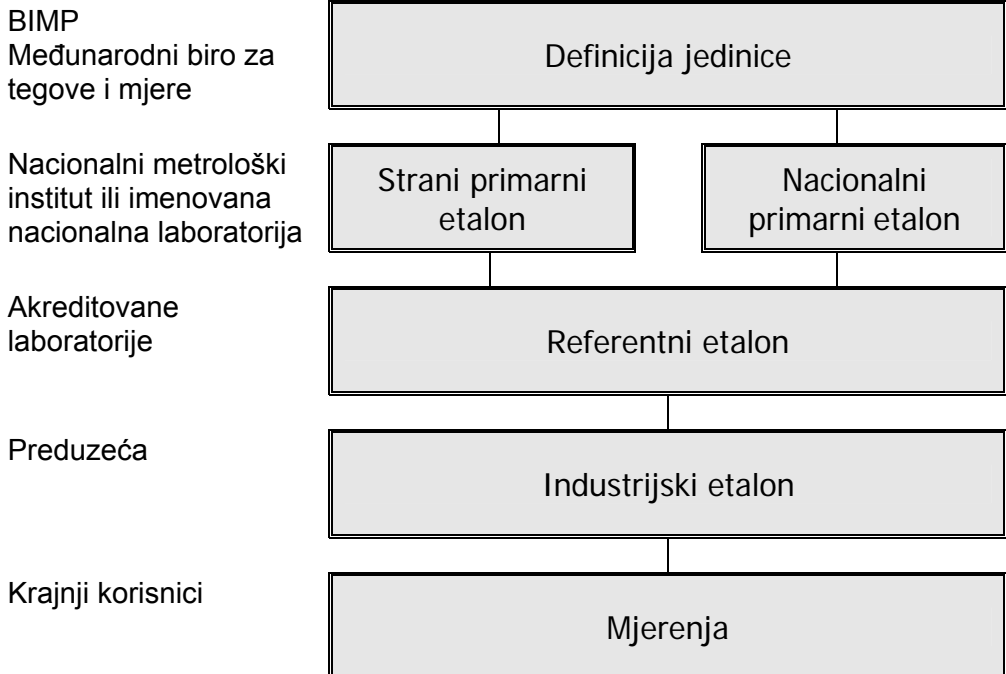
Industrija u Evropi obezbjeđuje sljedivost na najvišem međunarodnom nivou. Za te svrhe koriste se akreditirane evropske laboratorije.

U USA industrija obezbjeđuje sljedivost na najvišem internacionalnom nivou direktno preko NIST-a (National Institute for Standard and Technology).

Sljedivost predstavlja neprekidan lanac poređenja koji će učiniti da mjerni rezultati budu sigurni ili vrijednost etalona koja je u vezi sa referentnim etalom na najvišem nivou pri čemu je završni nivo sljedivosti primarni etalon.

Industrija u Evropi obezbjeđuje sljedivost na najvišem međunarodnom nivou. Za te svrhe se koriste akreditirane evropske laboratorije.

Lanac sljedivosti



Slika 1.6. Nacionalna metrološka infrastruktura

Etaloni

Etaloni su materijalizovane mjere, mjerila ili mjerni sistemi koji su namjenjeni da se definira, ostvari, čuva i reproducira jedna ili više vrijednosti jedne veličine da bi služila kao referentna vrijednost.

Primjer etalona je metar definiran kao dužina puta u vakuumu koju pređe svjetlost tokom vremenskog perioda od $1/299\,792\,458$ sekunde. Metar se ostvaruje-izvodi na primarnom nivou preko talasne dužine jodom stabilisanog helijum-neonskog lasera. Na nižim nivoima, upotrebljavaju se materijalne mjere kao plan-paralelne mjere, a sljedivost se obezbjeđuje

primjenom optičke interferometrije radi određivanja dužine planparalelnih mjera u odnosu na gore pomenutu talasnu dužinu laserske svjetlosti.

Etaloni mogu biti:

- primarni,
- državni-nacionalni,
- referentni,
- industrijski,
- grupni

Primarni etalon je određen ili priznat da ima najviše mjeriteljske osobine i čija je vrijednost prihvaćena bez obzira na druge etalone za istu veličinu.

Državni (nacionalni) etalon priznat je službenom odlukom državnog organa da služi kao osnovni i kod utvrđivanja vrijednosti svih drugih etalona date veličine.

Referentni etalon je najvišeg mjeriteljskog nivoa na određenom mjestu ili u određenoj organizaciji.

Grupni etalon je skup etalona izabranih vrijednosti da pojedinačno ili u kombinaciji omoguće dobivanje niza vrijednosti veličina iste vrste.

Referentni materijali

Referentni materijal je materijal ili supstanca čiji su jedno ili više svojstava dovoljno dobro definirani da omogućavaju njihovu upotrebu za kalibraciju nekog mjerila, provjeru metoda mjerenja ili za označavanje vrijednosti materijala.

Opit je tehnička operacija koja se sastoji od utvrđivanja jedne ili više karakteristika datog proizvoda, procesa ili usluge u skladu sa specificiranom procedurom. **Ispitivanje** je provođenje jednog ili više opita.

Ispitna metoda je navedena tehnička procedura za izvođenje opita. Tehnička procedura može biti definirana prema standardu ili nekom

drugom dokumentu. Ako je nestandardizirana mora biti potpuno dokumentirana.

Izveštaj o opitu je dokument koji daje rezultate opita i druge podatke vezane za opit.

Područje kalibracije i ispitivanja su kategorije mjerenja kao što je: mjerenje sile, toplotna mjerenja ili hemijski opiti, mjerenje električnih veličina i sl.

Laboratorija je mjesto gdje se obavlja opit. Laboratorije mogu biti akreditacija je zvanično priznanje da je laboratorij tehnički kompetentan za izvođenje određenih kalibracija ili ispitivanja. Ovlašteni organ za akreditiranje tu funkciju dobija od vlade i predstavljen je Evropskoj komisiji, da je ovlašten za preuzimanje jednog ili više zadataka iz evropskih direktiva. Ti zadaci mogu biti tipsko odobrenje, prava ovjera, ispitivanje i provjera sistema kvaliteta.

Zajednička evropska institucija za standardizaciju je izdala evropski standard koji određuje opšte kriterije za rad i ocjenjivanje ispitnih laboratorija (EN 45001 i 45002) kao, i opšti kriterij za organe za akreditiranje laboratorija, koji su sadržani u EN 45003.

Kriteriji, koje laboratorija mora ispuniti da bi radila, te da bi njen rad bio priznat i cijenjen su navedeni u nastavku.

a) Pravni identitet

Svaka laboratorija mora biti organizovana tako da se može pravno identificirati. Laboratorija za ispitivanje, takođe treba da ima samostalnost i nezavisnost. Nikakve djelatnosti, koje bi mogle ugroziti povjerenje u nezavisnost njihove ocjene i samostalnost njihove aktivnosti se ne smiju izvoditi unutar laboratorije. Osoblje laboratorije ne smije biti ni pod kakvim komercijalnim ili bilo kojim drugim uticajem pri donošenju tehničkih procjena.

b) Tehnička osposobljenost

Laboratorija mora biti osposobljena za izvođenje odgovarajućih ispitivanja. Upravljanje i organizacija moraju biti takvi da svaki član osoblja bude upoznat sa obimom i granicom svoje odgovornosti. Mora postojati dovoljan broj osoblja sa odgovarajućim stručnim obrazovanjem i iskustvom, koje je potrebno za pojedine radne funkcije, kao i prostor i oprema koji će omogućiti praviln opita i mjerenja.

U tehničku osposobljenost neke laboratorije spadaju i procedure rada tj. ispitne metode i procedure, sistem kvaliteta, izvještaji o opitima, razni zapisi, način rukovanja sa ispitnim uzorcima ili primjercima proizvoda, povjerljivost, sigurnost i podugovaranja.

c) Saradnja

Svaka laboratorija mora imati saradnju raznih oblika i inteziteta. Saradnja sa naručiocima je potrebna da bi naručilac pojasnio svoje zahtjeve, ali i da bi bio u mogućnosti da prati rad laboratorije, u vezi a poslom koji se za njega obavlja.

Akreditovane laboratorije

Akreditacija je priznavanje tehničke osposobljenosti, sistema kvaliteta i nepristrasnosti laboratorije od treće strane.

Akreditacija se dodjeljuje na osnovu ocjenjivanja laboratorije i redovnih nadzora. Akreditacija je generalno zasnovana na međunarodnim standardima, kao što je standard ISO/IEC 17025 «Opšti zahtjevi za osposobljenost laboratorija za ispitivanje i kalibraciju».

Cilj je da ispitivanja i kalibracije iz akreditovane laboratorije jedne države članice budu prihvaćena od strane vlasti i privrede svih ostalih država članica. Zbog toga akreditaciona tijela imaju međunarodno prihvaćene sporazume s ciljem međusobnog priznavanja.

Certifikacija (potvrđivanje) je postupak koji vrši treća strana koja ovjerava da je proizvod, proces ili usluga u skladu sa standardom. Postupak certifikacije završava se dodjelom certifikata-potvrde.

Metrološko ovjeravanje (potvrđivanje) je skup zahtjevanih operacija da se osigura da je mjerna oprema u takvom stanju koje je usaglašeno sa zahtjevima za koje se namjerava koristiti. metrološko potvrđivanje uključuje kalibraciju, neophodno prilagođavanje ili popravku a nakon toga ponovnu kalibraciju.

Popravka (correction) je vrijednost koja je računski dodaje nekorigovanom rezultatu mjerenja, da kompenzira sistematsku grešku. Korekcija je jednaka postojećoj sistematskoj grešci, ali je suprotnog predznaka. O greškama mjerenja će biti više riječi u narednom tekstu. Ukoliko sistematska greška nije tačno poznata, popravka nije sigurna.

Drift je postepeno mijenjanje metroloških karakteristika mjernog instrumenta.

Greška očitavanja (error of indication) pokazivanja mjernog instrumenta je pokazivanje mjernog instrumenta minus istinita (tačna) vrijednost odgovarajuće ulazne veličine. Greška je u principu razlika izmjerene i željene vrijednosti.

Očekivanje mjerene veličine je srednja vrijednost rezultata mjerenja.

Greška mjernog instrumenta je vrijednost koja je karakteristika mjernog instrumenta. Ako se ta vrijednost podijeli sa gornjom granicom nominalnog ranga mjerenog instrumenta dobije se sigurna greška.

Međulaboratorijski poredbeni opiti organizacija, provedba i ocjena opita na istim ili sličnim primjerima u dvije ili više laboratorija u skladu sa unaprijed određenim uslovima.

Poređenje se vrši radi:

- validnosti ispitnih metoda,
- certifikacije referentnih materijala i
- provjere osposobljenosti laboratorija.

Verifikacija mjerila ili referentnih materijala je niz postupaka kojima se utvrđuje da li mjerilo ili referentni materijal ispunjava propisane mjeriteljske zahtjeve.

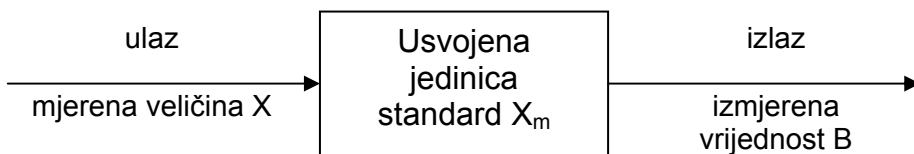
2. MJERENJE FIZIČKIH VELIČINA

Sadržaj lekcije:

1. Principi mjerenja i kontrole
2. Podjela metoda i sredstava mjerenja
3. Mjerni sistemi
4. Električna mjerenja neelektričnih veličina

2.1. Principi mjerenja i kontrole

U postupku izrade proizvoda ili odvijanja procesa vrše se mjerenja s ciljem da se dobiju karakteristike proizvoda ili procesa onakve kakve su nacrtane u dokumentaciji ili propisane za odvijanje procesa. Mjerenje se vrši u toku izrade proizvoda i da bi se provjerile tehničko-tehnološke mogućnosti sistema za izradu jednostavnih i složenih proizvoda. U klasičnom mjerenju vrši se uspoređivanje mjerene veličine X sa usvojenom jedinicom mjere (etalonom) X_m , slika 2.1.



Slika 2.1. Proces mjerenja

Mjerna veličina je B puta manja ili veća od usvojene jedinice (standarda) X_m .

$$X = B \cdot X_m$$

gdje su:

B – brojčana (numerička) vrijednost mjerene veličine

X_m – usvojena jedinica.

2.1.1. Proces mjerenja

Proces mjerenja u općem slučaju je složen proces, koji se provodi unutar i izvan proizvodnog procesa u toku i poslije izrade proizvoda.

Mjerenje se može posmatrati kroz nekoliko faza:

1. postavljanje zadataka i ciljeva mjerenja,

2. formiranje plana mjerenja (plan eksperimenta),
3. izvršenje mjerenja,
4. obrada rezultata mjerenja.

Mjerenjem se ukazuje na stanje tehnološkog procesa, proizvodnog i drugih sistema u cjelini. Postoje četiri osnovne faze u mjerenju. Sve aktivnosti mjerenja mogu se smjestiti u te četiri faze. Svako mjerenje je posao koji treba ozbiljno planirati, izvršiti planirane aktivnosti, a zatim stručno obraditi rezultate mjerenja zavisno od toga kakva su mjerenja vršena, koliko je mjerenja vršeno, sa kojim ciljem su vršena, koji parametri su mjereni i sl.

Prvu fazu mjerenja opisuje skup parametara kao što su: mjerena veličina (šta se mjeri), greška mjerenja, interval povjerenja u kome će se nalaziti vrijednost izmjerene veličine, vjerovatnoća da se vrijednost izmjerene veličine nađe u intervalu povjerenja, vrijeme kada će započeti mjerenje, vrijeme kada će se završiti mjerenje, vremenski interval u kome je vršeno mjerenje itd.

U drugoj fazi mjerenja pravi se plan mjerenja koji obuhvata tip i strukturu, interval mogućih vrijednosti mjerene veličine, karakter njene promjene u vremenu, broj mjerenja i sl.

Realizacija plana zacrtanih mjerenja obuhvata uslove i režim mjerenja, mjernu opremu, tip mjernog signala.

Četvrta faza mjerenja je obrada i analiza podataka dobivenih mjerenjem. Prave se zaključci da li je mjerenje provedeno na odgovarajući način i da li su rezultati mjerenja, greške mjerenja i vjerovatnoće uključeni u intervale pouzdanosti.

Ukoliko se mjerenje ne vrši na klasičan način nego se koriste mjerni pretvarači različitih vrsta onda se mjerenje svodi na proces generiranja i pretvaranja mjernih informacija – signala koji se dobiju mjerenjem. Mjerena veličina prikazana je rezultatom mjerenja na indikatorskoj jedinici ili su rezultati, što je najčešći slučaj pohranjeni u memoriji kompjutera.

Uz pomoć odgovarajućeg software – a podaci mjerenja, u vidu dobivenih signala se obrađuju na osnovu odgovarajućeg algoritma za date namjene.

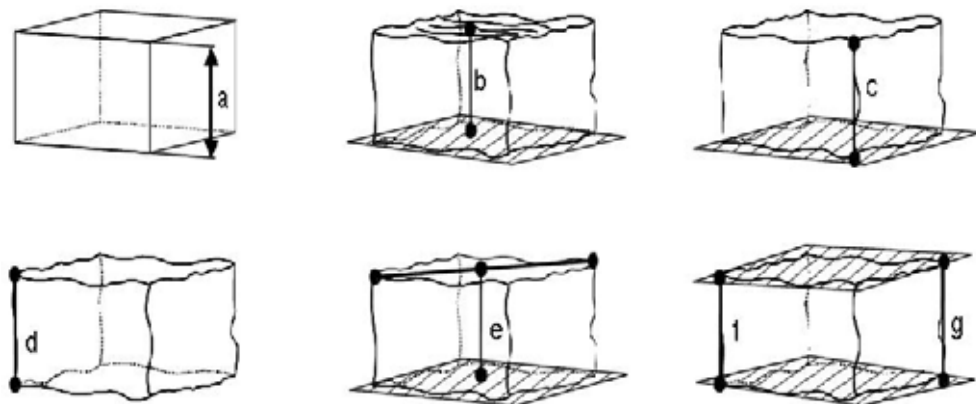
2.1.2. Postulati mjerenja

Prije svakog mjerenja treba imati na umu univerzalne pristupe mjerenju koji su definirani u vidu tri postulata.

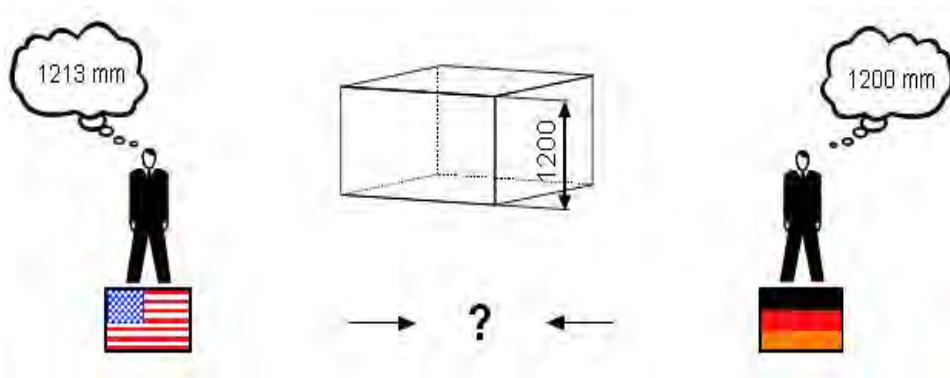
Prvi postulat mjerenja glasi:

Mjerena veličina mora biti jedinstveno definirana.

Nije moguće izvršiti mjerenja ukoliko se ne definira baza idealne geometrije koja je osnova za mjerenje u odnosu na koju će se vršiti mjerenje i analizirati rezultati. Na slici 2.2, dat je primjer kako se prvi postulat primjenjuje u proizvodnim mjerenjima. U mjerenju fizičkih veličina u procesima definira se željeni parametar procesa koji je osnova u odnosu na koju će se vršiti mjerenje, odnosno odstupanje mjerene veličine.



Slika 2.2. Prvi postulat mjerenja (Različite definicije mjerene veličine - razmaka između dvije paralelne ploče)
 a: Definicija na bazi idealne geometrije radnog komada,
 b do g: Moguće definicije na realnom komadu



Slika 2.3. Drugi postulat mjerenja

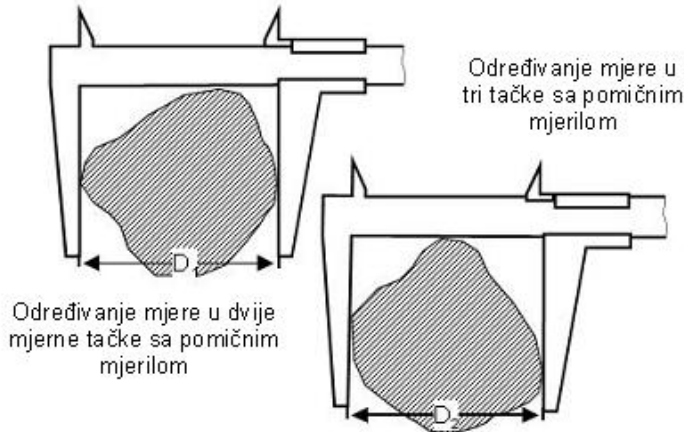
Drugi postulat mjerenja glasi:

Referenca ili jedinica moraju biti fiksne ili definirane konvencijom.

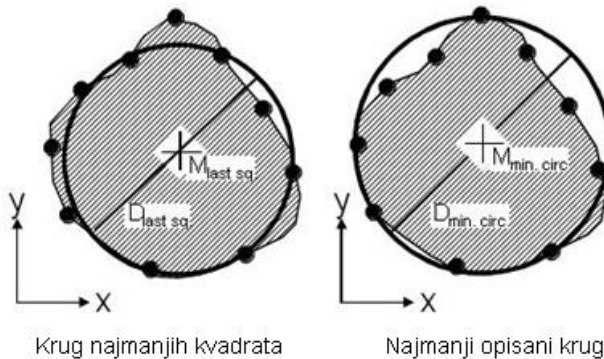
Svako mjerenje nužno zahtijeva da se zna koja se mjerna jedinica koristi. Ona mora biti tačno uzeta bez obzira o kom se mjernom sistemu radi.

Treći postulat mjerenja glasi:

Mjerna tehnika mora biti jedinstveno usvojena sa svim uslovima i uticajima.



CMM tehnika ocjena zamjenskih krugova za tačke dobivene koordinatnom mjernom tehnikom



$$D_1 \neq D_2 \neq D_{last sq} \neq D_{min. circ.}$$

$D_{last sq.}$ – prečnik kruga najmanjih kvadrata
 $D_{min. circ.}$ – prečnik najmanjeg opisanog kruga

Slika 2.4. Treći postulat mjerenja

Korištenje mjerne tehnike zavisno od mjerenja koje se vrči je slobodan izbor i mogućnost korisnika ili zahtjev kupca. Uslovi koji se pri tom moraju poštovati su mogućnosti i dosljedna primjena svih karakteristika izabrane mjerna opreme.

2.1.3. Kontrola (DIN 1319, DIN 2257, DIN 19222, ISO 286-1)

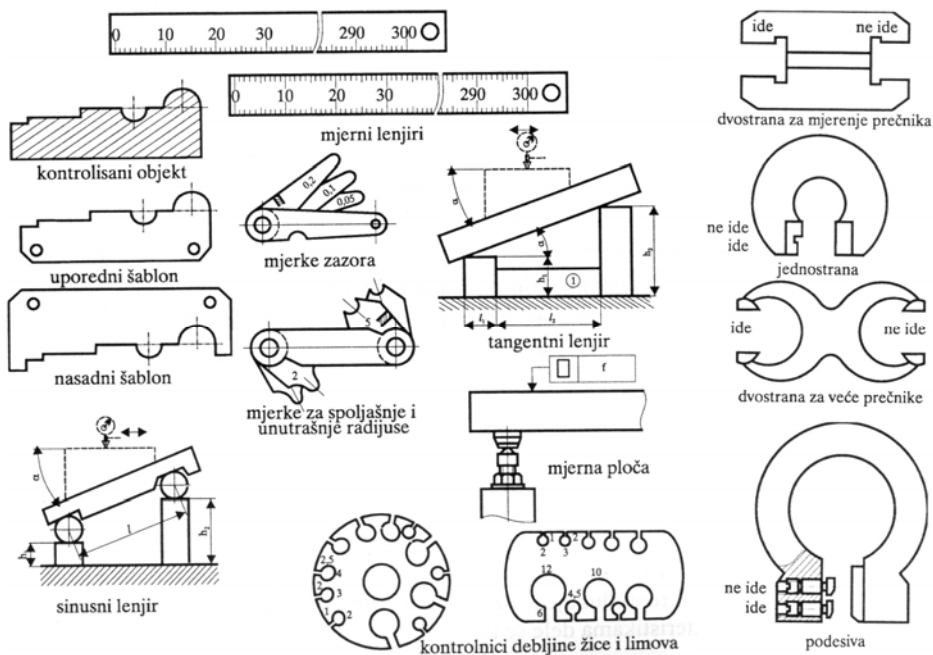
Postupak kontrole se bitno razlikuje od mjerenja. Kontrolom se ne dobivaju brojčane vrijednosti kontroliranih veličina. Dobiva se samo informacija da li je neka dimenzija mjerenog objekta u granicama ili izvan granica tolerancije. Rezultati kontrole pomažu u donošenju odluka u procesu proizvodnje da li je neki komad dobar, loš ili za doradu. Kontrolom se dobiva informacija o karakteru procesa kojim se izrađuje kontrolirani komad. Na osnovu rezultata kontrole zaključuje se o stabilnosti procesa ili potrebi korekcije upravljanja tehnološkim procesom.

Kontrolom se identificiraju odstupanja kontrolirane veličine, od dokumentacijom predviđene. Kontrola je provjera da li se kontrolirana veličina - dimenzija nalazi unutar propisanih granica tolerancije (gornje i donje).

Vrijednost kontrolirane veličine se izražava zaključcima:

- mjerena veličina je u granicama tolerancije
- mjerena veličina je iznad gornje granice tolerancije,
- mjerena veličina je ispod donje granice tolerancije,

Kontrolom se za razliku od mjerenja ne dobiju vrijednosti kontroliranih veličina nego samo njihovo stanje koje se može porediti sa propisanim.



Slika 2.5. Kontrolna oprema

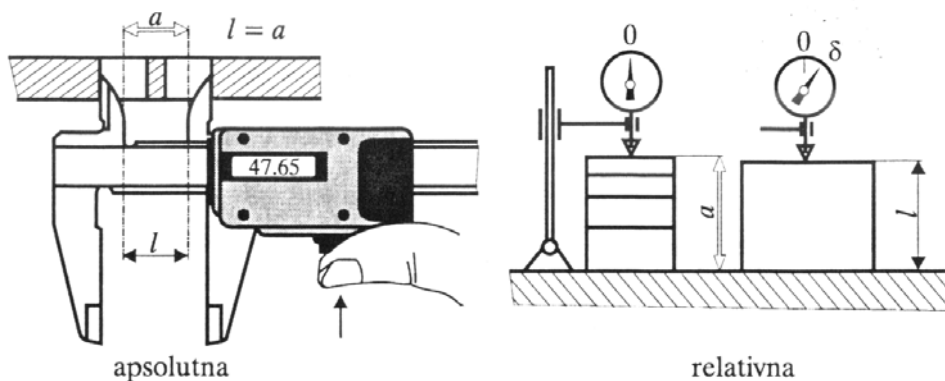
Kontrola se može podijeliti na

- aktivnu i
- pasivnu.

Aktivnom kontrolom se osim utvrđivanja stanja kontrolirane veličine vrši i automatsko upravljanje tj. promjena parametara koji utiču na proces kako bi se proces odvijao prema propisanim parametrima.

Pasivna kontrola se izvodi nakon završene obrade dijelova ili izrade proizvoda. Rezultati pasivne kontrole nemaju uticaja na proces.

U procesu proizvodnje donose se odluke kada će se vršiti kontrola, a kada mjerenje. U principu, ako se radi o jednom mjernom komadu ili jednom parametru koji se mjeri na manje od 20 komada vrši se mjerenje. Ako je broj komada veći od 20 vrši se kontrola predviđenog parametra.



Slika 2.6. Aktivna i pasivna kontrola

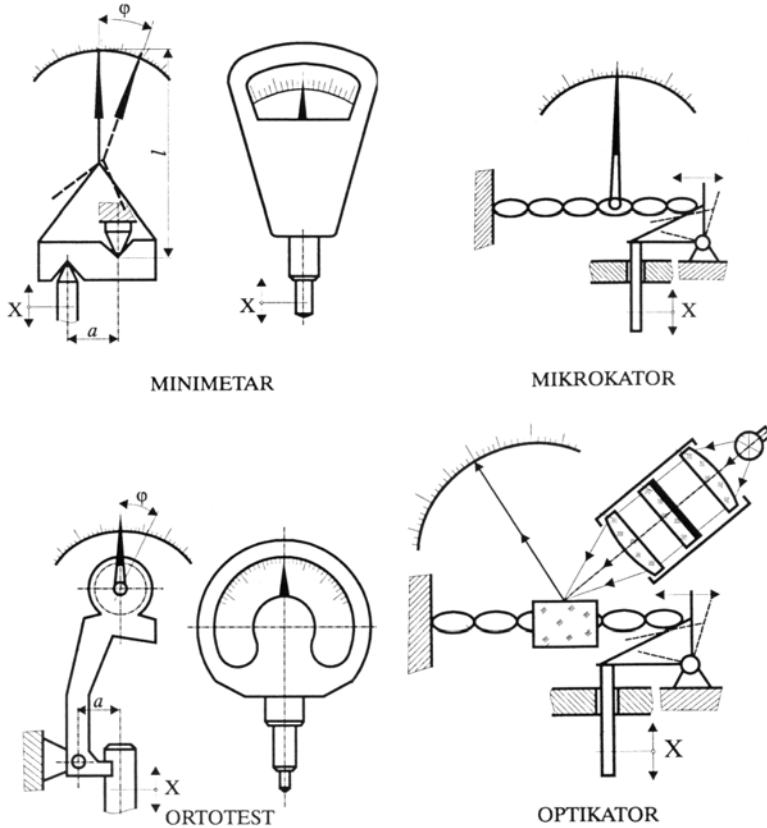
2.1.4. Princip mjerenja

Princip mjerenja se zasniva na poznatom fizičkom efektu (termoelektrični, fotoelektrični, piezoelektrični, pneumatski, hidraulički i sl.). Mjerna sredstva kojima se vrše mjerenja se izrađuju da rade na određenom fizičkom principu koji postaje princip mjerenja. Takva mjerna sredstva su termopar, elektrootporna mjerna traka itd).

Prema principu mjerenja mogu biti:

- mehanička,
- optička,
- električna,
- piezoelektrična,

- fotoelektrična,
- termoelektrična.
- pneumatska i dr.



Slika 2.7. Mjerenja zasnovana na razlilitim principima

U tehnici su praktični, korisni i često se upotrebljavaju električni mjerni sistemi za mjerenje neelektričnih veličina. Posebno je važna ova vrsta mjerenja za mjerenja na mašinama i uređajima koji rade u dinamičkim uslovima.

2.2. Podjela metoda i sredstava mjerenja

Sve što treba eksperimentalno provjeravati bez opreme ili uz korištenje bilo koje opreme, bilo mjerne ili kontrolne, može se nazvati ispitivanjem. Ispitivanje se, u principu, dijeli na subjektivno, objektivno i brojanje, slika 2.8.

Subjektivno ispitivanje je zaključivanje o karakteristikama i pojavama na bazi osjećaja dodirom, zvučnim efektima, čulom mirisa, okusa ili vizualno.

Brojanjem se utvrđuje ponovljivost neke pojave ili signala. Objektivni postupci ispitivanja imaju dimenzionalnu karakteristiku i dijele se na mjerenje i kontrolu.



Slika 2.8. Podjela ispitivanja

Postoje različite podjele mjerenja. Međutim u osnovi sva mjerenja se dijele na:

- direktna i
- indirektna.

Direktnom metodom mjerenja mjerena veličina se direktno poredi sa izabranom jedinicom (etalonom) koji ima istu fizičku dimenziju. Npr. pređenje dužine radnog komada sa slogom graničnih mjerki, slika 2.6.

Metode mjerenja su se mijenjale i razvijale sa ukupnim razvojem tehnike. U osnovi postoje tri vrste mjerenja:

- klasične metode,
- mjerenje na bazi mjernih pretvarača,
- mjerno informacijski sistemi.

Klasične metode mjerenja obuhvataju postupke upoređivanja mjerne veličine sa istorodnom poznatom veličinom. Pri tome je druga poznata veličina usvojena za jedinicu mjerenja. Na primjer prilikom mjerenja mase dobije se vrijednost X , koja je B puta veća od poznate uporedne veličine X_m , slika 2.1.



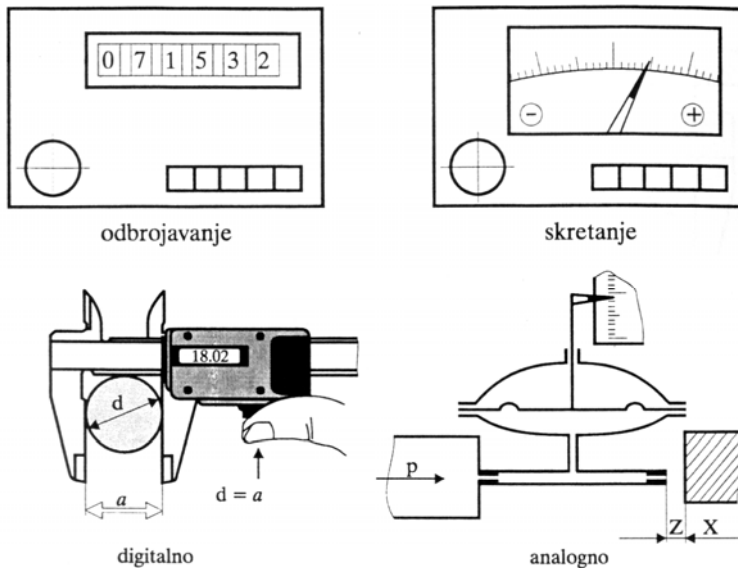
Slika 2.9. Uređaji za direktno mjerenje dužine

Metode mjerenja kod kojih se mjerenje izvodi pomoću instrumenata koji rade na bazi **mjernih pretvarača** (senzora) najčešće se koriste u tehničkoj praksi. Mjerni instrumenti su samo dio strukturnog sistema članova međusobno povezanih u mjerni lanac. U principu mjerenje ovom metodom je postupak generiranja i pretvaranja informacija o mjerenoj veličini. Ovako dobivene informacije mogu se registovati ili mogu biti ulazne veličine za upravljanje procesima.

Mjerno informacijski sistemi su najsavremeniji oblik mjerenja. U njihovom radu koristi se teorija informacija, mikroelektronski sistemi, mikroprocesori i računari. Cilj je upravljanje obradnim centrima i tehnološkim procesima uz primjenu fleksibilne automatizacije manipulacionim robotima.

Svaka od ovih metoda može imati dva načina registracije izmjene veličine i to :

- analogni,
- digitalni.



Slika 2.10. Analogne i digitalne metode mjerenja

Kod **analognih** metoda koristi se princip skretanja, a kod digitalnih princip odbrojavanja

Metode mjerenja mogu biti:

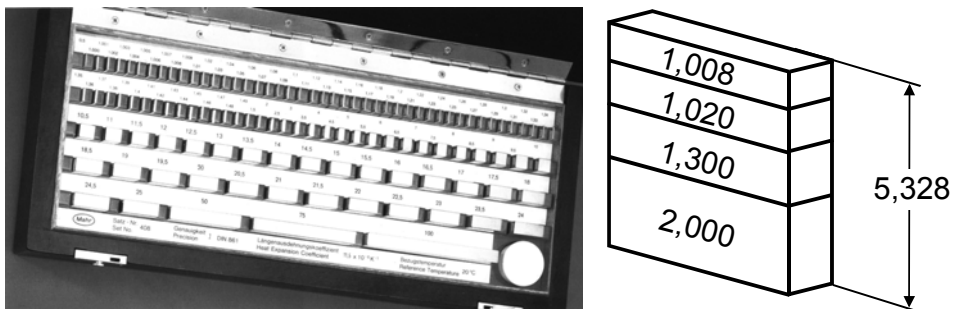
- apsolutne i
- relativne

Apsolutne metode omogućavaju direktno očitavanje rezultata mjerenja na indikatoru ili registracionom članu, npr. mjerenja pomičnim mjerilom, mikrometrima i sl., slika 2.11.



Slika 2.11. Apsolutno mjerenje

Relativna (uporedna) metoda mjerenja zasniva se na poređenju mjerene veličine sa posebno izrađenim uzorkom ili etalonom. Na slici 2.12. je prikazano poređenje sa graničnim paralelnim mjerkama.



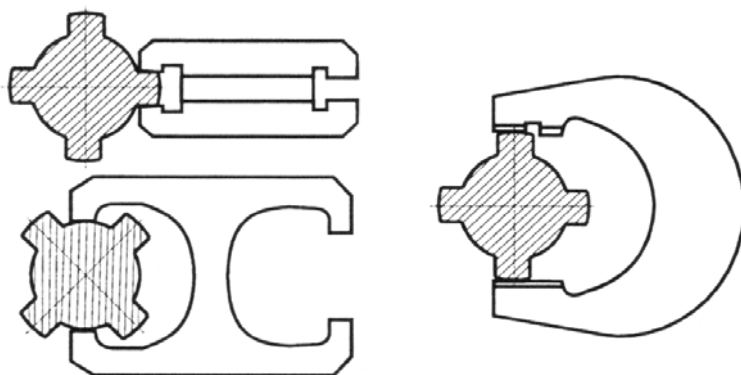
Slika 2.12. Relativna metoda mjerenja

Vrijednost izmjerene veličine izražava se na osnovu poznatih dimenzija uzorka (npr. sloga graničnih mjerki) i odstupanja relativne dimenzije čija se vrijednost očitava mjernom sredstvu koje se koristi za mjerenje (poređenje).

Metodi kontrole mogu biti:

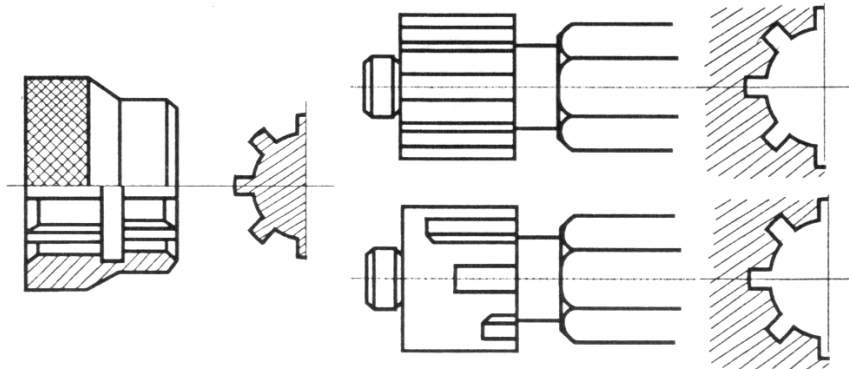
- diferencijalni (elementarni) i
- kompleksni (integralni).

Diferencijalni metodi kontrole omogućavaju da se utvrdi koji su to uzorci zbog kojih je mjereni objekat van granica odstupanja. Diferencijalni metodi kontrole su dobri da se izvrši kontrola parametara mjenog objekta složene konfiguracije. Kontrola se može izvoditi kontrolom svakog parametra posebno. Ovaj vid kontrole se može vršiti po određenom redosljedu kod proizvoda složene konfiguracije npr. ožljebljenih vratila. Vršiti se kontrola unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika, zatim širina i visina žlijeba, slika 2.13.



Slika 2.13. Diferencijalni metod kontrole

Kompleksni metod se koristi za kontrolu gotovih proizvoda složene izrade. Parametri se kontroliraju istovremeno. Uglavnom se postupak svodi na razmatranje kontroliranih komada na dobre i loše - škart. Pri tome se loši komadi razvrstavaju na one koji se mogu doraditi i one koji se odbacuju jer se ne mogu popraviti naknadnom doradom. Ovaj metod se koristi u završnoj kontroli u proizvodnom procesu, slika 2.14.

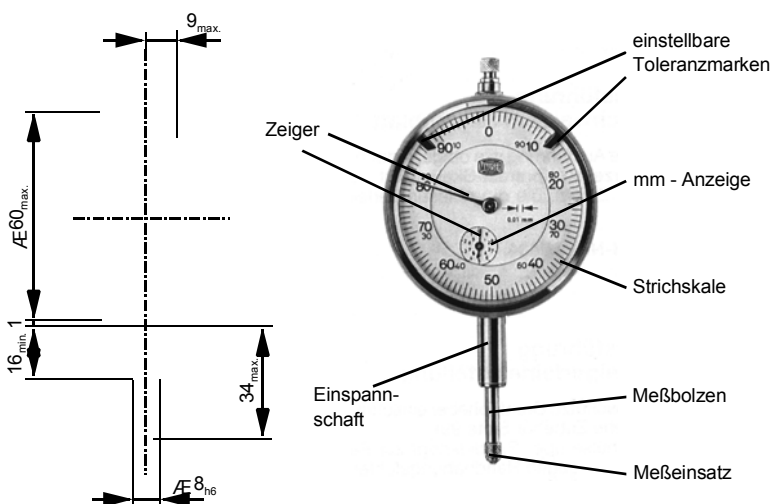


Slika 2.14. Kompleksni metod

Prema **korištenoj mjernoj opremi metode mjerenja i kontrole** se mogu podijeliti i na:

- kontaktne (taktilne) i
- bezkontaktne.

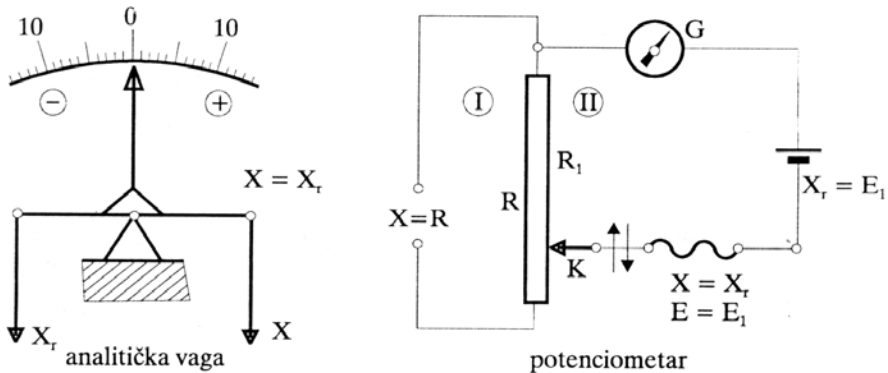
Kontaktne metode koriste instrumente čiji mjerni pipak dodiruje mjereni ili kontrolirani objekat u toku mjerenja ili kontrole.



Slika 2.15. Mjerno sredstvo za kontaktnu kontrolu

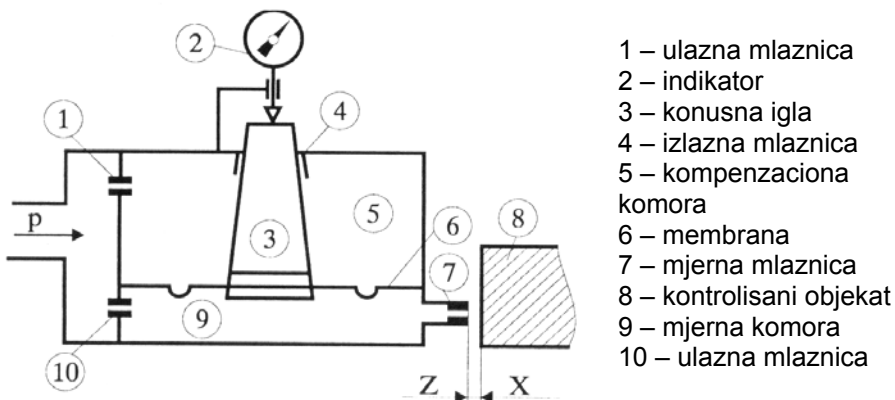
Bezkontaktnim metodama se vrši mjerenje ili kontrola objekata ili parametara bez fizičkog dodira sa njima. Ove metode su npr. optičke metode mjerenja i kontrole.

Nulti metod, kako mu i samo ime kaže, svodi se na dovođenje razlike između mjerene i referentne vrijednosti na nulu i uspostavljanje ravnoteže. Ovaj metod se koristi za vaganje kod različitih vrsta vaga (slika 2.16) ili kod mjerenja elektropretvaračkim mjernim trakama gdje se koristi električni most.



Slika 2.16. Nulti metod i električni most

Kompenzacioni metod je kombinacija nultog metoda i metoda skretanja. Prvo se mjeri mjerni pribor podesi na nulu uz pomoć nekog etalona npr. graničnih paralelni mjerki. Na njemu je kao nulta vrijednost registrirana referentna vrijednost. Zatim se uporedi sa referentnim objektom. Tada kazaljka mjernog instrumenta skrene i pokaže koliko je odstupanje od referentne vrijednosti. Zbir te dvije vrijednosti; referentne i nakon toga zabilježene predstavlja, izmjerenu vrijednost parametra, slika 2.17.



- 1 – ulazna mlaznica
- 2 – indikator
- 3 – konusna igla
- 4 – izlazna mlaznica
- 5 – kompenzaciona komora
- 6 – membrana
- 7 – mjerna mlaznica
- 8 – kontrolisani objekat
- 9 – mjerna komora
- 10 – ulazna mlaznica

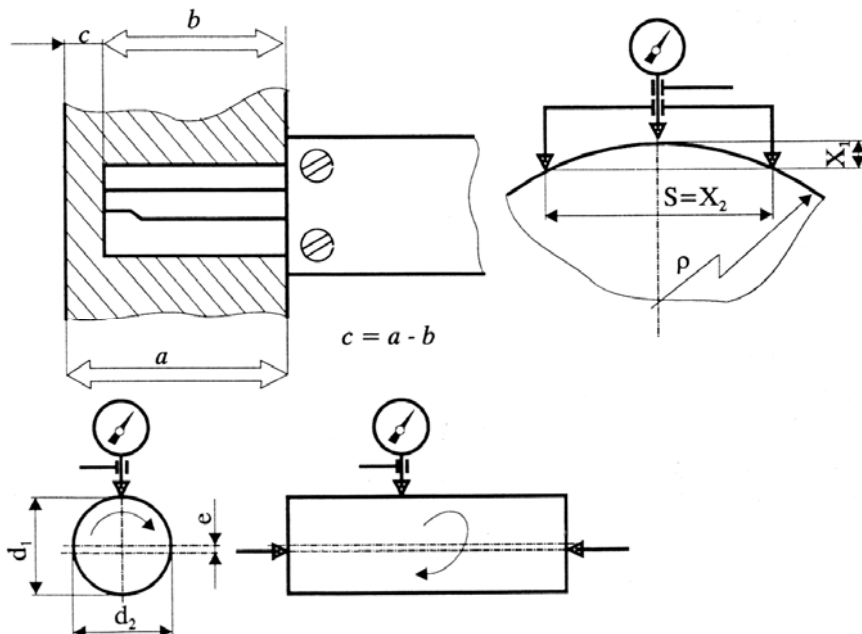
Slika 2.17. Kompenzacioni metod mjerenja

Korištenjem mjerne tehnike mogu se vršiti mjerenja i dobiti rezultari na neki od sljedećih načina:

- direktno,
- indirektno,
- grupno i
- centralizovano (kompleksno)

Najjednostavnija mjerenja sa aspekta dobijanja rezultata su **direktna mjerenja**. Vrijednost mjerne veličine se direktno očitava iz rezultata mjerenja. Mjerna veličina se upoređuje sa mjerom pomoću mjernog uređaja, graduisanog u odgovarajućim jedinicama, npr. mjerenje dužine je upoređivanje sa mjernim uređajem koji ima skalu u metrima i manjim jedinicama.

Kod **indirektnog mjerenja** mjerna veličina se dobiva se posredno iz poznatih relacija koje povezuju izmjerene i tražene veličine. Na primjer mjeri se dužina stranice kvadra i na osnovu nje izračuna zapremina kvadra. Indirektno se može izmjeriti otpor na osnovu mjerenja dužine i poprečnog presjeka provodnika. Ova mjerenja vrše se u slučaju kada je jednostavnije, brže i jeftinije doći do rezultata mjerenja, ali i u slučaju kada se direktnim mjerenjem dobiju rezultati manje tačnosti.



Slika 2.18. Indirektno mjerenje

Grupna mjerenja se provode tako što se istovremeno vrši direktno mjerenje više istorodnih veličina. Tražene veličine dobiju se rješavanjem sistema jednačina.

Kompleksna mjerenja se provode tako što se istovremeno vrši mjerenje više nejednorodnih veličina. Kod ovih mjerenja treba uspostaviti vezu između mjernih veličina.

S obzirom na tačnost rezultata, mjerenja mogu biti :

- maksimalne tačnosti,
- u cilju provjere i kontrole,
- tehnička mjerenja.

U prvu grupu se ubrajaju **etalonska mjerenja**, čiji rezultati daju vrijednosti najveće tačnosti s obzirom na postojeći nivo tehnike. Ova mjerenja se koriste za dobivanje odgovarajućih jedinica fizičkih veličina i konstanti.

Mjerenja čiji je cilj kontrola imaju greške koje se kreću u zadanim granicama. Ova vrsta mjerenja se provodi u laboratorijama, a služi za uvođenje standarda i provjeru mjerne tehnike u proizvodnim mjernim laboratorijama i pogonima

Tehnička mjerenja koja se vrše u proizvodnim i pogonskim uslovima imaju grešku. Veličina i vrsta greške zavisi od korištene mjerne opreme i metode mjerenja. To su mjerenja koja se vrše u cilju kontrole i dijagnostike stanja sistema. Ova vrsta mjerenja najčešće se koristi u proizvodnji i obuhvata različite vrste mjerenja zavisno od toga o kakvom se tehničkom sistemu radi.

Prema **načinu prezentiranja** mjerenja mogu :

- apsolutna i
- relativna

Apsolutna mjerenja se baziraju na direktnim jedne ili više osnovnih veličina uz primjenu jedinica. Rezultat mjerenja dužine iskazuje se u obliku numeričke vrijednosti izmjerene veličine i jedinice (metar, ili snage u kilovatima itd.

Rezultat **relativnih mjerenja** izražava se kao odnos mjerne veličine i istorodne veličine uzete za referentnu. Na primjer relativna vlažnost zraka je odnos količine vodene pare u 1 m^3 i količina vodene pare u 1 m^3 u zasićenom stanju pri datoj temperaturi.

Prema **karakteru promjene mjerne veličine** u toku mjerenja se dijele na :

- statička i
- dinamička.

Statička mjerenja su ona kod kojih mjerna veličina ostaje konstantna u toku vremena.

Dinamička mjerenja su ona kod kojih se mjerna veličina mijenja u toku vremena.

Promjene dinamičkih veličina mogu biti determinističke i stohastičke.

Determinističke promjene mogu biti periodične i neperiodične, dok slučajne mogu biti stacionarne i nestacionarne. Klasifikacija dinamičkih promjena može se napraviti i prema brzini odvijanja procesa pri čemu se razlikuju procesi sa malom, srednjom i velikom brzinom.

U zavisnosti od procesa koji se odvija mjerenja mogu biti :

- predprocesna,
- procesna i
- postprocesna

Predprocesna mjerenja vrše se prije procesa, npr. obrada u metaloprerađivačkoj industriji. Obuhvataju niz mjernih i kontrolnih radnji, a cilj im je kontrola i zaštita. Kontrola podrazumijeva otklanjanje loših komada. Zaštita u predprocesnim mjerenjima podrazumijeva zaštitu mašina, pribora i alata od oštećenja koja mogu nastupiti usljed obrade neodgovarajućih komada.

Procesna mjerenja se obavljaju u toku odvijanja procesa, **postprocesna** nakon završetka procesa (kontrola serije, klasiranje proizvoda, itd.).

Prema **uticaju rezultata na proces** mjerenja mogu biti :

- aktivna i
- pasivna.

Aktivna mjerenja se vrše s ciljem upravljanja i regulisanja procesa. Aktivni mjerni sistemi su funkcionalno povezani preko specijalnih upravljačkih jedinica sa izvršnim organima mijenjajući parametar npr. režima obrade, odmicanje i primicanje alata.

Osim toga aktivni mjerni sistemi mogu da vrše kompenzaciju greške obrade kao i korekciju dimenzija na osnovu rezultata mjerenja ili statističke ocjene izmjerenih vrijednosti iz serije. Cilj **pasivnih mjerenja** je selekcija loših komada kada se mjerenja provode u proizvodnim procesima.

2.3. Mjerni sistemi

Skup tehničkih uređaja, instrumenata ili mjernih sredstava, koji su međusobno povezani u funkcionalnu cjelinu zove se mjerni sistem. Mjerni sistem se povezuje na različite načine sa objektom koji se mjeri ili kontrolira. Cilj korištenja bilo kojeg mjernog sistema ili uređaja je mjerenje fizičke veličine, analiza i upravljanje.

Mjerni sistemi se izrađuju na bazi principa mjerenja. Tako postoje: mehanički, električni, optički, hidraulički, pneumatski i drugi sistemi. Pomoću mjernog sistema moguće je vršiti identifikaciju stanja u kome se nalazi objekat ili proces, koji se mjeri ili kontrolira. Objekat koji se mjeri može biti mašina, uređaj alat, konstrukcija ili bilo koji proizvod.

Mehanički sistemi su najjednostavniji po konstrukciji i pogodni su za održavanje. Nedostatak se ogleda u nemogućnosti mjerenja dinamičkih veličina.

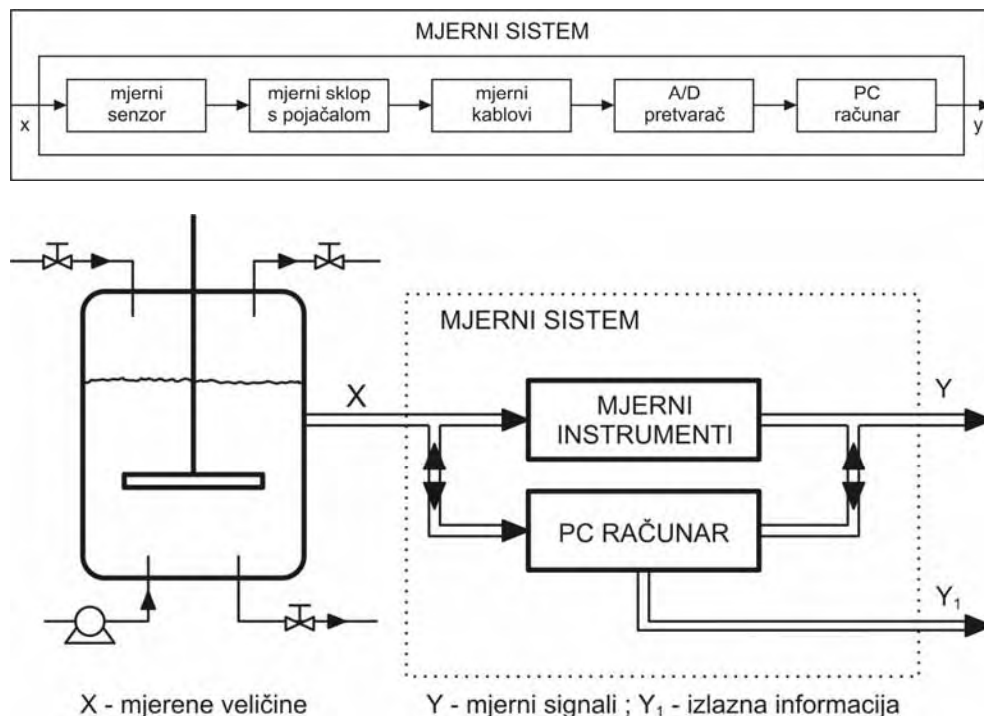
Mehanički mjerni sistemi ne zahtijevaju dodatnu opremu. Za razliku od mehaničkih ostali mjerni sistemi su složeniji po konstrukciji i po uslovima korištenja.

Savršeniji od mehaničkih su optički mjerni sistemi koji se koriste za mjerenje statičkih veličina. Složeniji su po konstrukciji i imaju veću osjetljivost u odnosu na mehaničke.

Najsloženiji su električni mjerni uređaji koji imaju i određene prednosti u odnosu na sve ostale. Najvažnije prednosti su:

- veća osjetljivost i veća tačnost,
- veća mogućnost mjerenja statičkih i dinamičkih veličina,
- mogu se koristiti i za mjerenja na udaljenim objektima (telemetrijska mjerenja),
- mogu se koristiti u automatskoj regulaciji neelektričnih veličina pomoću električnih postupaka.

Na slici 2.19 prikazana je blok šema mjernog sistema koji se sastoji od osnovnih dijelova: mjernog pretvarača, mjernog pojačivača, dodatne opreme koja služi za povezivanje dijelova mjernog sistema, mjernog pretvarača i registracionog člana.



Slika 2.19. Mjerni sistem

2.3.1. Karakteristike mjernih, sistema, pribora i instrumenata

Mjerni sistemi i pribori imaju pojedinačne i opće karakteristike. One pokazuju kakve su mogućnosti u pogledu mjerenja, kontrole, tačnosti, preciznosti i pouzdanosti mjerenja i druge eksploatacione karakteristike mjernih uređaja, instrumenata i pribora.

U postupku mjerenja sva korištena mjerna oprema, mjerni uređaji i instrumenti moraju obezbijediti da se mjerenje vrši:

- tačno,
- precizno i
- pouzdano

Prilikom izbora mjerne i kontrolne opreme za odgovarajuća mjerenja prvo se analizira koliko je dozvoljeno odstupanje veličine koja se mjeri ili kontrolira i uzimaju podaci iz dokumentacije bitni za metrološka razmatranja.

Mjerna i kontrolna sredstva, uređaji i instrumenti mogu se koristiti u laboratorijama ili u proizvodnim uslovima. Prema tome gdje se koriste mjerila se dijele na ona koja se koriste u laboratorijama i proizvodnim uslovima. Za mjerila koja se koriste u proizvodnim uslovima bitne karakteristike su:

- opseg mjerenja,
- opseg podešavanja,
- osjetljivost i
- greška mjerila

Za laboratorijska mjerenja koriste se instrumenti za koja su važne:

- veličina podjele skale
- vrijednost podjele skale
- opseg pokazivanja.

Neke od bitnih karakteristika mjerne i ispitne opreme biće detaljnije objašnjeni.

Veličina podjele skale (c) je rastojanje dvije susjedne crtice.

Vrijednost podjele skale (a) je vrijednost mjerne veličine koja odgovara podioku skale

$$a = \frac{R_0}{n} = k \cdot 10^z < T \quad (mm)$$

U izrazu su:

R_0 (mm) – opseg očitavanje mjerne skale,

n – broj podioka mjerne skale,

k – 1, 2 ili 5 karakteristika vrijednosti podjele

$z = \pm 1; \pm 2; \pm 3$ – pozitivni ili negativni cijeli broj

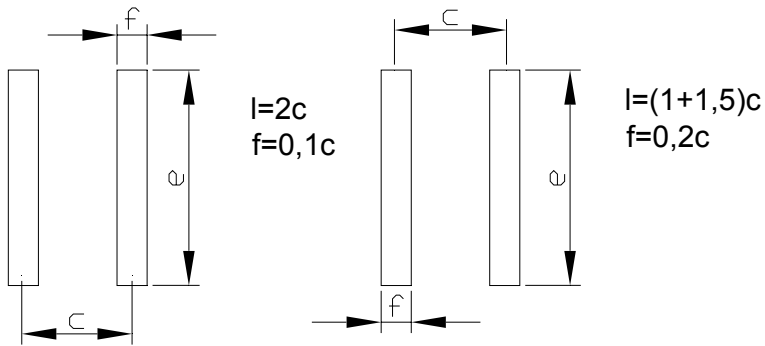
T (mm) – širina tolerantnog polja mjerene veličine.

Vrijednost podjele, koja se utiskuje na instrumentu, predstavlja minimalnu moguću vrijednost koja se direktno može očitati na skali.

Između veličine i vrijednosti podjele skale postoji odgovarajuća relacija koja čini prenosni odnos

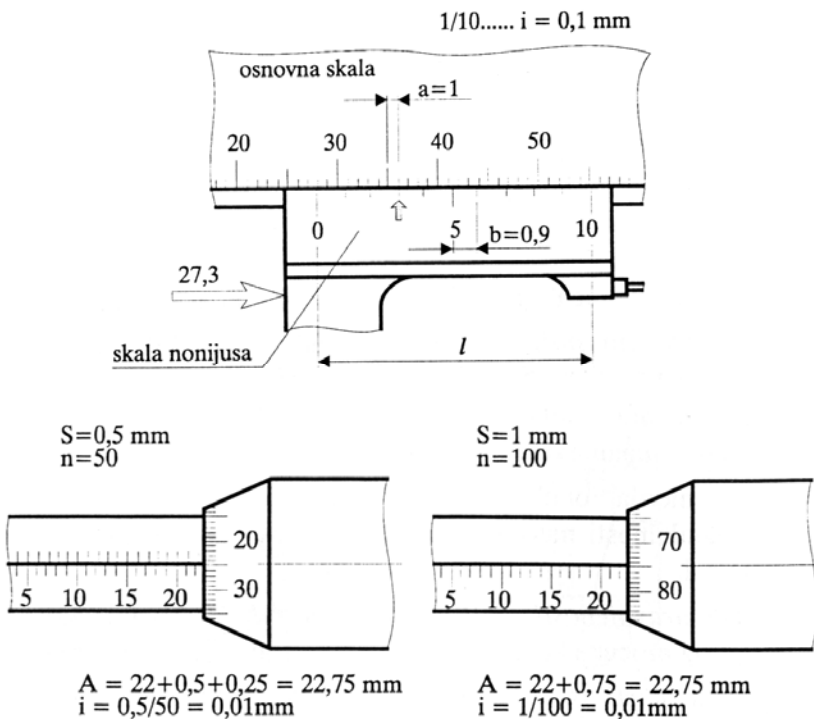
$$u = \frac{c}{a},$$

Na slici 2.20. prikazane su navedene veličine.



Slika 2.20. Podjela skale

To je karakteristika instrumenta.



Slika 2.21. Osnovna skala i skala nonijusa

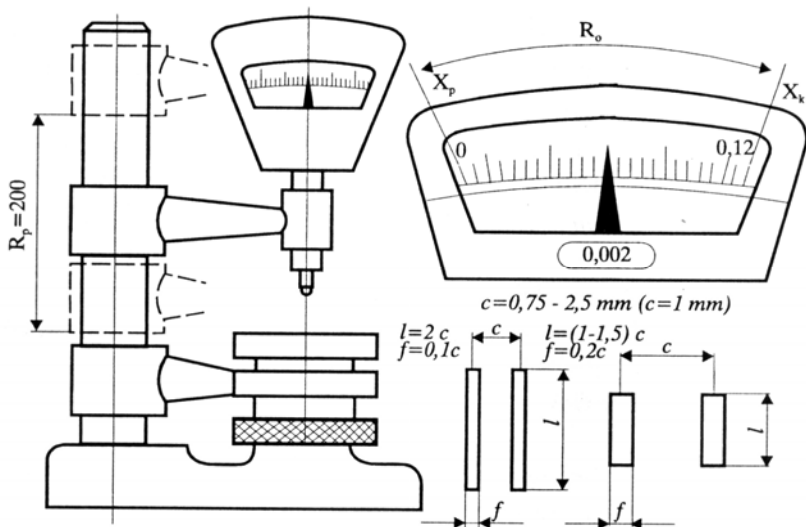
Opseg očitavanja (R_0) je područje mjerne skale ograničene početnom (X_p) i krajnjom vrijednošću (X_k):

$$R_0 = X_k \cdot X_p \quad (\text{mm})$$

Opseg očitavanja može se izraziti kao proizvod broja podioka (n) i vrijednosti podjele (a)

$$R_0 = n \cdot a \quad (\text{mm})$$

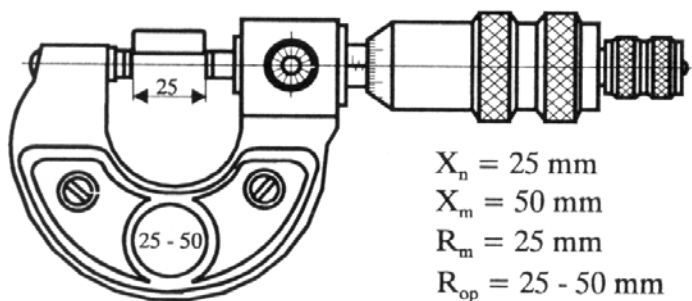
Opseg podešavanja (R_p) je zbir dužina pomjeranja mjernog vretena, mjernog stola ili instrumenta duž mjernog stuba.



Slika 2.22. Opseg očitavanja i podešavanja

Opseg mjerenja (R_m) je zbir opsega očitavanja i podešavanja:

$$R_m = R_0 + R_p \quad (\text{mm})$$



Slika 2.23. Opseg mjerenja

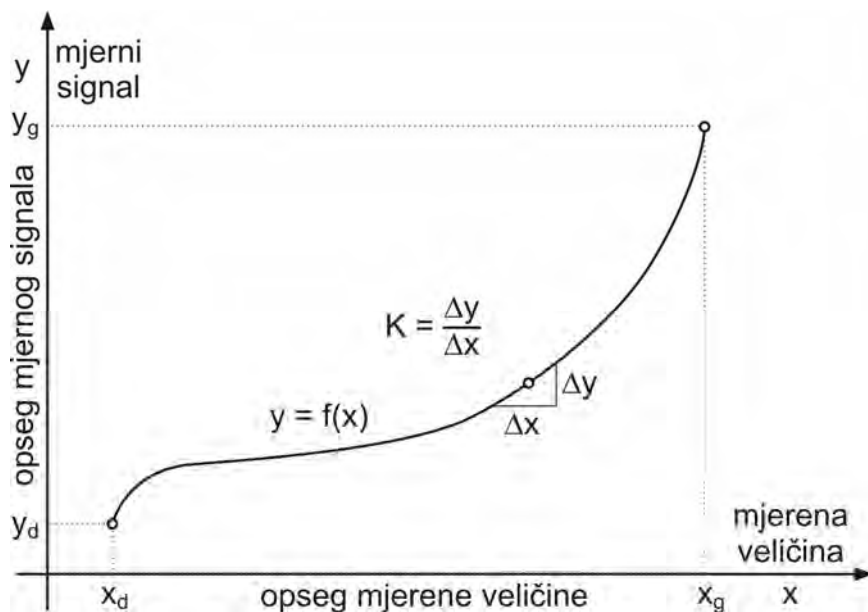
Opseg mjerenja je područje primjene vrijednosti mjerne veličine u kojoj je normirana greška instrumenta. Može se napisati i kao:

$$R_m = X_m - X_{\min}$$

gdje su:

X_m i X_{min} – najveća i najmanja vrijednost mjerne veličine koja se može odrediti instrumentom ili razika mjernih signala.

Mjerni opseg karakteriše statička karakteristika koja se može grafički prikazati kao na slici 2.24. Veličina k je statički faktor pojačanja i to je karakteristika mjernog uređaja.



Slika 2.24. Statička karakteristika

Opseg pokazivanja (R_{op}) je oblast mjernih veličina u kojoj se mogu koristiti mjerni instrumenti. Karakteriše ga minimalna i maksimalna vrijednost mjerne veličine:

$$R_{op} = X_{min} \text{ do } X_m \quad (mm)$$

Tako npr. kod mikrometarskih mjerila opseg mjerenja je 25 mm dok su opsezi pokazivanja različiti (0 – 25 mm, 25 – 50 mm i 50 – 75 mm)

Tačnost očitavanja je ona tačnost koja se postiže direktnim očitavanjem na indikatoru mjernog instrumenta. Odgovara vrijednosti podjele na skali.

Prenosni odnos predstavlja osjetljivost O.

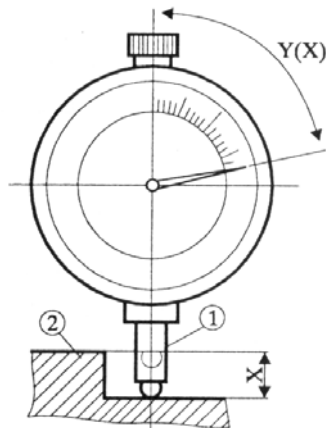
To je odnos dužinskog ili ugaonog pomjeranja pokazivača skale ili vrijednosti mjerne veličine:

$$O = \frac{Y(x)}{x}$$

gdje su:

$Y(x)$ (mm) – vrijednost veličine pomjeranja pokazivača mjernog pribora i

x (mm) – vrijednost mjerne veličine koja dovodi do odgovarajućeg pomjeranja pokazivača skale



Slika 2.25. Osjetljivost mjerenja

Prenosni odnos je količnik mjerene veličine i vrijednosti podjele skale.

Prenosni odnos polužnih mjerila odgovara prenosnom odnosu poluga, a osjetljivost optičkih mjernih instrumenata definisana je stepenom uvećanja optičkog sistema.

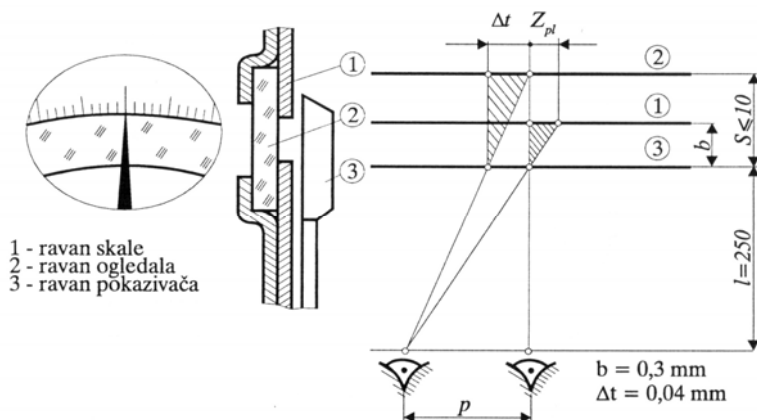
Mjerna sila F_m (N) je sila kojom mjerni pipak instrumenta djeluje na objekat mjerenja. Ima ograničenu normiranu vrijednost kako bi se moguće deformacije mjernog pipka instrumenta kao i mjernog objekta (savijanje, skraćenje, površinsko deformiranje) sveli na najmanju mjeru. Normiranje i regulisanje mjerne sile izvodi se specijalnim uređajima koji čine sastavni dio konstrukcije instrumenta (poluge, opruge, kazaljke i sl.). Mjerna sila je ona sila kojom mjerno sredstvo djeluje na površinu mjernog objekta.

Greška instrumenta Z_i je određena maksimalnom apsolutnom vrijednošću razlike vrijednosti mjerene veličine X_i i istinske vrijednosti:

$$Z_i = \max |X_i - X| \quad (mm) \text{ ili } (\mu m)$$

Ovo je jedna od najčešćih karakteristika instrumenta. Greška instrumenta nastaje usljed konstrukcije i tehnologije izrade, greške umjeravanja i paralakse i sl. Najveću dozvoljenu grešku instrumenta propisuje

proizvođač. Greška se može i eksperimentalno odrediti za svaki konkretan mjerni instrument. Greška instrumenta je sistematska greška mjernog pribora.



Slika 2.26. Greška paralakse

Greška paralakse nastaje kada oko operatora ne posmatra skalu i pokazivač (kazaljku) okomito nego pod nekim uglom, na ravan skale već pod nekim uglom φ . Ako se ravan skale i kazaljke nalaze na nekom rastojanju $b \neq 0$ greška očitavanja usljed paralakse je:

$$Z_{\text{paral}} = b \operatorname{tg} \alpha = b \varphi = \frac{b \cdot p}{l} = x - x_1 \quad (\text{mm})$$

gdje su:

b (mm) – rastojanje ravni kazaljke i skale

l (mm) – udaljenost operatora od ravni kazaljke

X i X_1 (mm) – su vrijednosti mjerene veličine očitane pri različitim položajima operatora

φ - ugao nagiba pri očitavanju $\varphi = \arctg(p/l)$

p (mm) – pomjeranje operatora od vertikale

Greška očitavanja zavisi od rastojanja ravni skale i ravni kazaljke (b), ugla nagiba (φ) i bočnog pomjeranja operatora (p).

Smanjenje greške paralakse može se postići:

- smanjenjem rastojanja b
- normiranjem ugla za kretanje φ
- drugih parametara konstrukcije

- greške paralakse može se smanjiti uvođenjem novih konstruktivnih rješenja.

Greške paralakse nema kada su skala i kazaljka u istoj ravni.

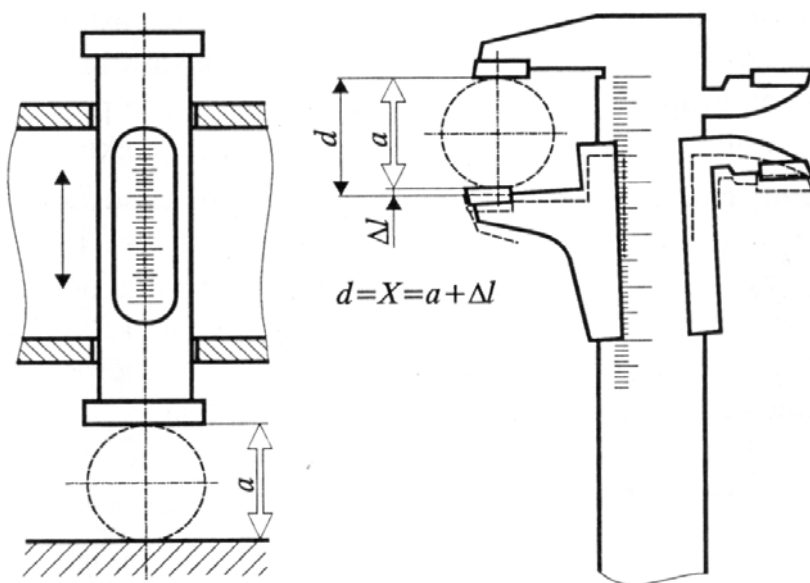
2.3.2. Osnovni principi mjerenja

Tačnost mjerenja zavisi od niza više ili manje relevantnih faktora, ali i od osnovnih principa na kojima se zasniva projektovanje i konstrukcija mjernih i kontrolnih sredstava. Osnovni principi su:

- Abbe-ov (komparatorski princip mjerenja)
- Taylor-ov princip mjerenja

Abbe-ov princip se odnosi na mjerne instrumente i glasi:

Najtačnija mjera se postiže samo onda kada se veličina koja se mjeri nalazi u pravolinijskom produžetku mjerne skale (slika 2.27). U suprotnom javlja se dopunska greška (npr. Δl kod pomičnih mjerila).

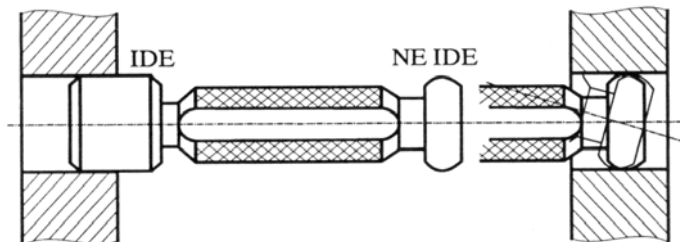


Slika 2.27. Komparatorski ili Abbe-ov princip mjerenja

Princip Taylora se odnosi na tolerancijska mjerila (kontrolnike, slika 2.28) i glasi:

Strana IDE - SMIJE tolerancijskog mjerila treba da je tako konstruisana da, svojom upotrebom, obezbijedi zamjenjivost dijelova, dok strana NE IDE - NE SMIJE treba da bude tako konstruisana da obezbijedi provjeru samo jednog parametra. Očigledno je da je zadatak strane NE IDE da otkrije

odstupanja kontrolisane mjere. Iz tih razloga ista i ima buričast oblik. Princip je primjenjiv na tolerancijska mjerila namjenjena kontroli elemenata sklopova (npr. tipa osovine ili vratilo - klizno ili kuglično ležište, klipni prsten - košuljica cilindra i sl.)



Slika 2.28. Taylorov princip kontrole

Zadovoljenje osnovnih principa mjerenja i kontrole, u fazi projektovanja konstruisanja mjerne i kontrolne instrumentacije, predstavlja osnovu koja dovodi do smanjenja ukupne greške mjerne i kontrolne tehnike.

2.3.3. Problemi i ograničenja u mjerenju

I pored stalnog usavršavanja tehnika i sredstava za mjerenje i dalje se teži ka poboljšanju karakteristika sredstava za mjerenje.

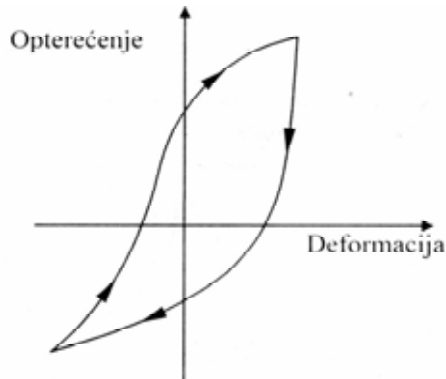
- Tačnost mjerenja, kao jedan od najvažnijih uslova kod mjerenja, je onolika kolike su mogućnosti tehnike mjerenja u datom momentu. Zbog toga se nastoji da se prilikom mjerenja koriste fizičke konstante čija je vrijednost dobivena korištenjem najtačnijih instrumenata.
- Drugi problem, pored tačnosti rezultata, predstavlja i jedinstvo mjerenja. Jedinstvom mjerenja se nastoji obezbjediti vjeran prenos veličina jedinica od kalibrisanih etalona na radna sredstva mjerenja, sa minimalnom greškom.
- Problem koji je stalno prisutan u mjernoj tehnici je određivanje tehničkih sredstava i metoda izvođenja granične tačnosti za tehničke sistem koji radi u nestacionarnom dinamičkom procesu pri velikom ubrzanju.
- U tehnici mjerenja je vrlo važna dobra povezanost metrologije i standardizacije. Ostvarena je standardizacija jedinice mjerenja, jedinstvenost nacionalnih i međudržavnih sistema etalona, mjera i kalibar, sredstava i metoda mjerenja, materijala, metroloških konstanti.
- Digitalna računarska tehnika je vrlo pogodna za automatsku obradu podataka. Veza između mjernog objekta, sredstva za mjerenje i računara može biti stalna pri čemu se podaci registrišu kontinuirano

kako se proces mjerenja odvija. To je posebno važno kod sistema koji rede u dinamičkim uvjetima.

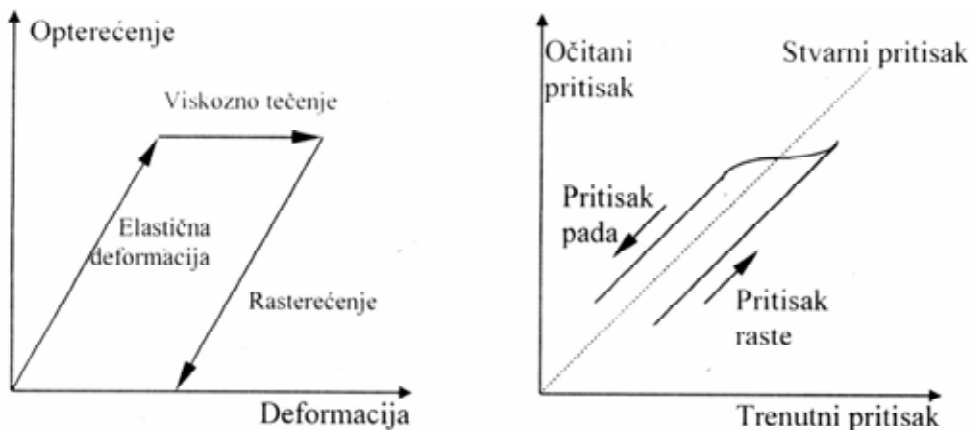
Mehanički histerezis i histerezne pojave u mjernim instrumentima

Histerezis je grčka riječ, a znači manjak ili zaostajanje. To je pojava koja nastaje kada posljedice djelovanja neke pojave zaostaju i nakon uzročnika tog djelovanja.

Mehanički histerezis može se javiti u materijalu. To je slučaj kada se mašinski element, npr. opruga napravljena od čelika ciklički opterećuje. Opterećenje i elastična deformacija koja j posljedica djelovanja opterećenja odnosno izlazna veličina na djelovanje opterećenja na oprugu, nemaju linearan odnos zbog pojave histerezisa (slika 2.29). Površina koju zatvara kriva predstavlja energiju pretvorenu u toplotu i predstavlja gubitak energije koju opruga akumulira.



Slika 2.29. Histerezis kod mjerenja deformacije



Slika 2.30. a) Viskozno tečenje, b) Histerezis kod mjerenja pritiska

U histerezne pojave može se ubrojati i viskozno tečenje. Razlika između navedenih slučajeva histerezisa i viskoznog tečenja je u tome što je viskozno tečenje ili klizanje pojava zavisna od vremena. Na slici 2.30.a pokazano je klizanje za slučaj elastične deformacije pod djelovanjem opterećenja, a zatim nakon viskoznog tečenja povratak materijala u početno stanje. Pojava histerezisa se uočava na mjernom instrumentu tako što se ne reprodukuje isto očitavanje pri povećanju mjerne veličine od manje ka većoj vrijednosti kao pri opadanju iste. To je npr. slučaj kod mjerenja pritiska (slika 2.30.b).

2.4. Električna mjerenja neelektričnih veličina

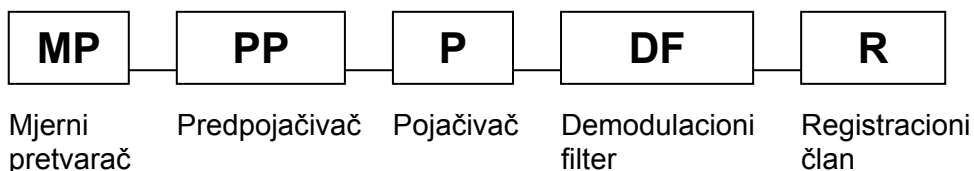
Električna mjerenja neelektričnih veličina su česta zbog prednosti koje u odnosu na druge mjerne sisteme pokazuju mjerni uređaji. Usavršavanjem mjerne i računarske tehnike ova mjerenja postaju nezaobilazna u tehničkoj praksi, kao i u svim oblastima gdje se vrše mjerenja i kontrole. Prethodno nabrojane prednosti, ali i sada već relativno pristupačna cijena omogućava široku primjenu i za komercijalne svrhe mjerenja protoka, potrošnje medija i sl.

2.4.1. Električni mjerni sistem

Električni mjerni sistem predstavlja skup uređaja i dodatne opreme za mjerenje parametara rada (neelektričnih veličina) nekog mjernog objekta ili procesa. Velika prednost ovakvih mjernih sistema je mogućnost vršena mjerenja na objektima koji u toku rada pokazuju velike dinamičke promjene.

Mjerni sistem u principu sadrži tri dijela povezana u lanac i to :

- mjerni pretvarač,
- mjerni pojačivač,
- registracioni član.



Slika 2.31. Blok šema mjernog sistema

Na početku mjernog lanca mjerna neelektrična veličina se uz pomoć mjernog pretvarača pretvara u odgovarajuću električnu veličinu. Ulazni signal mehaničke veličine mogu biti statičkog i dinamičkog karaktera. Kod statičkog mjerenja lakše se postiže linearan odnos između ulazne i izlazne veličine. U slučaju dinamičke ulazne veličine, odnos veličine zavisne od vremena treba uspostaviti relaciju između ulaza i izlaza.

Osnovne karakteristike mjernog pretvarača su : linearnost ulaza i izlaza i dinamičkih veličina koje se mjere. Neki mjerni instrumenti daju linearan odnos ulazne i izlazne veličine koji je opisan jednačinom $y=ax$, gdje je a kalibracioni faktor.

Kod mjernih instrumenata, kod kojih se uspostavlja linearan odnos ulaza i izlaza zanemaren je uticaj histerezisa, klizanja i drugih negativnih pojava. Međutim ove pojave su realne i one remete linearnu relaciju između ulaznih i izlaznih karakteristika.

Prvi dio mjernog lanca, mjerni pretvarač, prima neelektričnu veličnu koja se mjeri i pretvara je u odgovarajući električni signal.

Električni signal koji je obično slabog intenziteta se u drugom dijelu pojačava, demodulira i filtrira, a zatim se u pogodnom obliku šalje do registracion člana koji može biti u sklopu mjernog uređaja ili udaljen od njega.

Zavisno od veličina koje se mjere i registruju registracioni član može biti kompjuter, pisač, osciloskop, oscilograf, displej, magnetna traka ili disketa. Izmjerene veličine se mogu prikazati na analogan ili digitalan način.

2.4.2. Elektromehanička analogija

Između električnih i mehaničkih veličina mogu se uspostaviti analogne veze. Analogni sistemi su takvi fizički sistemi koji imaju jednačine istog oblika. Ako se jedan sistem ispita, po analogiji se mogu uspostaviti veze i prenijeti rezultati, odnosno donijeti zaključci o ponašanju njemu analognog sistema.

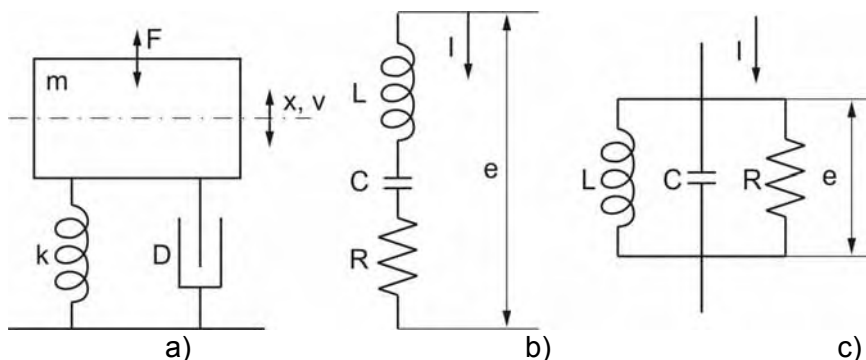
Mehanički sistemi su analogni električnim sistemima jer su opisani jednačinama koje se razlikuju samo vrsti nepoznatih veličina i koeficijentima. Kao jedinstven primjer elektromehaničke analogije mogu se posmatrati izrazi u mehanici za silu i elektrotehnici za napon, izrazi (2.1) i (2.2).

$$F = \frac{m \cdot dv}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Faktor n zove se "translacioni" faktor i pomoću njega se određuje veza između električnih i mehaničkih veličina.

Kada je faktor $n=1$ analogija je direktna. Direktna analogija postoji između momenata M i napona U . Direktna analogija također postoji između jačine struje I , i ugaone brzine ω . Osim direktne postoji i indirektna analogija električnih i mehaničkih veličina. U tom slučaju je $n \neq 1$.

Na slici 2.32 prikazan je primjer i šema direktne i inverzne analogije mehaničkog i električnog sistema.



Slika 2.32. Direktna i inverzna analogija mehaničkog i električnog sistema a) mehanički vibracioni sistem, b) direktna analogija, c) inverzna analogija.

Mehanički sistem koji vibrira sadrži masu m , oprugu k prigušivač D . Električne veličine koje su analogne nabrojane su induktivitet kabela L , kapacitet kondenzatora C i otpor otpornika R . Kod direktne i inverzne analogije u električnom sistemu isti su elementi, sistema, a razlikuju se samo u povezanosti. U slučaju direktne analogije elementi električnog sistema su spojeni serijski, a u slučaju inverzne analogije spojeni su paralelno direktna analogija je povoljnija u elektromagnetnom sistemima je pogodnija tamo gdje postoji neposredna veza između sile i električnog napona (piezoelektričnih sistema).

Diferencijalne jednačine kojima se opisuje mehanički vibracioni sistemi i njemu analogni električni, date su u funkciji od brzine v (jednačina 2.3) i jačine struje I (jednačina 2.4).

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} + Dv + \frac{1}{k} \int v dt \dots\dots\dots (2.3)$$

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{1/k} \int I dt \dots\dots\dots (2.4)$$

U tabeli 2.1. prikazan je shematski pregled nekih mehaničkih i odgovarajućih električnih veličina, te način njihovog povezivanja.

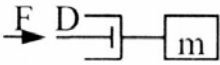
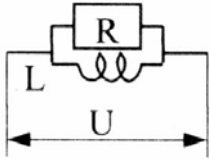
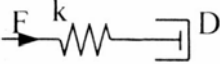
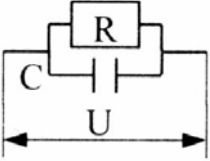
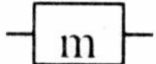


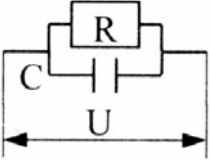

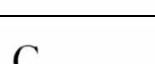
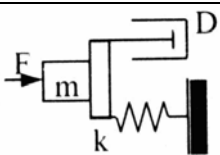
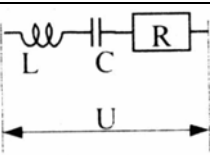
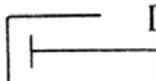
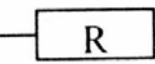
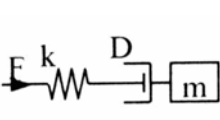
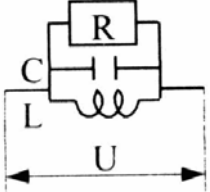
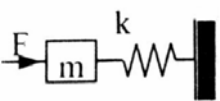
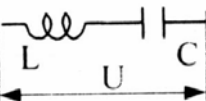
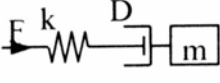
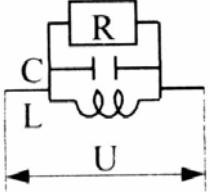
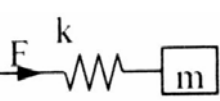
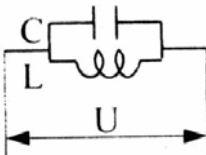
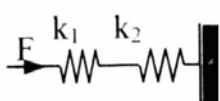
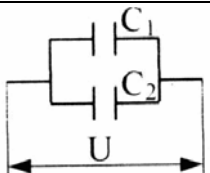
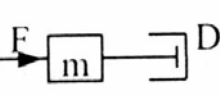
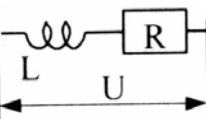
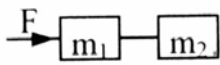
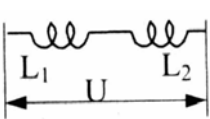
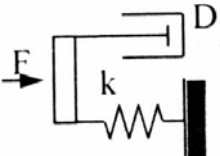
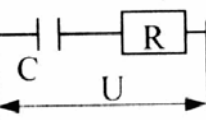
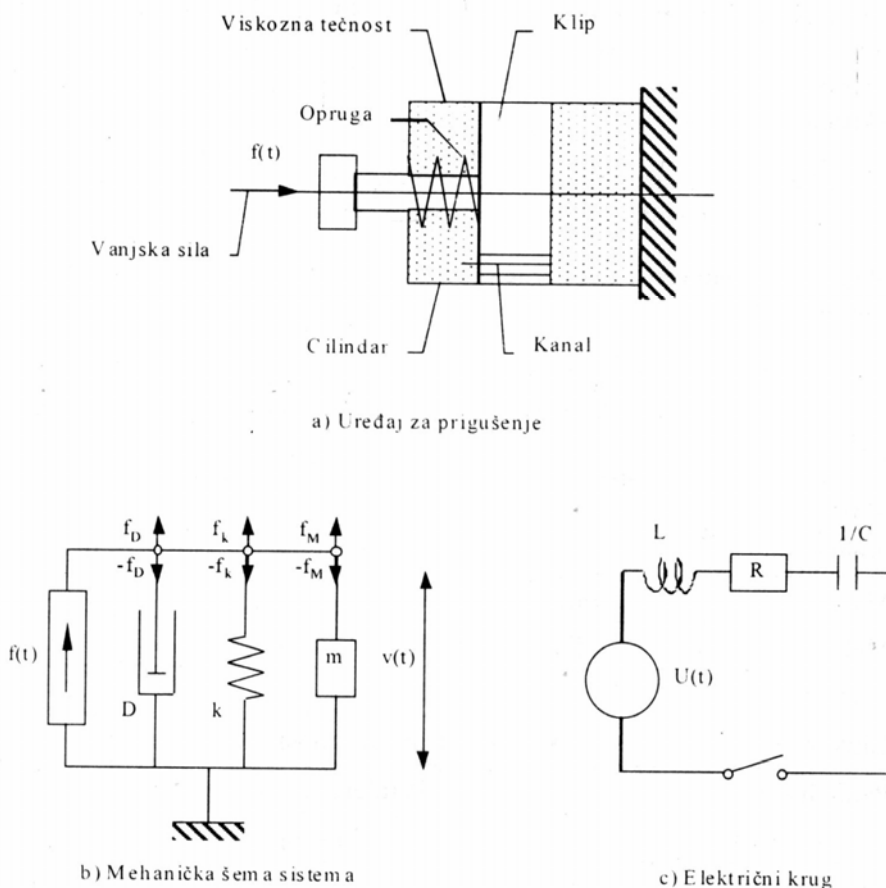
U mehanici	U elektrotehnici	U mehanici	U elektrotehnici
sila F	napon U		
brzina v	struja I		
			
			
			
			
			
			
			

Tabela 2.1. Šematski prikaz analognih mehaničkih i električnih veličina, te njihov načini povezivanja.

Na slici 2.33 prikazan je uređaj za prigušenje udara. Uređaj se sastoji od cilindra ispunjenog viskoznom tečnošću, klipa i opruge. Klip vrši translatorno kretanje pod djelovanjem sile $F = f(t)$. Prilikom modeliranja ovog sistema treba napraviti mehaničku šemu sistema (slika 2.33.b) i sve elemente mehaničkog sistema spojiti u krug. Na osnovu mehaničkog kruga u kome su elementi spojeni paralelno se formira se električni analogni krug u kome su odgovarajući elementi povezani serijski (slika 2.33.c).

Mehanički i električni krug na slici 2.33 razlikuju se po obliku jer mehaničkom paralelnom krugu odgovara električni serijski spoj. U mehaničkom krugu postoji jedna brzina, brzina v kretanja klipa i jedna struja koja protiče kroz sve elemente električnog kruga.



Slika 2.33. Primjer primjene analogije sa uređajem za prigušenje udara.

Diferencijalne jednačine kojima su opisani mehanički sistem (slika 2.33.b) i električni sistem (slika 2.33.c) su:

$$m \cdot \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) + k \int_{-\infty}^t v(t)dt = f(t) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$L \cdot \frac{dl}{dt} + Rl + \frac{1}{K} \int_0^t l(t)dt = U(t) \dots\dots\dots (2.6)$$

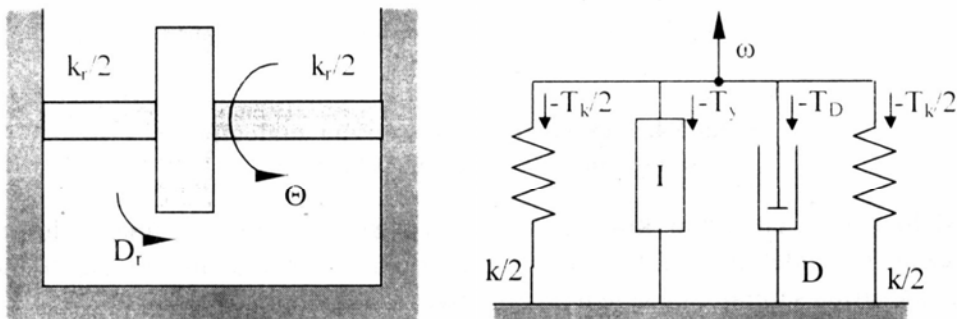
Mehanički i električni krug na slici 2.33 razlikuju se po obliku jer mehaničkom paralelnom krugu odgovara električni serijski spoj. U mehaničkom krugu postoji jedna brzina, brzina v kretanja klipa i jedna struja koja protiče kroz sve elemente električnog kruga.

Rotacioni mehanički sistemi bitno se ne razlikuju od translacionih kada je u pitanju njihova analogija sa električnim sistemima. Jednačine kretanja mahaničkog rotacionih sistema su istog oblika, s tim što se parametri razlikuju.

U tabeli su 2.2 date su analogne veličine translacionih i rotacionih sistema.

Translacione karakteristike mehaničkog sistema		Rotacione karakteristike mehaničkog sistema	
Naziv	Oznake	Naziv	Oznake
Masa	M	Moment inercije	I
Translaciona krutost	k	Torziona krutost	k_r
Translaciono otpor	D	Torzioni otpor	D_r
Translaciono pomjeranje	x	Ugaono zakretanje	Θ
Translaciona brzina	v	Ugaona brzina	ω
Sila	F	Moment sile	M

Tabela 2.2. Analogne veličine translacionih i rotacionih sistema



a) Skica sistema

b) Mehanički krug

Slika 2.34. Rotacioni sistem

Rotacioni sistem na slici 2.34 je mehanički vibracioni sistem koji se sastoji od zamajca i elastičnog vratila uklještenog na oba kraja. Zamajac je postavljen na sredini vratila. Dijelovi vratila lijevo i desno od zamajca imaju torzionu krutost $k_r/2$, a moment inercije zamajca je 1. Torzione vibracije zamajca prigušuje viskozno trenje, čiji je torzioni otpor D_r .

Kada se zamajac izvede iz ravnotežnog položaja i zakrene za neki početni ugao θ_0 on nastavlja da se kreće. Sistem ima jedan stepen slobode kretanja i kretanje je opisano koordinatom θ . Sistem vibrira ugaonom brzinom ω . Jednačine kojom je opisano kretanje sistema na slici 2.34 je:

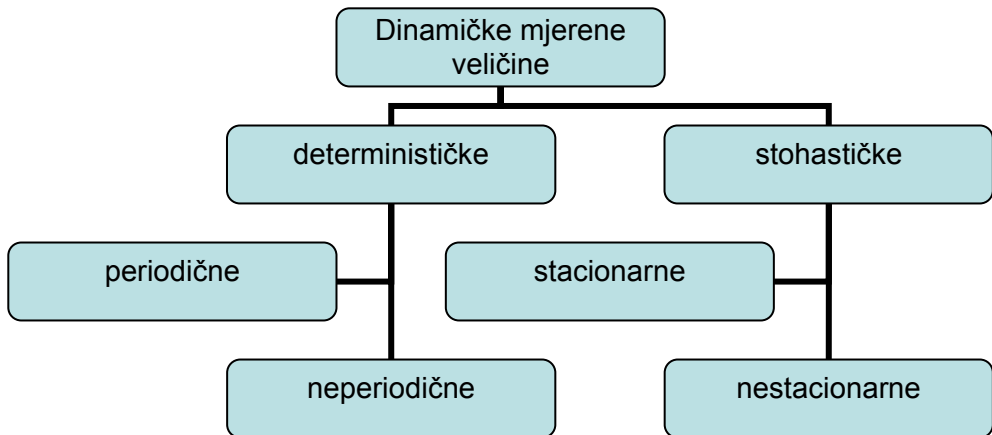
$$I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + D_r \frac{d\theta}{dt} + k_r \theta = 0 \quad i \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega \dots\dots\dots(2.7)$$

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} + D_r \omega + k_r \int_0^t \omega(t) dt = -k_r \theta_0 \dots\dots\dots(2.8)$$

2.4.3. Ulazne veličine

Ulazne veličine koje se mjere električnim mjernim uređajima mogu biti statičke i dinamičke.

Dinamičke veličine mogu se ponašati kao što je prikazano na slici 2.35.

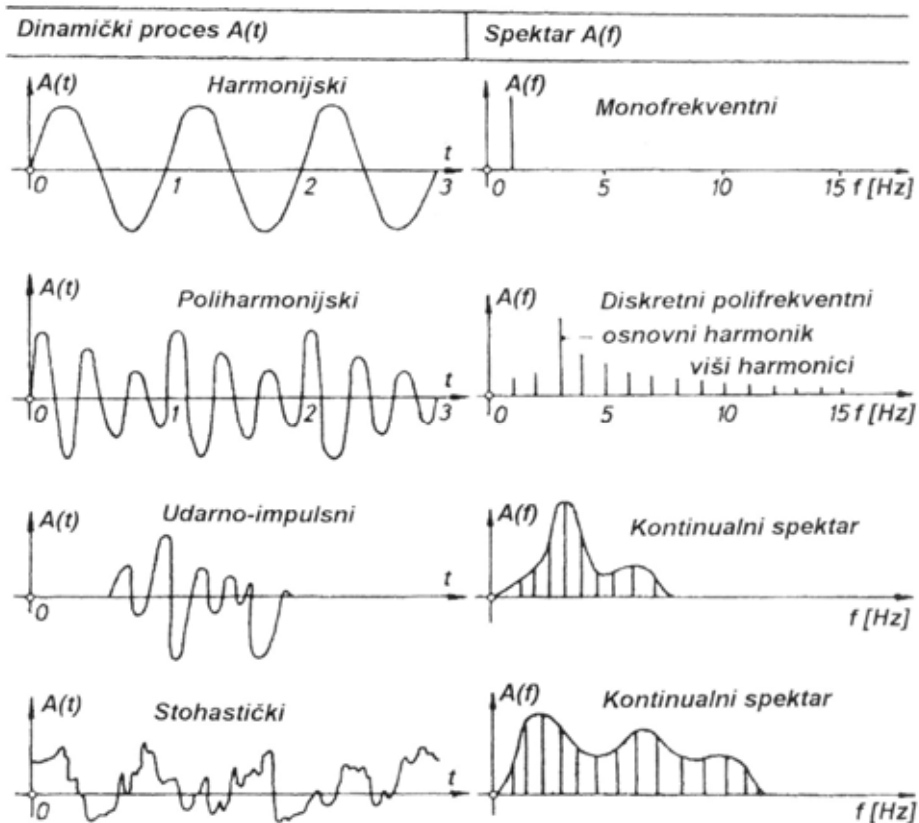


Slika 2.35. Ponašanje dinamičkih veličina

Mehanička veličina koja se mijenja sa vremenom je vremenska funkcija $x(t)$. To je ulazna mjerena veličina. Dinamički procesi mogu se posmatrati i analizirati u vremenskom ili frekventnom području.

Vremensko područje podrazumijeva da se posmatra promjena dinamičke veličine u funkciji od vremena.

Frekventno područje podrazumijeva da se promjena dinamičke veličine posmatra u funkciji od frekvencije. Na slici 2.36 prikazani su dinamičko-deterministički periodični procesi u vremenskom i frekventnom domenu.



Slika 2.36. Vrste dinamičkih ulaza mehaničkih veličina u vremenskom i frekventnom domenu

$A(t)$ su amplitude mehaničkih veličina koje pokazuju dinamičke promjene. Mehaničke veličine koje se dinamički mijenjaju mogu biti: put $s(t)$, brzina $v(t)$, sila $F(t)$, pritisak $p(t)$, napon $\sigma(t)$.

Spektar se dobije frekventnom analizom procesa u vremenskom domenu ili mjerenjem pomoću analizatora spektra.

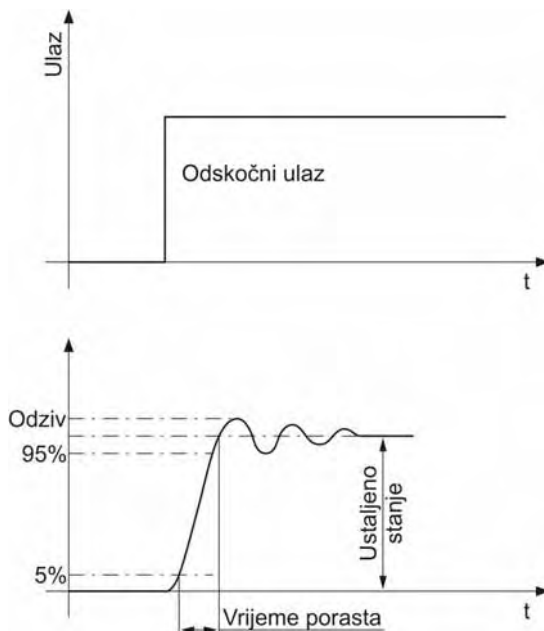
Mjerni sistemi u dinamičkim uslovima

U postupku mjerenja vremenski promjenljive veličine javlja se jedan period u kome mjerni sistem nije stabilan i drugi kada sistem treba da postigne

ustaljeno stanje. Taj period prelaznog procesa se u nekim slučajevima može zanemariti, ali ga treba poznavati.

Karakteristika odziva (odgovora) mjernog sistema na djelovanje vremenski promjenljive ulazne veličine je kašnjenje za ulaznom mjernom veličinom. Kašnjenje je posljedica inercije i prigušenje u mjernom sistemu.

Na slici 2.37 je prikazan odskočni ulaz koji pokazuje kašnjenje pri mjerenju dinamičke veličine i odgovarajući izlaz.



Slika 2.37. Odziv na odskočni ulaz

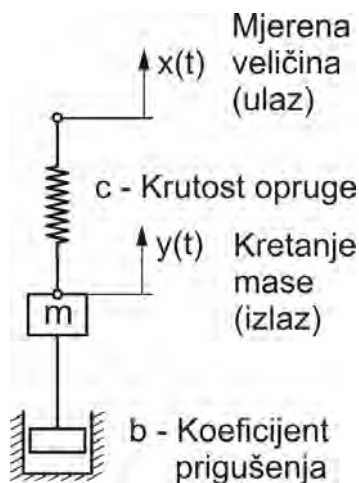
U periodu mjerenja ulazna odskočna funkcija se na izlazu ne javlja kao odskočna funkcija nego se prvo javlja vrijeme porasta mjerene veličine.

- **Vrijeme porasta** je vrijeme potrebno da sistem na izlazu promijeni izlazni signal od 5% do 95% konačne vrijednosti na početnom dijelu krive. To je ustvari, brzina odziva mjernog sistema na ulaznu veličinu. U svim mjernim sistemima treba težiti da se što prije postigne željeni izlaz
- Druga karakteristika mjernog sistema je **vrijeme prilagođavanja**. To je vremenski interval potreban da kazaljka dođe i ostane u opsegu odstupanja (2%) željene vrijednosti poslije odskočne promjene mjerne veličine

Prigušenje

Pored histerezisa i klizanja u mjernim instrumentima javlja se prigušenje. Prigušenje dovodi do progresivnog smanjenja amplitude ili potpunog

prigušenja uzastopnih vibracija poslije odskočne promjene ulaza mjerne veličine. Amplituda vibracija zavisi od osjetljivosti sistema. Svaki mjerni sistem u svom sastavu sadrži tri osnovna elementa: masu, oprugu (krutost c) i prigušnicu (prigušenje b), slika 2.38. Zavisno od toga kakva je struktura sistema, te da li sistem ima prigušenje u obliku amortizera, veličina prigušenja utiče na odziv sistema.



Slika 2.38. Oscilatorni sistem

Koeffcijent prigušenja predstavlja odnos stvarnog i kritičnog prigušenja:

$$\xi = b / b_c$$

gdje je :

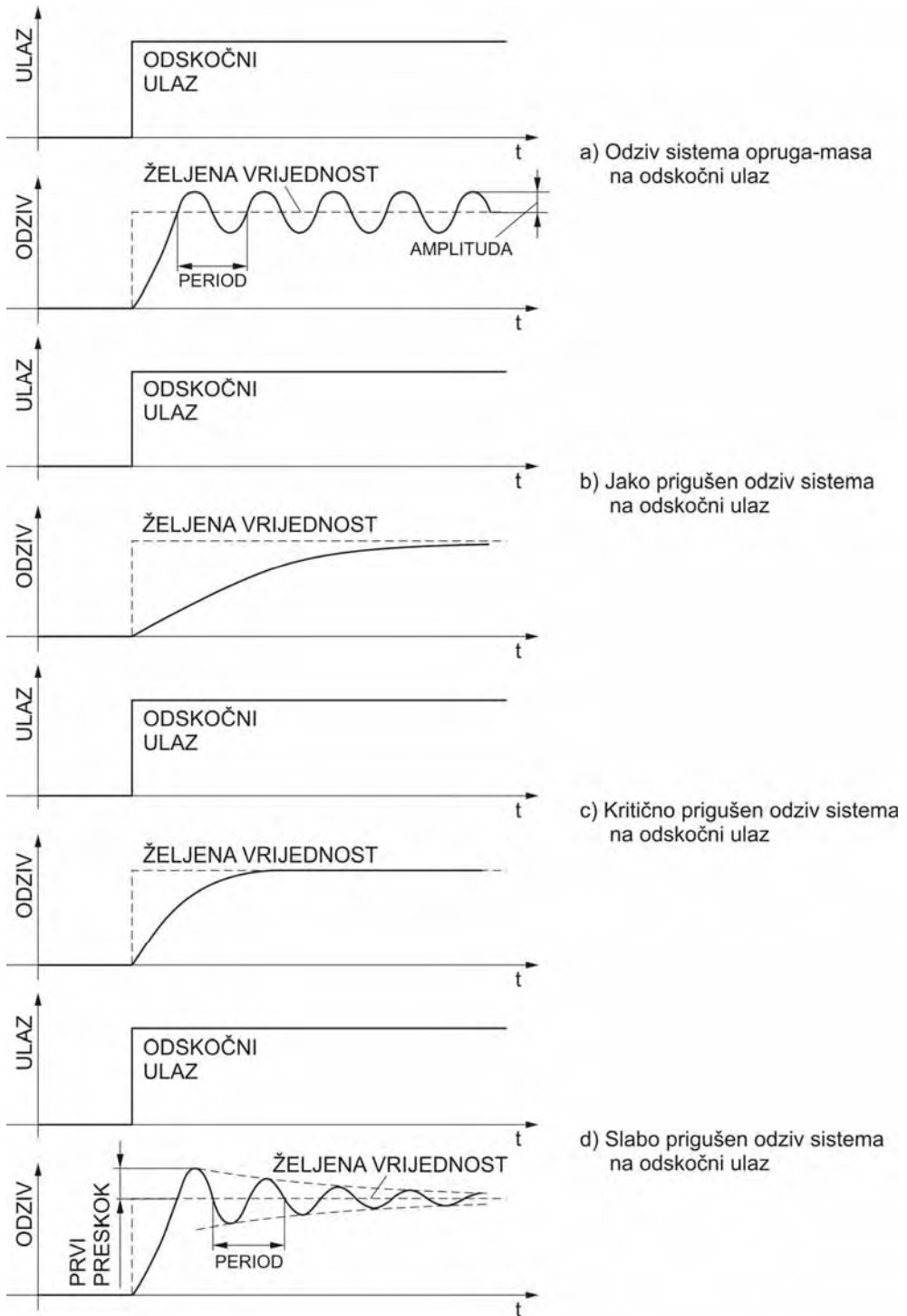
b – koeffcijent stvarnog prigušenja,

b_c – koeffcijent kritičnog prigušenja.

Postoje četiri tipa odziva sistema na odskočnu ulaznu funkciju.

1. Ako je koeffcijent prigušenja $\xi = 0$, odziv sistema je neprigušeno harmonijsko oscilovanje.
2. Ako je koeffcijent prigušenja $\xi > 1$, odziv sistema je jako prigušeno aperiodično kretanje.
3. Ako je koeffcijent prigušenja $\xi = 1$, odziv je kritično prigušenje.
4. Ako je koeffcijent prigušenja $\xi < 1$, odziv je slabo prigušenje.

To je prikazano na slici 2.39.



Slika 2.39. Izlaz iz sistema na odskočni ulaz

Promjenjiva $x(t)$ na slici 2.39 je ulaz (pomjeranje) i zavisi od vremena. Ona djeluje preko opruge, i prigušenja na izlaz $y(t)$. Obično se uzima da je koeficijent prigušenja b sila po jedinici brzine.

Ako je prigušenje jednako nuli, oscilacije na izlazu su harmonijske, slika 2.39.a. Period oscilacija kod prostog harmonijskog kretanja dat je izrazom $T = 2\pi / \omega_s$, gdje je ω_s (rad / s) sopstvena ugaona brzina sistema.

Kada u sistemu postoji prigušenje čiji je koeficijent $\xi > 1$, tada je taj koeficijent dovoljan da priguši oscilacije poslije odskočnog ulaza. Izlazna funkcija je eksponencijalna, koja se približava željenoj vrijednosti bez oscilovanja što se vidi na slici 2.39.b.

U slučaju kritičnog prigušenja (slika 2.39.c) za $\xi = 1$, odziv sistema je sličan kao i odziv predhodnog sistema s tom razlikom što su izlazna vrijednost brže približava vrijednosti željene ulazne veličine.

Za mjerni sistem sa slabim prigušenjem $\xi < 1$, prigušenje je nedovoljno da spriječi oscilacije koje sa vremenom eksponencijalno opadaju, (slika 2.39.c). Oscilatorno kretanje je aperiodično, a period prigušenja oscilacija je:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

Kod mjernih sistema teži se uspostavljanju takvog koeficijenta prigušenja koji će omogućiti malo vrijeme porasta i mali broj oscilacija u periodu postizanja željene vrijednosti izlaza.

3. MJERNA NESIGURNOST

Sadržaj lekcije:

1. Uvod u mjernu nesigurnost
2. Analiza grešaka mjerenja
3. Obrada rezultata mjerenja
4. Uzroci mjerne nesigurnosti i pojave grešaka
5. GUM i procedure određivanja mjerne nesigurnosti

3.1. Uvod u mjernu nesigurnost

Svako mjerenje je rezultat procesa sa više ili manje izraženim slučajnim djelovanjem koje rezultira greškama u mjerenju. Greške se javljaju tokom svakog mjerenja, pa i u najpreciznijim mjerenjima koja se vrše na etalonima.

Rezultat mjerenja je potpun samo kada je praćen sa kvantitativnim pokazateljem njegove nesigurnosti.

Izveštaj o nesigurnosti je neophodan da bi se mogla donijeti odluka o tome da li je rezultat adekvatan za predviđenu upotrebu i da je rezultat u skladu sa ostalim sličnim rezultatima. Tokom godina, razvili su se različiti pristupi određivanja i izražavanja nesigurnosti rezultata mjerenja. Upravo taj nedostatak međunarodnog dogovora o izražavanju mjerne nesigurnosti je bio razlog za donošenje jednog jedinstvenog dokumenta koji je regulirao raznolikosti u procedurama, metodama, tumačenjima i izražavanjima rezultata mjerenja i pridruženih im nesigurnosti.

Dokumentom pod nazivom Preporuka INC-1 (Recommendation INC-1) 1980. godine date su slijedeće definicije o izražavanju mjerne nesigurnosti:

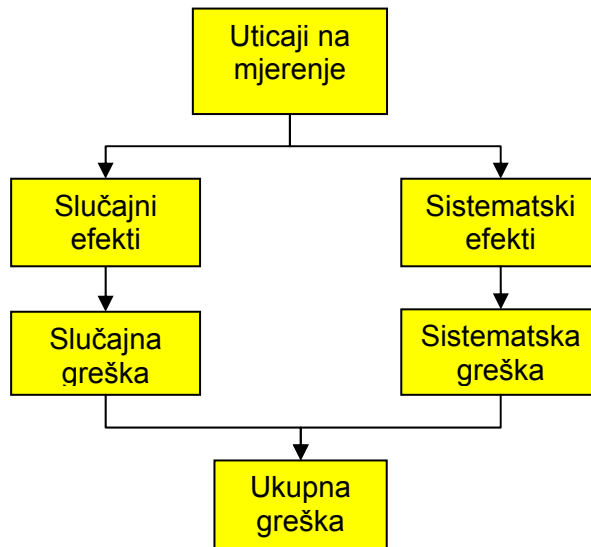
Nesigurnost u rezultatu mjerenja se općenito sastoji od nekoliko komponenti koje mogu biti grupisane u dvije osnovne kategorije prema načinu na koji su procjenjene njihove numeričke vrijednosti.

Tipa A - Komponente dobijene statističkim metodima

Tipa B - Komponente dobijene ostalim načinima određivanja uticaja na mjerenja

Ne postoji uvijek jednostavno razgraničenje između podjela u kategorije A i B i podjela u "slučajne" i "sistematske" nesigurnosti.

Svaki detaljan izvještaj o nesigurnosti treba da sadrži komponente, navodeći za svaku metod korišten da se dobije njena numerička vrijednost.



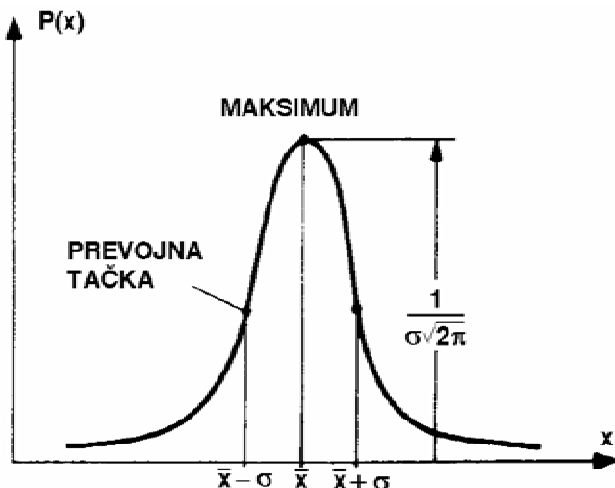
Slika 3.1. Struktura mjerne nesigurnosti

3.2. Analiza grešaka mjerenja

3.2.1. Srednja vrijednost mjerne veličine i greške

Cilj svakog mjerenja, bilo da se radi o istraživanju ili dijagnostičnoj kontroli, je dobivanje rezultata koji u sebi sadrže što manju grešku. Međutim svako mjerenje, bez obzira sa kakvom mjernom opremom se izvodi, u rezultatima uključuje veću ili manju grešku mjerenja. Dakle, rezultat mjerenja se dobije samo približno tačnoj vrijednosti mjerene fizičke veličine, tako da se idalno tačna vrijednost mjerene veličine u principu ne može saznati. Svi rezultati mjerenja jedne konstante veličine predstavljaju sveukupnost rezultata. U toku ponavljanja mjerenja iste veličine neki rezultati će se češće, a neki rjeđe ponavljati, što se grafički može pokazati linijom raspodjele rezultata .

Ako je izvršen veoma veliki broj n ponovljenih mjerenja, tako da se u graničnom slučaju smatra da $n \rightarrow \infty$, rezultati $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ nazivaju se populacijom.



Slika 3.2. Normalna raspodjela rezultata mjerenja

Na osnovu populacije rezultata mjerenja može se izračunati srednja vrijednost μ kao aritmetička sredina:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots (3.1)$$

gdje su:

μ - istinita vrijednost

n - broj mjerenja

x_i - rezultati pojedinih mjerenja.

Prilikom mjerenja ne može se vršiti beskonačno mnogo mjerenja već samo n (uzoraka) mjerenja.

Procjena srednje vrijednosti data je izrazom:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots (3.2)$$

\bar{x} -srednja ili aritmetička vrijednost

Svaki pojedini rezultat mjerenja odstupa od istinite vrijednosti μ za veličinu devijacije:

$$d_i = \mu - x_i$$

Za normalnu (Gaussovu) raspodjelu devijacije su simetrične u odnosu na istinitu (pravu) vrijednost i mogu se napisati u obliku:

$$\sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n (\mu - x_i) \dots\dots\dots (3.3)$$

Na osnovu ovoga su definisane apsolutna i relativna greška mjerenja.

Kao što je već rečeno osnovni zadatak mjerne tehnike je da utvrdi pravu vrijednost mjerene veličine u određenim okolnostima. Međutim, i uz primjenu najprikladnijih mjernih metoda i najsavremenijih mjernih uređaja ipak dolazi do odstupanja između prave i izmjerene vrijednosti. To odstupanje naziva se apsolutna greška mjerenja i različito se definiše ovisno o tome da li je to greška pokaznih mjerila ili greška mjerenja.

Apsolutna greška kod pokaznih mjerila definira se kao razlika između izmjerene vrijednosti neke mjerene veličine x na mjerilu i prave vrijednosti mjerene veličine:

$$\Delta x = \text{izmjerena vrijednost} - \text{prava vrijednost} \dots\dots\dots (3.4)$$

Apsolutna greška mjerenja neke veličine x kod mjera definira se kao razlika naznačene vrijednosti mjere i njene prave vrijednosti:

$$\Delta x = \text{naznačena vrijednost} - \text{prava vrijednost} \dots\dots\dots (3.5)$$

Pri ocjeni tačnosti mjerenja naročito je interesantna relativna greška mjerenja koja predstavlja odnos između apsolutne greške i prave vrijednosti mjerene veličine.

Relativna greška pokaznih mjerila definira se kao:

$$\delta_x = \frac{\text{izmjerena vrijednost} - \text{prava vrijednost}}{\text{prava vrijednost}} \dots\dots\dots (3.6)$$

Relativna greška mjera je:

$$\delta_x = \frac{\text{naznačena vrijednost} - \text{prava vrijednost}}{\text{prava vrijednost}} \dots\dots\dots (3.7)$$

Relativna greška neke mjerene veličine x može se iskazati i u procentima ($\delta_{x\%}$).

U praksi se još upotrebljava i pojam *korekcija* ili *popravka*. Korekcija ima istu apsolutnu vrijednost kao i greška, ali je suprotnog predznaka.

Apsolutna greška može biti aditivna mjerenoj veličini, proporcionalna, multiplikativna ili nelinearna sa mjerenom veličinom.

Aditivna greška Δa javlja se na ulazu mjernih uređaja nezavisno od mjerene veličine:

$$y = K(x + \Delta a) = Kx + K\Delta a \dots\dots\dots (3.8)$$

Multiplikativna greška Δm nastaje zbog promjene parametra K linearnog mjernog uređaja i proporcionalna je mjerenoj veličini:

$$y = K(x+\Delta m) = Kx + K\Delta m \dots\dots\dots (3.9)$$

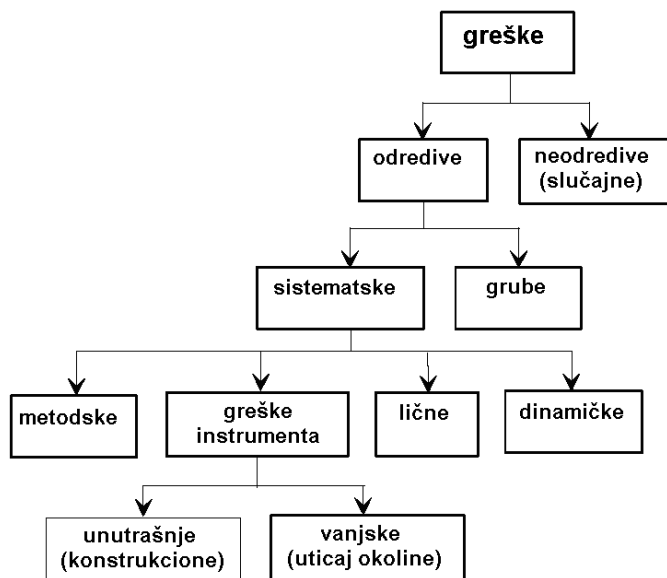
Nelinearna greška Δn javlja se kod mjernih uređaja sa nelinearnom funkcijom, na primjer:

$$y = Kx+ax^2 = Kx + \Delta n \dots\dots\dots (3.10)$$

pri čemu je linearna komponenta Kx dominantna.

3.2.2. Vrste mjernih grešaka

Tačnost mjerenja zavisi od tačnosti očitavanja vrijednosti na skali mjernog instrumenta i od tačnosti kojom kazaljka pokazuje mjernu veličinu. Maksimalno moguće odstupanje pokazivanja instrumenta usljed netačnosti izražava se u jedinicama mjerne veličine ili u procentima, u odnosu na pun opseg mjerenja, te predstavlja tačnost dotičnog instrumenta.



Slika 3.3. Klasifikacija mjernih grešaka

S obzirom na veliki broj uzroka koji ih uslovljavaju, greške nije lako klasifikovati. Po jednoj od mogućih klasifikacija (slika 3.3) greške se dijele na dvije velike skupine:

- odredive i
- neodredive.

Odredive greške su one koje se na neki način mogu utvrditi - ponekad samo teoretski, a neodredive ili slučajne zapažaju se tek prilikom ponovljenih mjerenja iste veličine. Zbog toga objektivno gledano neodredivih grešaka nema, što znači da je podjela na odredive i neodredive subjektivne prirode.

Što su veće ekonomske i vremenske mogućnosti i bolja oprema i metode, veće su mogućnosti da neodredive greške postanu odredive. Zato se i kaže da je zbog prisustva slučajnih grešaka rezultat nepouzdan (neprecizan), a da je zbog prisustva sistematskih grešaka netačan.

Odredive greške dijele se na sistematske i grube.

Sistematske nastaju usljed nesavršenosti:

- mjernog postupka,
- mjernih instrumenata,
- mjera,
- prirode mjerene fizikalne veličine,
- uticaja okoline i
- ličnog uticaja lica koje vrši eksperiment.

Grube greške nastaju prvenstveno zbog:

- nepažnje ispitivača ili
- nedovoljnog stručnog iskustva.

U tehnici automatske regulacije posebnu važnost imaju dinamičke greške mjernih uređaja, koje se manifestuju prilikom mjerenja fizikalnih veličina promjenljivih sa vremenom. Kod svih navedenih grešaka može biti izražen ili aditivni ili multiplikativni ili proporcionalni ili nelinearni karakter.

Sistematske greške

Pri ponavljanju mjerenja u približno jednakim uslovima, neki ometajući efekti djeluju uvijek u istom pravcu, prouzrokujući greške koje u toku mjerenja imaju uvijek isti znak i približno istu veličinu. To su **sistematske greške mjerenja**. Za sistematske greške mjerenja je karakteristično da se njihovi uzroci mogu otkriti i u velikoj mjeri smanjiti.

Uzroci sistematskih grešaka mogu poticati od:

- samog mjernog uređaja (loša kalibracija, starenja komponenti, i sl.),
- okolnih uticaja (promjena temperature, vlažnost, blizina metalnih predmeta, jaka električna i magnetna polja, i sl.),

- osobe koja mjeri (nepravilan ugao pri posmatranju kazaljke, rad na pogrešnom opsegu, itd.)

Sistemska greška javlja se uvijek u slučaju kada mjerni instrument nije kalibriran ili kada postoji znatan uticaj spoljašnjih faktora u postupku mjerenja. Kalibriranjem mjernog uređaja može se ukloniti mogući uzrok pojave sistematske greške. To se ostvaruje na različite načine, a najprostije je vršiti više uzastopnih mjerenja nekog poznatog etalona instrumentom koji se kalibrira. Etaloni su sredstva kojima je poznata tačna mjera neke veličine. Na primjer za mjerenje temperature etalon je tačka ključanja čistih materijala.

Kao etalon jedne veličine može poslužiti i etalon neke druge veličine ako je poznata zavisnost između posmatranih veličina. Ako su nakon kalibriranja srednja vrijednost i istinita vrijednost jednake, odnosno ako je devijacija jednaka nuli, otklonjena je sistemska greška. Međutim može se desiti da i nakon kalibriranja postoji devijacija. Tada je sigurno osim sistemske prisutna i slučajna greška.

Slučajne greške

Slučajne greške su uglavnom subjektivne prirode, tj. onaj koji vrši ta mjerenja ne može ih izvesti potpuno tačno, bilo zbog netačnosti instrumenta (trenje u ležajima, uticaj temperature, uticaj vlage, pritisak,...) bilo zbog netačnosti samog mjerenja (netačnost očitavanja skale).

Eksperimenti su pokazali da i pored uzimanja u obzir svih poznatih grešaka, ponovljena mjerenja jedne iste veličine, po istom metodu i sa istim uređajim kad ih vrši isti izvršilac, daju međusobno različite rezultate. Odstupanja postaju veća ako istu veličinu mjere različite osobe sa različitom opremom i koriste različite metode.

Prisustvo odstupanja srednje od istinite vrijednosti, zbog velikog broja nezavisnih parametara, istraživali su matematičari smatrajući da je greška slučajna. Zaključili su da svaki uzrok ima vjerovatnoću pojave koja će dovesti do posljedice odnosno greške.

Slučajna greška može se uočiti samo sa više uzastopnih mjerenja iste veličine, tj. ne može se odrediti već se procijeniti uz pomoć matematičke statistike i teorije vjerovatnoće. Ako se vrši eksperiment i mjeri više veličina istovremeno, slučajna greška će se uočiti ako se izvrši više mjerenja a istovremeno se kontrolišu spoljašnji faktori i drže na istom nivou. O ovome treba voditi računa pri planiranju eksperimenata.

Mjerenjem jedne veličine dobije se niz diskretnih vrijednosti, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Prilikom svakog mjerenja učinjena je greška:

$$a_i = x_i - x \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Ako se sve greške saberu, iz dobijenog zbira slijedi da je stvarna vrijednost:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i. \dots\dots\dots (3.11)$$

Prvi član jednačine je srednja vrijednost \bar{x} , a drugi član je greška srednje vrijednosti, koja teži nuli za beskonačan broj mjerenja. Iz praktičnih razloga broj mjerenja je ograničen, pa se statističkim metodama procjenjuje greška srednje vrijednosti, tj. procjenjuje se vjerovatnoća sa kojom se stvarna vrijednost mjerene veličine x zamjenjuje srednjom vrijednošću \bar{x} .

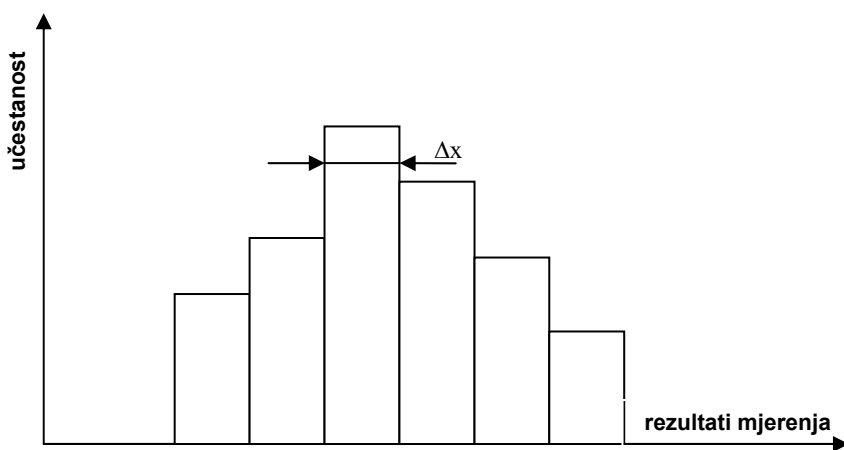
Ako se u toku eksperimenta rezultat x_i pojavi f_i puta, gdje je $i=1, 2, \dots, n$, tada je očigledno

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{n}, \dots\dots\dots (3.12)$$

gdje je je $\frac{f_i}{n}$ relativna frekvencija (učestanost) pojave rezultata x_i .

Ako se, dalje, pretpostavi da se sve vrijednosti veličine x u intervalu $x_i \pm (\Delta x/2)$, gdje se Δx proizvoljno odabrani i dovoljno mali interval, javljaju sa istom frekvencijom f_i , odnosno relativnom frekvencijom f_i/n , dobija se histogram kao na slici 3.4. Matematički zapis ove pretpostavke je

$$\frac{f_i}{n\Delta x} = \Psi_i \dots\dots\dots (3.13)$$



Slika 3.4. Histogram šest diskretnih rezultata mjerenja jedne veličine

Prema teoriji vjerovatnoće, relativna frekvencija f_i/n rezultata mjerenja x_i interpretira se kao vjerovatnoća njegove pojave Δx , tako da se iz (3.13) dobija:

$$P_i = \psi_i \Delta x \dots\dots\dots (3.14)$$

gdje ψ_i predstavlja gustinu vjerovatnoće.

Za povećani broj mjernih rezultata, tj. za $n \rightarrow \infty$, interval $\Delta x \rightarrow 0$, te se umjesto histograma dobija kontinualna kriva raspodjele gustine vjerovatnoće $\psi(x)$. Vjerovatnoća da rezultat x bude u intervalu x_1 do x_2 jednaka je površini ispod krive $\psi(x)$ na tom intervalu:

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \psi(x) dx \dots\dots\dots (3.15)$$

Kriva raspodjele $\psi(x)$ ima različit oblik. Ako se pretpostavi:

- 1) da je veća vjerovatnoća pojave rezultata sa malom nego sa velikom greškom,
- 2) da su jednako vjerovatni rezultati sa negativnom i pozitivnom greškom.

Tada kriva $\psi(x)$ ima oblik

$$\psi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2 / 2\sigma^2} \dots\dots\dots (3.16)$$

i naziva se normalna ili Gaussova kriva raspodjele.

Parametar normalne raspodjele je standardno odstupanje σ , a njena vrijednost se procjenjuje na osnovu

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (3.17)$$

Normalna raspodjela je simetrična i monotono opadajuća, sa maksimumom od $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ u $x=\bar{x}$ i prevojnim tačkama $x=\bar{x} \pm \sigma$ (Slika 2. 1. 1.) Njena normirana forma dobija se iz (3.17) uvođenjem bezdimenzionalne promjenljive $z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$.

$$\Psi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-z^2/2} \dots\dots\dots (3.18)$$

Vjerovatnoća da je mjerena veličina u intervalu $x_1 < x < x_2$ sada se jednostavno može izračunati kao površina ispod krive normirane krive $\psi(z)$ u intervalu $z_1 < z < z_2$:

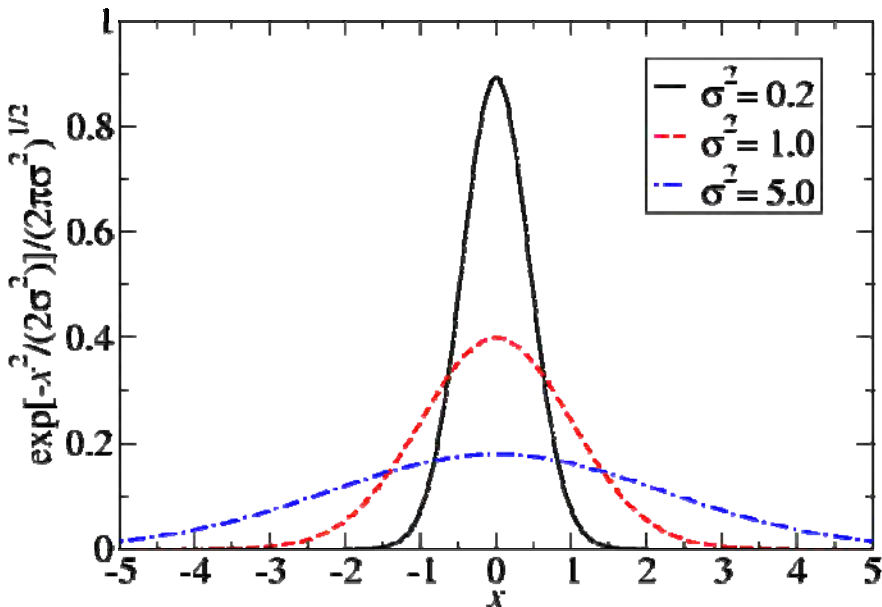
$$P(a < x < b) = P(z_a < z < z_b) = \Phi(z_2) - \Phi(z_1), \dots\dots\dots (3.19)$$

gdje su bezdimenzionalne granice $z_1 = \frac{a - \bar{x}}{\sigma}$ i $z_2 = \frac{b - \bar{x}}{\sigma}$ i gdje je

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz \dots\dots\dots (3.20)$$

integral Laplacea koji je analitički nerješiv, pa se njegove vrijednosti daju tabelarno.

Vjerovatnoća da je mjerena veličina u intervalu $\bar{x} \pm \sigma$ jeste $P_1=0,683$, u intervalu $\bar{x} \pm 2\sigma$ je $P_2=0,954$, a u intervalu $\bar{x} \pm 3\sigma$ je $P_3=0,997$. Ukoliko se ustanovi da je neka vrijednost x_i izvan intervala $\bar{x} \pm 3\sigma$, ona se smatra grubom greškom i odbacuje se. Preporučuje se da prilikom crtanja histograma raspodjele broj intervala bude $m = \sqrt{n} + 1$ a širina intervala $\Delta x \approx (x_{\max} - x_{\min}) / n$.



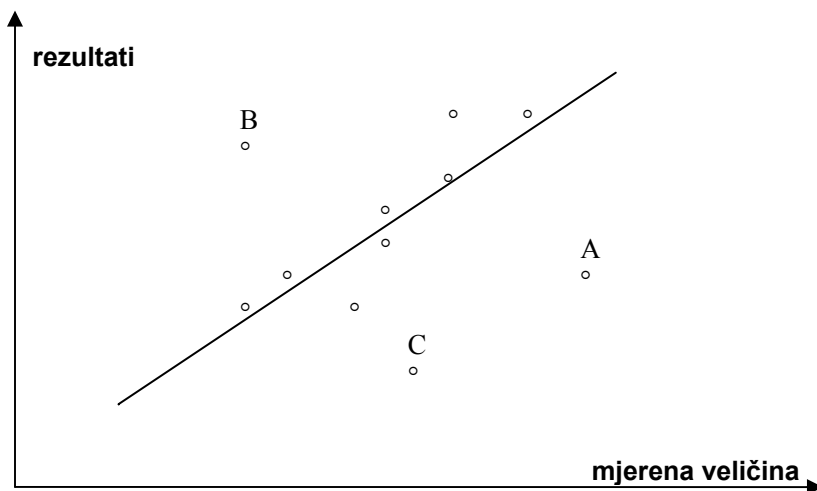
Slika 3.5. Normalna raspodjela, $\mu = \text{const.}$

Grube greške

Prilikom analize rezultata mjerenja neke veličine može se desiti da neki rezultati bitno odstupaju od svih ostalih. Tada se zaključuje da su takvi rezultati posljedica grube greške, te se u obradi rezultata ne uzimaju u obzir. Ako bi se takvi rezultati prihvatili zaključci izvedeni uključujući takve rezultate bili bi pogrešni.

Uzroci koji dovode do pojave grubih grešaka su različiti. Nedovoljna pažnja vršioca može dovesti do lošeg očitavanja rezultata, a uzrok tome je nepažnja i loši uslovi osvjetljenja. Zato da bi se izbjegle moguće pojave grubih grešaka treba kontrolisati uslove u kojim se vrši mjerenje: napon, struju, osvjetljenje, pritisak, temperaturu itd.

Svako veliko odstupanje nekog od ostalih rezultata mjerenja ne mora da bude i rezultat grube greške. Naprotiv, to može da bude važan pokazatelj ponašanja neke veličine.



Slika 3.6. Gruba greška

Na slici 3.6 rezultati mjerenja A, B, C znatno odstupaju od ostalih rezultata postoji velika vjerovatnoća da su to grube greške, međutim mjerenja treba ponoviti da bi se takva sumnja potvrdila ili odbacila.

Ako ponovljena mjerenja ukažu na pojavu grube greške koriste se matematičke metode provjere odstupanja rezultata koji znatno odstupaju od ostalih. U pripremi planiranja i obradi eksperimentalnih rezultata polazi se od činjenice da nema grubih grešaka. Međutim one se javljaju i treba ih ukloniti.

Definiranje grube greške ako je poznata tačnost mjerenja

Mjerenjem neke veličine dobiveno je niz rezultata mjerenja $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Jedan od rezultata x^* znatno odstupa od ostalih. Izmjerena sumnjiva vrijednost x^* poredi se sa srednjom vrijednosti svih ostalih rezultata. Razlika $x^* - \bar{x}$ se upoređuje sa poznatom disperzijom za različit broj rezultata po izrazu:

$$\sigma \sqrt{\frac{n+1}{n}} \dots\dots\dots (3.21)$$

gdje je:

n- broj rezultata u koje se ne sumnja,

prema Studentovom kriterijumu:

$$t = \frac{\left| x^* - \bar{x} \right|}{\sigma \sqrt{\frac{n+1}{n}}} \dots\dots\dots (3.22)$$

Dobiveni rezultat se poredi sa vrijednošću nezavisno promjenljive Studentove raspodjele za potrebnu vjerovatnoću P i (n-1).

Definiranje grube greške ako nije poznata tačnost mjerenja

Kada se vrše mjerenja čija tačnost nije poznata i dobiju se rezultati među kojima ima i onih koji znatno odstupaju od ostalih prvo treba procijeniti tačnost mjerenja. U tom slučaju koristi se izraz za procjenu tačnosti mjerenja u obliku:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \bar{x} \right)^2} \dots\dots\dots (3.23)$$

A Studentov raspored određuje se po izrazu:

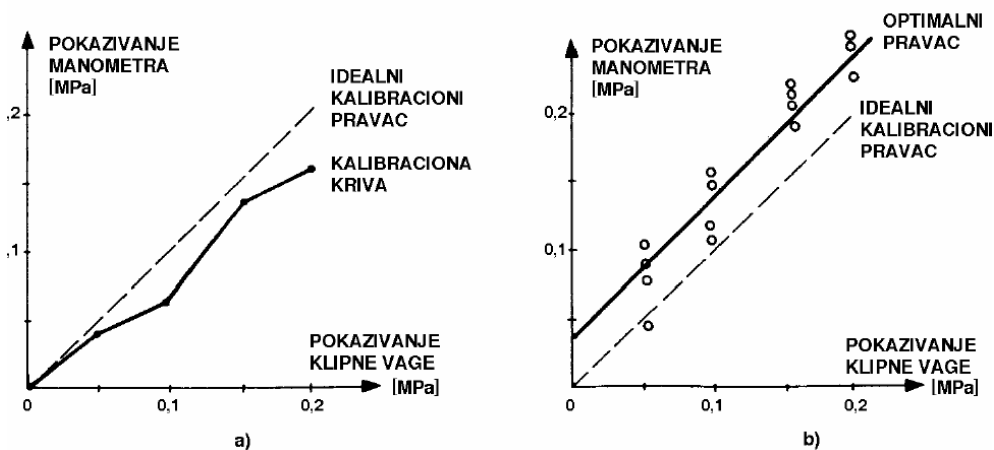
$$t = \frac{\left| x^* - \bar{x} \right|}{s} \dots\dots\dots (3.24)$$

Ovako izračunata vrijednost za određenu vjerovatnoću i (n-1) poredi se sa standardnom vrijednošću iz tabela za Studentovu raspodjelu.

Odnos sistematskih i slučajnih grešaka

Rezultat inženjerskog eksperimenta sadrži uvijek negu grešku, koja je sumarna - sastoji se od dva dijela, sistematske i slučajne greške. Njihov međusobni odnos zavisi od upotrijebljenih uređaja i uslova u kojima se eksperiment provodi. Kakav je doprinos sistematske a kakav je slučajne greške ne može se zaključiti samo na osnovu jednog rezultata.

Slučajne greške odražavaju se kao rasutost rezultata mjerenja. U nizu mjerenja iste vrijednosti mjerene veličine dobijaju se različita pokazivanja. Kvantitativna mjera rasutosti može se izraziti pomoću standardnog odstupanja.



Slika 3.7. Kalibracija mjernog instrumenta
a) bez ponovljenih mjerenja, b) sa ponovljenim mjerenjima

Kalibracija je utvrđivanje položaja znakova ili eventualno samo glavnih znakova, na mjernom uređaju u funkciji vrijednosti mjerene veličine uz pomoć etalona ili tačnijeg instrumenta. Provjera instrumenta u cijelom dijapazonu promjene mjerene veličine uz pomoć nekog etalona radi smanjivanja grešaka, jedna je od najčešćih metoda u praksi. Kalibracijom se otklanjaju samo sistematske greške. Na primjer, potrebno je kalibrirati senzor pritiska sa tenzometarskom trakom pomoću klipne vage, kao etalonskog instrumenta. Zadajući vrijednosti pritiska 0; 0,05; 0,1; 0,15 i 0,2 MPa, koje odgovaraju glavnim oznakama na klipnoj vazi, zapisuju se odgovarajuća pokazivanja ispitivanog senzora. Tako se dobija skup kalibracionih tačaka, čije spajanje daje kalibracionu krivu (slika 3.7.a). razlika između idealnog kalibracionog pravca (pokazivanje klipne vage) i kalibracione krive (pokazivanje senzora) jeste sistematska greška senzora, na osnovu koje se može napraviti skala njegovog tačnog pokazivanja.

Da bi se uzeo u obzir i uticaj slučajnih grešaka, kalibracija se vrši više puta za svaku glavnu oznaku, (slika 3.7.b). Kalibraciona kriva tada se dobija kao optimalni pravac metodom linearne regresije. Pravac

$$y = ax + b$$

je optimalan po kriterijumu da je suma kvadrata odstupanja tačaka (x_i, y_i) od pravca minimalna. Pri tome su:

- x pokazivanje etalonskog instrumenta
- y pokazivanje instrumenta koji se kalibrira i
- a, b koeficijenti optimalnog pravca koje treba odrediti.

Zbog slučajnih uticaja prilikom svakog mjerenja ispolji se neko odstupanje pokazivanja između etalonskog i ispitivanja instrumenta. Zato se snimljene tačke (x_i, y_i) ne nalaze na optimalnom pravcu, već su od njega udaljene po vertikali za iznos

$$e_i = y_i - (ax_i + b) \dots \dots \dots (3.25)$$

Iz uslova optimalnosti

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = \min \dots \dots \dots (3.26)$$

Slijedi da je

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-x_i) = 0 \dots \dots \dots (3.27)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-1) = 0$$

Rješenje ove dvije jednačine daje koeficijente optimalnog pravca:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots \dots \dots (3.28)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \dots \dots \dots (3.29)$$

Optimalni kalibracioni pravac minimizira uticaj slučajne greške, a eventualna razlika između idealnog i optimalnog pravca je sistemaska greška.

Treba napomenuti da su jednačine (3.28) i (3.29) za proračun koeficijenata optimalnog pravca izvedene uz pretpostavku da slučajni uticaji djeluju samo sa strane ispitivanog instrumenta. Pretpostavi li se da slučajni poremećaji djeluju smao na etalonski instrument, tada je razlika pokazivanja ova dva instrumenta

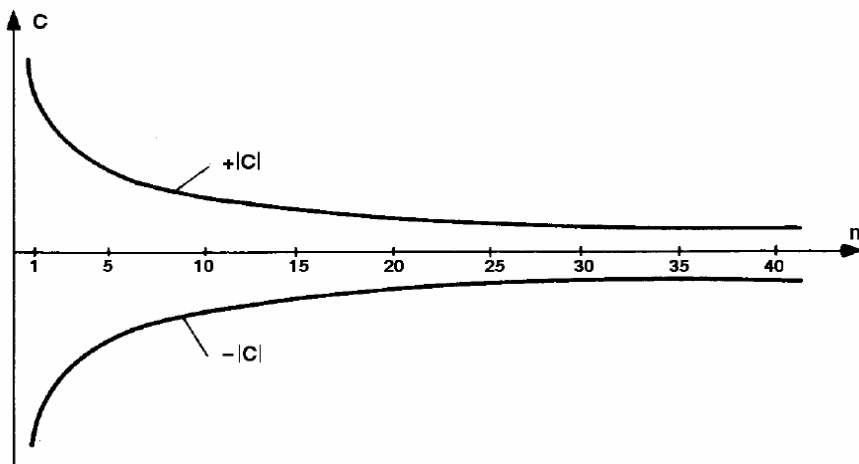
$$x = \frac{y}{a_1} - \frac{b_1}{a_1} \dots\dots\dots (3.30)$$

Poređenjem jednačina (3.28), (3.29) i (3.30) uočava se da važe relacije $a_1=1/a$ i $b_1=-b/a$, tako da koeficijente optimalnog pravca nije teško izračunati i za ovaj slučaj.

Broj mjerenja i tačnost

Prilikom mjerenja idealno bi bilo eksperiment ponoviti beskonačan broj puta. Tada se za stvarnu vrijednot mjerene veličine može smatrati da je srednja vrijednost, jer je

$$x = \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \dots\dots\dots (3.31)$$



Slika 3.8. Nepouzdanost srednje vrijednosti u funkciji broja mjerenja

Ako se greška srednje vrijednosti $\frac{1}{n(\sum a_i)}$ dovede u vezu sa standardnim odstupanjem σ , tada jednačina (3.31) postaje

$$x = \bar{x} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{x} \pm C \dots\dots\dots (3.32)$$

gdje C označava pouzdanost, kojom je određena srednja vrijednost. Na slici 3.8 prikazana je zavisnost pouzdanosti srednje vrijednosti od broja mjerenja. Nije teško provjeriti da je, uz pretpostavku da σ ostaje isto, potrebno obaviti 10 puta veći broj mjerenja da bi se C smanjilo za svega 3,14 puta. Za precizna mjerenja uzima se $n > 30$. Za manji broj mjernih rezultata proračun pouzdanosti eksperimenta treba izvršiti po Studentovoj raspodjeli koja je opštija od Gaussove.

Granična greška i klasa mjernog instrumenta

Na raspodjelu mjernih rezultata oko srednje vrijednosti utiču isključivo slučajne greške, ako se pretpostavi da su sistematske greške korigovane kalibracionim postupkom. Međutim, potpuna korekcija sistematskih grešaka je rijetko moguća. Te preostale sistematske greške uzrokuju da je konačni rezultat mjerenja uvijek nesigurniji nego što pokazuje jednačina (3.31)

Najjednostavniji način da se procijene preostale sistematske greške E je povećanje broja mjerenja ili obavljanje poredbenih mjerenja. Zbog preostalih sistematskih grešaka granica pouzdanosti srednje vrijednosti se proširuje na

$$U = \pm \{ |C| + |E| \} \dots\dots\dots (3.33)$$

i naziva se mjerna nesigurnost.

Za praktična mjerenja uvodi se granična greška $G = \Delta x_{\max}$ kao garantovano najveće dopuštanje od stvarne (propisane) vrijednosti. Za mjerni uređaj treba da je $U < G$, a obično je $U < 0,2G$. Na osnovu ovih razmatranja sada se može definisati klasa tačnosti mjernog instrumenta kao

$$e = \frac{G}{x} 100\% \dots\dots\dots (3.34)$$

gdje je x najveće pokazivanje instrumenta, s tim da se on upotrebljava u propisanim ambijentnim uslovima.

3.3. Obrada rezultata mjerenja

Nakon izvršenih direktnih ili indirektnih mjerenja treba dobivene rezultate obraditi. Zavisno od toga da li je mjerena veličina određena direktno ili posredno vrši se odgovarajuća obrada rezultata mjerenja.

3.3.1. Obrada rezultata direktnih mjerenja

Prilikom direktnih mjerenja fizičkih veličina kao što je već pokazano u poglavlju 2. treba ispuniti sljedeće uslove:

- mjerenje se vrši direktno uz sve pripreme koje su prethodno izvršene,
- mjerenje se ponavlja n puta,
- u toku mjerenja javljaju se sve vrste grešaka,
- mjerenje vrši jedan izvršilac sa istim priborom i uz nepromijenjen metod i uslove mjerenja,
- izmjerene vrijednosti su x_1, \dots, x_n .

Rezultati mjerenja prema propisima standarda (DIN, BAS, ISO, GOST...) treba da sadrže obrađene podatke. U principu rezultati mjerenja treba da sadrže:

- izmjerenu i standardnim postupkom određenu vrijednost fizičke veličine,
- grešku mjerenja, odnosno njenu donju i gornju granicu,
- statističku vjerovatnoću tj. sigurnost sa kojom se izmjerena vrijednost nalazi u granicama.

Rezultati mjerenja u mašinstvu najčešće se raspoređuju po normalnom Gaussovom zakonu raspodjele.

Do odstupanja od normalne raspodjele dolazi zbog tri glavna razloga:

- a) Kod instrumenata sa nulom ili nekim maksimumom može biti različita tačnost za veličine na početku skale i na maksimalnom mjestu. Zato su instrumenti sa širokim opsegom mjerenja nepogodni, jer će se javiti asimetrija rezultata.
- b) Kada pokazivanje instrumenata za jednu mjernu veličinu zavisi od prethodnog položaja kazaljke može nastati asimetrija raspodjele. Do ove pojave doći će kada se ne obavlja isti broj mjerenja u porastu i u opadanju mjerene veličine.
- c) Kod posrednih mjerenja normalnost raspodjele zavisi i od odnosa veličine koja se mjeri i veličine koja se proračunava. Npr. Ako se mjeri

težina kugli preko njihovih prečnika, težine mogu biti raspoređene po normalnom zakonu. Međutim težina zavisi od trećeg stepena prečnika, pa raspodjela nije normalna

Postoje tačne i približne metode provjere normalnosti raspodjele. U tačne metode spada npr. poređenje sa raspodjelom. U približne metode raspodjele spadaju analitička i grafička provjera odstupanja linije normalne raspodjele od linije koju daju rezultati mjerenja.

3.3.2. Obrada rezultata posrednih mjerenja

Slučajne greške posrednih mjerenja

Vrlo često nije moguće direktno izmjeriti neku fizičku veličinu pa se mjerenje većine veličina vrši posredno. Tada se veličina y dobija na osnovu funkcionalne zavisnosti

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \dots\dots\dots (3.35)$$

gdje su x_1, x_2, \dots, x_n mjerni argumenti, koji se određuju direktnim mjerenjima. U teoriji grešaka definisan je slučaj sa linearnom funkcijom f i međusobno nezavisnim mjernim argumentima:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x_i \dots\dots\dots (3.36)$$

Najvjerojatnija vrijednost veličine y tada je

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n a_i \bar{x}_i \dots\dots\dots (3.37)$$

a standardno odstupanje je

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{x_i}^2} \dots\dots\dots (3.38)$$

U slučaju nelinearne zavisnosti veličine y od mjernih argumenata, najvjerojatniji rezultat dobija se linearizacijom pomoću razvoja funkcije f u Taylorov red u okolini tačke $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$:

$$y = \bar{y} + \Delta y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}} \Delta x_i + R \dots\dots\dots (3.39)$$

gdje su x_i slučajna odstupanja od \bar{x}_i , tj. $\Delta x_i = x_i - \bar{x}_i$ i R ostatak Taylorovog reda, koji teži nuli, čime se potvrđuje valjanost linearizacije.

Standardno odstupanje za posredna mjerenja sa nelinearnom zaisnošću između y i mjernih argumenata x_1, x_2, \dots, x_n određuje se na osnovu

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \dots\dots\dots (3.40)$$

Umjesto standardnog odstupanja ponekad se uzima relativno standardno odstupanje, $r_y = \sigma_y / \bar{y}$.

Sistematske greške posrednih mjerenja

Ako su direktna mjerenja veličine $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, obavljena sa sistematskim greškama Δx_i , tada će one prouzrokovati grešku Δy u veličini y :

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \dots, x_n + \Delta x_n) \dots\dots\dots (3.41)$$

S obzirom da su $\Delta x_i \ll x_i$ i $\Delta y_i \ll y_i$, može se smatrati da su $\Delta x_i = dx_i$ i $\Delta y_i = dy_i$. Razvojem funkcije f u Taylorov red u okolini tačke $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, dobija se

$$y + dy = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n + R \dots\dots\dots (3.42)$$

gdje su $\partial f / \partial x_i$ vrijednosti parcijanih izvoda u tački (x_1, x_2, \dots, x_n) i R ostatak, koji teži nuli. Imajući u vidu prolaznu jednačinu (3.35) iz (3.42) slijedi da je totalni diferencijal

$$dy = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i \dots\dots\dots (3.43)$$

Iz čega se vidi da je apsolutna greška posrednih mjerenja jednaka sumi parcijalnih grešaka:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \dots\dots\dots (3.44)$$

U slučaju da je funkcija f linearna, apsolutna greška jednostavno se računa pomoću:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i \dots\dots\dots (3.45)$$

Očigledno je da je kod posrednih mjerenja, slično kao i kod direktnih, za otklanjanje sistematskih grešaka kalibracijom potrebno njihovo tačno poznavanje, kako po iznosu tako i po predznaku. S obzirom da su

parcijalne greške $(\partial y / \partial x_i) \cdot \Delta x_i$ različitog predznaka, one se na taj način djelimično kompenzuju.

3.3.3. Granice nepouzdanosti rezultata posrednih mjerenja

Preostale sistemske greške (koje nisu kompenzirane kalibracijom) kod direktnih mjerenja proširuju granicu nepouzdanosti srednje vrijednosti, koja se definiše kao mjerna nesigurnost. Za indirektno mjerenu veličinu $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ mjerna nesigurnost procjenjuje se na osnovu jednačine:

$$U_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} U_{x_i} \right]^2} \dots\dots\dots (3.46)$$

koja je, što je razumljivo slična jednačini za proračun standardnog odstupanja složene veličine.

U mjernoj praksi često nisu poznate mjerne nesigurnosti U_{x_i} , pa se radije, na osnovu pravila o složenoj sistematskoj grešci, računa granična (maksimalna) greška posrednog mjerenja $G_y = \Delta y_{\max}$ kao

$$G_y = \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} G_{x_i} \right| \dots\dots\dots (3.47)$$

gdje su $G_{x_i} = \Delta x_{i \max}$ poznate granične greške pojedinih veličina x_i .

Prema tome, sada je

$$y = \bar{y} \pm |G_y| \dots\dots\dots (3.48)$$

Ovo je dosta širok interval jer formula (3.48) predstavlja najnepovoljniji slučaj granične greške. Zato se obično uzima tzv. statistička (vjerovatna) granična greška, koja je manja od prethodne, a računa se pomoću formule:

$$G_y^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} G_{x_i} \right]^2} \dots\dots\dots (3.49)$$

3.3.4. Obrada rezultata parametarskih mjerenja

Parametarska mjerenja

U tehnici automatske regulacije često se postavlja zadatak da se na osnovu direktnih mjerenja veličina procesa a_1, a_2, \dots, a_n odrede nepoznati parametri x_1, x_2, \dots, x_n , koji definišu funkcionalnu zavisnost između tih veličina, tj. matematički model procesa. Tipičan primjer ovakvih mjerenja je određivanje temperaturnih koeficijenata α, β i γ električnog otpora nekog materijala na osnovu mjerenja temperature t i otpora R_t na toj temperaturi:

$$R_t = R_0 + R_0\alpha t + R_0\beta t^2 + R_0\gamma t^3 \dots \dots \dots (3.50)$$

gdje je R_0 otpor materijala na 0°C .

Da bi se odredile vrijednosti koeficijenata α, β i γ , potrebna su bar tri mjerenja, tako da se u odnosu na nepoznate koeficijente dobija sistem linearnih jednačina:

$$\begin{aligned} R_{t1} &= R_0 + R_0\alpha t_1 + R_0\beta t_1^2 + R_0\gamma t_1^3 \\ R_{t2} &= R_0 + R_0\alpha t_2 + R_0\beta t_2^2 + R_0\gamma t_2^3 \dots \dots \dots (3.51) \\ R_{t3} &= R_0 + R_0\alpha t_3 + R_0\beta t_3^2 + R_0\gamma t_3^3 \end{aligned}$$

Prilikom mjerenja R_t i t uvijek se čine greške, pa će zato i traženi koeficijenti biti određeni nekom greškom. Za njen proračun neophodno je izvršiti veći broj mjerenja nego što je broj nepoznatih koeficijenata.

Greške parametarskih mjerenja

U opštem slučaju parametarska mjerenja mogu se predstaviti jednačinom

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n, a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk}) = a_{rk} \dots \dots \dots (3.52)$$

gdje su:

x_i ($i=1, 2, \dots, n$) nepoznati parametri

a_{ik} direktno mjerene veličine procesa

$k=1, 2, \dots, m$ broj ponovljenih mjerenja.

U praktičnim mjerenjima opšta jednačina (3.52) najčešće se svodi na sistem linearnih jednačina:

$$a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k} = 0, \quad k=1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (3.53)$$

Uvrštavanjem vrijednosti izmjerenih veličina a_{ik} , moguće je doći do rješenja.

Međutim, kako je svako to mjerenje obavljeno sa nekom greškom, desna strana jednačina neće biti nula, pa se umjesto (3.53) realno dobija modifikovan sistem

$$a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k} = \delta_k, \quad k=1, 2, \dots, m \dots \dots \dots (3.54)$$

gdje δ_k predstavlja nepodudarnost mjerenja.

Zadatak se sada svodi na određivanje parametara x_i tako da će suma kvadrata mjernih nepodudarnosti biti minimalna:

$$S = \sum_{k=1}^m \delta_k^2 = \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k})^2 = \min \dots (3.55)$$

Minimum iz uslova da parcijalni izvodi po svim parametrima budu jednaki nuli, odnosno da:

$$\frac{\partial S}{\partial x_1} = 2 \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k}) a_{1k} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial x_2} = 2 \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k}) a_{2k} = 0 \dots \dots \dots (3.56)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x_n} = 2 \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k}) a_{nk} = 0$$

Dobijeni sistem od n jednačina i n nepoznatih rješava se uobičajenim postupcima. Kao rezultat dobijaju se srednje vrijednosti parametara:

$$x_i = \frac{D_{x_i}}{D}, \quad i=1, 2, \dots, n \dots \dots \dots (3.57)$$

Gdje je determinanta sistema, a D_{x_i} determinanta koja se dobija kada se u determinanti sistema i-ta kolona zamijeni kolonom koju čine homogeni dijelovi jednačina (3.56).

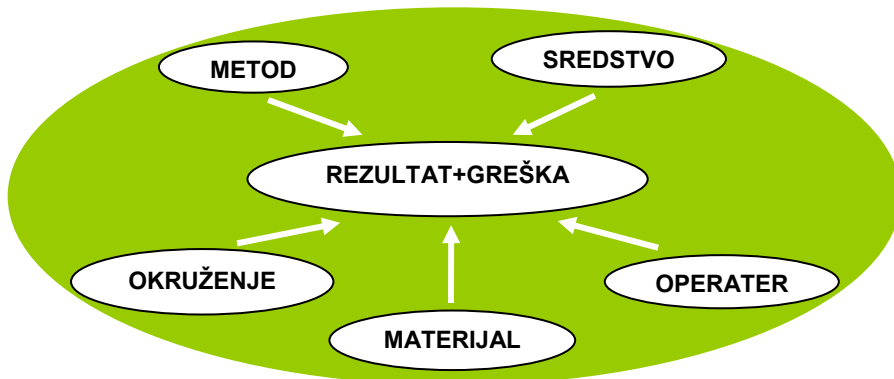
Tačnost određivanja parametara x_i opisanim metodom reprezentuje standardno odstupanje

$$\sigma(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{m-n} \sum_{i=1}^m \delta_k^2 \frac{A_{ii}}{D}} \dots \dots \dots (3.58)$$

gdje je A_{ii} algebarski komplement i-tog dijagonalnog elementa determinante sistema. Pri proračunu se uzima u obzir osrednjavanje rezultata mjerenja zahvaljujući većem broju mjerenja m od broja n nepoznatih parametara.

3.4. Uzroci mjerne nesigurnosti i pojave grešaka

Uzroci mjerne nesigurnosti mogu se podijeliti na pet osnovnih grupa. Svaka od ovih cjelina učestvuje u ukupnoj ocjeni mjerne nesigurnosti određenim udjelom. Podjela se može pokazati kao na slici 3.9.



Slika 3.9. Uticaji na rezultat mjerenja

Osnovni uzroci koji dovode do pojave grešaka su :

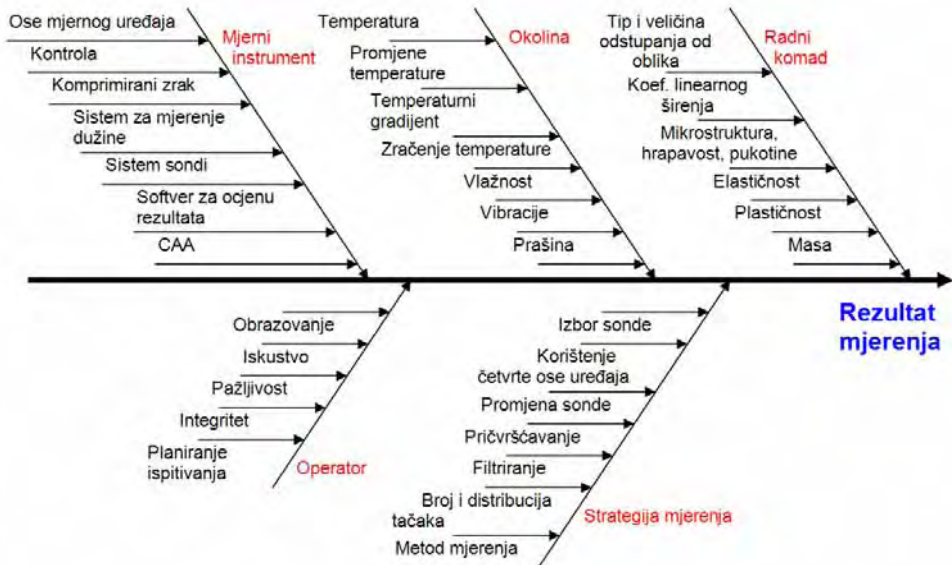
- princip mjerenja koji podrazumijeva osnovni matematički model koji opisuje način dobivanja mjerene veličine, smjenjivanje operacija, broj mjerenja, obrada informacija.
- Sredstvo za određivanje mjerne nesigurnosti odnosno oprema kao uzrok mjerne nesigurnosti ima dvije komponente.

Prva komponenta se tiče etalona i vremenske stabilnosti etalona, homogenosti, metrološke karakteristike etalona.

Druga komponenta se odnosi na instrument mjerenja i to na njegovu pouzdanost, tačnost, rezoluciju, rang mjerenja, način prikazivanja rezultata, bias.

U toku jednog mjerenja, okruženje u kojem se izvodi proces mjerenja igra naročito važnu ulogu. Ako se mjerenje provodi u uslovima promjenjive temperature, vlažnosti, pritiska, vibracija i drugih faktora koji se mogu okarakterisati kao parametri sredine, pouzdanost i ponovljivost procesa mjerenja će ozbiljno biti narušena a time i tačnost rezultata mjerenja.

Materijal u procesu mjerenja može učestvovati svojom kvalitetom, homogenošću, temperaturnom stabilnošću, fizičkim i hemijskim karakteristikama.



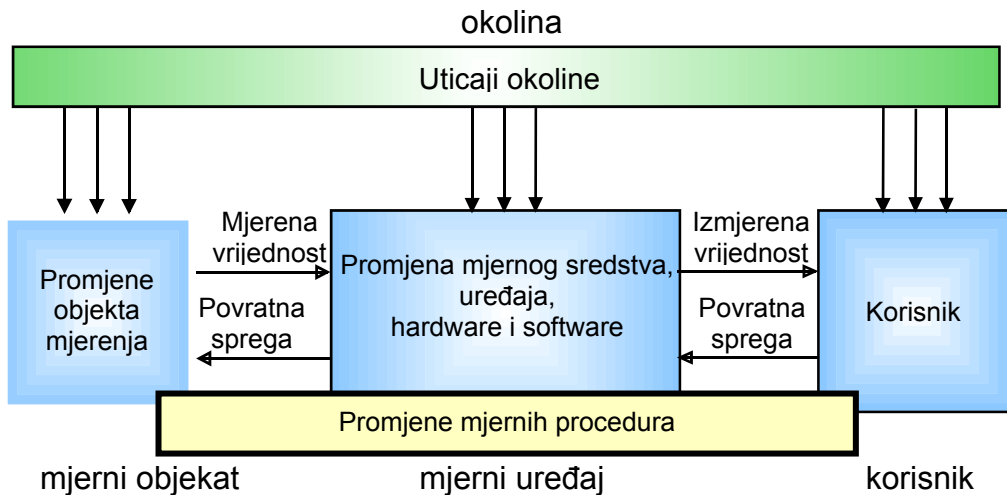
Slika 3.10. Uticaji na pojavu grešaka mjerenja i mjerne nesigurnosti

Greške koje pridonose mjernoj nesigurnosti može uzrokovati i osoba koja vrši mjerenje-operator. Naime, instrumenti koji se koriste pri mjerenju mogu biti analogni i digitalni. Prilikom očitavanja rezultata mjerenja moguće je pogrešno očitavanje sa analognih instrumenta. S obzirom da digitalni instrumenti za podiroke imaju diskretne cjeline pri prikazivanju rezultata javlja se greška zaokruživanja. Operator unosi kao faktore koji utiču na proces mjerenja njegovo iskustvo, kvalifikacije i stručnost, trenutno raspoloženje i koncentraciju.

U svakom slučaju greške mjerenja su posljedica uticaja slučajnog i sistematskog karaktera koji proizvode navedenih pet glavnih faktora:

- mjerni instrument
- radni komad
- okolina
- izvršilac mjerenja - operator (metrolog)
- mjerna strategija.

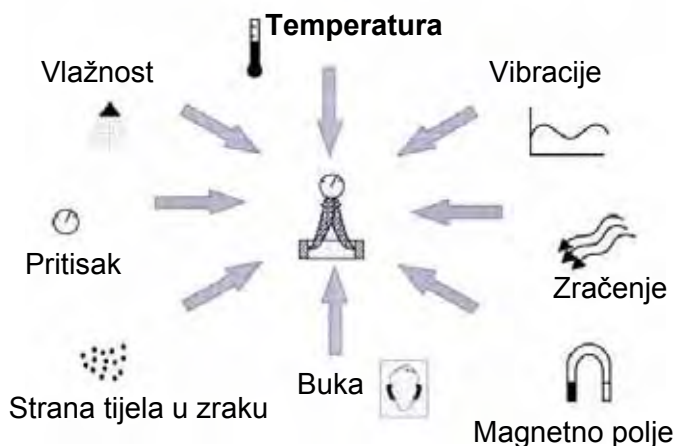
Posljedice takvih uticaja prikazane su na slici 3.11.



Slika 3.11. Posljedice uticaja okoline na greške mjerenja

3.4.1. Uticaj okoline na mjernu nesigurnost

Ambijent u kome se obavlja mjerenje utiče na objekat mjerenja, izvršioca mjerenja i na mjernu opremu kojom se vrši mjerenje. Okolišni uticaj djeluje tako da mijenja karakteristike mjernog objekta i mjernog sredstva (dužinu, površinu, vlažnost itd.) a operatoru stvara poteškoće u ispravnom postupku vršenja mjerenja, slika 3.12.



Slika 3.12. Uticaj okoline na greške mjerenja

Utjecaji okoline mogu se svesti na nekoliko koji najviše utiču na mjerenja, a to su:

- vibracije podloge,
- zagađenje,
- klima i
- temperatura

Vibracije

Dijelovi mjernih sredstava kao što su pogoni mjernih sredstava mogu prouzrokovati vibracije koje utiču na mjerni rezultat. Uticaj vibracijskog efekta magnetnog polja i zvučnog pritiska proizvode vibracije koje remete ispravnost mjerenja. Zbog toga je važno da se planirano ispitivanje vrši u uslovima u kojima je mali uticaj vibracija na mjerenja. Zato se u laboratorijama mjerenja vrše na specijalnim stolovima sa granitnim pločama, a u pogonu je potrebno, od situacije, stvoriti ambijent sa što manje vibracionog djelovanja koje doprinosi mjernoj nesigurnosti i pojavi greške mjerenja.

Okoliš

Osnovni uzroci pojave grešaka mjerenja su:

- Zagađenost okoliša i
- Vlaga

Zagađenost atmosfere oko mjernog sredstva i mjernog objekta može uticati na rezultat mjerenja proizvodeći defekte dimenzija, oblika i površina. Uzroci kontaminacije su: ulje, prašina i čestice koje formiraju sloj na mjernom objektu i time dovode do greške mjerenja. U prostoru oko proizvodnih linija mogu postojati uslovi koji će dovesti do pojave greške ukoliko se nješenje vrši u ovim uslovima.

Vlaga uzrokuje koroziju kako mjernog objekta tako i mjernog sredstva, a čak može dovesti i do kvara mjernog sredstva.

Ipak, od svih uticaja, najveći je uticaj temperature na greške mjerenja.

Temperatura

Temperatura ima odlučujući uticaj na mjerenje u području proizvodnih mjerenja. Uticaj temperature ima poseban uticaj namjerenje dužine. Uticaj temperature na mjerenje je posljedica prenosa toplote koji se ostvaruje kondukcijom, konvekcijom ili radijacijom. Prilikom uticaja temperature mogu se uočiti tri tipa temperaturnih uticaja:

- temperaturne promjene

- temperaturni gradijent
- temperaturna radijacija (zračenje).

Zbog uticaja temperature mnogi metalni materijali se šire pri povećanju temperature. Linearno širenje se prikazuje izrazom:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

ΔL – promjena dužine

L – nominalna dužina

α – koeficijent linearnog širenja dat u tabeli 3.1.

Δt – promjena temperature

Materijal	Koeficijent linearnog širenja α [$10^{-6}/K$]	Granična varijacija u_a [$10^{-6}/K$]
Al legure	23 – 24	0,5 – 2
Staklo	8 – 10	0,5
Sivo liveno gvožđe	9,5 – 10	0,5
Čelik	10 – 12	0,5 – 1,5
Zerodur (staklo i keramika)	0 – 0,05	0,05

Tabela 3.1. Osobine materijala

Materijal	Koeficijent linearnog širenja α u $K^{-1} \cdot 10^{-6}$	Modul elastičnosti E u $N/mm^2 \cdot 10^3$
Aluminijum	23,8	71
Legure aluminija	20 – 24	60 – 80
Olovo	29,2	19
Liveno gvožđe	10,5	90 – 180
Bakar	17	125
Mesing	18,5	100
Nikl	13	206
Srebro	19,7	80
Čelik	11,5	185 – 215
Titan	8,2	120
Cink	28	128

Tabela 3.2. Osobine materijala

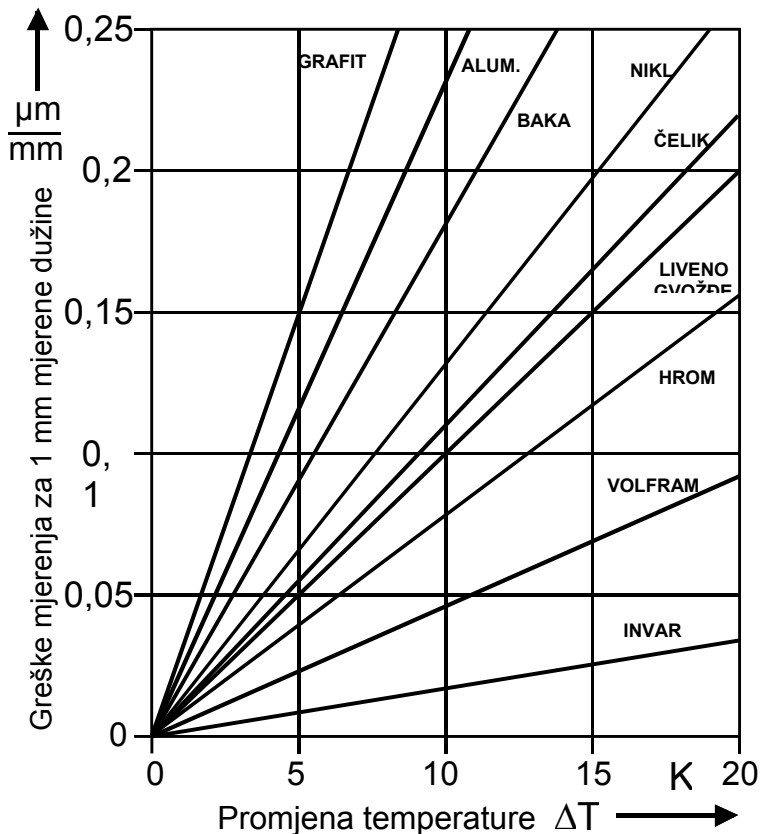
Greška usljed temperature za različite materijale:

$$MA = L_p \cdot \alpha_n \cdot \Delta T_p - L_n \cdot \alpha_n \cdot \Delta T_n$$

L_p, L_n – dužina na 20°C

α_p, α_n – koeficijenti linearnog širenja

$\Delta T_p, \Delta T_n$ – promjena temperature



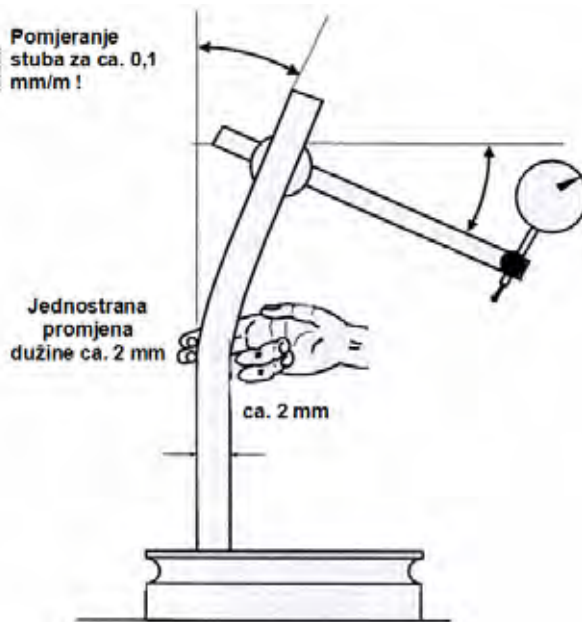
Slika 3.13. Greška usljed temperature za različite materijale

Kad se vrše precizna mjerenja radijacija igra značajnu ulogu u promjeni uslova mjerenja. Na dužinu od 100 mm dugom čeličnom dijelu materijal se skuplja za više od 1 μm pri promjeni temperature od 1°K. Kada se vrši mjerenje mora se voditi računa da se mijenja i dužina mjerne skale prema izrazu:

$$\Delta L = L \cdot (\alpha_{rk} \cdot \Delta t_{rk} - \alpha_M \cdot \Delta t_M)$$

gdje su:

α_{rk} i α_M – koeficijenti linearnog širenja radnog komada i mjernog sredstva
 Δt_{rk} i Δt_M – promjene temperature



Slika 3.14. Savijanje mjernog uređaja kroz jednostrano zagrijavanje

Referentna temperatura u proizvodnim mjerenjima je 20°C prema DIN 102 i prema ISO1. Navedena jednačina se koristi za iste karakteristike mjernog sredstva i mjernog objekta. Tada Δt predstavlja razliku temperatura skale i mjernog komada. Promjena dužine se neće desiti ako je:

- α malo ili $\alpha \sim 0$
- $\alpha_{rk} = \alpha_M$ i $t_{rk} = t_M$
- ako se mjerenje vrši na referentnoj temperaturi.

Prvi slučaj se dešava kada je korišteni materijal Zerodur. Drugi slučaj se dešava sa mjerenjem čeličnih komada i skala od istog materijala. Treći slučaj je mjerenje u mjernim sobama u kojima se temperatura održava na referentnom nivou. Uticaj temperaturnih gradijenata na mjerno sredstvo i radni komad zahtijeva složenu proceduru korekcije i ne može se računati prema datim izrazima. Veličine određene prema specifičnim jednačinama mogu se koristiti da se koriguje mjerni rezultat.

Uticaj temperature na radni komad se ogleda i kroz koeficijente toplotnog širenja. Taj uticaj treba uzeti u obzir u obliku izraza i tada je zbir nesigurnosti kod mjerenja dužine.

$$u = L \cdot \sqrt{(u_{\alpha_{rk}} \cdot \Delta t_{rk})^2 + (u_{\Delta_{rk}} \cdot \alpha_M)^2 + (u_{\alpha_M} \cdot \Delta t_M)^2 + (u_{\Delta_M} \cdot \alpha_M)^2}$$

Varijacije mjerenja temperature su između 0,2 i 1 K zavisno od mjernih uslova. Nesigurnost se određuje za sve veličine koje utiču na ukupnu mjernu nesigurnost. Temperatura je najvažniji vanjski uticaj na mjerni rezultat i bitno mijenja rezultat mjerenja. Spada u sistematsku grešku. Važno je korigovati rezultat mjerenja.

3.4.2. Uticaji mjernog objekta na mjernu nesigurnost

Karakteristike radnog komada su dodatni izvor grešaka mjerenja. To je posebno slučaj sa odstupanjem oblika radnog komada čiji rezultati u ispitnim tačkama ne predstavljaju željeni oblik objekta.

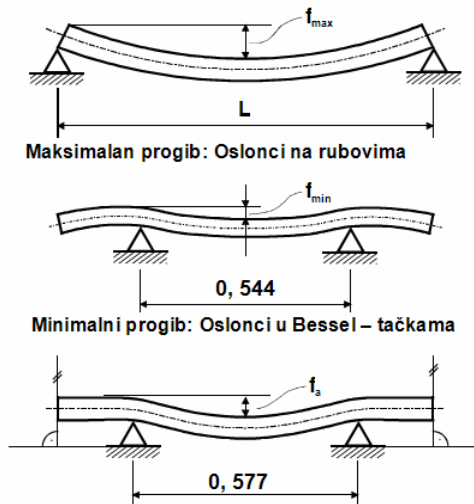
Površina radnog komada je važna za kvalitet proizvoda. Kod vršenja mjerenja optičke karakteristike kao što je refleksija utiču na mjerenje kada se koriste optička mjerna sredstva. Ukoliko se koriste dodirna sredstva kapacitet i valovitost površine igra značajnu ulogu.

Za vrijeme mjerenja kontaktnim mjernim sredstvima djeluje sila mjerenja koja može izazvati deformaciju.

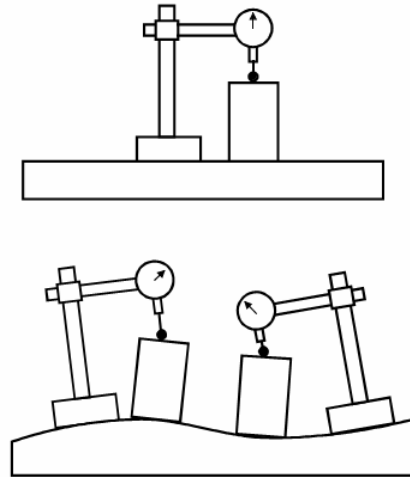
Ako se mjerenja vrše na čeličnim radnim komadima pomoću mjernog skenera sa čeličnom kuglicom greška nastaje usljed trošenja vrha senzora i površine radnog komada. Pošto je ta pojava definirana Hercovim pritiskom može se i tačno odrediti. Sa sensorima čiji je vrh radijusa veći od 1,5 mm i mjerne sile 1,5 N ovaj efekat se može zanemariti.

Usljed uticaja prouzrokovanog skladištenjem i montiranjem mjernog objekta, mjerenju se može dodati uticajni faktor kojim se pokriva ovaj uticaj. Skladištenje i montaža se postepeno određuju prema dimenzijama i težini mjernog objekta. Uticaj je usmjeren na mjerni objekat. Kada se montira mjerni objekat izvođač i korisnik mora biti siguran da radni komad neće biti deformisan. Preferira se postavljanje i oslanjanje mjernog komada na tri oslonca. Uzima se u obziri da se mjerni objekat može deformirati površinski kada se koriste magneti. Mjerni objekti koji su vitki ili imaju tanke zidove mogu se deformisati usljed sopstvene težine. Koristeći cijevi, osovine, rolere mogu se ostvariti željena oslanjanja u cilju smanjenja grešaka montaže. Deformacije se mogu smanjiti i postavljanjem u tačkama koje su na rastojanju 0,22 od linearnog razmaka od vanjskih ivica (Besselove tačke). Time se reducira deformacija približno 2% sa homogenim objektima.

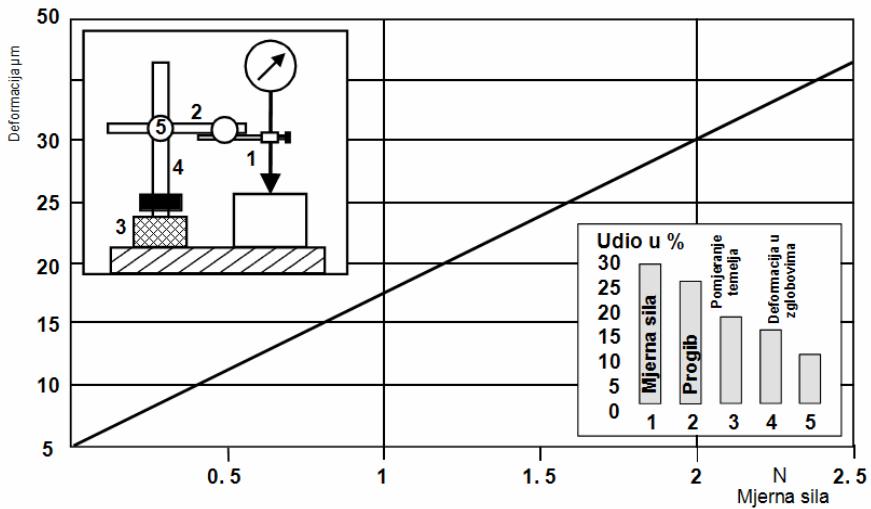
Progib u zavisnosti od rastojanja oslonca



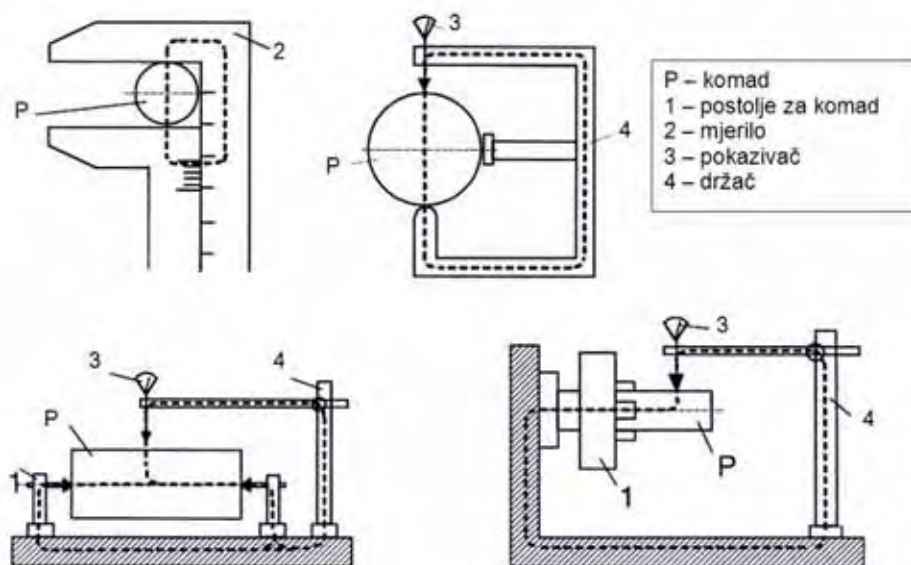
Deformacija mjernih ploča
uzrokuje mjerna odstupanja



Slika 3.15. Deformacija mjernih ploča



Slika 3.16. Deformacija držača instrumenta uzrokovana mjernom silom



Slika 3.17. Mjerni krugovi različitih izrada

3.4.3. Uticaj mjernog sredstva na mjernu nesigurnost (greška prvog i drugog reda, Abbe'ov princip)

Uticaj mjernog sredstva na rezultate mjerenja ogleda se kroz više osnovnih efekata. Mjerno sredstvo se sastoji od dijelova, a u svakom od njih mogu se javiti neispravnosti.

Greške mjerenja mogu se javiti zbog netačnih vođica a imaju važnu ulogu u mjernim sredstvima. Zazor koji se tehnički zahtijeva u vođicama za mjerne oslonce, dodirne probe uzrokuju zakretanje. Uticaji na rezultat mjerenja su mali ili veliki zavisno od tog kako su mjerna sredstva i mjerni objekti pozicionirani. Pomično mjerilo je primjer takve pojave.

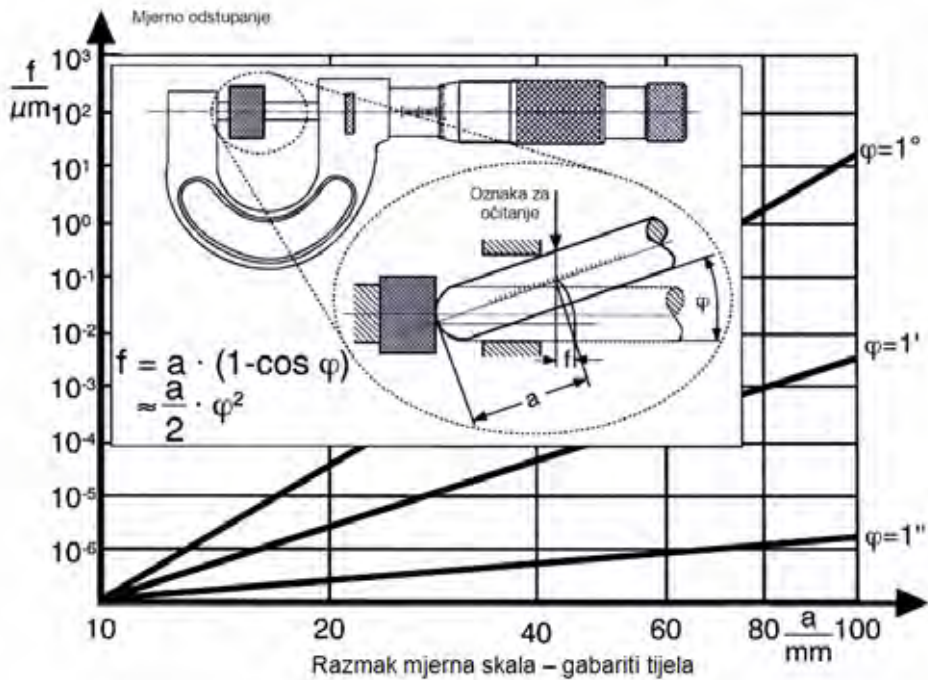
Abbeov princip glasi:

Najtačnija mjerenja se postižu samo onda kada se veličina koja se mjeri nalazi u pravolinijskom produžetku mjerne skale. U suprotnom javlja se dopunska greška npr. MA kod pomičnih mjerila. Zavisno od tačke kontakta ispitivanog radnog komada sa mjernim čeljustima, se dešava između mjernog objekta i mjerne skale.

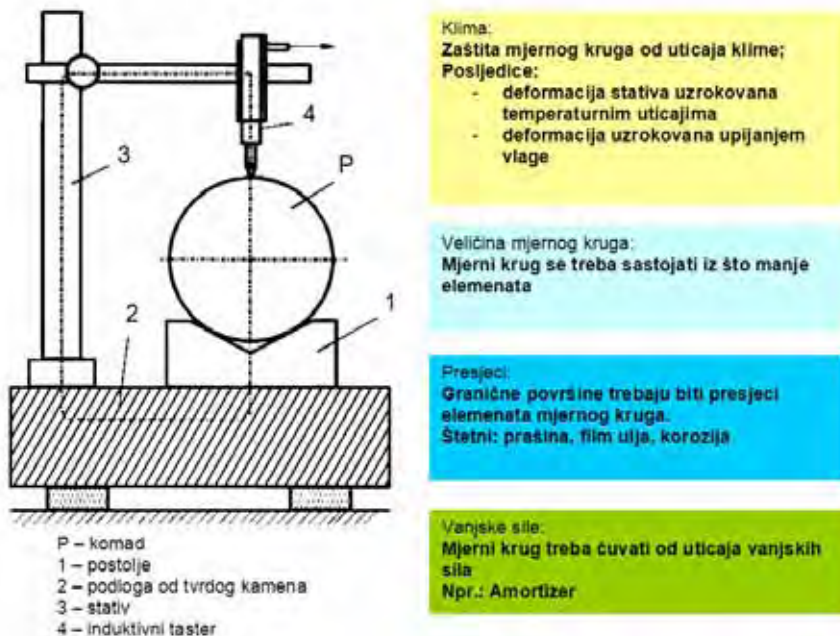
Mjerne greške se računaju po: $MA = a \cdot \sin\varphi = L \cdot (1 - \cos\varphi)$

Za male uglove $\varphi \ll 1$ je φ u radijanima.

Zakretanje $\varphi=0, 35$ do $2, 6'$ se može očekivati. Zakretanje za $\varphi=2'$ i paralelno zakretanje 30 mm dovode do greške mjerenja $MA=17 \mu\text{m}$.



Slika 3.18. Greška drugog reda na primjeru mikrometra



Slika 3.19. Princip komparatora

3.5. GUM i procedure određivanja mjerne nesigurnosti

Novi pristup određivanja mjerne nesigurnosti, jedinstven i razumljiv za cijeli svijet počeo se primjenjivati uvođenjem GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). Donošenju odluke o izradi GUM-a prethodio je dokument koji je 1980. napravila radna grupa formirana od strane BIPM. Grupa eksperata je radila na ilzveštavanju nesigurnosti i objavila dokument pod nazivom Preporuka INC-1 (Recommendation INC-1). Dokument je odobren od strane CIPM 1981. prvi put i ponovo potvrđen 1986. vlastitom CIPM-ovom Preporukom 1 (CI-1981) i 1 (CI-1986).

Rad ISO/TAG 4/WG 3 rezultirao je izdavanjem dokumenta koji nosi naziv Vodič za Izražavanje nesigurnosti u mjerenju ili GUM kako se često zove, Internacionalna Organizacija za Standarde (ISO) po prvi put objavljuje ovaj dokument 1993. (prepravljen i ponovo odštampan 1995) u ime sedam internacionalnih organizacija koje su podržale razvoj ISO/TAG 4:

Danas nije moguće kvantitativno izraziti bilo koji rezultat mjerenja bez određene sumnje u njegovu tačnu vrijednost. Nedostatak znanja o faktorima koji utiču na mjerenje (slučajni i sistematski faktori) podario nam je izraz kao što je mjerna nesigurnost. Svako mjerenje je izloženo različitim uticajima i smetnjama bilo da proizilaze iz slučajnih ili sistematskih efekata, obično iz oba. Zbog ovih efekata rezultat mjerenja leži unutar intervala koji se označava kao nesigurnost mjerenja. Standard koji se bavi izražavanjem nesigurnosti mjerenja a nosi naziv Vodič za Izražavanje Mjerne Nesigurnosti (GUM), dao je slijedeću definiciju mjerne nesigurnosti:

Parametar, vezan za rezultat mjerenja, koji karakteriše rasipanje vrijednosti koje bi sa pravom mogle biti pridružene mjerenoj veličini, gdje je mjerena veličina određena veličina podvrgnuta mjerenju.

GUM standard je široko prihvaćen u mnogim područjima istraživanja gdje se mjerenje primjenjuje. Iz GUM-a kao internacionalnog standarda su izvedeni nacionalni standardi za izražavanje mjerne nesigurnosti. U cilju detaljnijeg objašnjenja mjerne nesigurnosti GUM standard je dao i slijedeće definicije o nesigurnosti u mjerenju:

- mjera moguće greške pri procijenjenoj vrijednosti mjerene veličine date kao rezultat mjerenja; ili
- procjena koja karakteriše područje vrijednosti u kojem leži tačna vrijednost mjerene veličine kada je mjerna nesigurnost procijenjena i izražena na takav način da prikazuje nivo povjerenja da vrijednost stvarno leži unutar granica definisanih intervalom nesigurnosti.

Nesigurnost rezultata mjerenja reflektuje nedostatak znanja o vrijednosti mjerene veličine. Izvori nesigurnosti u mjerenju su:

- nepotpuna definicija mjerene veličine;
- nepotpuno shvatanje definicije mjerene veličine;
- nereprezentativno uzorkovanje - uzorak mjerene veličine ne mora reprezentovati definisanu mjerenu veličinu;
- nedovoljno znanje o efektima uslova okruženja na mjerenje ili nezadovoljavajuće mjerenje uslova okruženja;
- lični bias u čitanju analognih instrumenata;
- konačna rezolucija instrumenata;
- netačne vrijednosti standarda za mjerenje i referentnog materijala;
- netačne vrijednosti konstanti i drugih parametara dobivenih iz vanjskih izvora i korištenih u algoritmima za manje podataka;
- aproksimacije i pretpostavke utjelovljene u metod i proceduru mjerenja;
- varijacije i ponavljajuća posmatranja mjerene veličine pod prividno sličnim uslovima;

U stvarnosti rezultat mjerenja je jednostavno najbolja procjena vrijednosti veličine koja se treba mjeriti.

3.5.1. Kako odrediti mjernu nesigurnost?

Prvi korak u proceduri određivanja mjerne nesigurnosti je kreiranje matematičkog modela procjene koja opisuje funkcionalnu zavisnost mjerene veličine Y od ulaznih varijabli X_i .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \dots\dots\dots (3.59)$$

3.5.2. Procjena standardne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost se procjenjuje kroz dva metoda koji su u suštini samo koncepti za obradu različitih vrsta mjernih rezultata: metod tipa A i metod tipa B.

Oba tipa procjene su zasnovana na raspodjelama vjerovatnoće. Rezultujuće nesigurnosti su kvantitativno definisane varijansama ili standardnim odstupanjem u oba slučaja.

Tip A standardne nesigurnosti je dobiven iz serije ponovljenih posmatranja i jednak je kvadratnom korjenu statistički procjenjene varijanse, i zove se standardno odstupanje.

Prema GUM standardu, metod tipa A je:

metod procjene nesigurnosti statističkom analizom serije posmatranja.

U većini slučajeva, rezultati ponovljenih mjerenja su raspodijeljeni oko srednje vrijednosti u zvonastom obliku krive ili normalno raspodijeljeni. Ono što je karakteristično za ovu raspodjelu je da je vjerovatnoća vrijednosti koje leže bliže procjenjenoj srednjoj vrijednosti veća od onih koje leže u blizini ekstrema. Procjena ponovljenih mjerenja se dobija relativno jednostavnom matematičkom formulom. Ovo je izvedeno iz teorije statistike, a parametar koji se određuje zove se standardno odstupanje.

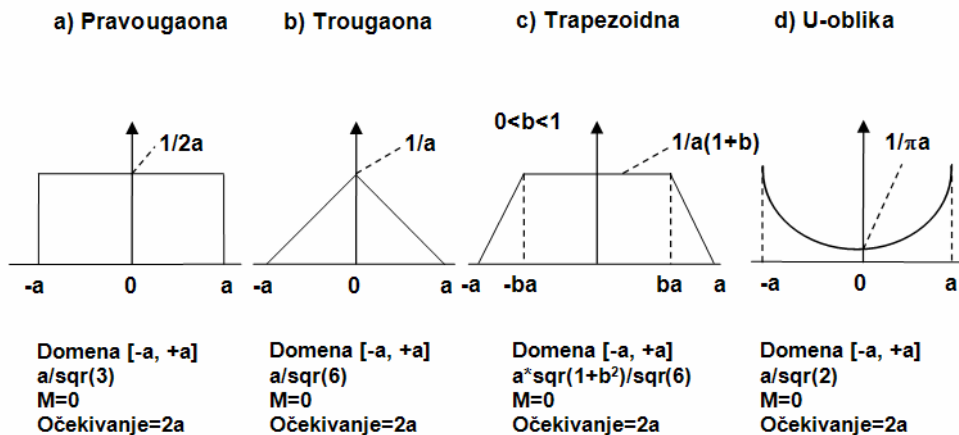
Procjena vrijednosti veličine može biti određena, bez stvarnih posmatranja, putem iskustva baziranog na dostupnim informacijama. Takva procjena naziva se metod procjene tipa B i izvedena nesigurnost označava se kao standardna nesigurnost tipa B. Baza podataka je sačinjena od podataka iz prethodnih mjerenja, znanja o opremi i iskustava u mjerenju, priručnika itd.

Metod procjene tipa B prema GUM standardu je definisan kao:

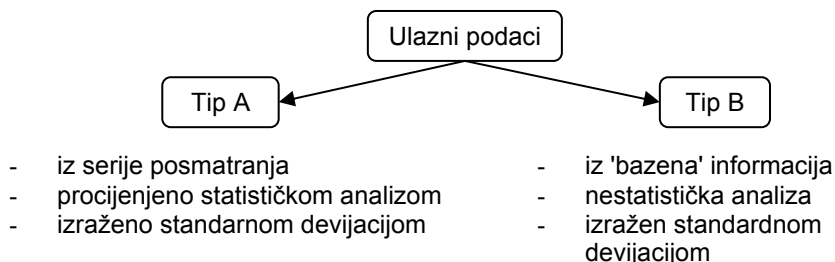
metod procjene nesigurnosti sredstvima različitim od statističke analize serije posmatranja.

Tip B standardne nesigurnosti je izračunat iz pretpostavljene funkcije gustine raspodjele zasnovane na stepenu vjerovanja da će se događaj pojaviti. Vjerovatnoća je zasnovana na procjeni iz tzv. "bazena informacija" koji čini iskustvo. Tip B standardne nesigurnosti nije neophodno reprezentovan normalnom raspodjelom. U slučajevima kada podaci nisu

smješteni oko srednje vrijednosti, primjenjuju se raspodjele kao pravougaona, trougaona, trapezoidna, U-oblika i druge.



Slika 3.20. Dijagrami najčešće upotrebljivanih distribucija za predstavljanje podataka Tipa B



Slika 3.21. Ulazni podaci

Kao što je već napomenuto, nesigurnost pri mjerenju proizilazi iz dva razloga, tj. efekta: slučajnih i sistematskih efekata.

Slučajni efekti kao posljedicu daju slučajnu grešku i predstavljaju prema GUM standardu rezultat mjerenja umanjen za srednju vrijednost koja bi proizišla iz beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine pod istim ponovljivim uslovima. Slučajnu grešku je moguće redukovati samo povećanim brojem posmatranja.

Sistematska greška kao posljedica sistematskih efekata, predstavlja srednju vrijednost koja bi proizišla iz beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine sprovednim pod istim ponovljivim uslovima, umanjena za tačnu vrijednost mjerene veličine, gdje je tačna veličina mjerene veličine vrijednost usklađena sa definicijom date veličine.

3.5.3. Određivanje kombinovane nesigurnosti

Kada se procjenjuje sveukupna nesigurnost, svaki doprinos nesigurnosti mora biti uzet u obzir posebno. Nesigurnost izražena na ovakav način je označena kao kombinovana nesigurnost i svaki pojedinačni doprinos nesigurnosti predstavlja komponentu nesigurnosti.

Prema GUM standardu kombinovana nesigurnost je definisana na slijedeći način:

Kombinovana nesigurnost je procjenjeno standardno odstupanje i karakteriše rasipanje vrijednosti koje bi mogle biti pridružene mjerenoj veličini.

Ili detaljnije kao:

Standardna nesigurnost rezultata mjerenja kada je rezultat dobijen iz niza vrijednosti drugih veličina, jednak pozitivnom kvadratu sume izraza, gdje su izrazi varijanse i kovarijanse ovih drugih veličina poredane prema intenzitetu promjene rezultata mjerenja sa promjenom ovih veličina;

gdje standardna nesigurnost predstavlja nesigurnost rezultata mjerenja izražena u vidu standardnog odstupanja.

Kao što ćemo vidjeti kombinovana nesigurnost će biti jedan od kriterija za izbor programskih paketa s obzirom da za bilo koju složenu veličinu (veličina koja ne može biti direktno mjerena) kombinovana nesigurnost mora biti određena.

Ulazne veličine koje ulaze u proceduru određivanja mjerne nesigurnosti mogu biti korelisane i nekorelisane.

Nekorelisane ulazne veličine

Ulazne veličine koje nemaju međusobne unutrašnje veze nose naziv nekorelisane ulazne veličine. Kombinovana standardna nesigurnost za nekorelisane veličine se označava $u_c(y)$ i jednaka je:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \dots\dots\dots (3.60)$$

gdje je f funkcija data u jednačini (3.59).

Članovi jednačine (3.60) su parcijalni izvodi i nose naziv koeficijenti osjetljivosti, a jednaki su:

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i} = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{x_1, x_2, \dots, x_N} \dots\dots\dots (3.61)$$

Koeficijenti osjetljivosti opisuju kako se izlazna procjena $u(y)$ mijenja sa promjenama vrijednosti ulaznih procjena x_1, x_2, \dots, x_N . Tako jednačina (3.60) može biti napisana kao što slijedi:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \dots\dots\dots (3.62)$$

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad u_i(y) \equiv |c_i| u(x_i) \dots\dots\dots (3.63)$$

Postoji mogućnost da se kombinovana nesigurnost računa numerički smjenom

$$c_i u_i(x_i)$$

sa izrazom

$$Z_i = \frac{1}{2} [f(x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N) - f(x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N)] \dots\dots\dots (3.64)$$

Što znači da je $u_i(y)$ procjenjeno numerički izračunavajući promjene y u zavisnosti od promjene x_i od $+u(x_i)$ i od $-u(x_i)$.

Neke statističke analize pokazuju da je moguće zamijeniti parcijalne izvode kao u jednačini (3.65):

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{y(x_i + u(x_i)) - y(x_i)}{u(x_i)} \dots\dots\dots (3.65)$$

Koeficijenti osjetljivosti mogu biti dobijeni i eksperimentalno iz mjerenja.

Korelisane ulazne veličine

U praksi, ulazne veličine su često korelisane zbog istih standarda za mjerenje fizičkih veličina, mjernih instrumenata, referentnog datuma, ili čak metode mjerenja.

Za korelisane ulazne veličine, koristi se proširena varijanta jednačine (3.60):

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \\ &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \dots\dots\dots (3.66) \end{aligned}$$

gdje su x_i i x_j procjene od X_i i X_j , i $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ procjenjena kovarijansa povezana sa x_i i x_j . Stepen korelacije između x_i i x_j je okarakterisan procjenjenim koeficijentom korelacije $r(x_i, x_j)$:

$$\begin{aligned} r(x_i, x_j) &= \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}, \\ r(x_i, x_j) &= r(x_j, x_i), \dots\dots\dots (3.67) \\ -1 &\leq r(x_i, x_j) \leq +1 \end{aligned}$$

Za nezavisne x_i i x_j koeficijent korelacije r je jednak nuli.

Jednačina (3.66) može biti modifikovana u:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \dots\dots\dots (3.68)$$

Jednačina (3.60) za nekorelisane i jednačina (3.66) za korelisane ulazne veličine su bazirane na prvom redu Taylor-ovog aproksimacionog niza jednačine (3.59) i one izražavaju zakon propagacije nesigurnosti.

3.5.4. Određivanje proširene nesigurnosti

Za komercijalnu i industrijsku upotrebu, osim univerzalnog izražavanja nesigurnosti u vidu kombinovane standardne nesigurnosti, neophodno je proširiti područje oko kombinovane nesigurnosti da bi se obuhvatio veliki skup vrijednosti koje bi mogle s razlogom biti pridružene mjerenoj veličini. Ovo je ostvareno umnoškom kombinovane standardne nesigurnosti sa faktorom pokrivanja k_p . Kao rezultat se dobije proširena standardna nesigurnost označena sa U :

$$U = k_p u_c(y) \dots\dots\dots (3.69)$$

Tada je rezultat mjerenja izražen kao:

$$Y = y \pm U \dots\dots\dots (3.70)$$

Prema GUM standardu data je slijedeća definicija proširene standardne nesigurnosti: To je interval oko rezultata mjerenja koji obuhvata veliki skup p raspodjele vjerovatnoće okarakterisan tim rezultatom i njegovom kombinovanom mjernom nesigurnosti, gdje je p vjerovatnoća pokrivanja ili nivo povjerenja intervala.

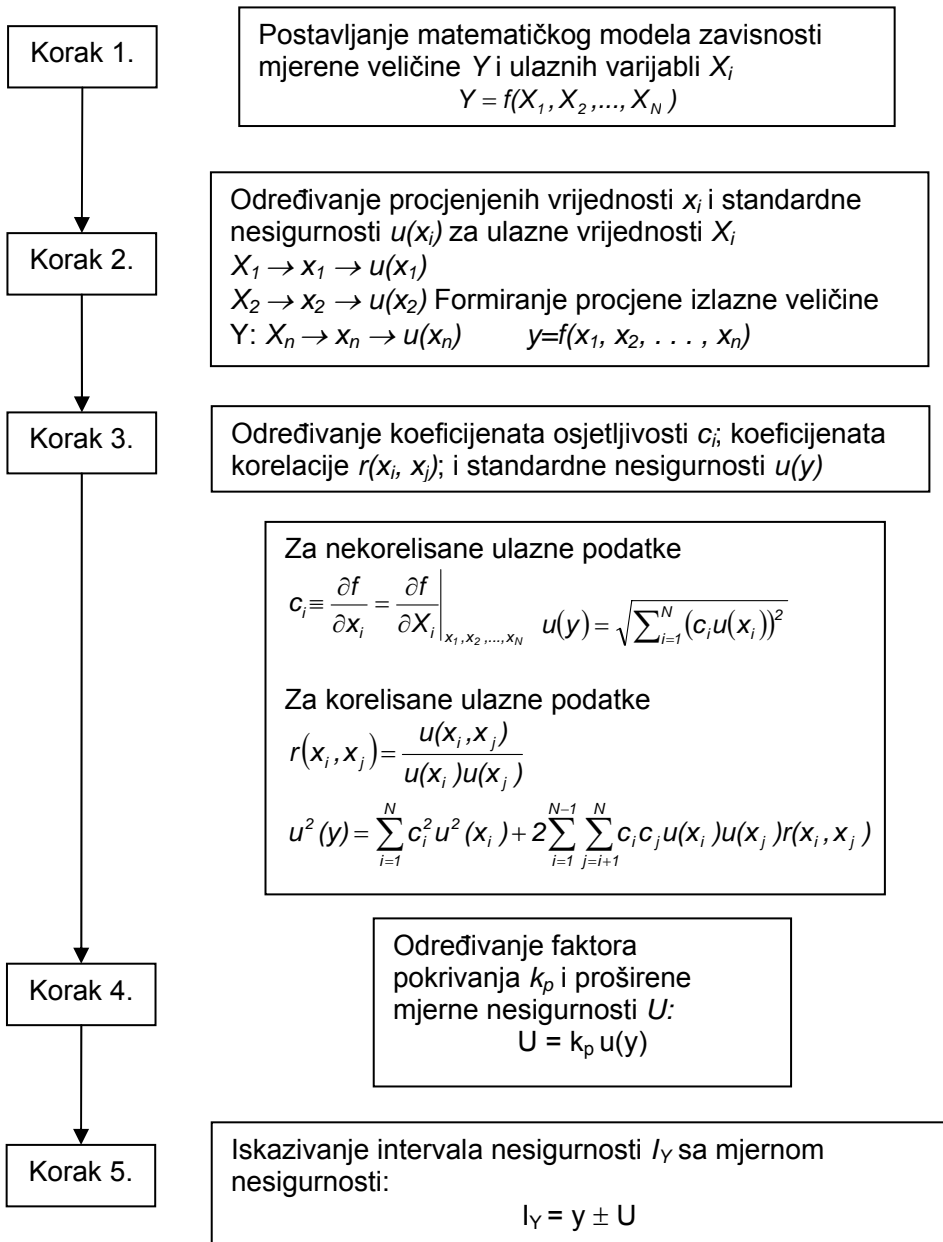
Izrazi interval povjerenja i nivo povjerenja imaju specifičnu definiciju u statistici i primjenjivi su na intervale zasnovane na kombinovanoj nesigurnosti samo pri određenim uslovima. Sve komponente nesigurnosti koje doprinose kombinovanoj nesigurnosti moraju poteći od tipa A metoda procjene.

Vrijednost faktora pokrivanja k_p se bira na osnovu nivoa povjerenja koji zahtjeva interval $y-U$ do $y+U$. Samo u posebnim slučajevima faktor k_p će izlaziti iz intervala od 2 do 3. Za nivo povjerenja od 95,45 procenata u Gauss-ovoj distribuciji, k_p iznosi 2. (vidi tabelu 3.3)

Nivo povjerenja p (%)	68,27	90	95	95,45	99	99,73
Faktor pokrivanja k_p	1	1,645	1,960	2	2,576	3

Tabela 3.3. (GUM g-dodatak)

Procedura određivanja mjerne nesigurnosti prikazana je dijagramom toka na slici 3.22.



Slika 3.22. Dijagram toka određivanja mjerne nesigurnosti

3.5.5. Izvještaj o nesigurnosti

Jedan od najvažnijih kriterija kvaliteta programskih paketa je način na koji prikazuje rezultat proračuna nesigurnosti (mogućnosti eksportovanja i prezentovanja rezultata). Najvažniji zahtjevi prema preporukama GUM standarda koje mora ispuniti prikaz rezultata određivanja mjerne nesigurnosti su nabrojani ispod.

Izvještaj nesigurnosti treba:

1. jasno opisati metode korištene u proračunu rezultata mjerenja i njegove nesigurnosti iz eksperimentalnih podataka i ulazih podataka;
2. prikazati sve komponente nesigurnosti i dokumentovati u potpunosti kako su procijenjene;
3. prikazati analizu podataka na takav način da svaka od njenih komponenti može biti jasno slijeđena i da proračun rezultata može biti neovisno ponovljen u slučaju potrebe;
4. dati sve isparavke i konstante korištene u analizi i njihove izvore.

Izvještaj rezultata mjerenja i kombinovane mjerne nesigurnosti treba :

1. dati detaljan opis kako je mjerena veličina Y definirana;
2. dati procjenu y mjerene veličine Y i njene kombinovane mjerne nesigurnosti; jedinice y i $u_c(y)$ treba uvijek dati;
3. uključiti relativnu kombinovanu standardnu nesigurnost $u_c(y)/|y|$, $|y| \neq 0$, tamo gdje ona neophodna;
4. dati informacije o tome na koji način je određen rezultat mjerenja ili se referencirati na dokument koji to sadrži.

Izvještaj o načinu na koji su dobijeni rezultat mjerenja i njegova nesigurnost treba:

1. dati potpunu vrijednost svake ulazne procjene x_i i njene standardne nesigurnosti $u(x_i)$ zajedno sa opisom načina na koji je određena;
2. dati procjenjene kovarijanse ili procjenjene koeficijente korelacije (preferira se oboje) koji su vezani za sve ulazne procjene koje su korelisane, i metode korištene da se isti odrede;

3. dati stepene slobode za standardnu nesigurnost svake ulazne procjene i kako su određeni;
4. dati funkcionalnu vezu $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ i, kada se pokaže potrebnim, parcijalne izvode ili koeficijente osjetljivosti $\partial f/\partial x_i$.

Primjer 1.

Poznata je tačna temperatura topljenja olova koja iznosi $\mu=327,4^\circ\text{C}$. Optičkim piezometrom izvršena su mjerenja temperature topljenja i to šest puta uzastopno.

Dobivene su vrijednosti:

323; 328,5; 322; 327; 328 i 320.

Srednja vrijednost mjerenja je

$$\bar{x} = \frac{323 + 328,5 + 322 + 327 + 328 + 320}{6} = 324,75^\circ\text{C}$$

Odstupanje od istinite vrijednosti je:

$$\bar{x} - \mu = 324,75 - 327,4 = -2,65^\circ\text{C}$$

Iz rezultata se može zaključiti da je rasipanje rezultata relativno malo i da je izmjerena srednja vrijednost približna istinitoj vrijednosti.

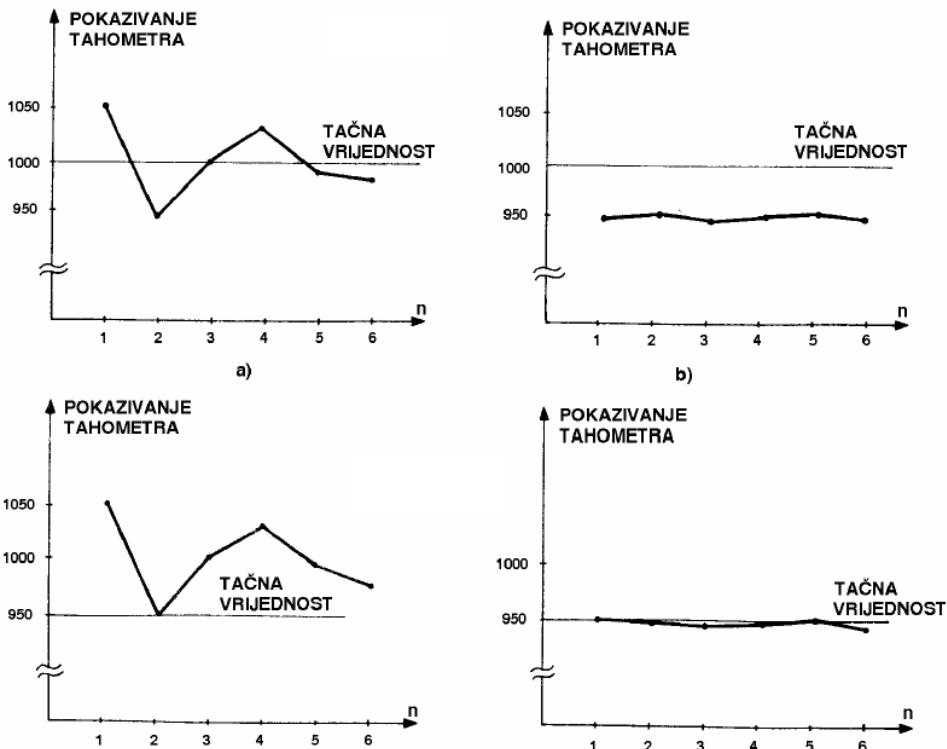
Znači, možemo zaključiti da mjerni instrument ima malo rasipanje rezultata i malu sistemsku grešku. Međutim, veliko rasipanje rezultata ne znači da je uzrok sistemski greška. To može biti i slučajna greška.

Primjer 2:

Tahometrom se mjeri brzina električnog motora čije je stvarna vrijednost 1000 o/min. U šest mjerenja dobijene su vrijednosti 1050, 950, 1000, 1030, 990 i 980 o/min. (slika 3.23.a). Srednja vrijednost ovih mjerenja je 1000 o/min, tj. jednaka je stvarnoj vrijednosti. Međutim, rasutost rezultata zbog djelovanja slučajnih faktora je velika ($\sigma=36$ o/min). Prema tome, ovakav tahometar ima sistematsku grešku jednaku nuli, ali je slučajna greška velika.

Mjerenjem iste brzine od 1000 o/min pomoću drugog tahometra, izmjerene su vrijednosti: 950, 952, 949, 950, 951 i 948 o/min, (slika 3.23.b). U ovom slučaju srednja vrijednost je manja od stvarne za 50 o/min, što je rezultat sistematske greške. Rasutost pokazivanja ovog tahometra je mala ($\sigma=1,4$ o/min), što znači da je slučajna greška zanemariva.

Tahometar može imati veliko rasturanje rezultata, ($\sigma=36$ o/min), a istovremeno i veliko odstupanje srednje vrijednosti od stvarne vrijednosti, (slika 3.23.c). Najbolje bi bilo da tahometar daje rezultate sa malim rasturanjem ($\sigma=1, 4$ o/min) i srednju vrijednost jednaku stvarnoj vrijednosti, (slika 3.23.d).



Slika 3.23. Odnos sistematske i slučajne greške:

- a) tačno mjerenje sa rasipanjem rezultata,
- b) netačno mjerenje bez rasipanja rezultata, c) netačno mjerenje sa rasipanjem rezultata, d) tačno mjerenje bez rasipanja rezultata

U procesu automatske regulacije jedna vrijednost obično se mjeri samo jedanput. Ako se mjerenje brzine realizuje tahometrom koji ima veliko rasturanje pokazivanja, (slika 3.23.a i 3.23.c), tada je mala vjerovatnoća da će mjerenje biti tačno. Takav instrument potrebno je popraviti ili zamijeniti. Tahometar koji ima samo sistematsku grešku, (slika 3.23.b), potrebno je kalibrirati (baždariti) radi njenog otklanjanja, nakon čega se može upotrebljavati.

4. SENZORI

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Klasifikacija senzora
3. Fizikalni principi rada senzora
4. Vrste senzora
5. Prijenos i registracija mjernih veličina

4.1. Uvod

Sredstva za dobivanje informacija u sistemu automatskog upravljanja daju informaciju o kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama procesa što se odvijaju u upravljanoj objektu kao i u samom upravljačkom sistemu.

Za upravljanje tehničkim sistemima veoma su važne informacije o ponašanju osnovnih parametara kao što su: temperatura, protok, nivo, pritisak, vrijeme, položaj, ...

Troškovi za dobivanje informacija u sistemima automatskog upravljanja čine 1/3 ukupne cijene proizvoda.

Informacije se u suštini dobivaju mjerenjem fizikalnih veličina koje karakteriziraju ponašanje procesa. Dobivena informacija se obrađuje po nekom algoritmu.

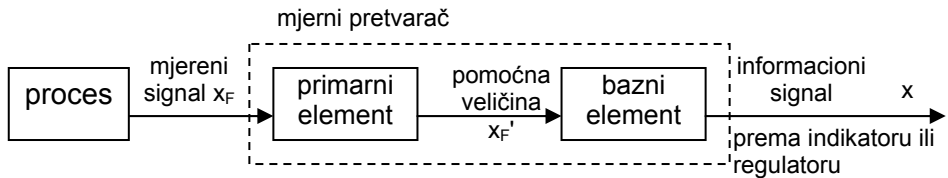
Mjerni uređaji pomoću kojih se u sistemu automatskog upravljanja dobivaju informacije su: senzori, transdjuseri i mjerni pretvarači.

Senzor ili davač je primarni osjetilni element, koji pretvara fizikalnu veličinu X_F koja je pogodnija za mjerenje. Senzor vrši prvo pretvaranje fizikalne veličine u nizu pretvaranja koja su prisutna u složenim mjernim uređajima.

Transducer pretvara mjernu fizičku veličinu X_F u neki standardni oblik – najčešće električni signal, strujni ili naponski a može biti i pneumatski.

Mjerni pretvarač ili transmitter pretvara fizičku veličinu u standardni signal. Konstruktivno je osposobljen da šalje informaciju sa jednog mjesta na drugo putem prenosnih linija ili medijuma. Sastoji se od primarnog elementa koji procesnu veličinu X_F pretvara u neki pogodniji oblik X_F' , te baznog elementa (adaptera) koji tu veličinu pretvara u informacioni signal sa normalnim obilježjima.

Šema pretvaranja mjernog signala dana je na slici 4.1.



Slika 4.1. Struktura mjernog pretvarača

4. 2. Klasifikacija senzora

Tehnika senzora razvija se u tri osnovna pravca:

1. Minimalizacija i veći stepen integracije sastavnih dijelova što je tendencija i u drugim oblastima nauke.
2. Realizacija višestrukog djelovanja, tako da se pomoću jednog senzora istovremeno određuje nekoliko različitih fizikalnih veličina (npr. senzor temperature i vlažnosti zraka)
3. Proširivanje funkcionalnih mogućnosti senzora zahvaljujući ugradnji mikroprocesora.

Podjela senzora nije jednostavna. Vršiti se u odnosu na:

- vrstu izlaznog signala,
- prirodu mjerne veličine,
- princip rada gabarite,
- prirodu izlazne veličine,
- uvjete rada,
- načina upotrebe,
- unutrašnje strukture,
- pouzdanosti, itd.

4. 2. 1. Klasifikacija prema vrsti izlaznog signala

Senzori se dijele na analogne i digitalne. Analogni senzori imaju normiran dinamički opseg izlaznog signala i osjetljivost na šumove. Digitalni senzori imaju veliku mogućnost interakcije sa mikroprocesorskim upravljačkim sredstvima.

4. 2. 2. Klasifikacija prema prirodi mjerene veličine

Dijele se na: toplotne, mehaničke, kinematičke, geometrijske, radijacijske, vremenske i električne, hemijske i fizikalne.

Toplotni se koriste za mjerenje temperature, toplotnog kapaciteta, entalpije, toplote izgarnja

Mehanički se koriste za mjerenje sile i momenta, pritiska, vakuuma, mehaničkog naprezanja.

Kinematički se koriste za mjerenje linearnog i ugaonog ubrzanja i brzine, protoka.

Geometrijski se koriste za mjerenje položaja (koordinata) tijela razmjere, nivoa.

Radijacijski se koriste za mierenje intenziteta toplotnog, nuklearnog, akustičnog i elektromagnetnog zračenja, boje, parametara talasnog procesa.

Vremenski se koriste za mjerenje vremenskog perioda i frekvencije.

Električni se koriste za mjerenje elektromotorne sile, struje, otpora, induktivnosti, kapaciteta, provodnosti

Hemijski senzori se koriste za mjernje hemijskog sastava.

Fizikalni senzori se koriste za mjernje mase, gustine, vlažnosti, tvrdoće, plastičnosti, hrapavosti

4.2.3. Klasifikacija senzora prema principu rada

Pretvaranje neelektričnih mjernih veličina u električne vrši se pomoću odgovarajućih pretvarača na dva načina.

Prvi način podrazumijeva da se odgovarajuća neelektrična veličina pretvara u pretvaraču u električnu veličinu. Pretvarači koji rade na ovaj način zovu se aktivni pretvarači. Aktivni pretvarači za svoj rad ne trebaju dodatnu energiju.

Aktivni senzori mogu biti:

- Indukcioni
- Elektromagnetni
- Elektrodinamički
- Piezoelektrični
- Piroelektrični

- Termoelektrični
- Fotoelektrični.

Drugu grupu pretvarača čine pasivni pretvarači ili parametarski pretvarači. U pasivnim pretvaračima neelektrične veličine utiču na promjenu neke električne karakteristike; kapaciteta, otpora ili induktiviteta.

Pasivni senzori se dijele na:

- Induktivne
- Otporničke
- Kapacitivne.

Hemijski senzori rade na principu: polarizacija jona, kombinovanja hemijskih i električnih metoda, promjena impedance u zavisnosti od hemijskog sastava.

Hemijski senzori mogu biti:

- Polarizacioni
- Hemijsko-električni
- Impedantni.

Optoelektronski dovode do pojave struja u poluprovodnicima koja djeluje na spontanu ili stimulisanu emisiju svjetlosti (svjetleća ili laserska dioda). Kvanti svjetlosti mijenjaju gustinu nosilaca naboja u poluprovodniku (fotootprior), otpor p-n prelaza (fotodioda) ili otpor zapornog sloja metal – poluprovodnik (fotoelement)

Optoelektronski senzori su:

- Predajnici
- Prijemnici sa vanjskim fotoefektom

4.2.4. Klasifikacija senzora prema gabaritima

Prema veličini mjerni senzori mogu biti:

- Normalni i oni su standardne izvedbe.
- Malogabaritni za primjenu u ograničenom prostoru
- Minijaturne koji se koriste za specijalne namjene.

4.2.5. Klasifikacija prema prirodi izlazne veličine

- Mehanički čiji je izlazni signal je sila ili pomak
- Vremenski čiji je izlazni signal vremenski ili frekventni kod
- Električni čiji se izlazni signali mjerene veličine odražavaju kroz promjenu R, L, C parametara izlaza, pa se zovu i parametarski. Ukoliko se na izlazu se generira električni signal t o su generatorski ili aktivni senzori.

4.2.6. Klasifikacija senzora prema uslovima rada

- Stacionarni koji su fiksirani na jednom mjestu i
- Prenosivi koji se mogu pomjerati na razna mjesta

4.2.7. Klasifikacija prema načinu upotrebe

- Operativni koji služe za neposredno davanje informacija
- Pomoćni za dobivanje pomoćnih informacija.

4.2.8. Klasifikacija prema unutrašnjoj strukturi

- Direktni kojima se vrši od ulaza do izlaza direktan prijenos (konverzioni lanac) i
- Kompenzacioni sa negativnom povratnom spregom po izlaznoj veličini.

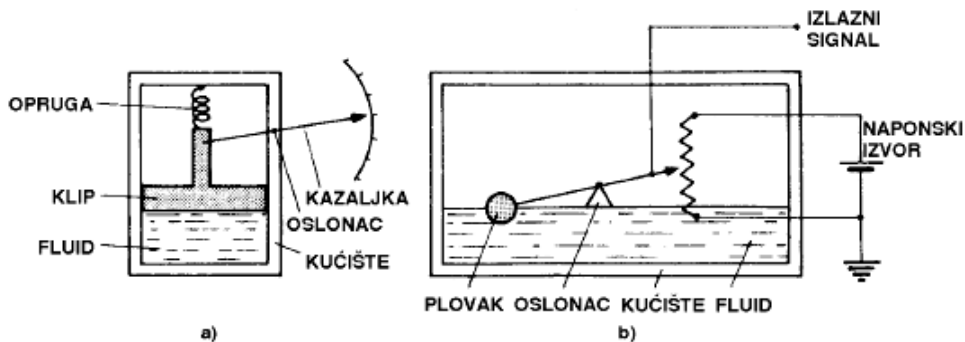
4.2.9. Klasifikacija prema pouzdanosti u eksploataciji

- Pouzdani koji imaju mali intenzitet otkaza i malo vrijeme obnavljanja malo.
- Nepouzdana.

4.2.10. Aktivni i pasivni senzori

Aktivni pretvarači za svoj rad ne zahtijevaju dovođenje dodatne energije tj. Izlazni signal senzora je nastao na osnovu energije mjerene veličine.

Pasivni pretvarači moduliraju energiju nekog vanjskog izvora tj. potrebno im je dovesti dodatnu energiju.



Slika 4.2. Podjela senzora na osnovu energije potrebne za mjerenje:
a) pasivni, b) aktivni senzor

Pasivni senzori su zapravo mjerni uređaji direktnog tipa, jer energiju neophodnu za mjerenje i transport izlaznog signala uzimaju sa objekta mjerenja. Na slici 4.2.a prikazan je pasivni uređaj za mjerenje pritiska. Pritisak fluida prenosi se preko klipa tako da se vrši pomjeranje kazaljke. Ovo pomjeranje je rezultat promjene mjerenog pritiska, jer, nema nikakvog vanjskog izvora energije.

Aktivni senzori su mjerni instrumenti indirektnog tipa, oni energiju neophodnu za mjerenje dobijaju iz vanjskog izvora. Vanjski izvor je najčešće električni, ali može biti i pneumatski ili hidraulični. Na slici 4.2.b prikazan je aktivni senzor za mjerenje nivoa goriva u rezervoaru. Promjena nivoa prenosi se preko plovka na klizač potencijometra. Energija izlaznog signala dolazi iz vanjskog izvora, tako što klizač modulira vrijednost izlaznog napona u skladu sa promjenom nivoa.

Razlika između pasivnih i aktivnih senzora je u rezoluciji mjerenja. U prethodnom primjeru se vidi da se rezolucija mjerenja pasivnih senzora može povećati produžavanjem kazaljke ali je ta mogućnost ograničena iz praktičnih razloga. Rezolucija aktivnih senzora se povećava uzimanjem izvora sa većim iznosom energije, što je opet ograničeno zbog zagrijavanja vodova i povećanih gubitaka toplote i zbog opasnosti od eksplozije.

Pasivni senzori su jednostavnije konstrukcije i jeftiniji su od aktivnih pa je izbor jednog od njih stvar kompromisa između cijene i potrebe rezolucije mjerenja.

U literaturi se može naći i drugačije poimanje pasivnog odnosno aktivnog senzora. Naime, pasivni senzor mehaničkim kontaktom prenosi promjene mjerne fizikalne veličine na promjenu nekog električnog parametra: otpora, induktivnosti, kapaciteta, struje, napona ili intenziteta zračenja. Aktivni generiraju električni signal (struja, napon, naboj) zahvaljujući konverziji mehaničke, svjetlosne ili hemijske energije.

Primjer pasivnog senzora je otpornički detektor mehaničkog pomjeranja, a aktivnog termoelement, koji toplotnu energiju pretvara u napon.

4.3. Fizikalni principi rada senzora

Senzori rade na osnovu njihove interakcije sa procesom i to tako što reagiraju na stanja, a reakciju transformiraju u izlazni signal. Postoji veliki broj fizikalnih pojava i efekata, načina transformacije svojstava procesa kao i metoda konverzije energije koji se mogu primijeniti pri gradnji senzora.

Principi su dati na slici 4.3.

Nosilac informacije je masa ili energija. Mjerenje neelektričnih signala počinje pretvaranjem u električni pa se onda obavlja procesiranje. Važnost imaju fizikalni efekti koji omogućavaju takvu konverziju.

Za neelektrično-električno pretvaranje potrebna je energija iz domena mjernog signala ili van njega.

4.4. Vrste senzora

Najčešće korišteni senzori biće opisani u narednom tekstu; način rada, konstrukcija i upotreba.

4.4.1. Magnetnoelektrični senzori

Za pretvaranje neelektrične mjerne veličine u električnu koristi se princip elektromagnetne indukcije. Ovi senzori rade na samouzbudnom principu. Elektromotorna sila koja se na taj način inducira proporcionalna je brzini promjene magnetnog toka u pojedinim namotajima i i broju namotaja:

$$e = \frac{d\theta}{dt} N$$

Magnetno električni senzori se dijele na:

- elektrodinamičke ili senzore sa relativnim pomjeranjem provodnika i
- elektromagnetne ili senzore sa promjenljivim magnetnim otporom.

Fizička pojava, efekat ili svojstvo	⇐	Piroelektrični efekat	Temperatura u elektricitet	Generiranje električnog naboja na površini kristala pri povećanju temperature
	⇐	Termoelektronski efekat	Toplotna energija u emisiju elektrona	Odvajanje elektrona sa površine metala pri zagrijavanju u vakuumu
	⇐	Peltijev efekat (elektrotermički)	Elektricitet u toplotnu energiju	Apsorpcija ili generiranje toplotne energije u električnom kolu sa dva metala
	⇐	Tomasov efekat	Temperatura i elektricitet u toplotnu energiju	Apsorpcija toplote u električnom kolu sa provodnikom od jesnog materijala pri čemu su dijelovi na različitim temperaturama
	⇐	Fotogalvanski efekat	Svjetlost u elektricitet	Pojava slobodnih elektrona i EMS u osvijetljenom p-n spoju
	⇐	Provođenje toplote	Energija u fizičko svojstvo	Provođenje toplote kroz tijelo iz oblasti sa većom u oblast sa manjom temperaturom
	⇐	Toplotna radijacija	Toplotna energija u IC zračenje	Optička radijacija prilikom povećanja temperature objekta
	⇐	Zebekov efekat	Temperatura u elektricitet	Generiranje elektromotorne sile u kolu sa dva metala pri čemu su temperature spojeva različite
	⇐	Fotootporni efekat	Svjetlost u električni otpor	Promjena električnog otpora osvijetljenog poluprovodnika
	⇐	Zemanov efekat	Svjetlost u magnetizam ili spektar	Prelamanje spektralnih linija pri prolasku kroz magnetno polje
	⇐	Ramonov efekat	Svjetlost u svjetlost	Nastajanje zračenja svjetlosti
	⇐	Pokelsov efekat (elektrootpornički)	Svjetlost i elektricitet u svjetlost	Prelamanje svjetlosnog zraka pri prolasku kroz piezokristal kojem je doveden napon na površine okomite na pravac kretanja svjetlosti
	⇐	Icerov efekat (elektrootpornički)	Svjetlost i magnetizam u svjetlost	Prelamanje svjetlosti u izotropnim tečnostima koje se nalaze u jakom magnetnom polju i postaju anizotropne
	⇐	Koton-Mutonov efekat (magnetoopornički)	Svjetlost i magnetizam u svjetlost	Prelamanje svjetlosti u izotropnim tečnostima u jakom magnetnom polju
	⇐	Faradejev efekat (magnetoopornički)	Svjetlost i magnetizam u svjetlost	Zakretanje ravni polarizacije linearno polarizovane svjetlosti kada prolazi kroz paramagnetni materijal
⇐	Holov efekat	Magnetizam i elektricitet u elektricitet	Nastaje razilka potencijala na površini poluprovodnika kada teče struja, nastaje magnetno polje okomito na pravac struje	

Slika 4.3. Principi rada senzora

Elektrodinamički senzori

Princip rada elektrodinamičkog senzora zasniva se na elektrodinamičkoj indukciji. U provodniku koji se kreće određenom brzinom v i presijeca silnice stalnog magnetnog polja indukuje se napon:

$$U = NIBv$$

gdje su:

N-broj zavoja

l-dužina jednog navoja

B-magnetna indukcija

v -brzina kretanja kalema

Kako je promjena napona proporcionalna prvom izvodu pomjeranja tj. brzini ova grupa senzora se koristi za detekciju brzine. Kada pokretni dio senzora miruje izlaz je jednak nuli.

Brzina kretanja kalema može biti linearna $\left(v = \frac{dx}{dt}\right)$ ili ugaona $\left(\omega = \frac{d\Theta}{dt}\right)$.

Ako je brzina kretanja kalema linearna pomoću njega se može mjeriti put $s = \int v dt$ i ubrzanje

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Ako je brzina kretanja kalema ugaona onda se pomoću nje može odrediti broj obrtaja $n = \frac{\omega}{2\pi}$ i ugaono ubrzanje $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$. Kalem umjesto pravolinijskog kretanja vrši rotaciju između polova magneta. Indukovana elektromotorna sila je u tom slučaju:

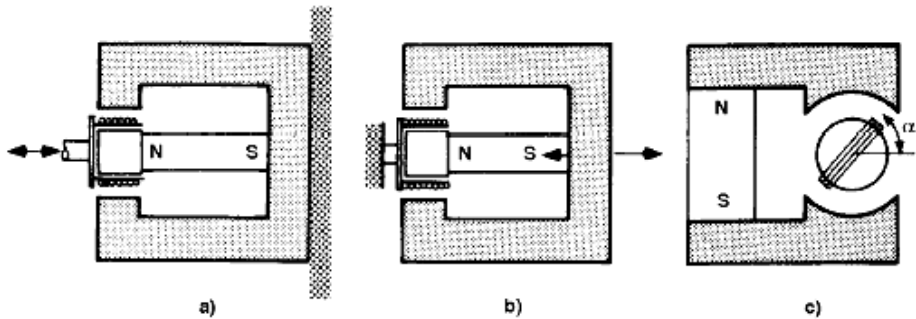
$$e = -Blr \frac{d\varphi}{dt} \text{ gdje je:}$$

r-poluprečnik kalema

φ -ugao zakretanja

Napon indukovan na ovaj način direktno zavisi od brzine okretanja motora.

Indukcioni senzori su u suštini generatori. Zato što su izvanredni detektori vibracija primjenjuju se u alarmnim sistemima.



Slika 4.4. Indukcioni senzori: a) sa pokretnim kalemom, b) sa pokretnim magnetom, c) za detekciju ugaone brzine

Elektromagnetni senzori

Rad ovih senzora zasnovan je na indukciji. Pri promjeni magnetnog fluksa na krajevima kalema se indukuje napon. Promjena magnetnog fluksa nastaje pomjeranjem metalne pločice u onosu na magnet. Napon koji se indukuje na krajevima kalema dat je izrazom:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} \dot{x}$$

gdje je:

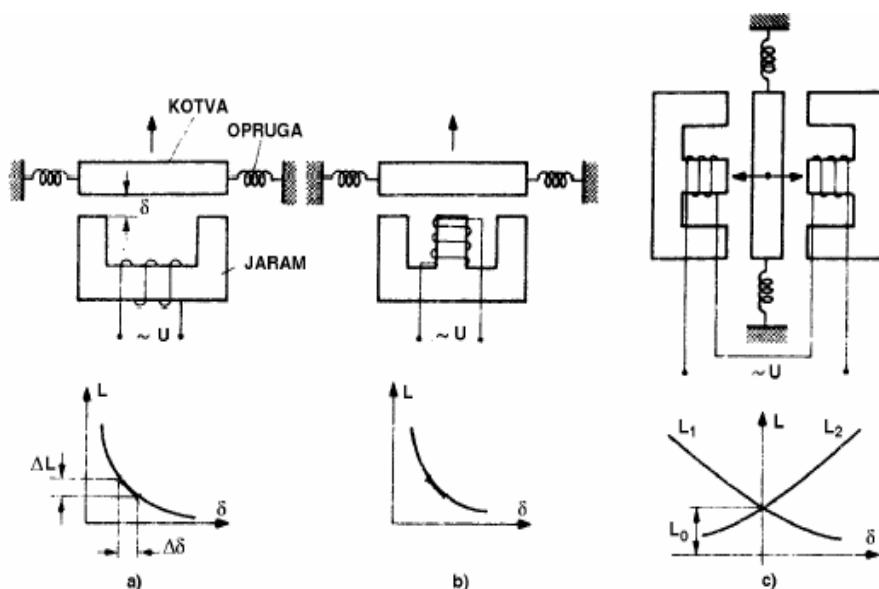
n-broj navoja

Φ - fluks

\dot{x} - brzina pokretne pločice

Elektromagnetni senzori rade na bezkontaktnom principu. Induktivnost se mijenja u zavisnosti od promjene vazdušnog zazora između jezgra (jarma) i pokretnog dijela od feromagnetika (kotve). Prosti induktivni senzor ima jaram u obliku slova U ili E. Kada se kotva približi jarmu, zazor se smanji a induktivnost raste. Prednost ovakvih mjerenja je što masa senzora i opreme ne utiče na rezultate mjerenja. Osjetljivost senzora zavisi od udaljenosti pokretnog elementa.

Indukcioni senzori se primijenjuju u uljnoj hidraulici za mjerenje ugaonih brzina, a posebno elektrodinamički indukcioni pretvarači (tahogeneratori).



Slika 4.5. Induktivni senzori s promjenom zazora i njihove statičke karakteristike: a) prosti induktivni senzor sa U-presjekom, b) prosti induktivni senzor sa E-presjekom, c) diferencijalni induktivni senzor

4.4.2. Piezoelektrični senzori

Za rad piezoelektričnih senzora iskorišten je princip piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekat otkrili su braća Kiri. Oni su primijetili da izvjesni dielektrični materijal monokristalne strukture kada se mehanički napreže razvija električni potencijal.

Ako se na materijal koji ima ove osobine djeluje silom F kristalna rešetka će se deformisati. Uslijed deformacije rešetke javiće se piezoelektricitet., čiji napon se mjeri na elektrodama postavljenim na površine kristala. Količina elektriciteta zavisi od sile kojom se rešetka deformiše:

$$Q = dF$$

gdje je:

F-sila deformisanja

d-konstanta kristala

Napon između elektroda određen je izrazom:

$$U = \frac{Q}{C}$$

gdje je:

Q-količina elektriciteta

C-kapacitivnost

Kako je $p = \frac{F}{A}$ tada je $Q = dpA$. Kapacitivnost je dana izrazom:

$$C = \varepsilon \frac{A}{l}$$

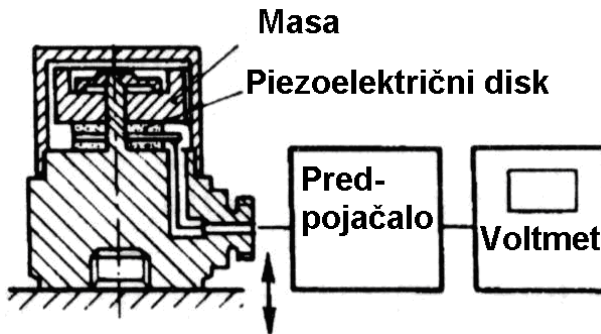
gdje je ε linearna dilatacija. Tada je:

$$U = \frac{dpA}{\varepsilon \frac{A}{l}} = \frac{dpl}{\varepsilon}$$

Ako se uvede oznaka $g = \frac{d}{\varepsilon}$ tada je napon između elektroda:

$$U = gpl$$

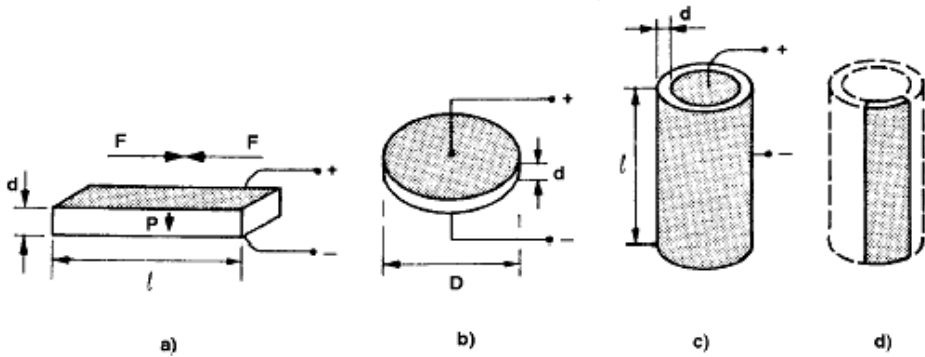
Vrijednosti g i d su karakteristike kristala. Najpoznatiji prirodni piezomaterijal je kvarc. Piezoelektrični senzori se koriste za mjerenje mehaničkih vibracija i zovu se piezoelektrični akcelerometri.



Slika 4.6 Piezoelektrični akcelerometar

Prosti piezoelektrični senzor

Prosti piezoelektrični senzori se grade u obliku: prizme, diska, cilindra ili dijela cilindra.



Slika 4.7. Prosti piezoelektrični senzori:
a) traka, b) disk, c) cilindar, d) uzdužni segment cilindra

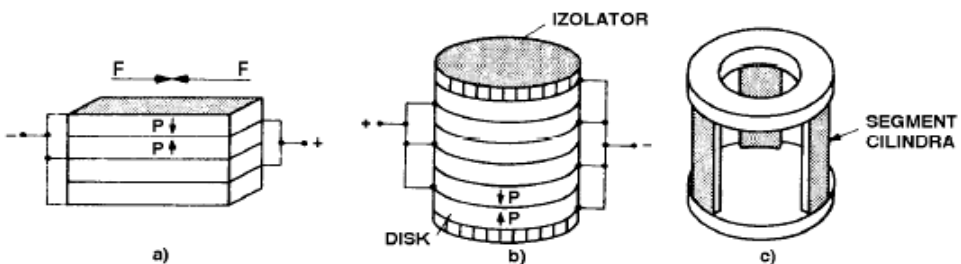
Izlazni napon je pozitivan kada je prizma podvrgnuta sabijanju. Najveća osjetljivost je kada je maksimalan odnos l/d tj. kada je piezoelektrik u obliku trake. Traka, naime, ima malu čvrstinu pa se lako lomi pod uzdužnim opterećenjem.

Oblik diska je povoljniji u pogledu čvrstine. Površine diska se posrebruju kako bi kontakt između piezoelektrika i priključnih vodova bio što bolji.

Najbolju čvrstinu ima senzor u obliku cilindra, ali ga je tehnološki najteže proizvesti. Potrebno je da poprečni presjek što manje odstupa od kružnog prstena i da debljina prstena bude jednaka po cijelom obimu.

Uzdužni segment cilindra ima sva dobra svojstva cilindra i zbog zakrivljenosti je čvršći od trake.

Nedostaci prostih piezoelektričnih senzora su mali izlazni napon i slaba mehanička čvrstina pa se grade višestruki ili složeni senzori (paralelno-serijsko spajanje više prostih piezoelektričnih senzora slika 4.8).



Slika 4.8. Višestruki piezoelektrični senzori:
a) lamelni, b) diskoidni, c) trosegmentni

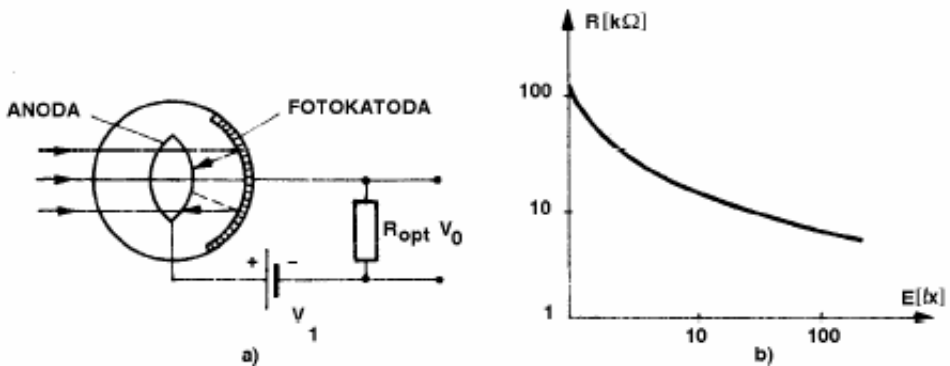
4.4.3. Fotoelektrični senzori

Osnov rada ovih senzora zasniva se na promjeni parametara optičkog signala sa promjenom mjerene fizikalne veličine tj. prvenstveno se bazira na fizičkoj pojavi fotoelektričnog efekta. Fotoelektrični efekat može biti unutrašnji i vanjski.

Vanjski fotoelektrični efekat karakteriše se time što djelovanjem svjetlosti na neke provodnike ili poluprovodnike dolazi do emitovanja elektrona. Fotokatoda ovih senzora prekrivena je slojem fotoemisionog materijala, čiji elektroni imaju mali izlazni rad. Kada se fotokatoda osvijetli monohromatskom svjetlošću talasne dužine $\lambda = \frac{c}{\nu}$ apsorbovani foton predaje elektronu dovoljno energije da savlada energetska barijeru i sasvim napusti materijal.

Pomoću vanjskog izvora fotoelektroni se dalje ubrzavaju između anode i katode i sakupljaju na anodi. Regstrujuća fotostruja registruje se direktno ili kao pad napona na opteretnom otporu. Fotoni svjetlosti manje talasne dužine imaju veću energiju pa je pojava fotoemisije vjerovatnija. Zato se fotoelektrode prave od fotoemisionih materijala osjetljivih na vidljivu ili infracrvenu svjetlost.

Ukoliko se pod djelovanjem svjetlosti na odgovarajuće materijale oslobađaju elektroni u unutrašnjosti materijala, onda je to unutrašnji fotoelektrični efekat. Efekat se sastoji u promjeni električnog otpora materijala na koji pada svjetlost. Nedostatak im je relativno velika vremenska konstanta $T > 50\text{ms}$.



Slika 4.9. Princip rada optičkog senzora: a) sa fotoelektronskom emisijom, b) sa efektom fotoprovodnosti

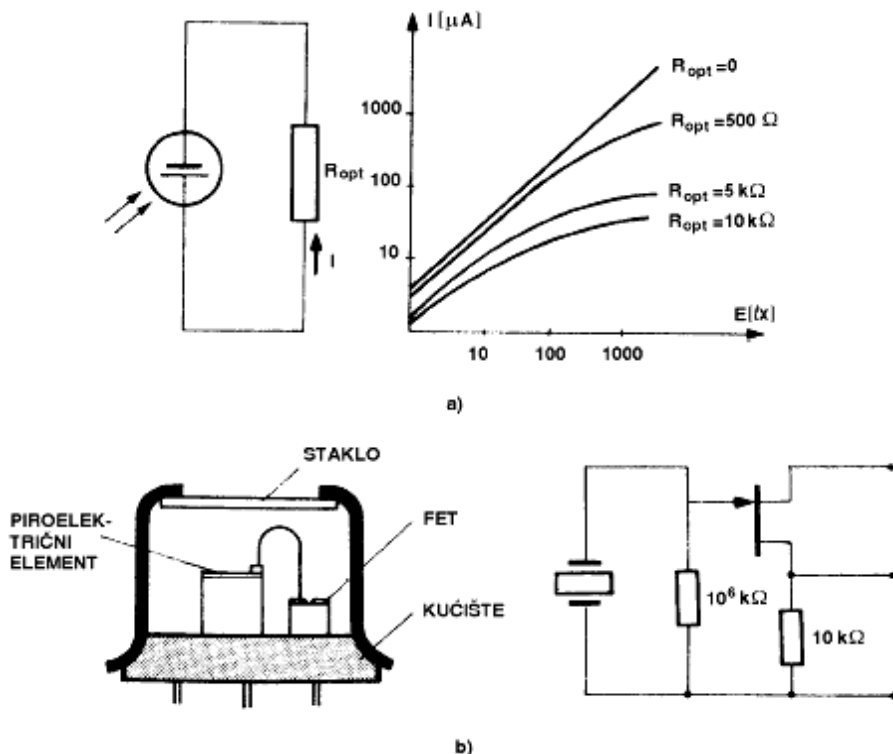
Fotoelementi

Pretvaranje svjetlosne energije u električnu na principu fotoelektričnog efekta vrše pretvarači u zoni između poluprovodnika i metalne podloge na koju je nanesen fotemisioni sloj.

To su aktivni senzori, jer se pod uticajem svjetlosti unutar p-n prijelaza javljaju slobodni elektroni i šupljine pa se generira ems. Pri tome se p-sloj ponaša kao anoda a n-sloj kao katoda.

Tipičan fotonaponski element je solarna ćelija. Kada se fotonaponski element inverzno polariše pomoću vanjskog naponskog izvora, inverzna struja zasićenja postaje direktno proporcionalna jačini svjetlosti. Inverzna polarizacija ima veliku brzinu odziva. Predstavnici senzora koji rade na ovom principu su fotodiode i fototranzistori.

Primjenjuju se u automatskoj regulaciji tehnoloških procesa, robotici, avioindustriji, vojnoj tehnici, medicini, itd.



Slika 4.10. Optički senzor: a) sa fotonaponskim efektom i tipičnom karakteristikom, b) sa piroelektričnim efektom i ekvivalentnom šemom

4.4.4. Termoelektrični senzori

Mjerenje temperature zasniva se na termoelektričnom efektu. Princip je sljedeći: spoje se dvije žice, slika 4.11 napravljene od različitih materijala koji su elektroprovodnici. Jedan čvor npr. čvor (2) se grije na temperaturu T_2 , a drugi je na temperaturi T_1 .

Kada su krajevi provodnika na različitim temperaturama $T_2 > T_1$ između njih nastaje toplotni tok od toplijeg prema hladnijem kraju. Prijenos toplote je, prema tumačenju kvantne teorije, usko povezan sa kretanjem slobodnih elektrona. Njihova koncentracija i pripadni potencijal neravnomjerno su raspoređeni duž provodnika, pa se javlja struja:

$$I_e = -K_e \frac{dU}{dx}$$

Istovremeno se javlja i struja zbog temperaturnog gradijenta:

$$I_\tau = -K_\tau \frac{dT}{dx}$$

K_e i K_τ označavaju proporcionalnost struja I_e i I_τ sa gradijentom potencijala, odnosno gradijentom temperature.

Znak minus upućuje na negativan prirast potencijala i temperature sa pozitivnim prirastom rastojanja duž provodnika. Kako nije zatvoreno niakvo vanjsko električno kolo, ukupna struja kroz provodnik je nula tj. $I_e + I_\tau = 0$ pa je:

$$dU = -\left(\frac{K_\tau}{K_e}\right)dT$$

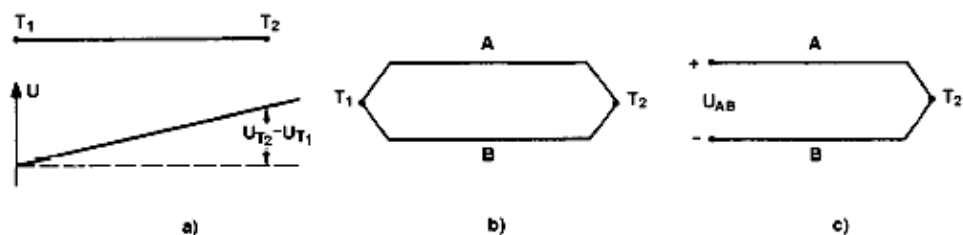
Napon koji nastaje kao rezultat temperaturne razlike $T_2 - T_1$ između krajeva posmatranog provodnika naziva se termoelektrični napon, a njegova vrijednost se dobija integracijom jednačine:

$$U_{T_2} - U_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} K dT$$

Koeficijent $K = -\left(\frac{K_\tau}{K_e}\right)$ zavisi od svojstava materijala od kojeg je izrađen provodnik i temperature.

Za male promjene temperature može se smatrati da je:

$$U_{T_2} - U_{T_1} = K(T_2 - T_1)$$



Slika 4.11. Termoelektrični efekt: a) otvoreno termoelektrično kolo, b) zatvoreno termoelektrično kolo sa dva provodnika, c) otvoreno termoelektrično kolo sa dva provodnika

Termoelement ili termopar je uobičajeni naziv za termoelektrično kolo sastavljeno od dva provodnika napravljena od različitih materijala.

Pri mjerenju temperature javlja se toplotna inercija. To je vrijeme potrebno da termoelement pri prenošenju sa sobne temperature $(15 \div 20)^\circ\text{C}$ na temperaturu 100°C dostigne $(97 \div 98)^\circ\text{C}$. Početna, odnosno konstantna temperatura T_0 ostvaruje se tako što se spoj stavlja u prostor konstantne temperature. Veza između posude i termoelementa mora biti takva da se ne unosi greška sistemom mjerenja. Ako se mjerenje vrši na većoj udaljenosti uvode se tzv. "kompenzacione" veličine, a vodiči moraju biti od materijala istih termoelektričnih svojstava kao i radni čvor termoelementa.

4.4.5. Induktivni senzori

Ova grupa elektromagnetnih senzora radi na principu promjene magnetnog otpora. Promjena magnetnog otpora može se ostvariti promjenom:

- ukupne dužine zavojnice,
- zračnog zazora,
- permeabilnosti materijala jezgra,
- međusobnim djelovanjem dva ili više elemenata,
- promjenom međusobnog položaja kalema i jezgra,
- promjenom položaja dvije zavojnice.

Najčešće se koriste senzori kod kojih se promjena magnetnog otpora ostvaruje promjenom veličine zračnog zazora ili promjenom magnetne permeabilnosti tj. propustljivosti željeznog jezgra μ .

Induktivnost senzora, koji sadrži namotaj i feromagnetno jezgro, određuje se izrazom:

$$L = \frac{n^2}{Z_m}$$

gdje su:

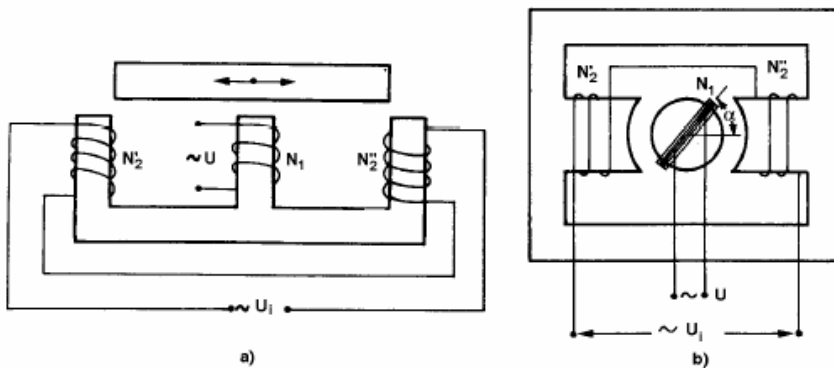
n -broj navoja kalema

Z_m -magnetni otpor jezgra i zazora.

Kod senzora sa promjenljivim zračnim zazorom pomjeranjem kotve pod djelovanjem mjerene veličine dolazi do promjene induktivnosti. Ovi senzori imaju po dva navoja magnetno povezana. Zahvaljujući tome, između izvora napajanja i izlaza postoji transformatorska veza, pa se ovi senzori nazivaju i transformatorski. Pogodni su za mjerenja malih mehaničkih pomjeranja.

U ovu grupu spada i diferencijalni transformatorski senzor (slika 4.12). Na primarni namotaj N_1 , koji je ravnomjerno raspoređen po cijeloj dužini senzora, priključen je naizmjenični napon napajanja U . Sekundar je podijeljen na dva navoja N_2' i N_2'' koji su suprotno namotani i vezani u seriju. Proporcionalno položaju pomičnog jezgra na njima se indukuje napon U_2' i U_2'' odnosno ukupni napon $U_i = U_2' - U_2''$. Prilikom prolaska kroz središnji položaj $U_i = 0$, izlazni signal mijenja znak, što odgovara promjeni faze za 180° . Pomjeranjem namotaja ili jezgra remeti se magnetna simetrija i javlja se izlazni signal.

Izvedba diferencijalnog međuinduktivnog (transformatorskog) senzora omogućava proširenje mjernog opsega i bolju linearnost.



Slika 4.12. Transformatorski induktivni senzor:

a) sa linearnim pomjeranjem kotve, b) sa ugaonim zakretanjem primara

4.4.6. Kapacitivni senzori

Dvije metalne ploče između kojih se nalazi dielektrični (izolacioni) materijal grade kondenzator (slika 4.13.a) kapaciteta:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

gdje su:

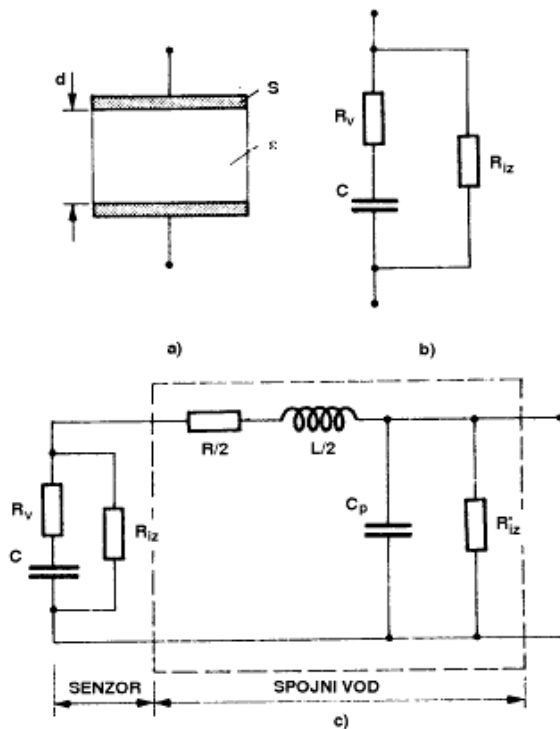
S-površina ploče

d-rastojanje između ploča

ε_r -relativna dielektrična konstanta

ε_0 -dielektrična konstanta vakuuma

Ukoliko se na S, d ili ε utiče nekom nelinearnom veličinom, tada kapacitet C zavisi od te veličine pa se na taj način dobija kapacitivni senzor., tj, rad kapacitivnih senzora se temelji na promjeni kapaciteta kondenzatora koji se mijenja pod uticajem mjerene nelinearne veličine.



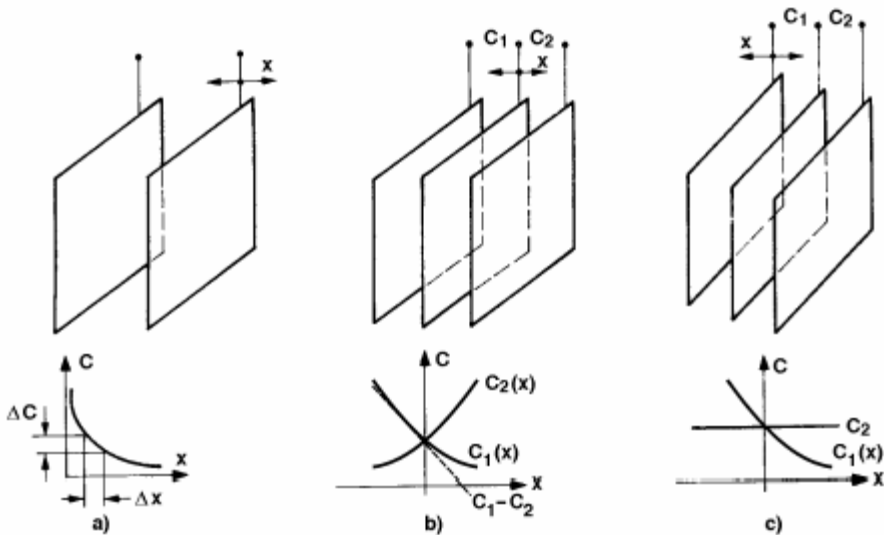
Slika 4.13. Kapacitivni senzor: a) opšti prikaz, b) ekvivalentna šema, c) ekvivalentna šema kapacitivnog senzora sa priključnim vodovima

Postoje razne konstrukcije senzora zavisno da li se utiče sa S , d ili ε . Vrste kapacitivnih senzora su:

1. Senzori sa promjenljivim rastojanjem kondenzatorskih ploča
2. Diferencijalni pretvarač
3. Pretvarači sa obrtnom elektrodom
4. Pretvarač sa ugaonim preklapanjem
5. Pretvarač sa promjenom dielektrikuma

Senzori sa promjenljivim rastojanjem kondenzatorskih ploča

Ovaj tip senzora se sastoji od dvije kondenzatorske ploče čiji se kapacitet mijenja ako jedna od ploča mijenja rastojanje u odnosu na drugu prilikom paralelnog pomjeranja.



Slika 4.14. Kapacitivni senzori sa promjenljivim zazorom:
a) prosti, b) diferencijalni, c) poludiferencijalni

Princip rada senzora zasniva se na promjeni kapacitivnosti. Ako je početna vrijednost kapaciteta C_0 kada su ploče na rastojanju a_0 tada je:

$$C_0 = \varepsilon \frac{S}{a_0}$$

Nakon pomjeranja jedne ploče za Δa kapacitet je:

$$C = \varepsilon \frac{S}{a_0 - \Delta a}$$

Promjena kapaciteta je:

$$\Delta C = C - C_0 = \varepsilon \cdot S \left(\frac{1}{a_0 - \Delta a} - \frac{1}{a_0} \right)$$

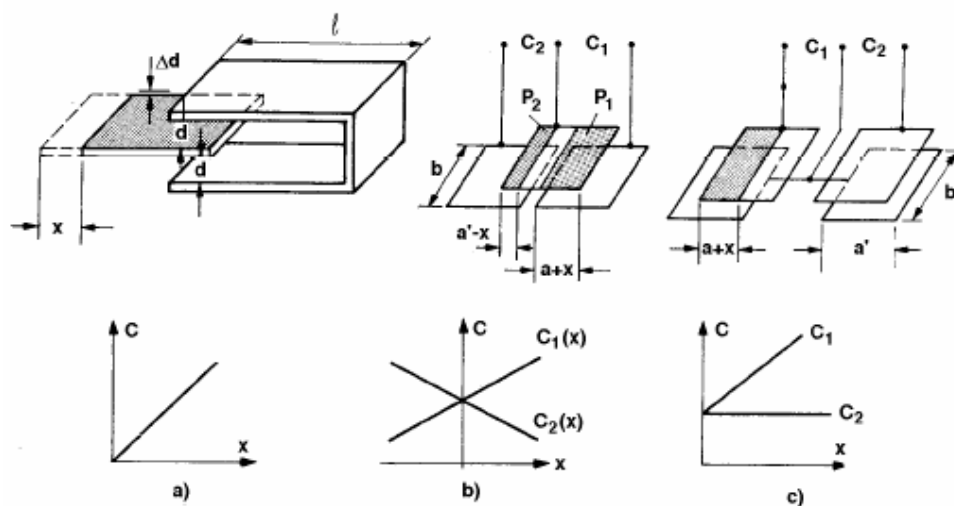
a relativna promjena kapaciteta:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\frac{\Delta a}{a_0}}{1 - \frac{\Delta a}{a_0}}$$

Ovi senzori imaju veliku osjetljivost na promjenu razmaka između ploča Δd .

Njihova osjetljivost $\frac{\Delta C}{\Delta d}$ je negativna, što znači da s porastom pomaka kapacitet senzora opada i obratno.

Koriste se za praćenje fizikalnih veličina koje se manifestuju kao mali pomaci reda milimetra, mikrometra pa i manje.



Slika 4.15. Izvedbe pločastih kapacitivnih senzora i njihove statičke karakteristike: a) poboljšana varijanta, b) diferencijalni, c) poludiferencijalni

Na slici 4.15.b prikazan je kapacitivni senzor sa promjenljivom površinom preklapanja ploča. Sastoji se od dvije fiksne i jedne pokretne ploče. Relativnim pomjeranjem ploče u pravcu x veličina površine preklapanja se

mijenja. Ovakav senzor ima dva radna kondenzatora. Prilikom pomjeranja pokretne ploče kapacitet jednog kondenzatora se povećava, a drugog smanjuje.

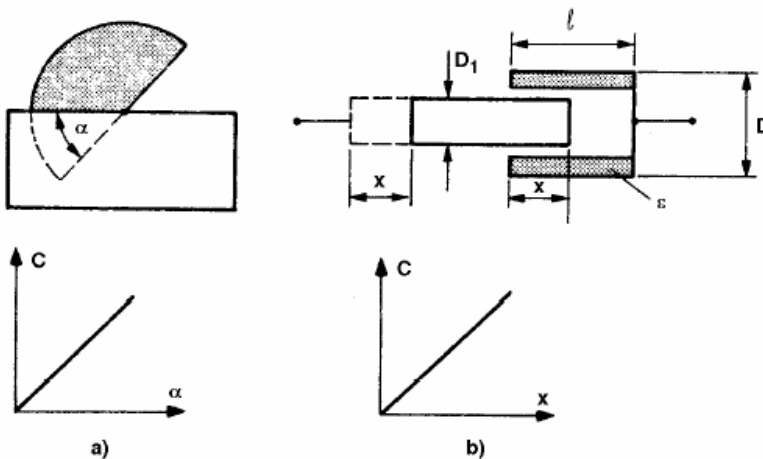
Kapacitivni senzor sa ugaonim preklapanjem

Površine preklapanja mogu se ostvariti i rotacionim preklapanjem dviju pločica. Ploče kod kapacitivnog senzora mogu biti izvedene kao kod ugaonog kondenzatora. Statorska ploča je fiksna a rotorska se zakreće za ugao α , slika 4.16. Ako je aktivna površina ploča kondenzatora kružnog oblika promjena kapaciteta je dana izrazom:

$$C = C_0 + k\alpha$$

gdje je: C_0 - početna vrijednost kapaciteta.

Ovi senzori izgrađeni su tako da je zakretni moment rotorske ploče veoma mali, reda 0,1Nm.



Slika 4.16. Izvedbe kapacitivnih senzora: a) ugaoni, b) cilindrični

Kapacitivni senzori sa promjenom dielektrika

Najčešće se koristi za mjerenje pomjeranja. Princip rada se sastoji u kretanju čvrstog dielektrika između kondenzatorskih ploča dužine l i širine b . Promjena kapaciteta dana je izrazom:

$$C = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) b \frac{l}{a}$$

gdje je:

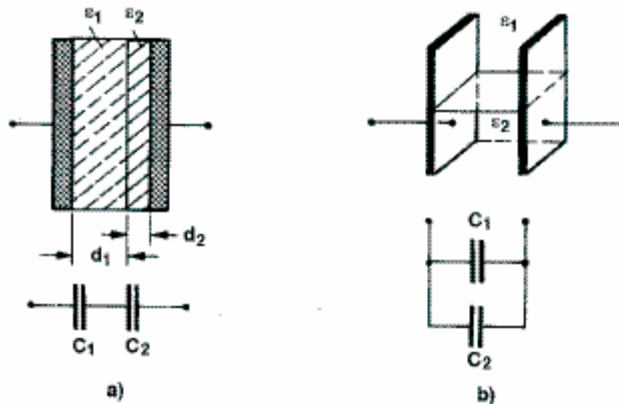
ϵ_0 -dielektrična konstanta

ϵ_r -relativna dielektrična konstanta

s- mjereno pomjeranje

b-širina ploče

a- razmak između ploča



Slika 4.17. Pločasti kapacitivni senzor sa promjenljivim dielektrikom:
a) dielektrik sa paralelnim elektrodama, d) dielektrik okomit na elektrode

Kapacitet linearno zavisi od dielektrične konstante izolatora. Bitan uslov je da materijal između elektroda kondenzatora ne smije provoditi električnu struju.

4.4.7. Otpornički senzori

U grupu otporničkih mjernih pretvarača spadaju mjerne trake koje se koriste za mjerenje deformacija. Mjerne trake su jedan od najčešćih korištenih mjernih pretvarača. Mjerna traka je kao otpornički pretvarač jeftina, neznatne je krutosti male dužine. Može se koristiti za mjerenja statički i dinamički opterećenih konstrukcija.

Opis mjerne trake

Mjerna traka se sastoji od žice savijene nekoliko puta a zatim zalijepljene posebnim ljepilom na njen noseći element koji može biti napravljen od papira, sintetičke mase, metalne folije i slično. Savijena žica se preko nosećeg elementa lijepi na konstrukciju koja je izložena djelovanju opterećenja usljed čega se deformiše.

Dio mjerne trake na koji je postavljena mjerna mrežica zove se noseći element. Materijal nosećeg elementa mora biti takav da prenosi deformacije sa konstrukcije na traku. Žica mjerne trake može biti različito uvijena i postavljena na noseći element.

Mjerne trake mogu biti izrđene u obliku rozete. Rozete se koriste za mjerenje lokalnih dilatacija u više pravaca. Mjerne trake se još koriste i kao pretvarači za mjerenje sile, pritiska, obrtnog momenta, ubrzanja i sl.

Veličina mjerne trake nije određena i zavisi od namjene. Najčešće su u upotrebi mjerne trake dužine (0,5÷50) mm i širine (1÷15) mm, a električni otpor se kreće od 50 do 1000Nm.

Oblik mjerne trake zavisi od funkcije koju traka treba da ima.

Električni otpor provodnika može se definisati izrazom:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

gdje je:

ρ -specifični otpor

l -dužina provodnika

S -poprečni presjek provodnika

Usljed djelovanja sile pritiska ili istezanja na žicu, nastaju male promjene dužine l , poprečnog presjeka S i specifičnog otpora ρ . Pošto je zapremina žice mjerne trake $V=Sl$ otpor žice kroz koju prolazi struja je:

$$R = \rho \frac{l^2}{V}$$

Diferenciranjem gornjeg izraza i dijeljenjem sa prethodnim dobija se:

$$\frac{dR}{R} = [2 + (1 - 2\mu)(B - 1)] \frac{dl}{l}$$

$$\frac{dR}{R} = k \frac{dl}{l}$$

gdje je:

$k = 2 + (1 - 2\mu)(B - 1)$ -koeficijent osjetljivosti mjerne trake

$B = \frac{dR/R}{dl/l}$ -Bridgemanova konstanta

Koeficijent osjetljivosti k definira se kao jednačina promjene otpora poluprovodnika podijeljena sa relativnom deformacijom koja je izazvala tu promjenu:

$$k = \frac{dR/R}{dl/l}$$

Koeficijent osjetljivosti zavisi od dva faktora i to od promjene dimenzija provodnika u obliku $(1+2\mu)$ i od promjene specifičnog otpora datog Bridgemanovom konstantom B . Konstanta zavisno od vrste materijala trake može biti pozitivna, jednaka nuli ili negativna.

Koeficijent osjetljivosti ima vrijednosti od -12 do $+4$ za većinu materijala, a najčešće se koriste sa $k=2$. Ova vrijednost koeficijenta osjetljivosti se dobije za $B=0$ i $\mu=0,5$.

Uticaj temperature

Uticaj temperature na mjernu traku se ogleda u promjeni otpora žice mjerne trake i razlici deformacija materijala mjerne trake i materijala konstrukcije na koju je mjerna traka zalijepljena. Promjena otpora usljed promjene temperature dana je izrazima:

$$\frac{dR}{R} = t_{\theta} dt$$

$$t_{\theta} = f(t_R, t_Z, t_k)$$

gdje su:

t_{θ} -toplotni koeficijent mjerne trake

t_R -toplotni koeficijent promjene otpora žice

t_Z -koeficijent linearnog izduženja materijala žice usljed promjene temperature

t_k -koeficijent linearnog izduženja usljed promjene temperature materijala

dt -promjena temperature

Veza između promjene otpora i toplotnog koeficijenta promjene otpora žice može se dobiti na osnovu izraza:

$$\frac{dl}{l} = t_Z dt$$

i Bridgemanove kostante:

$$\frac{d\rho}{\rho} = B \frac{dV}{V} = 3t_z B dt$$

pa je:

$$\frac{dR}{R} = (3B - 1)t_z dt = t_R dt$$

Toplotni koeficijent usljed razlike linearnih deformacija materijala žice i konstrukcije može se naći iz relacija:

$$l_k = l_{k0}(1 + t_k dt) \text{ i}$$

$$l_z = l_{z0}(1 + t_z dt)$$

Dužine l_{k0} i l_{z0} su dužine konstrukcije trake pri $t=t_0$ odnosno temperature lijepljenja trake kada je baza $l_{k0}=l_{z0}=l_0$. Usljed promjene temperature sa vrijednosti t_0 na t_1 promijenit će se različito dužina trake i konstrukcije:

$$dl = l_k - l_z = l_0(t_k - t_z)dt$$

Relativna promjena otpora usljed izduženja:

$$\frac{dR}{R} = k \frac{dl}{l} = k(t_k - t_z)dt$$

Ako se uzme u obzir poprečna i uzdužna osjetljivost (k_x i k_y) tada je:

$$\frac{dR}{R} = (k_x + k_y)(t_k - t_z)dt$$

Toplotni koeficijent trake može se napisati u obliku:

$$t_\theta = t_z(3B - 1) + (k_x + k_y)(t_k - t_z)$$

pa je promjena otpora mjerne trake usljed temperature:

$$\frac{dR}{R} = [t_z(3B - 1) + (k_x + k_y)(t_k - t_z)]dt$$

Karakteristike i materijal mjerne trake

Zahtjevi koje mjerna traka mora da ispuni:

- promjena električnog otpora po jedinici dužine mora biti relativno velika i veliki koeficijent osjetljivosti;

- veliki specifični otpor kako bi se relativno malom dužinom žice dobio pretvarač velike otpornosti;
- dužina žice u odnosu na poprečni presjek treba da bude što veća kako bi sila po jedinici površine poprečnog presjeka bila što manja. Ovaj zahtjev se može ispuniti i sa žicom čiji prečnik ne prelazi 0,025 mm;
- temperaturni koeficijent žice treba da bude što manji, kako bi se što lakše izbjegli uticaji promjene okolne temperature na otpornost pretvarača, pa se problem prevazilazi korištenjem kompenzacionih traka:
- izvodi mjerne trake treba da se lako leme sa bakrom i da spoju daju minimalnu termoelektromotornu silu;
- mjerna traka treba da bude jednako osjetljiva pri mjerenju naprezanja u obadva smjera;
- mjerna traka treba da ima što manji histerezis.

Ljepila i uslovi rada mjernih traka

Za konstrukciju čije se dilatacije mjere, mjerna traka se pričvršćuje pomoću ljepila. Od kvaliteta i osobina ljepila zavisi ispravno prenošenje dilatacija sa konstrukcije na mjernu traku. Zato ljepila moraju ispunjavati sjedeće uslove:

- osigurati dobro prijanjanje između konstrukcije i nosećeg elementa trake;
- ne smiju imati osobine puzanja što bi dovelo do histerezisa;
- trebaju biti otporna prema uticaju vlage;
- između ljepila i žice mjerne trake ne smije doći do hemijske reakcije.

Ljepila se prave na bazi sintetičkih smola ili na bazi celuloze.

Kvalitet mjerenja zavisi od postupka ljepljenja trake na konstrukciju koja se ispituje. Mjerno mjesto na konstrukciji, na koje će se lijepiti traka predhodno se treba dobro izbrusiti tako da površina bude glatka i sjajna. Zatim se ta površina očisti hemijskim sredstvom od mehaničkih nečistoća i masnoća. Mjerna traka se zalijepi na mjerno mjesto na kom su tačno određeni pravci (uzdužni i poprečni). Traka se pritisne sve dok se ljepilo ne osuši. Nakon toga se zaleme izvodi trake sa izvodima kablova kojima se mjerno mjesto povezuje sa uređajem. Zaštitni kit se stavlja preko mjerne trake u slučaju kada se mjerenja izvode u vlažnoj ili zaprljanoj sredini.

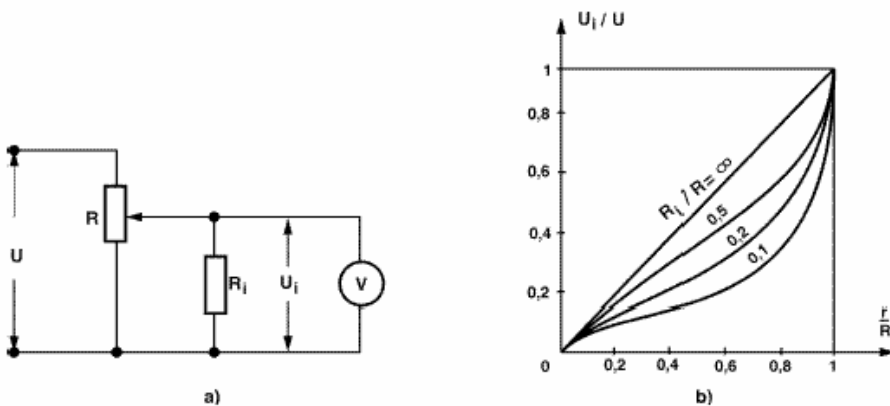
4.4.8. Ostali otpornički senzori za mjerenje mehaničkih i procesnih veličina

Ostali otpornički senzori za mjerenje mehaničkih i procesnih veličina su:

- potenciometar
- otpornički termometar
- termistor
- pretvarač sa toplom žicom

Potenciometarski senzor

Njihov rad se temelji na promjeni otpora usljed promjene kliznog kontakta. Omski otpor se mijenja sa promjenom dužine provodnika. Nedostatak ove vrste senzora je kontaktna tačka između klizača i otporničke žice.



Slika 4.18. Detekcija promjene otpora potencioematskog senzora: a) mjerna šema, b) statička karakteristika

Primijenjuju se za mjerenje otpora senzora na bliskim rastojanjima. Senzor u ovom slučaju ima oblik potenciometra tj. otpornika sa klizačem i pogodan je za mjerenje mehaničkih veličina.

Veza između veličina potencioematskog pretvarača sa namotanom otporničkom žicom date su izrazima:

$$R_s = \frac{S}{S_{\max}} R_0$$

$$U_s = \frac{S}{S_{\max}} U_0$$

gdje su:

S_{\max} -najveći mogući put

R_0 -ukupni otpor

U_0 -ulazni napon

Otpornički termometri

Rad ove vrste pretvarača bazira se na činjenici da se električni otpor čistih metala i legura povećava sa povećanjem temperature. Takvi materijali imaju pozitivan temperaturni koeficijent.

Veza između otpora i temperature je linearna i može se pokazati izrazom:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)] = R_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

gdje su:

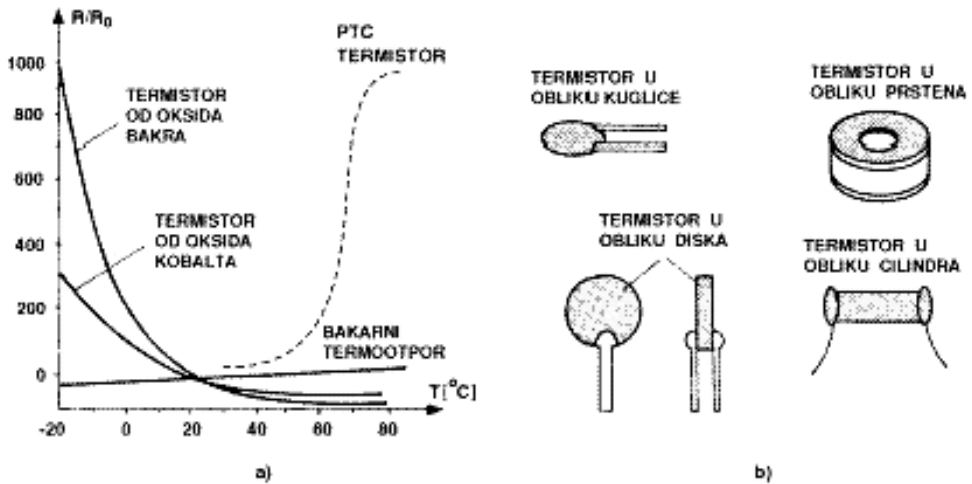
R_1 i R_2 otpori na temperaturama T_1 i T_2 .

Najčešće korišten otpornički termometar je od čiste platine jer se može koristiti u temperaturnom području od $-182,7^\circ\text{C}$ do $630,5^\circ\text{C}$.

Termootpornički senzor je pasivan i kroz njega mora prolaziti neka struja da bi se dobio napon koji se može mjeriti. Međutim, prolaskom struje kroz termootpornik nastaje Džulova toplota koja ga dodatno zagrijava. Ovaj najveći nedostatak termootporničkih senzora ispoljava se kod platinastog kao sistemska greška

Termistori

Termistor je osjetljivi otpornik, koji se pravi od čistog germanijuma, oksida metala hroma, kobalta, željeza, nikla i drugih. Termistori imaju otpore većeg iznosa u odnosu na otpore metala za iste temperature. Za većinu termistora otpor opada sa porastom temperature, što znači da je temperaturni koeficijent otpora negativan. Takvi termistori se nazivaju NTC-otpornici (Negative Temperature Coefficient). Temperaturni koeficijent termistora može biti i pozitivan, kao što je kod metala. Tada je riječ o PTC-otpornicima (Positive Temperature Coefficient). Imaju najčešće oblik diska, prstena ili cilindra.



Slika 4.19. Termistor: a) statička karakteristika, b) izgled

Pretvarači sa toplom žicom

Princip rada ovog pretvarača zasniva se na promjeni električnog otpora usljed strujanja fluida, oko tople žice, kroz koju protiče struja. Žica se hladi gasnom strujom, a brzina strujanja gasa se mjeri. Najčešće se koriste za mjerenje protoka fluida pa se zovu anemometri.

4.5. Prijenos i registracija mjerenih veličina

Mjerni lanac se sastoji do nekog pretvarača, zavisno od toga koja se veličina mjeri, uskladnog i registracionog člana. Osnovni zadatak uskladnog člana je pojačavanje slabih i nestabilnih signala koji se dobiju mjerenjem neelektrične veličine. Ove signale treba prilagoditi uređajima za registraciju i obradu podataka.

4.5.1. Prijenos mjernih veličina

Prijenos mjernih veličina od objekta na kojem se vrše mjerenja do registracionog uređaja može se vršiti kada su mjerni objekt i registracioni uređaj praktično jedan uz drugi, ali isto tako i na velike udaljenosti kao što je prijenos podataka sa satelita iz svemira.

U procesu prenosa signala uključene su razne vrste modulacija i filtriranja. Za jedan signal postoji mogućnost direktnog prenosa, mogućnost da se

veličina prije prenosa digitalizuje ili da se nakon digitalizacije grupiše i prenese po grupama. Ovo se može ostvariti bežično ili kablovskim putem.

Analogni signal koji se dobije iz mjernog pretvarača može se prenijeti direktno kao analogni zapis, a može se modulirati i na razne načine. Nakon prijenosa može se demodulirati i registrirati kao analogni ili digitalni podatak. Postoje razne vrste modulacija kao što su frekventna modulacija FM, modulacija dužine impulsa PDM, plus-kodna modulacija PCM, multikomleks prijenos.

Frekventnom modulacijom dobija se kontinuiran signal.

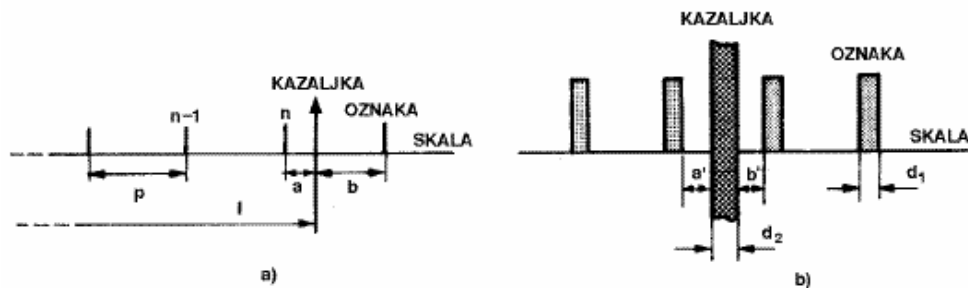
Modulacijom dužine impulsa dobija se signal pravougaonog oblika koji ima konstantnu amplitudu.

Plus-kodna modulacija je digitalni postupak koji se sastoji u tome da se ulazni signal propušta kroz filtere u kojima se odstranjuju visokofrekventne komponente.

4.5.2. Registriranje mjernih veličina

Način pokazivanja rezultata na instrumentu zavisi od tipa instrumenta. Principijelno, razlikuje se pokazivanje rezultata na analognim i digitalnim instrumentima.

Indikacioni i registracioni uređaji, koji se zovu i mjerni instrumenti mogu biti: pokazivači, pisači, osciloskopi, magnetne trake, magnetofoni, digitalni pokazivači.



Slika 4.20. Pokazivanje instrumenta:
a) kazaljka između oznaka, b) stvarno očitavanje

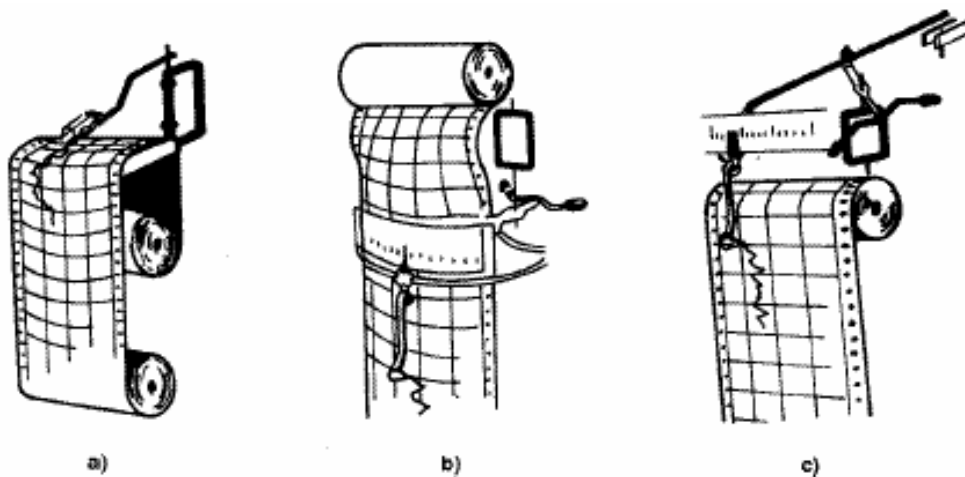
Analogni registracioni uređaji

Analogni instrumenti (slika 4.21 i 4.22), koji se u automatskoj regulaciji primjenjuju u funkciji monitoringa imaju kazaljku čiji položaj odgovara trenutnoj vrijednosti mjerene veličine. Kazaljka može biti: čvrsta, tečna i

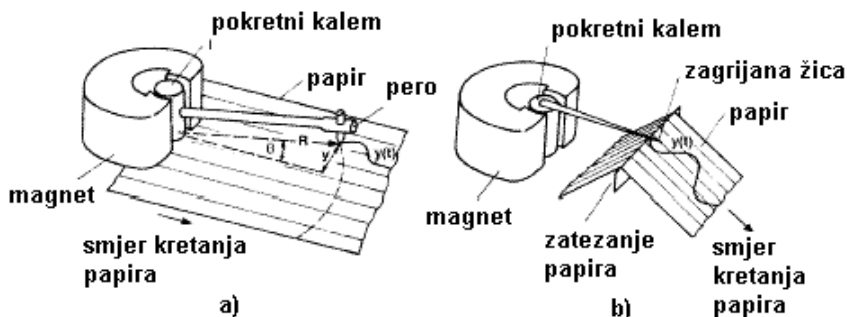
optička. Problem tačnog očitavanja na analognim instrumentima javlja se onda kada je položaj kazaljke između oznaka na skali.

Jedan od načina analognog bilježenja je zapisivanje na traku, dakle direktno registriranje. Kretanje trake vrši se u funkciji vremena.

Analogni registracioni uređaji pogodni su za mjerenje dinamičkih veličina.



Slika 4.21. Realizacija zapisa: a) sa krivolinijskim koordinatama, b) i c) sa pravolinijskim koordinatama



Slika 4.22. Galvanometarski pisač: a) sa krivolinijskim koordinatama, b) i c) sa pravolinijskim koordinatama

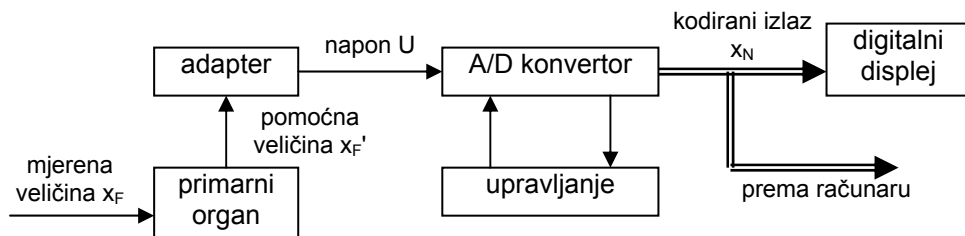
Digitalno memorisanje podataka

Izlazni signali gotovo svih pretvarača su po svom karakteru analogni tj. predstavljaju veličine koje su po svom karakteru analogne veličinama koje se mjere. Za prikazivanje rezultata u digitalnom (cifarskom) obliku treba analogne signale pretvoriti u odgovarajuće digitalne veličine. Ovu funkciju obavlja jedan dio mjerne sprege, analogno-digitalni konvertor. Izlazna

digitalna informacija može se dalje koristiti na različite načine, bilo da se direktno zapisuje na štampaču, ili da se poslije šifriranja zapisuje na perforiranu traku i vodi u računar na obradu.

Digitalna obrada informacija nalazi sve veću primjenu u raznim oblastima nauke i tehnike a naročito u informaciono-mjernoj tehnici. Razlog tome je u brzini djelovanja digitalnih mjernih uređaja, koji se grade na bazi integralnih kola velikog ili srednjeg stepena integracije.

Prednosti u odnosu na analogne mjerne uređaje su: funkcionalnost, efikasnost, ekonomičnost, tačnost i pouzdanost. Imaju i dodatne prednosti koje su uvezi sa prenosom informacija na veća rastojanja.



Slika 4.23. Opšta strukturalna blok-šema digitalnog senzora

5. MJERENJE TEMPERATURE

Sadržaj lekcije:

6. Opći pojmovi u mjerenju temperature
7. Vrste termometara
8. Termometri zračenja
9. Specijalne metode mjerenja temperature
10. Kontrola i kalibriranje termometara

5.1. Opći pojmovi u mjerenju temperature

5.1.1. Uvod

Temperatura je toplotno stanje predmeta ili procesa. Temperatura zavisivi od toga koliko toplote sadrži tijelo određene mase i pod određenim pritiskom. Toplota je stanje molekularnog kretanja u tijelima. Pri određivanju toplotnog stanja tijela ili procesa temperatura je osnovna veličina koja se mjeri ili kontrolira.

Kontrola temperature može se vršiti subjektivnim i objektivnim metodama. Prve su nepouzdana i ne daju mjerene vrijednosti šterbe zbog kojih se vrši mjerenje.

Temperatura ne može prelaziti sa tijela na tijelo, nego prelazi toplota a temperature se izjednačavaju, i kao takva očituje se na niz načina. Povišena temperatura prouzrokuje promjenu dimenzija tijela ili stanja procesa ili neke veličine.

Sa porastom temperature produžuje se npr. metalni štap, smanjuje kaučukova nit, plinovi povećavaju svoju zapreminu itd.

Promjena temperature prouzrokuje promjenu električnog otpora vodiča (pri višim temperaturama otpor bakarne žice je veći, a ugljenog štapa manji).

Također promjena temperature prouzrokuje promjenu agregatnog stanja materije (pri niskim temperaturama voda je čvrstom stanju, dok je pri višim temperaturama u tekućem stanju. Pri još višim temperaturama voda prelazi u paru).

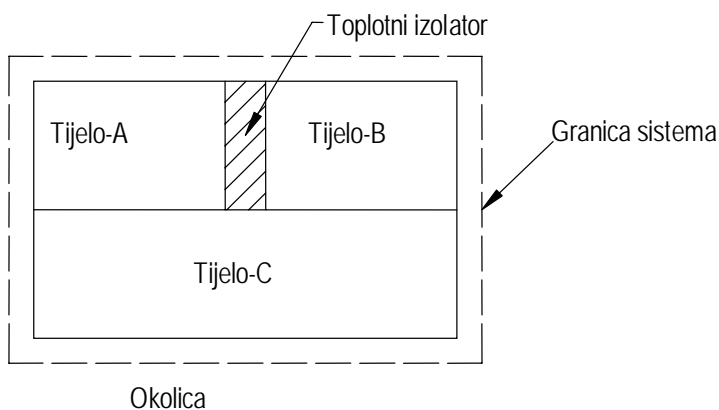
Razlike temperatura dovode do pojave električnog napona između dva spojena metala.

Ljudi su bez obzira na mjesto i vrijeme prikazivali veliku pozornost ispravnosti mjerenja, i svaku od navedenih pojava (reakcija) na temperaturu upotrebljavali kao osnovu za mjerenje temperature.

5.1.2. Uslovi za mjerenje temperature

Temperaturno osjetljive osobine materije, iskorištene u izradi instrumenata za mjerenje temperature su:

1. promjena volumena,
2. pritisak plina pri konstantnom volumenu,
3. električni otpor u čvrstom tijelu (metal),
4. elektromotorna sila u dva različita metala ili poluprovodnika,
5. intenzitet zračenja na visokim temperaturama i magnetni efekti na ekstremno niskim temperaturama.



Slika 5.1. Termička ravnoteža sistema

Temperatura sistema se određuje dovođenjem termometra i mjenog objekta ili procesa, sistema u neposredni kontakt puštajući ih da dostignu toplotnu ravnotežu. Nakon dostizanja toplotne ravnoteže, prema nultom zakonu termodinamike, oba tijela će imati istu temperaturu, kao što je prikazano na slici 5.1.

Ako su u toplotnoj ravnoteži tijela A i C, a isto tako i tijela B i C, tada su u toplotnoj ravnoteži i tijela A i B. Na slici 5.1. je ilustrirana termička ravnoteža dva sistema.

Sistem čine tri tijela A, B, C i toplotni izolator, koji je postavljen između tijela A i B. U ovom slučaju sistem ne razmjenjuje toplotnu energiju sa okolicom. Može se zaključiti da sva tri tijela imaju istu temperaturu. Ovaj zakon je omogućio mjerenje temperature.

Naime, termometar je tijelo C, koje se dovodi u toplotnu ravnotežu sa tijelima A i B.

Temperatura je veličina stanja, koju nije moguće direktno mjeriti.

5.1.3. Historija uređaja za mjerenje temperature

Prvi uređaj za mjerenje temperature je 1597. godine napravio Galileo Galilei (1564-1642), kojim je mogao ustanoviti manju ili veću zagrijanost zraka.

Francuski fizičar Guillaume Amonton (1663-1705) je 1703. godine usavršio i napravio zračni termometar i uveo termodinamsku skalu.

Njemački fizičar iz Gdanjska Danijel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) je 1715. godine napravio živin termometar i predložio temperaturnu skalu kod koje je temperatura topljenja leda $+32^{\circ}$ F, a temperatura ključanja vode $+212^{\circ}$ F.

Francuski fizičar Reomir je 1736. godine predložio temperaturnu skalu kod koje je temperatura topljenja leda 0° R, a temperatura ključanja vode na temperaturi 80° R.

Švedski astronom iz Uppsale Anders Celzijus (1701-1744) je 1740. godine predložio skalu kod koje je temperatura topljenja leda 0° C, a temperatura ključanja vode 100° C. U anglosaksonskom mjernom sistemu koristi se i Rankinova skala.

Temperaturni interval kod ove skale je $1K=1,8^{\circ}$ Ra, trojna tačka vode je na temperaturi $491, 69^{\circ}$ Ra.

Međunarodni komitet za mjerenje i težine preporučio je u SI-sistemu dvije skale: apsolutnu termodinamsku temperaturnu skalu, koju je 1851. godine predložio britanski naučnik William Thopson lord Kelvin (1824-1907) poznata kao Kelvonova skala, i praktičnu skalu od sto stepeni, poznatu kao Celzijusova skala.

Mjerenje temperature u objema skalama može se vršiti u objema skalama može se vršiti u kelvinima [K] ili u celzijusima [$^{\circ}$ C] u zavisnosti od prihvaćenog položaja nule na mjernoj skali.

Od 1954. godine Međunarodni komitet je preporučio da referentno stanje na Kelvinovoj temperaturnoj skali bude $273,16$ K, gdje sve tri faze vode (čvrsto - tečno - parno) koegzistiraju u ravnoteži na pritisku 1 atm.

Takvo stanje je nazvano trojno stanje ili trojna tačka.

Voda se ledi na temperaturi $273,15$ K i pritisku 1 atm, što odgovara 0° C na Celzijusovoj skali..

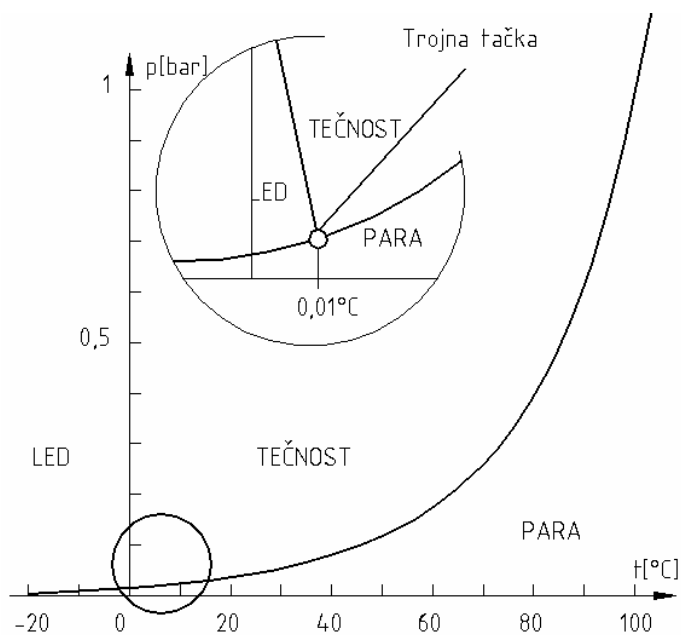
Trojna tačka vode je ona vrijednost temperature i pritiska kod koje kod koje voda može postojati u sva tri agregatna stanja.

Kelvin je termodinamička temperatura koja je jednaka $1/273,16$ dijelu termodinamičke temperature trojne tačke vode (DIN 1301). (slika 5.2) Voda

se leđi na temperaturi 273,15 K i pritisku 1 atm, što odgovara 0° C na Celzijusovoj skali..

Trojna tačka vode je ona vrijednost temperature i pritiska kod koje voda može postojati u sva tri agregatna stanja.

Kelvin je termodinamička temperatura koja je jednaka 1/273,16 dijelu termodinamičke temperature trojne tačke vode (DIN 1301) na slici 5.2. dat je fazni dijagram vode.



Slika 5.2. Fazni dijagram vode

5.1.4. Temperatura i temperaturne skale

Promjena temperature očituje se kroz promjenu dužine stupca npr. živinog termometra (toplomjera) tekućine.

Ako se određenim dužinama h stuba tekućine takvog termometra propišu određene vrijednosti temperatura, onda se tako definirana fizikalna veličina naziva **empirijska temperatura**, i označava sa t ili θ .

Primjer empirijske temperature je tzv. međunarodna temperatura t koja je empirijski interpolirana kroz četiri područja. Unutar svakog od četiri područja t se oslanja na tzv. fiksne temperaturne tačke kojima su propisane stanovite vrijednosti empirijske međunarodne temperature.

Termodinamička temperatura, T zavisi od osobina tijela i moguće je definirati iz prvog i drugog zakona termodinamike pri čemu toplota ne prelazi sama od sebe sa tijela niže temperature na tijelo više temperature.

Etalon temperature ili standard temperature je 1°C , stoji dio intervala između tačke topljenja leda i tačke ključanja vode na normalnom pritisku. Međutim, određivanje temperature u intervalima je uvijek povezano sa osobinama tijela odnosno temperaturnim parametrima, koji se u ove svrhe koriste.

Na konferenciji održanoj 1954. god. usvojena termodinamička skala temperature u stepenima kelvina ($^{\circ}\text{K}$). Tom prilikom je kao polazna tačka usvojena trojna tačka vode, koja se nalazi tačno na $0,01^{\circ}\text{C}$.

Trojna tačka vode je ona vrijednost temperature i tlaka kod koje kod koje voda može postojati u sva tri agregatna stanja.

Kelvin je termodinamička temperatura koja je jednaka $1/273,16$ dijelu termodinamičke temperature trojne tačke vode (DIN 1301).

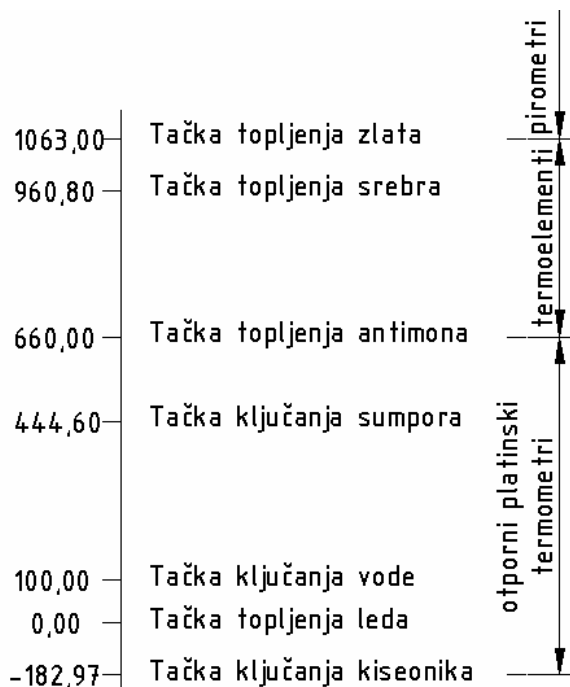
Pošto se savremena mjerenja temperature izvode u vrlo širokom opsegu, pokazalo se kao korisno da se pored izvedenih fiksnih tačaka temperature uzmu i neke tačke na višim i nižim područjima. Tako je na istoj konferenciji od 1954. god. Preporučeno da se pored poznatih temperatura topljenja leda $0,00^{\circ}\text{C}$ i ključanja vode 100°C pod normalnim atmosferskim pritiskom uvedu još i sljedeće fiksne temperature koje se lako i podesno mogu uvijek reproducirati:

- Temperatura ključanja kiseonika na normalnom atmosferskom pritisku od $-182,97^{\circ}\text{C}$
- Temperatura ključanja sumpora od $444,60^{\circ}\text{C}$ pri normalnom pritisku
- Temperatura topljenja srebra $960,80^{\circ}\text{C}$

Pored toga preporučeno je da se za baždarenje termometara u intervalima između navedenih fiksnih tačaka upotrebljavaju:

- Otporni platinski termometri u intervalu od -190 do 660°C
- Platina rodijum u intervalu od 660°C do tačke topljenja zlata, a preko ove temperature optički pirometri

Na slici 5.3. prikazan je položaj navedenih fiksnih tačaka temperaturne skale, kao i odgovarajuće vrste termometara koji se koriste za kalibriranje u pojedinim oblastima.



Slika 5.3. Položaj fiksnih tačaka temperaturne skale

Temperaturne skale date su sljedećim relacijama:

Fahrenheitova skala °F

$$F = \frac{9 \cdot C}{5} + 32$$

Reamurova skala °R

$$R = \frac{5}{4} \cdot C$$

Celzijusova skala °C

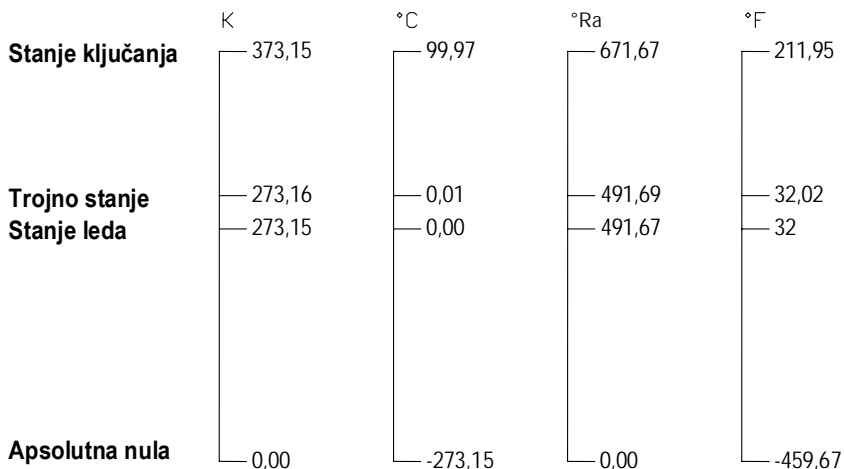
$$C = \left(\frac{5}{9}\right) \cdot (F - 32) \quad C = \frac{4}{5} \cdot R \quad C = K - 273,15$$

Kelvinova skala K

$$K = C + 273,15$$

$$1^\circ C = 33,88^\circ F = 1,25^\circ R = 274,15 K$$

Na slici 5.4. dat je uporedni grafički prikaz temperaturnih skala u odnosu na stanje vode



Slika 5.4. Pregled temperaturnih skala u odnosu na stanje vode na atmosferskom pritisku

5.2. Vrste termometara

Mjerenje temperature u praksi izvodi se raznovrsnim termometrima, u zavisnosti o kojoj se temperaturi radi i da li je primjena laboratorijska, industrijska, ili za neku drugu svrhu.

Kod termometara ulazna veličina ja temperatura, sa čijom promjenom nastaju i promjene na termometrima, koje se mogu koristiti pri određivanju temperature.

Vrste termometara	Područje primjene u °C	
	uobičajeno	manje uobičajeno
Štakleni termometar	- 200 do 750	- 160 do 550
Štapni termometar	- 30 do 1000	
Bimetalni termometar	- 30 do 400	do 1000
Opružni termometar:		
- punjen tekućinom	- 30 do 600	
- na pritisak pare	- 200 do 360	
Električni termonaponski termometar	- 220 do 550	
Otpornički termometri	- 200 do 550	
Radijacioni pirometri	do 1600	

Tabela 5.1. Vrste termometara i područje primjene

Kod ovih mjernih uređaja ulazna veličina je temperatura, sa čijom primjenom nastaju i promjene na termometrima, koji se mogu koristiti pri određenoj temperaturi, a te promjene mogu biti:

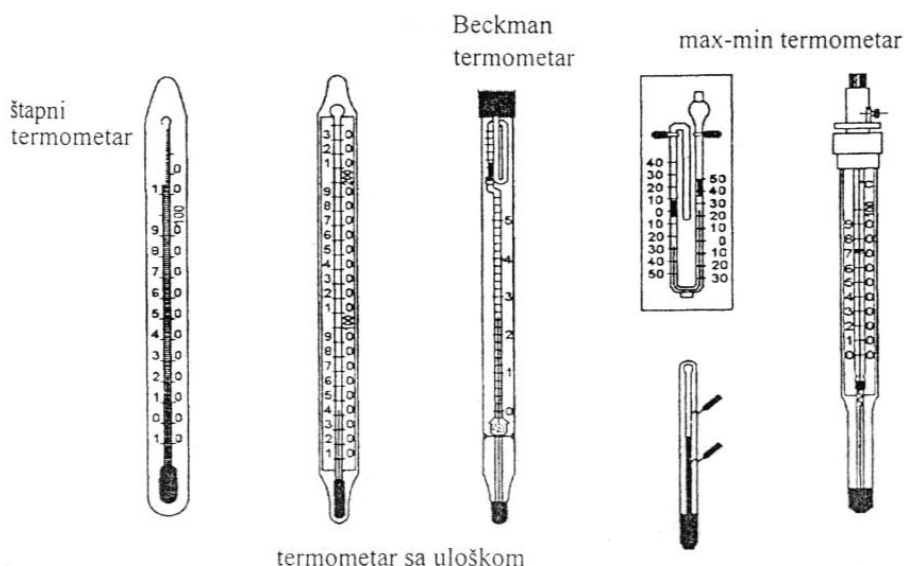
- promjena dužine,
- promjena pritiska,
- promjena električnog otpora,
- promjena termonapona itd.

Promjena dužine temperaturne skale čini da se takvi termometri svrstavaju u grupu mehaničkih mjernih uređaja.

5.2.1. Stakleni termometri

Stakleni termometri rade na principu širenja tečnosti i stakla.

Živin termometar je najviše u primjeni i za više temperature rade se od Jena-stakla. Glavni dio termometrijske tečnosti se nalazi u jednom kuglastom ili cilindričnom spremniku. Spremnik je uliven u dugu tanku staklenu kapilarnu cjevčicu. Na gornjem kraju kapilare nalazi se proširenje, u koje može da uđe živa, ako se pređe maksimalna temperatura.



Slika 5.5. Termometri sa tečnošću

Obično se živa primjenjuje do 300°C , jer kod 360°C ona već ključa. Stoga se za primjenu živinog termometra na višim temperaturama puni prostor

iznad žive sa azotom ili ugljičnim dioksidom pod pritiskom od 20 bar i više, dok se termometri prave iz specijalnog jenskog stakla.

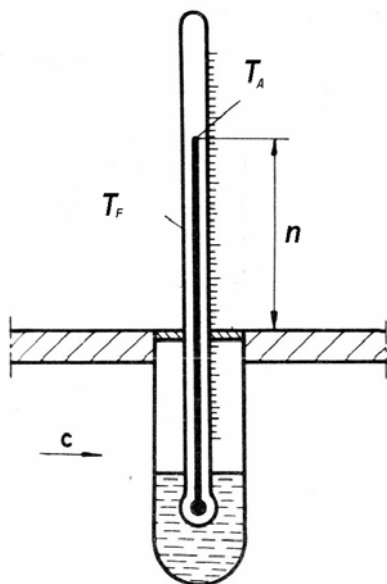
Na taj način se oblast živinog termometra proširuje do 625°C . Termometri od kvartnog stakla se koriste do 750°C (međutim postoji opasnost od eksplozije radi visokog pritiska do 100 bar živine pare i gasa u termometru). Tijelo termometra može biti uložnog ili štapastog tipa (slika 5.5).

Određivanje temperature kod tekućinskih termometara zasnovano je na zapreminskom rastojanju.

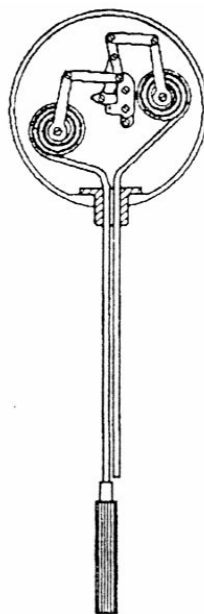
$$V(T) = V_o(T_o)[1 + \beta(T - T_o)]$$

Gdje je: β -kubni koeficijent izduženja $\beta = \beta(T) \approx 3\beta$. Npr. za živu $\beta_{\text{Hg}} = 182\text{ K}^{-1}$, $T_o = 273,15\text{ K}$.

Usljed širenja stakla i tečnosti, kod tačnih mjerenja moramo posebnu pažnju posvetiti uranjanju, slika 5.6.



Slika 5.6. Uranjanje termometra



Slika 5.7. Opužni termometar

Ukoliko je mjerna skala termometra izvan mjernog mjesta (dio stupca nije uronjen u tečnost) tada je potrebno provesti korekciju. Stvarna temperatura dobija iz formule

$$T = T_A + k \cdot s (T_A - T_F)$$

Gdje je: T_A -temperatura na glavnom termometru

T_F -temperatura niti termometra

k -korekcionni faktor, prividni koeficijent rastezanja mjerne kapljevine i stakla

$k = 18 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ za H_g /kvarcno staklo

s -dužina neuronjene niti (broj neuronjeni stepeni)

5.2.2. Opružni termometri sa cijevnom oprugom

Ovi termometri također rade na principu širenja tečnosti, koja se nalazi u rezervoaru detektora, koji je dalje spojen sa kapilarnom cijevi do Bourdonove opruge, slika 5.7.

Dužina kapilarne cijevi se prilagođava montažnim potrebama temperaturnog uređaja. Bourdonova opruga služi kao pokazivač, dok je skala linearna, jer odgovara linearnoj promjeni zapremine tečnosti sa temperaturom.

Ovakvi instrumenti se primjenjuju češće u industriji, naročito za automobilsku regulaciju, jer su termičke deformacije usljed toplotnog širenja velike.

Termometri se obično pune živom, pa se primjenjuju od -35 do $+600^\circ C$.

5.2.3. Plinski termometri

Termometar je slične konstrukcije kao i termometri punjeni tečnošću, samo što je punjenje ovog termometra izvedeno nekim inertnim gasom.

Plinski termometar je uređaj za fundamentalna određivanja termodinamičke temperature.

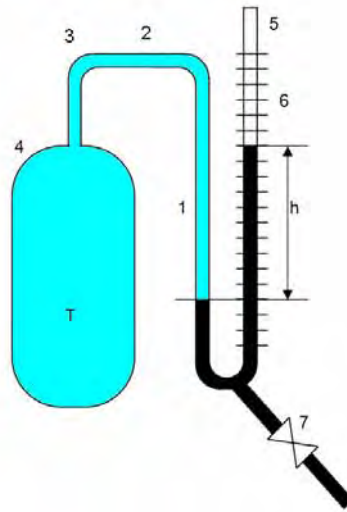
Mjerenje termodinamičke temperature T ovim termometrom svodi se na precizno mjerenje pritiska i volumena plina u zatvorenoj posudi, pri čemu kao osnovu koristi jednačinu stanja idealnih plinova.

$$T = \frac{T_r \cdot p \cdot V}{(p \cdot V)_r}$$

Gdje su; p -pritisak posude pri referentnoj temperaturi T_r

V -volumen posude pri referentnoj temperaturi T_r

Referentna temperaturna tačka je polazište plinske termometrije $T_r = T_t = 273,16 K$.



Slika 5.8. Plinski termometar

Mjerenje termodinamičke temperature, T ovom metodom sastoji se iz izmjenog pritiska p i volumena V plina u dva različita temperaturna stanja, npr. jedno je pri vrijednostima T, p, v , a drugo pri vrijednostima T_r, p_r, V_r . Pri tome masa plina mora da bude jednaka u oba stanja, tj. $m = \text{const}$.

Plinski termometar se sastoji od staklene i metalne nepropusne posude koja je uronjena u materiju čija se termodinamička temperatura mjeri. Na posudu je pomoću posebne cijevi (kapilare) priključen manometar za mjerenje pritiska. Posuda i kapilara su napunjene radnim plinom za koji vrijedi jednačina stanja $pV = mRT$.

Na slici 5.8. data je skica plinskog termometra.

Plin dolazi u dodir sa živom u staklenoj cijevi 1 kroz kapilaru 3. Živa ispunjava i drugu pomičnu cijev 5, koja se zbog pokretljive veze 2 između obje cijevi može podizati i spuštati, tako da plin iz 4 stalno dopire do nacrtane oznake i time pri bilo kojoj temperaturi posude 4 zadržava stalan volumen, $V = \text{const}$. Hod termometra na slici 5.8. se postiže pomoću ventila 7.

Razlika nivoa pri referentnoj temperaturi T_r iznosi h_r , a pri temperaturi T iznosi h .

Kako je $p = \zeta g h$, to pri $V = \text{const}$ slijedi:

$$T = T_r \frac{p}{p_r} = T_r \frac{h}{h_r}$$

Kako je rad sa plinskim termometrima skup i složen, koriste se samo za najpreciznija mjerenja.

Pored plinskih termometara koji rade na konstantan volumen, postoje i plinski termometri koji rade na konstantan pritisak i konstantnu temperaturu.

5.2.4. Mehanički dodirni termometri

Princip rada mehaničkih dodirnih termometara je zasnovan na razlici izduženja dva različita materijala, koji mogu biti u čvrstom, tečnom ili gasovitom stanju.

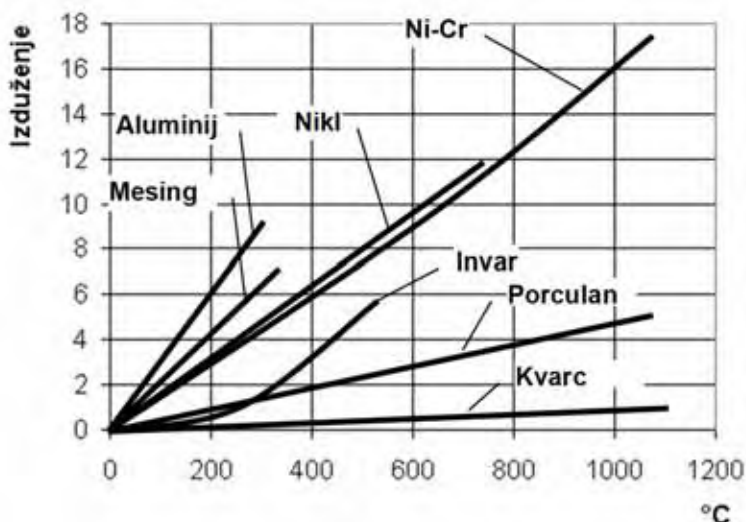
Metalni termometri izduženja

Ovi termometri se primjenjuju kao pogonski termometri, pogotovo u prehrambenoj industriji gdje je zabranjena primjena živinog termometara. Metalni termometri koriste princip širenja metala zagrijavanjem.

Širenje je vrlo malo, pa stoga mora mehanizam pokazivača biti vrlo precizan i sa dovoljnim prenosom radi povećanja pokazivanja temperature na skali.

Termička sila istezanja metala je vrlo velika, pa se stoga metalni termometri uspješno primjenjuju kod regulacije.

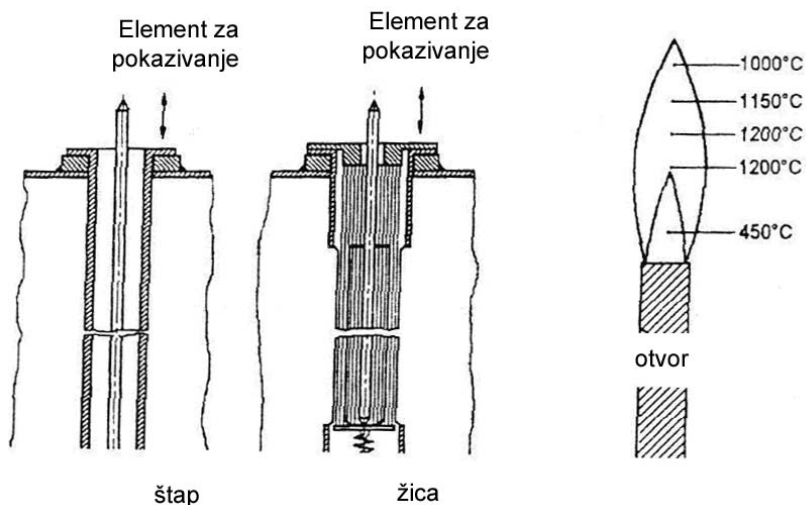
Na slici 5.9. su prikazana izduženja za različite materijale.



Slika 5.9. Izduženje za različite materijale

Tačnost metalnih termometara je ± 1 do 3% , oblast primjene $0 - 1000^{\circ}C$.

Na slici 5.10. je prikazan jedan takav termometar.



Slika 5.10. Metalni termometri izduženja

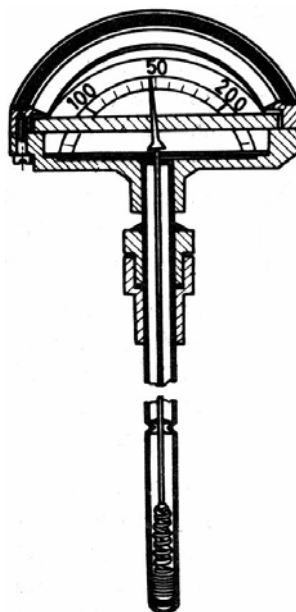
Bimetalni termometri

Bimetalni mjerni instrumenti su poznati po svojoj primjeni u termostatima. Na slici 5.11 je dat jedan takav instrument

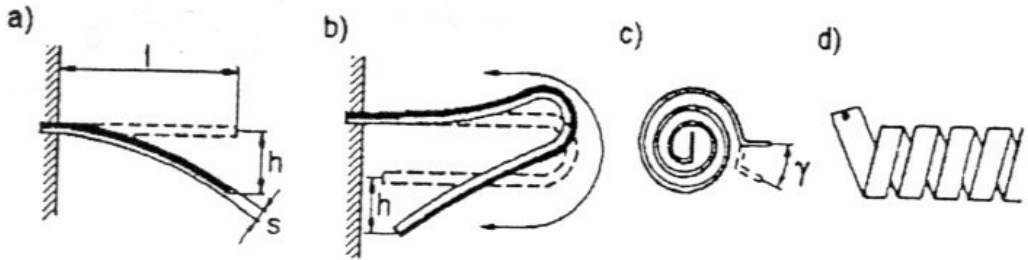
Bimetalni termometri također rade na principu širenja metala, ali tako, što se dvije metalne trake sa različitim koeficijentima istezanja uvijaju jedna u drugu, te kod promjene temperature jedna traka se rasteže više dok druga manje, što uzrokuje savijanje u jednu stranu.

Taj se odklon prenosi mehaničkim sistemom poluga i zupčanika na kazaljku instrumenta čija je skala kalibriranau stepenima Celzija.

Oblici bimetalnih traka su prikazani na slici 5.12.



Slika 5.11. Bimetalni termometar

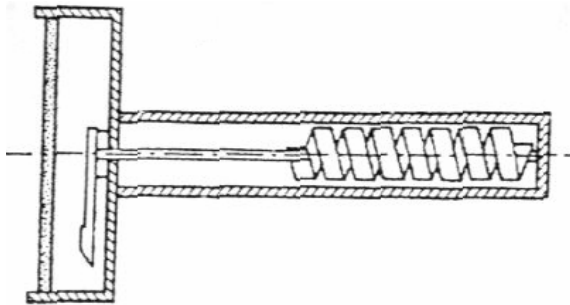


Slika 5.12. Oblici bimetalnih traka, a- trakasta opruga, b- savijena opruga, c- spiralna traka, d- zavojna spirala

Što su bimetalne trake duže, to je njihovo temperaturno savijanje jače, pa se obično uvijaju u spiralu.

Oblast primjene -100 do $600^{\circ} C$. Tačnost je $\pm 0,5$ do $\pm 2,0 \%$.

Na slici 5.13. dat je sklop bimetalnog termometra



Slika 5.13. Sklop bimetalnog termometra

$$\Delta h = a \frac{l^2}{s} \Delta T \quad \Delta h = a \frac{l^2}{2s} \Delta T \quad \Delta \gamma = a \frac{360l}{\pi s} \Delta T \quad \Delta \gamma = a \frac{360l}{\pi s} \Delta T$$

γ - ugao savijanja kod promjene temperature.

Zbog većeg ugla savijanja uzima se mala debljina traka, svakako uz uvažavanje čvrstoće.

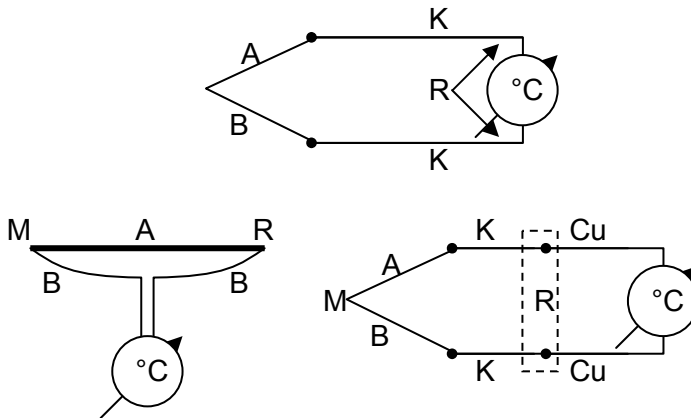
5.2.5. Električni dodirni termometri

Prikazivanje promjene otpora metala ili poluvodiča kao i promjene termoelektričnog napona kod metala ili legura metala su najčešći postupci mjerenja temperature. Mjerno područje, tačnost i dinamika mjerenja su općenito bolji nego kod mehaničkih sistema. Troškovi i cijena su veći zbog električne obrade signala.

1821. godine Seebeck je otkrio novu pojavu. Spojio je dvije žice od različitih materijala (npr. željezo i bakar) i spojio njihove slobodne krajeve, slika 14. Spojena mjesta je označio sa t_1 i t_2 . Kada je zagrijavao jedan od ta dva spojna mjesta, dok je držao na sobnoj temperaturi, ustanovio je da kroz taj zatvoreni strujni krug teče električna struja.



Slika 5.14. Termospoj



Slika 5.15. Pregled spajanja termoparova

Električni krug prikazan na slikama 5.14 i 5.15 naziva se termospoj ili termopar, a električni napon koji se stvara naziva se termoelektrični napon ili termonapon.

Otporni termometri

Pri promjeni temperature mijenja se otpornost električnih provodnika. Temperatura se može odrediti mjerenjem električnog otpora provodnika izrađenih od prikladnih materijala. Postoje provodnici sa pozitivnim i sa negativnim temperaturnim koeficijentom otpora. Većina metala ima pozitivni temperaturni koeficijent, to jest, sa porastom temperature otpornik od metala povećava svoju otpornost. Temperaturna zavisnost električnog otpora metala može se opisati sljedećom jednačinom:

$$R = R_o \left[1 + A(T - T_o) + B(T - T_o)^2 \right]$$

gdje su:

R-električni otpor pri temperaturi T,

R_0 -električni otpor pri temperaturi T_0 .

A i B-konstante materijala

Mnoga mjerenja temperature su potrebna samo u malom mjernom intervalu, npr. interval 0 do 120°C. Kod takvih malih mjernih intervala ostaje sistematska greška većinom u podnošljivim granicama, koja se pojavljuje ako se električni otpor opisuje približno linearnom zakonitošću.

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

R_0 -električni otpor pri temperaturi $T=T_0$, npr $T_0=0^\circ\text{C}$

α -temperaturni koeficijent koji se npr. iz nagiba pravca regresije određuje. Kod metalnih otpornika temperaturni koeficijent je zavisan o čistoći metala.

$\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3}$ do $3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ za platinu

$\alpha = 3,9250 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ za vrlo čvrstu platinu

$\alpha = 6,17 \cdot 10^{-3}$ do $6,75 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ za nikal

$\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$ do $4,33 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ za bakar

Temperatura °C	$R_{\text{Platine}} \Omega$		$R_{\text{nikla}} \Omega$	$R_{\text{Bakar}} \Omega$
	ISO/OIML	DIN IEC 751		
-220	9,05			
-100	59,65	60,25		
-60	75,96	76,33	69,5	
0	100	100	100	100
100	139,10	138,50	161,7	142,60
180	169,54	168,46	223,1	176,68
200	177,03	175,84		
300	213,79	212,02		
400	249,38	247,04		
500	283,80	280,90		
600	317,06	313,59		
700	349,3	345,13		
800	380,1	375,51		
840	392,2	385,34		
900	409,8			
1000	438,2			

Tabela 5.2. Normalne vrijednosti električnih otpornih termometara od platine, nikla i bakra

Brojne vrijednosti pokazuju da je osjetljivost električnih otpornih termometara sa mjernim davačima od nikla znatno veća nego kod mjernih davača iz platine. Ipak je područje primjene platinskih mjernih davača znatno veće od davača nikla.

Otporni termometri koriste kao detektor namotaj tanke žice od platine ili nikla na jezgru od tvrdog stakla ili glimera. Spolja se detektor zaštićuje istopljenim staklom, emajlom ili keramičkom masom, već prema namjeni. Detektor se stavlja u zaštitnu metalnu ili keramičku cijev temperaturske sonde.

Detektor ima određen nominalni otpor na 0° ili 20° C, obično 100Ω . Platinski otporni termometri se primjenjuju normalno za oblast -200 do 550°C (specijalna izrada do 1100° C), od nikla -150 do 300° C, a od bakra -200 do 120° C.

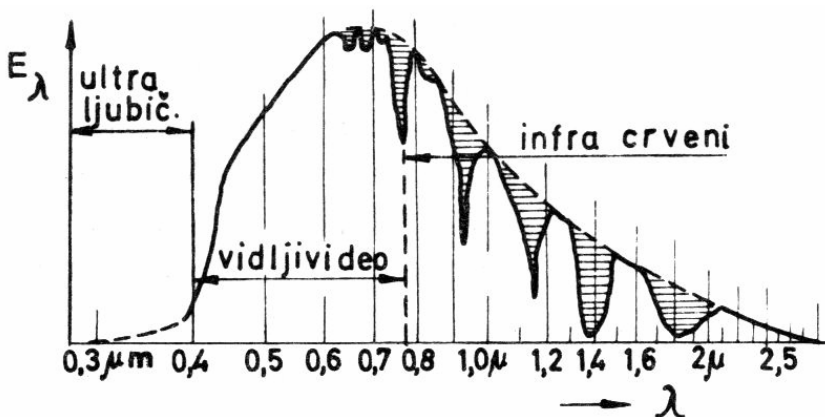
5.3. Termometri zračenja

Kod termoelemenata, iznad 1600°C moguće je mjeriti temperaturu jedino na osnovu zakona o zračenju.

Prednost je pri tom ta, da detektor temperature-pirometat ne mora biti stavljen u prostor, od koga se određuje temperatura, odnosno u toplotni izvor.

Kod pirometara na zračenje imamo objektivno odrađivanje temperature na principu prenosa toplote zračenjem na sondu-termoelement u instrumentu.

Na slici 5.16 prikazan je dijagram intenziteta sunčevog spektra u zavisnosti od talasnih dužina.



Slika 5.16. Dijagram intenziteta sunčevog spektra

Svako zračenje je definirano energijom zračenja i talasnom dužinom.

Energija zračenja $M_{\lambda S}$ nekog crnog tijela za neku talasnu dužinu λ zavisna je od temperature tog tijela. Prema zakonu zračenja po Wienu energija zračenja je:

$$M_{\lambda S} = \frac{c_1}{\lambda^5 (c_2/\lambda T - 1)}$$

c_1 i c_2 -konstante zračenja: $c_1 = 2\pi c^2 h$, $c_2 = ch/k$

gdje je:

$c = 2,997925 \cdot 10^8$ m/s brzina svjetlosti, $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Js Planck-ova konstanta i $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmann-ova konstanta.

Iz navedenog izraza se jasno vidi mogućnost indirektnog određivanja temperature preko određivanja intenziteta svjetlosnog zračenja, zračenja toplote. U prvom slučaju koristi se svjetlosna energija, a u drugom toplotna za mjerenje temperature.

Energija zračenja $M_{\lambda S}$, prema navedenom izrazu pokazuje vrlo karakterističan, vrlo izrazit maksimum, koji leži kod temperature izvora zračenja T od 650 K, pri talasnoj dužini $\lambda \approx 4,5 \mu m$, i kod T=1300 K pri $\lambda \approx 2,2 \mu m$, dakle u području infra crvenog zračenja.

Vrijednosti za stepene emisije ϵ nekih tehničkih tijela su date u tabeli 5.3.

Materijal	Stepen emisije ϵ
Metal, čisti poliran	0, 03
Aluminium, valjan, neobrađen	0, 07
Nikal, bez sjaja	0, 11
Mesing, bez sjaja	0, 22
Čelik, čist	0, 24
Čelik, valjani	0, 77
Čelik, jako korodiran	0, 85
Lak	0, 90
Papir, drvo	0, 93
Staklo, glatko	0, 94
Čađa	0, 95
Voda, led	0, 96

Tabela 5.3. Stepene emisije ϵ tehničkih tijela u zavisnosti od materijala

5.3.1. Mjerni postupak

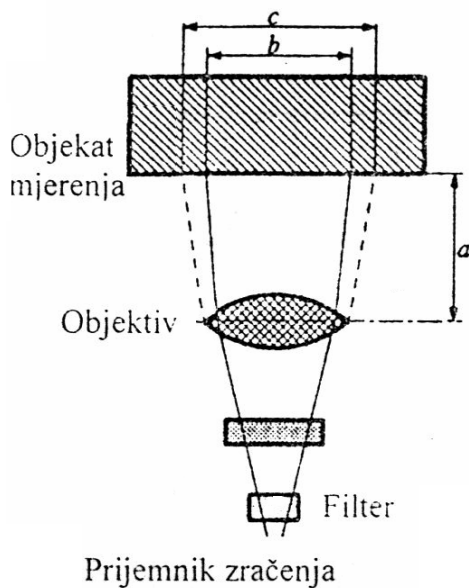
Određivanje temperature mjerenjem energije zračenja može se izvoditi:

- Mjerenjem od tijela odaslanog cjelokupnog zračenja (pirometri ukupnog zračenja),
- Mjerenjem dijela ovog zračenja (pirometri djelimičnog zračenja) ili
- Mjerenjem zračenja u više ograničenih intervala frekvencije (pirometri boje).

Pirometri ukupnog zračenja

Kod ovih pirometara ispituje se ukupna energija zračenja, koja od izabranog dijela površine ide na posmatrano tijelo, prihvatajući pri tome zračenje ukupne frekvencije, i prije svega zračenja u nevidljivom području.

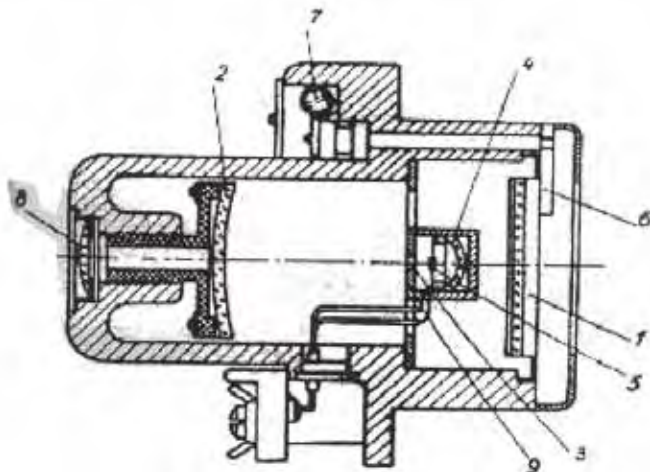
Oblici izvođenja pirometara ukupnog zračenja uređuju se prema dotičnom mjernom području.



Slika 5.17. Mjerenje temperature sa pirometrom ukupnog zračenja (a-odstojanje objekta mjerenja i objektivna; b-prečnik mjernog polja; c-prečnik polja posmatranja)

Kod nižih temperatura mjernih objekata prikladno je energiju zračenja mjernog objekta potpuno prihvatiti. Primjenjuje se pirometar sa otvorom na ogledalu, koji povećava intenzitet energije zračenja.

Pirometri sa otvorom na ogledalu se primjenjuju za mjerenje temperatura nižih $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri mjerenju viših temperatura primjenjuju se pirometri sa sočivom, slika 5.18.



Slika 5.18. Pirometri s ogledalom: 1- prozorčić, 2 i 4- konkavna staklena ogledala, 3- otvor, 5- detektor, 6 i 9 - zaslon, 7-vijak, 8- leća

Odgovarajuće zračenje na ovoj slici proizilazi od određenog dijela površine mjernog predmeta. Veličina ovog mjernog polja zavisi od veličine optičkog sistema pirometra i od površine i selektiviteta senzora zračenja. Sočivo i drugi ugrađeni dijelovi optičkog sistema apsorbiraju jedan dio zračenja. Zavisno od vrste materijala, sočiva propuštaju i druga područja frekvencija od mjernog objekta odaslanog zračenjem. Za smanjenje primjenog zračenja od senzora zračenja, koriste se također posebna sredstva slabljenja, kao npr. rotirajući sektorski zaklon, koji dio zračenja zavisno od frekvencije apsorbiruje.

Odgovarajuće zračenje proizilazi od određenog dijela površine mjernog predmeta. Veličina mjernog polja zavisi od veličine optičkog sistema pirometra i od površine i selektiviteta senzora zračenja.

Sočivo i drugi ugrađeni dijelovi optičkog sistema apsorbiraju jedan dio zračenja. Zavisno od vrste materijala, sočiva propuštaju i druga područja frekvencija zračenja odaslanog od mjernog objekta. Za smanjenje primljenog zračenja od senzora zračenja, koriste se posebna sredstva slabljenja, kao npr. rotirajući sektorski zakloni, koji dio zračenja zavisno od frekvencije apsorbiruju.

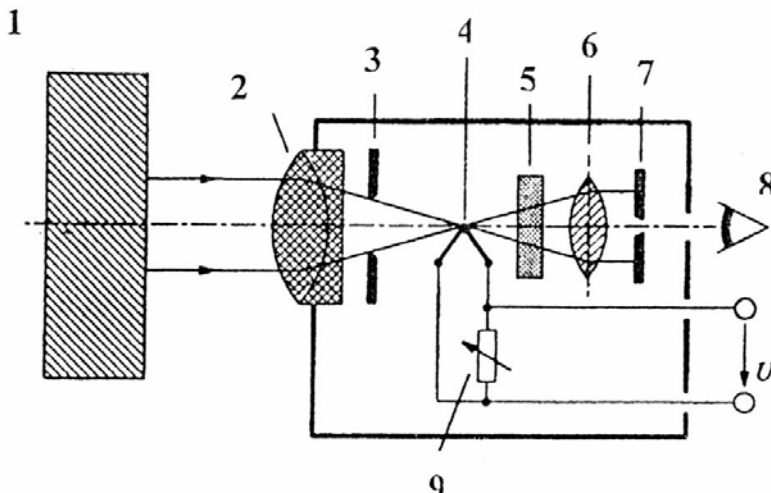
Kao senzori za energiju zračenja koriste se termoelementi ili foto elementi od silicijuma ili germanijuma. Termoelementi senzori se izvode i kao višestruki termoelementi (lanac termoelemenata). Kod primjene

fotoelemenata u pirometrima ukupnog zračenja (fotoelektrični pirometri) područje frekvencija je jače ograničeno nego kod termoelemenata. Fotoelektrični pirometri imaju prednost vrlo malog vremenskog podešavanja. Koriste se pri mjerenju temperatura od 500°C do oko 1500°C .

Pirometri djelomičnog zračenja i spektralni pirometri

Kod pirometara sa sočivom moguće je područje frekvencija, u kojem je pirometar osjetljiv, ograničiti preko optičkih svojstava primijenjeni sočiva. Dalje ograničenje ovog područja frekvencija je moguće pomoću posebnih filtera. Pirometri sa sočivom od kalcijum florita mogu se prihvatiti iznad temperatura objekata od 700°C još kao pirometri ukupnog zračenja. Odgovarajući pirometri sa kvarcnim sočivom iskorištavaju pri 1750°C samo 83 % ukupnog zračenja crnog tijela, pirometri sa staklenim sočivom 65% ovog zračenja, pri nižim temperaturama objekta manje.

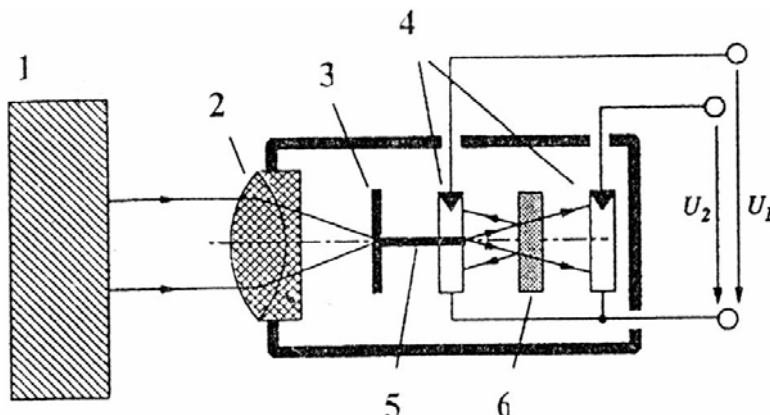
Pirometar sa sočivom i termoelementom kao senzorom temperature, slika 16, se koristi kod mjerenja temperatura preko 500°C . Ne samo kod pirometara ukupnog zračenja već i kod pirometara djelimičnog zračenja i spektralnih pirometara mjeri se gustoća zračenja. Kod takvih pirometara temperatura se određuje ili neposredno iz gustoće zračenja ili poređenjem sa poznatom gustoćom zračenja referentnog izvora.



Slika 5.19. Princip pirometra sa sočivom i termoelementom:
 1-tijelo koje zrači, 2-objektiv, 3-kalibrirana blenda, 4-fotoelement,
 5-filter, 6-okular, 7-blenda, 8-posmatrač,
 9-električni otpornik za kompenzaciju temperatura kućišta

Fotoelektrični pirometar

Da bi se izbjegli štetni uticaji apsorpcije toplinskog isijavanja, upotrebljavaju se fotoelektrični pirometri. Kao detektor ovdje služi fotočelija. Otklanjanje uticaja apsorpcije postiže se na taj način, da se spektakularna osjetljivost fotočelije smanji u onim oblastima spektra u kojima se uticaj apsorpcije može mjeriti. Kod fotoelektričnog pirometra greška može iznositi 15°C .



Slika 5.20. Pirometar boje i odnosa sa automatskom slikom odnosa gustoće zračenja kod dva različita bliska područja talasnih dužina:
 1-zračeće tijelo, 2-objektiv, 3-blenda, 4-fotoelement,
 5-vodič svjetlosnih talasa, 6-filter od indijumfosfida

Mjerni uređaj prima zračenje preko objektivu. Ovo se zračenje veže na otvoru blende, od koje se dalje vodi preko voda svjetlosnih talasa na indijumfosfidni filter. Ovaj filter reflektira zračenje (nešto oko $\lambda < 1 \mu\text{m}$) i pušta jednolično zračenje. Tako razdvojeni dijelovi zračenja padaju na različite silicium-fotoelemente, što daje napone U_1 odnosno U_2 , koji zavise od gustoće nastalih zračenja.

Pirometri boje ili pirometri odnosa

Izvjescni materijali, najčešće soli metala, mijenjaju boju u zavisnosti od temperature. To je tskorišteno za mjerenje površinske temperature. Postoje jednostavne i složene mjerne boje. Ove boje se isporučuju u obliku praha, otapaju se u alkoholu i nanose na površinu čija se temperatura želi izmjeriti. Temperatura se može očitati nakon pola sata, dok se boja počinje mjenjati poslije dvije do tri minute. Ukoliko promjena boje započne odmah nakon nanošenja na površinu, tada je temperatura površine viša od one za koju se dotična boja može upotrebiti. Promjena boje osjetljivih na promjenu temperature mogu se zapravo odrediti pojedina stacionirana stanja.

5.4. Specijalne metode mjerenja temperature

5.4.1. Segerovi stošci

U tehnološkim procesima i operacijama, gdje je važna konačna temperatura, upotrebljavaju se stošci izrađeni od raznih silikata. Ovi se stošci omekšavaju na određenoj temperaturi, a vrh im se savija prema podlozi. Kad vrh dotakne podlogu, postignuta je temperatura za koju je stožac predviđen. Segerovi stošci se naručito primjenjuju u keramičkoj industriji i to za temperaturu između 600°C i 1200°C . Tačnost mjerenja iznosi od ± 20 do $\pm 30^{\circ}\text{C}$. Važno je pomenuti da omekšanje stožca ne zavisi samo od konačne temperature nego i od vremena izlaganja toj temperaturi.

5.4.2. Metalna tijela za topljenje

Metalna tijela za topljenje služe na isti način kao i Segerovi stošci, a sastoje se od raznih legura. Dok Segerovi stošci imaju prilično širok raspon omekšanja, talište metalnih tijela za topljenje leži u granicama od $\pm 7^{\circ}\text{C}$. Područje primjene je od 100°C do 1600°C .

5.4.3. Pirometri boje ili pirometri odnosa

Izvjerni materijali, najčešće soli metala, mijenjaju boju u zavisnosti od temperature. To je iskorišteno za mjerenje površinske temperature. Postoje jednostavne i složene mjerne boje. Ove boje se isporučuju u obliku praha, otapaju se u alkoholu i nanose na površinu čija se temperatura želi izmjeriti.

Temperatura se može očitati nakon pola sata, dok se boja počinje mijenjati poslije dvije do tri minute. Ukoliko promjena boje započne odmah nakon nanošenja na površinu, tada je temperatura površine viša od one za koju se dotična boja može upotrebiti.

Promjena boje osjetljivih na promjenu temperature mogu se zapravo odrediti pojedina stacionirana stanja. Neke boje koje su osjetljive na temperaturu: ružičasta/plava (40°C), bijela/smeđa (175°C), zelena/smeđa (1000°C), siva/crnosmeđa (1200°C)

5.5. Kontrola i kalibriranje termometara

Tačnost mjerenja temperature sa nekim termometrom nalazi se u granicama dopuštenih tolerancija samo onda ako je sam instrument dobro podešen i ako je ispravno postavljen na mjerno mjesto.

Održavanje i kontrola električnih pokazivača zahtijeva posebnu stručnost i opremu. Mnoge tvornice, a pogotovo manji pogoni to nisu u stanju. Osim kontrole instrumenata u slučaju netačnog pokazivanja, potrebno je vršiti i kalibriranje termometra. Pod kalibriranjem se podrazumjeva podešavanje instrumenta da bi njegovo pokazivanje bilo tačno.

Ako je instrument ispravno postavljen, kontrola se može najčešće vršiti i u pogonu, periodičnom kontrolom električnog otpora vodiča. Pokazivač električnih termonaponskih termometara mogu se kontrolirati dovođenjem određenih napona i upoređujući pokazivanje instrumenta s tabličnim vrijednostima termonapona za određeni termopar. Sam tehnološki proces ponekad može ukazati na netačnost mjerenja temperature. Na veoma važnim mjestima se postavljaju 2 termometra različite izvedbe.

U slučajevima kada postoji opravdana sumnja u ispravnost termometra, mora se vršiti kontrola termometara. Nakon zakonski propisang roka termometri se moraju kalibrirati u za to ovlaštenim kalibracionim ili ispitnim laboratorijama.

6. MJERENJE UGAONE BRZINE I BROJA OBRTAJA

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Mjerenje ugaone brzine pomoću tahometara
3. Senzori ugaone brzine

6.1. Uvod

Ugaona brzina nekog objekta se definišira kao promjena vrijednosti ugla rotacije u jedinici vremena i predstavlja mjeru brzine kojom se objekat obrće.

Najčešća jedinica za broj obrtaja je obrtaj po minuti (round per minute), ali može se koristiti bilo koja jedinica mjere ugla po jedinici vremena. Translatorna i ugaona brzina u tehničkoj praksi mjere se u širokom opsegu: translatorna brzina 0-15000 m/s, a ugaona 0-20000 rad/s. Danas se za mjerenje ugaone brzine prema ISO sistemu jedinica koristi jedinica s^{-1} .

Senzori za mjerenje ugaone brzine se također koriste kod sistema automatskog upravljanja, kao što su ABS (Antilock Brake Sistem), brzina približavanja alata obratku, kod robota itd.

Uređaji za mjerenje ugaone brzine, kojom se obrću rotirajući elementi, nazivaju se tahometri.

6.2. Mjerenje ugaone brzine pomoću tahometara

Za mjerenje mehaničke veličine, ugaone brzine, koriste se različiti principi na kojima su konstruirani tahometri.

Prema tipu konverzije ulaznog signala u izlazni razlikuju se:

- mehanički,
- magnetni,
- elektromehanički i
- stroboskopski.

Mehanički tahometri mogu biti:

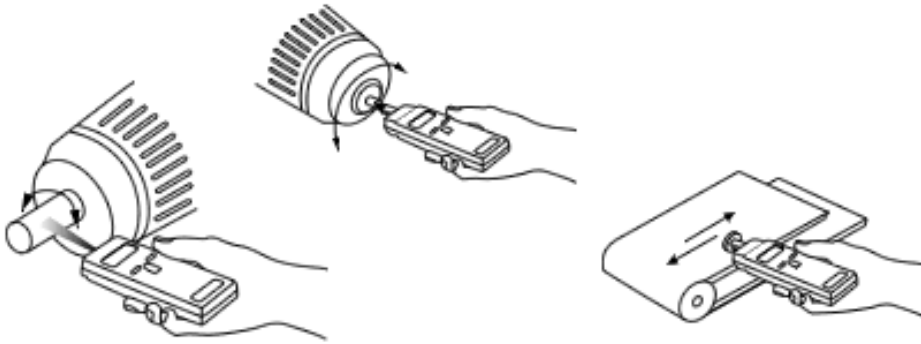
- centrifugalni,

- frikcioni,
- vibracioni,
- hidraulički i
- pneumatski.

Mjerenja se mogu vršiti:

- kontaktnim,
- bezkontaktnim tj. optičkim metodama
- kontaktnim metodama na traci.

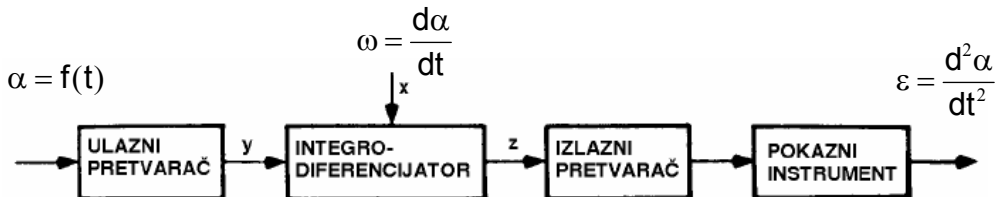
Metode mjerenja su prikazane na slici 6.1.



Slika 6.1. Mjerenje ugaone brzine:
a) optičko, b) kontaktno, c) kontaktno na traci

6.2.1. Principi rada senzora brzine

Osnovni element senzora brzine je diferencijator, koji omogućava automatsku konverziju mjerene ulazne veličine i izlaznog signala proporcionalan izvodu te veličine.



Slika 6.2. Principijelna šema senzora za brzinu i ubrzanje

Integratori i diferencijatori se razlikuju

- po fizikalnom principu rada mehanički, elektromehanički, električni, elektronski, optički i dr.
- po tipu procesa koji služi za integriranje i diferenciranje (stacionarni, nestacionarni),
- po tipu operacija (integrator, diferencijator) i
- po strukturi (direktni, inverzni).

$$\omega_{\alpha} \rho = \omega_{\beta} r$$

$$\frac{d\alpha}{dt} \rho = \frac{d\beta}{dt} r$$

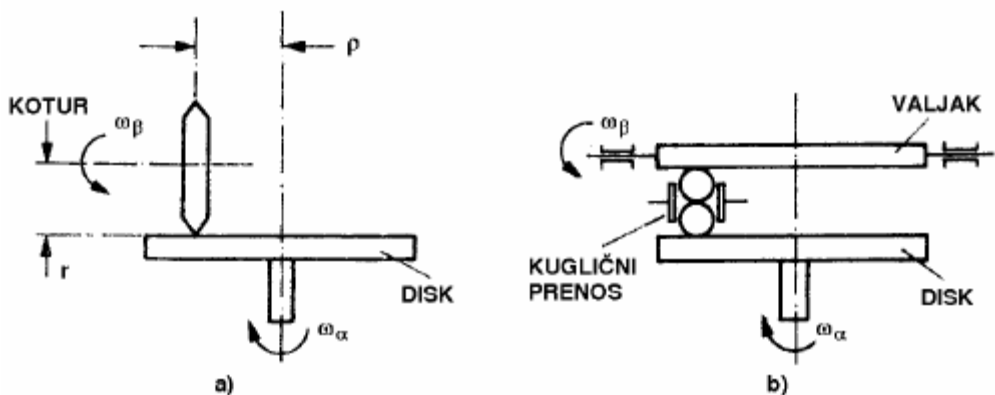
gdje su:

ω_{α} , ω_{β} su ugaone brzine diska i kotura,

α i β ugaoni pomjeraji njihovih osa,

te ρ i r pozicija i radijus kotura

Najčešće se koriste mehanički tahometri. Na slici 6.3. prikazana je šema mehaničkog tahometra sa kuglama.



Slika 6.3. Frikcioni integrodiferencijator:
a) sa koturom i diskom, b) sa kugličnim prenosom

6.3. Senzori ugaone brzine

6.3.1. Centrifugalni senzor

- Centrifugalna sila i njena komponenta duž ose:

$$F = m\rho\omega^2 \quad \text{i} \quad F_{os} = F / 2\text{tg}\alpha$$

- Geometrijske relacije:

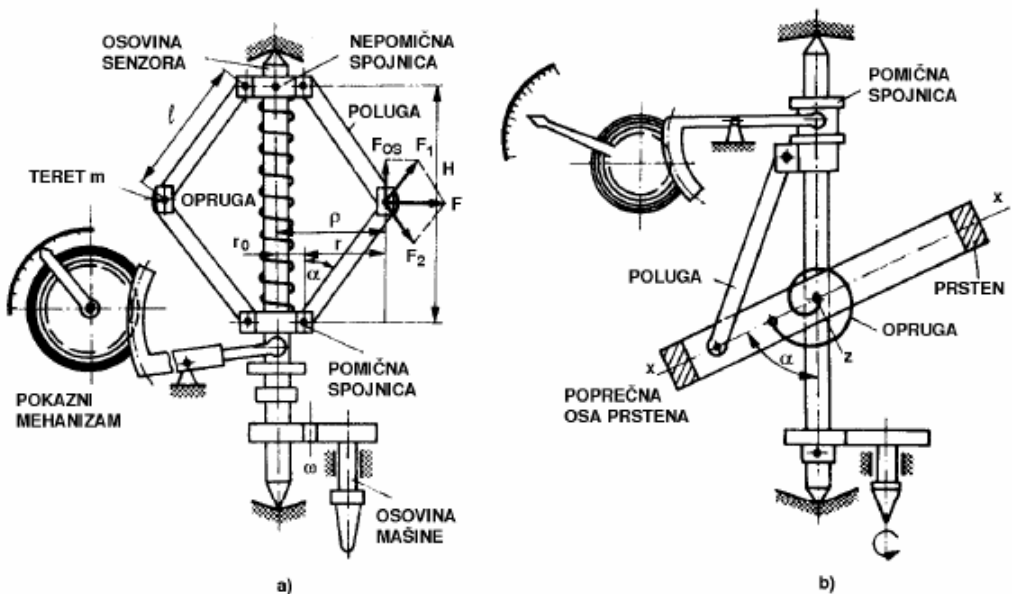
$$\rho = r + r_0 \quad \text{i} \quad r = l \sin \alpha, \quad F_{os} = \frac{m(r_0 + l \sin \alpha)}{2\text{tg}\alpha} \omega^2.$$

- Centrifugalni senzor sa prstenom

$$\omega = \frac{2(\alpha - \alpha_0)M_0}{(Ix - Iz) \sin 2\alpha},$$

- Centrifugalni senzor sa kuglama:

$$\omega = A \cdot \sqrt{\frac{z_1 + z_0}{(2l - z_0) \left(1 + \frac{2r_0}{(4lz_0 - z_0^2)^{1/2}} \right)}}$$



Slika 6.4. Centrifugalni senzor: a) sa kuglama, b) sa prstenom

6.3.2. Magnetni senzor

- Jednačina ravnoteže momenata:

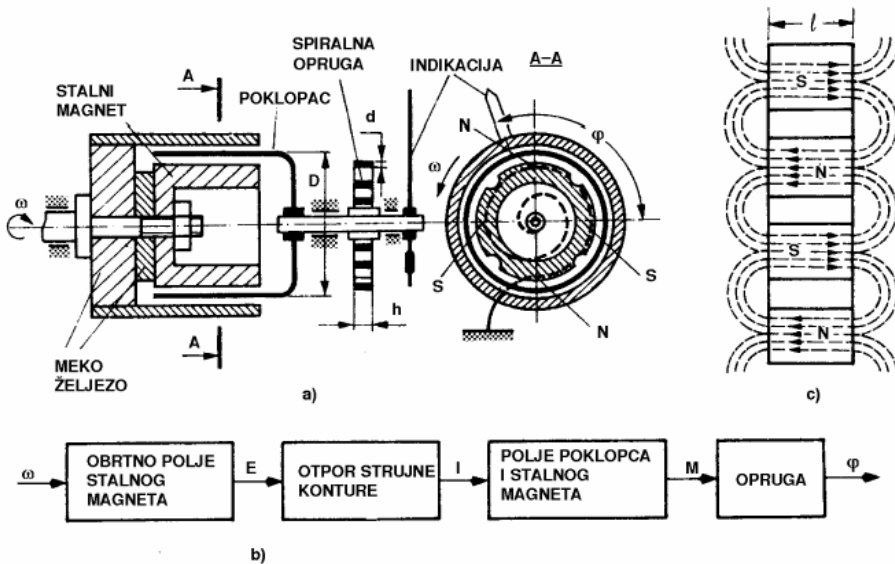
$$BH \frac{D}{2} 2p = \frac{Ebh^3}{12L} \alpha$$

- Struja u poklopcu i elektromotorna sila E:

$$I = 2U / R, U = 2Blv = 2Bl \cdot (D/2)\omega,$$

- Linearna statička karakteristika:

$$\alpha = \frac{12(BID)^2 \Delta 2 pL}{k_s \rho EBh^3} \omega = k\omega$$



Slika 6.5. Magnetni senzor: a) funkcionalna šema, b) lanac konverzija, c) magnetno polje vrtložnih struja

6.3.3. Tahogeneratori

- Indukovana elektromotorna sila E proporcionalna je fluksu pobude i brzini obrtanja ω :

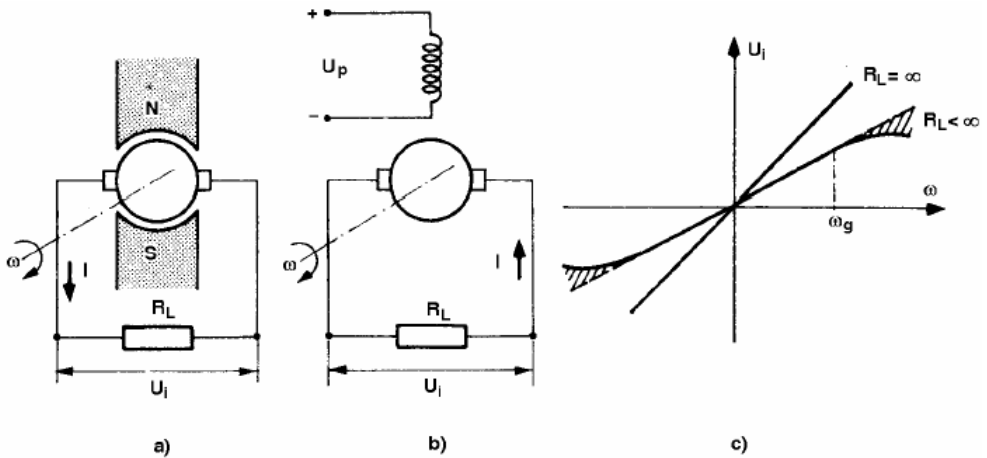
$$E = c\Phi\omega$$

- Struja u rotoru kola:

$$I = \frac{E}{R_T + R_L} = \frac{c\phi\omega}{R_T + R_L}$$

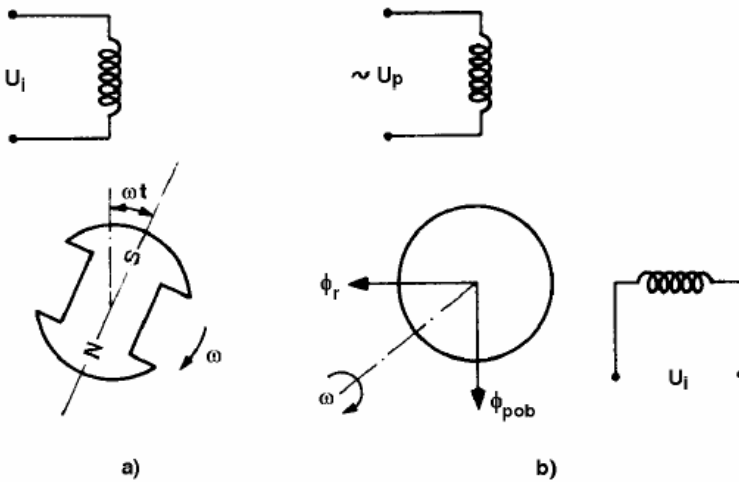
- Izlazni napon tahogeneratora proporcionalan je brzini vrtnje,

$$U_i = \frac{c\phi\omega}{R_T + R_L} R_L = k\omega$$



Slika 6.6. Istosmjerni tahogenerator:

- a) pobudno kolo sa stalnim magnetom, b) nezavisno pobudno kolo,
c) uticaj opterećenja na statičku karakteristiku

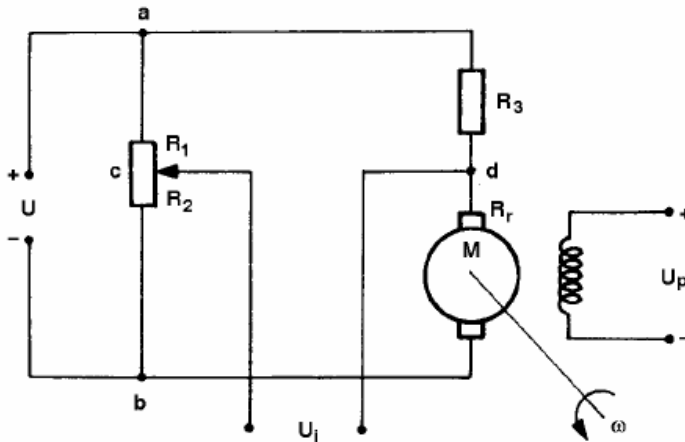


Slika 6.7. Naizmjenični tahogenerator:

- a) sinhroni tahogenerator, b) asihroni

Naizmjenični tahogeneratori prave se kao sinhroni ili asihroni tahogeneratori. Djelovanjem fluksa ϕ_T , u izlaznom namotaju nastaje naizmjenična elektromotorna sila iste frekvencije kao i pobudni napon i sa amplitudom koja je proporcionalna brzini vrtnje rotora, tj. Izlazni signal je u fazi sa pobudnim signalom, a za suprotni smjer vrtnje faza se pomjeri za π .

6.3.4. Tahometarski mostovi



Slika 6.8. Tahometarski most

Ako u izlaznom kolu ne teče struja ($R_{opt}=\infty$), tada su izlazni napon i struja rotora:

$$U_i = U_{ac} - U_{ad} = UR_1 / (R_1 + R_2) - I_T R_3$$

$$I_T = (U - k\omega) / (R_T + R_3)$$

Eliminacijom promjenljive I_T , dolazi se do rješenja

$$U_i = U \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_T + R_3} \right) + \frac{kR_3}{R_T + R_3} \omega.$$

Ravnoteža se postiže pomjeranjem klizača potenciometra dok motor miruje ($\omega=0$). $R_1 R_T = R_2 R_3$ – ravnoteža mosta

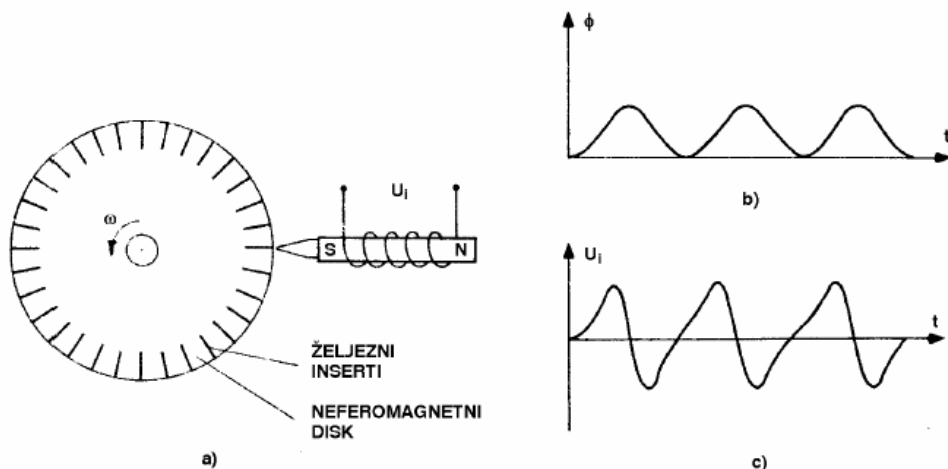
Izlazni napon direktno je proporcionalan ugaonoj brzini:

$$U_i = kR_3 \omega / (R_T + R_3) = k_{TM} \omega,$$

$$U_i = kR_3 \omega / (R_T + R_3) = k_{TM} \omega,$$

6.3.5. Elektromagnetni senzori

Rade na principu promjene otpornosti magnetnog kola usljed prolaska željeznih zubaca diska koji je montiran na rotirajuću osovinu.



Slika 6.9. Elektromagnetni senzor ugaone brzine indukcionog tipa:

a) principijelna šema, b) vremenska promjena magnetnog fluksa,
c) promjena izlaznog napona sa brzinom vrtnje

$\phi = M/R_m$ – elektromagnetni fluks

$E = -d\phi/dt$ – elektromotorna sila

Povećanje broja inserata (zubaca) N povoljno utiče na tačnost mjerenja pomoću frekvencometra.

$$f = N f_0.$$

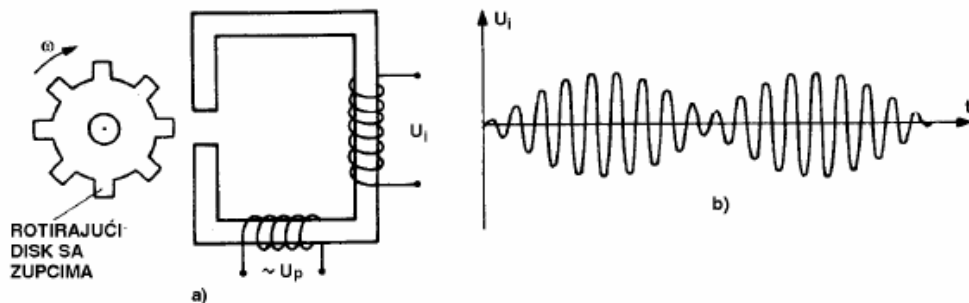
Srednja vrijednost ugaone brzine je:

$$\omega_{sr} = 2 \pi N/T$$

6.3.6. Elektromagnetni senzor transformatorskog tipa

Na primar se dovodi naizmjenični napon napajanja visoke frekvencije, a na sekundaru se dobija izlazni napon. Za tačno očitavanje potrebno je zadovoljiti uslov $f_p \gg N f_0$.

Kod digitalnih očitavanja izlaza prvo se mora izvršiti demodulacija, zatim transformacija u slijed impulsa, i na kraju njihovo brojanje.



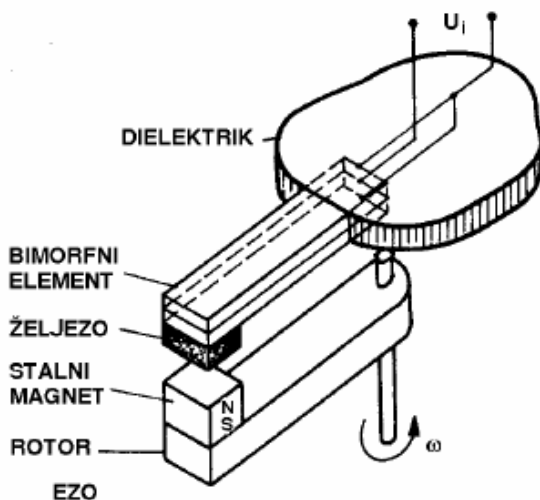
Slika 6.10. Elektromagnetni senzor transformatorskog tipa:
 a) principijelna izvedba, b) oblik izlaznog napona

6.3.7. Piezoelektrični senzori

Osnova za gradnju piezoelektričnog tahometra je bimorfni piezoelement u obliku trake. Zbog direktnog piezoelektričnog efekta nastaju impulsi naponskog signala na izlazu. Frekvencija ovih impulsa proporcionalna je brzini vrtnje

Zbog malih dimenzija piezoelektrični tahometar pogodan je za gradnju u minijaturnim servosistemima, u robotici itd.

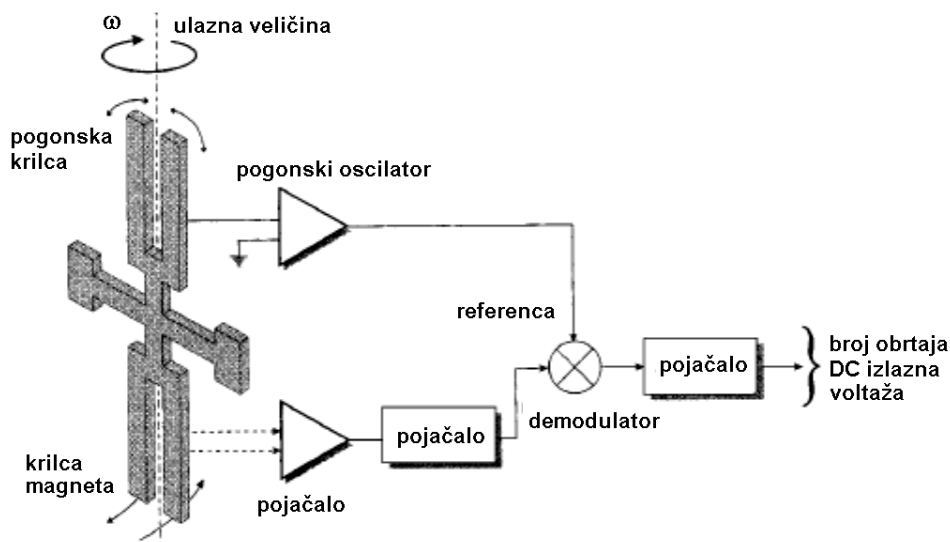
Tipična tačnost je +/- 0,5 - 1,5%.



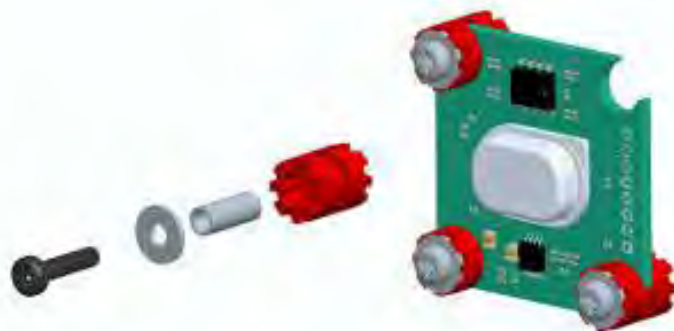
Slika 6.11. Piezoelektrični tahometar

6.3.8. Žiroskopski senzori ugaone brzine

Brojni žiroskopski senzori ugaone brzine su razvijeni tako da koriste minijaturne kvarcne elemente. Kvarcni element vibrira sa njegovom prirodnom frekvencijom. Obrtno kretanje uzrokuje sekundarne vibracije, koje su kada se demoduliraju proporcionalne ugaonim vibracijama.



Slika 6.12. Žiroskopski senzor



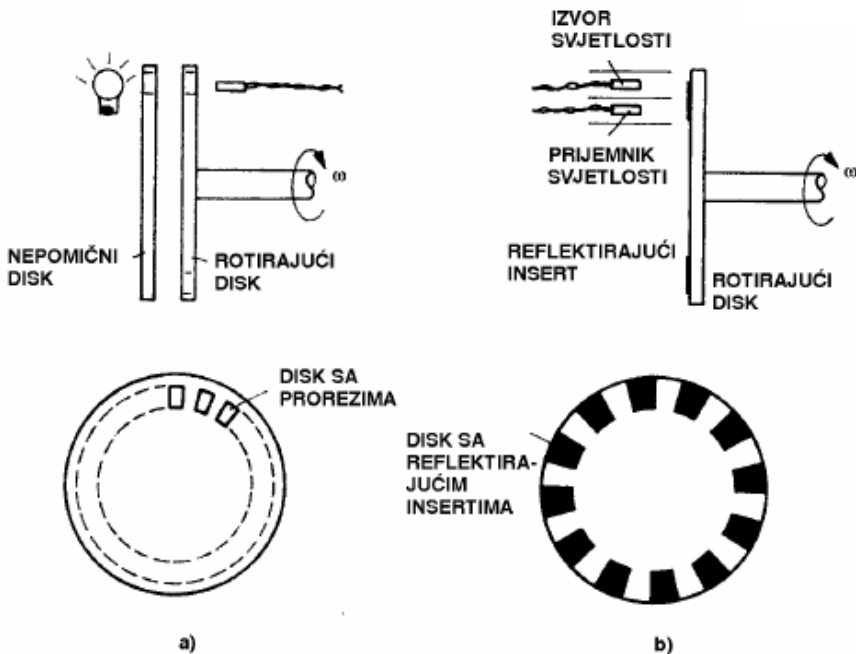
Slika 6.13. Izgled žiroskopskog senzora ugaone brzine sa pratećom elektronikom firme GyroChip

Zbog različitih dimenzija u kojima se izrađuju žiroskopski senzori se koriste u automobilskoj i avionskoj industriji kao i u vojne svrhe.



Slika 6.14. Stabilnost leta kod Apache Longbow helikoptera

6.3.9. Optoelektronski senzor

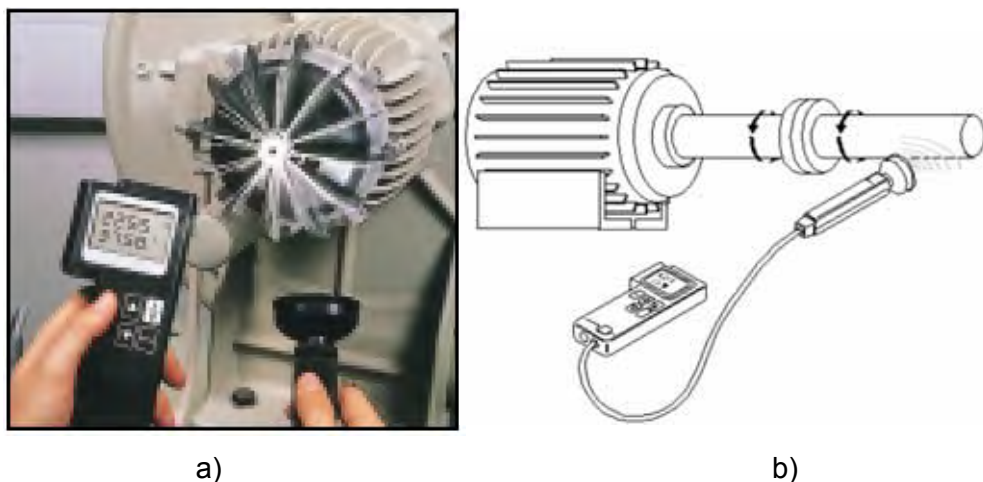


Slika 6.15. Optoelektronski tahometar: a) izvor i prijemnik svjetlosti su na suprotnim stranama diska, b) izvor i prijemnik svjetlosti na istoj strani diska.

Spada u grupu senzora sa impulsnim izlaznim signalom čija je frekvencija jednaka višestrukoj frekvenciji obrtanja osovine. Svjetlosni predajnik je u većini slučajeva LED (Light Emiting Diode), a prijemnik fotočelija. Mjerni opseg je 0 – 100000 o/min.

6.3.10. Stroboskopski senzor

Radi na principu stroboskopskog efekta - prividno zaustavljanje osovine kada se ona osvjetljava impulsima svjetlosti čija je frekvencija jednaka frekvenciji obrtanja osovine. Isti efekat se primjećuje i kad je frekvencija $f = i f_s$



Slika 6.16. Stroboskopski mjerni uređaj testo 745:
a) mjerenje na ploči, b) mjerenje na vratilu

Rotirajuće tijelo se obilježi uočljivim znakom i osvjetli bljeskajućim svjetlom, te kontinuiranim podešavanjem frekvencije podesi najveća moguća frekvencija za koju se uočava sinhronizam.

$$f = \frac{f_{\min} \cdot f_{\max}}{f_{\max} - f_{\min}},$$

Ako bljeskalica ima konstantnu frekvenciju f , tada se na čelo vratila čija se ugaona brzina mjeri učvrsti bijela ploča sa crnim segmentima. Broj segmenata iznosi $q=1,2,3,\dots$ i oni su poredani u koncentrične krugove.

$$n = \frac{f}{q} \pm \frac{z}{q}$$

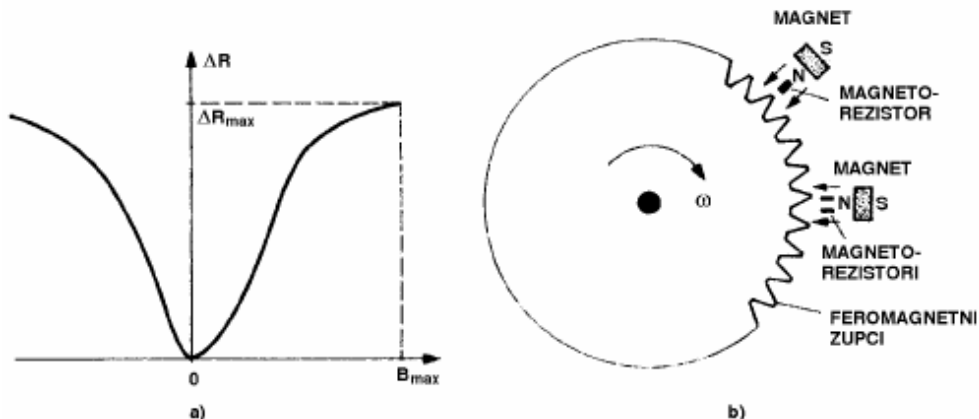
z – broj segmenata koji je prošao kroz jednu tačku u jedinici vremena

Pri niskim frekvencijama do ($f < 10\text{Hz}$) dolazi do trperenja slike. Mjerni opseg 25000 bljeskova u minuti, a tačnost $\pm 1\%$.

Mjerno područje za stroboskopsko mjerenje: 100 – 20000 rpm. Mjerno područje za mehaničko mjerenje: 20 – 20000 rpm. Mogućnost mjerenja mehaničkim i stroboskopskim putem. Reflektujuća traka na mjerenom objektu nije neophodna.

6.3.11. Magnetorezistivni senzor

Magnetorezistivni senzor mijenja svoj otpor R u zavisnosti od magnetnog polja. Nailaskom zubaca od feromagnetnog materijala mijenja se magnetno polje u kojem se nalazi senzor, tako da se na izlazu dobija odgovarajući naponski impuls. Šema sa dva magnetorezistora omogućava i detekciju smjera vrtnje.

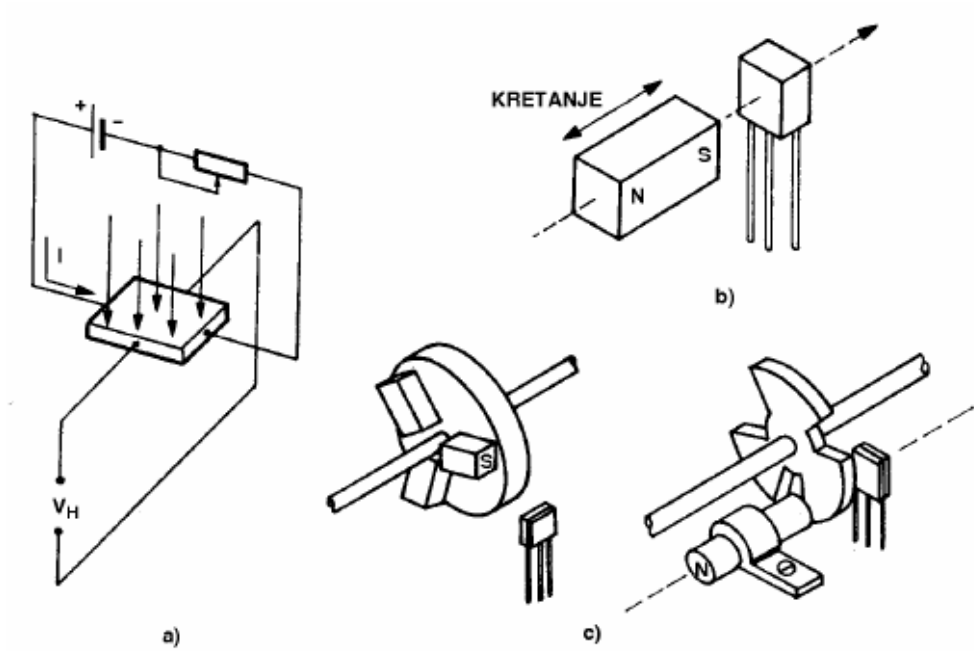


Slika 6.17. Magnetorezistivni senzor: a) tipična karakteristika, b) praktična izvedba za detekciju ugaone pozicije (brzine)

6.3.12. Senzori na bazi Holovog efekta

Holov efekat nastaje kada se poluprovodnik kroz koji teče struja unese u magnetno polje.

Ako se poluprovodnička pločica nalazi u fiksiranom položaju okomito na magnetno polje indukcije B i ako kroz pločicu protiče stuja I , tada se u smjeru poprečno na tok struje javlja tzv. Holov napon



Slika 6.18. Senzor na bazi Holovog efekta: a) Holov efekt, b) modifikovani senzor sa digitalnim izlazom - Holov prekidač, c) detekcija ugaone brzine pomoću Holovog prekidača

7. MJERENJE OBRITNOG MOMENTA I SNAGE

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Mjerenje obrtnog momenta pomoću mjernih traka
3. Mjerenje obrtnog momenta pomoću induktivnih senzora
4. Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim torziometrom sa stroboskopskim indikatorom
5. Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim dinamometrima
6. Transmisioni dinamometri
7. Mjerenje snage pomoću kočnica
8. Ostali načini mjerenja obrtnog momenta i snage

7.1. Uvod

Moment obrtanja djeluje na vratila, spojnice, doboše, zupčanike itd. Može da bude stacionaran tj. da se ne mijanja sa vremenom, $dM/dt = 0$ i nestacionaran da se mijenja sa promjenom vremena $M(t) \neq 0$.

Mjerenjem dinamičkog obrtnog momenta dobija se informacija o tome kakvo je opterećenje ispitivanog rotirajućeg dijela, da li je ravnomjerno, periodično, impulsno ili kombinovano. Taj podatak je važan u slučaju dijagnosticanja tj. određivanja tehničkog stanja sistema. Na osnovu rezultata mjerenja moće se vršiti uklanjanje nastalih poremećaja.

Drugi važan razlog mjerenja obrtnog momenta je provjera postojećeg konstruktivnog rješenja rotirajućeg sistema. Često je potrebno prije isporuke takvih proizvoda; pumpi, motora, ili bilo kojih konstrukcija koje sadrže rotirajuće dijelove, izvršiti mjerenje obrtnog momenta.

Posebna pažnja posvećuje se mjerenju obrtnog momenta na vratilima. Moment **M** pomnožen sa ugaonom brzinom ω predstavlja mehaničku snagu koju vratilo prenosi.

Postoje različiti metodi i postupci mjerenja obrtnog momenta i snage. Uređaji i mjerni sistemi koji se koriste za ove namjene rade na sljedećim principima:

- mehaničkom,
- električnom,
- optičkom itd.

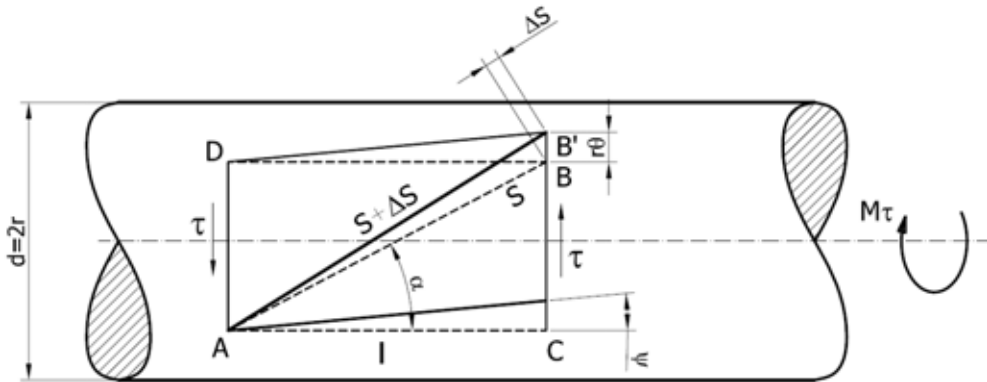
Mjerenje obrtnog momenta najčešće se vrši pomoću tenzometarskih mjernih traka. Trake lijepe na elastični torzioni dinamometar. To je elastični

dio koji se ugrađuje između motora i ulaznog vratila neke radne mašine. Ugradnja se vrši pomoću krutih spojnice koje omogućavaju radijalno i aksijalno podešavanje vratila. Ukoliko nije moguće u pogonskim uslovima izvršiti ugradnju ovakvih jedinica, tada se pristupa lijepljenju trake na elemente transmisije čime se postiže potpuna tačnost prenosa opterećenja.

Mjerenje obrtnog momenta najčešće se vrši pomoću mjernih traka .a princip može biti mehanički i električni (elektrooptorne mjerne trake).

7.2. Mjerenje obrtnog momenta pomoću mjernih traka

Mjerenje obrtnog momenta najčešće se vrši pomoću mjernih traka. Na površini vratila koja su opterećena momentom uvijanja javljaju se najveći tangencijalni naponi.



Slika 7.1. Mjerenje deformacija vratila opterećenog momentom uvijanja

Objašnjenje principa mjerenja deformacija vratila opterećenog na uvijanje prikazano je na slici 7.1.

Mjerna traka dužine $AB = S$ zalijepi se pod uglom α u odnosu na ono vlakno vratila koje je najviše udaljeno od ose. Nakon dejstva momenta uvijanja traka promijeni dužinu tako da se od dužine S poveća na $S + \Delta S = AB'$, pri čemu lijevi dio trake ostaje nepomičan. Dva presjeka na međusobnom rastojanju l uvijaju se za ugao

$$\theta = \frac{M_1 \cdot l}{G \cdot I_0} \dots \dots \dots (7.1)$$

gdje je:

M_1 – moment uvijanja (torzije),

G – modul klizanja,

I_0 – polarni moment inercije presjeka.

Tačka **B** kraja trake nakon uvijanja pomjerila se u položaj **B'** i opisala luk $r \cdot \theta$. Iz trougla $\triangle ABB'$ po kosinusnoj teoremi slijedi:

$$(S + \Delta S)^2 = S^2 + r^2 \cdot \theta^2 - 2 \cdot S \cdot r \cdot \theta \cdot \cos(90 + \alpha) \dots\dots\dots(7.2)$$

Nakon kvadriranja dobije se:

$$S^2 + 2S\Delta S + \Delta S^2 = S^2 + r^2 \cdot \theta^2 + 2 \cdot S \cdot r \cdot \theta \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots(7.3)$$

Poslije zanemarivanja malih veličina višeg reda dobije se:

$$S\Delta S = r \cdot \theta \cdot S \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots(7.4)$$

Dilatacija mjerne tačke može se napisati u obliku:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} = r \cdot \theta \cdot \frac{\sin \alpha}{S} = \frac{r \cdot M_1 \cdot l}{S \cdot G \cdot I_0} \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots(7.5)$$

Kako je $S = \frac{l}{\cos \alpha}$, dobije se:

$$\varepsilon = \frac{M_1}{2 \cdot G \cdot W_0} \cdot \sin 2\alpha \dots\dots\dots(7.6)$$

gdje je:

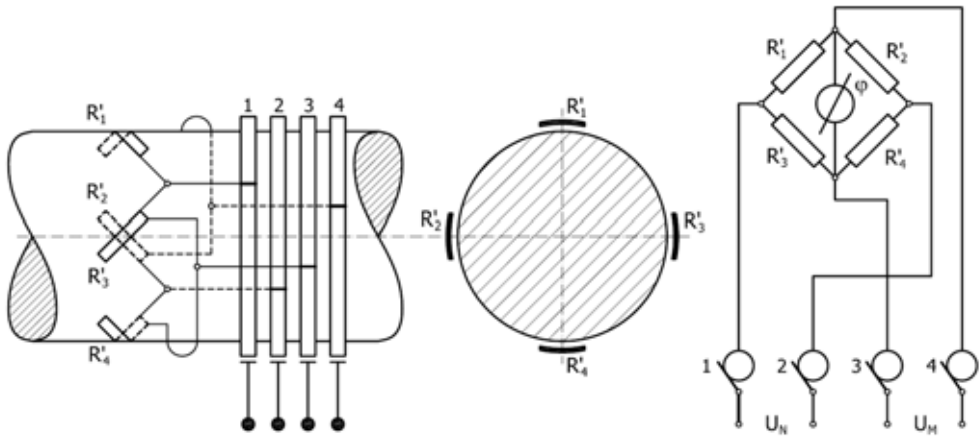
$W_0 = I_0/r$ – polarni otporni moment inercije poprečnog presjeka

Veličina $\sin 2\alpha$ ima maksimalnu vrijednost +1 za $\alpha = 45^\circ$ i 225° i vrijednost -1 za $\alpha = 135^\circ$ i 315° .

Maksimalna dilatacija je:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{M_1}{2 \cdot G \cdot W_0} \dots\dots\dots(7.7)$$

Na slici 7.2. šematski je prikazano povezivanje mjernih traka sa kliznim prstenovima kao i Wheatstone-ov most za mjerenje obrtnog momenta. Četiri mjerne trake zalijepljene su pod uglovima 45° , 135° , 225° i 315° . Prilikom uvijanja dvije mjerne trake R_2 i R_3 se izdužuju, a trake R_1 i R_4 skraćuju.



Slika 7.2. Mjerni sistem za mjerenje obrtnog momenta:
a) raspored mjernih traka, b) mjerni Wheatstone-ov most

Svaka traka ima otpor R i relativnu promjenu otpora $R_r = \frac{\Delta R}{R}$.

Mjerni most čine četiri aktivne trake, a mjerna sprega je ujedno i temperaturno kompenzirana. Izlazni napon koji se mjeri je:

$$U_M = U_N \frac{R \cdot (1 + R_r)}{2 \cdot R} - \frac{R \cdot (1 - R_r)}{2 \cdot R} = U_N \cdot R_r \quad \dots\dots\dots (7.8)$$

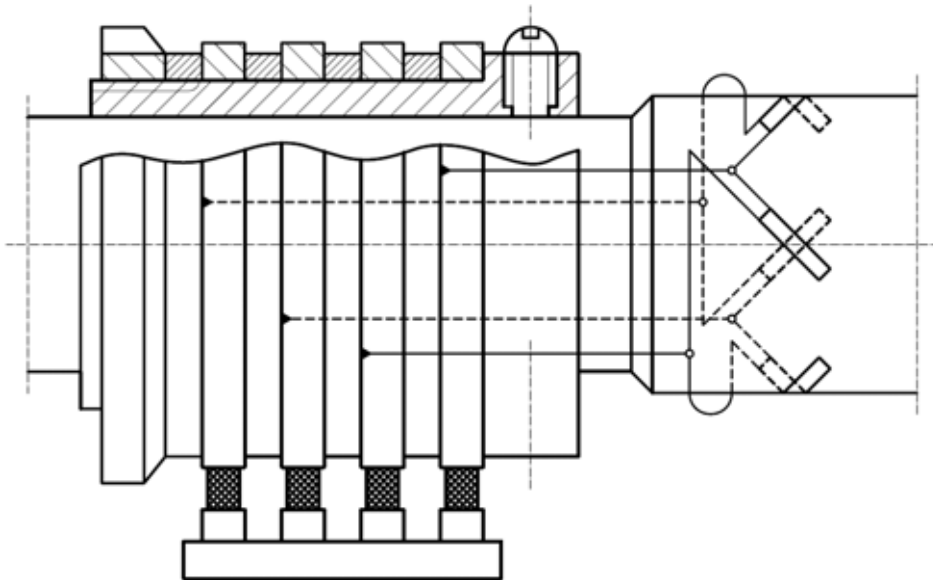
Ako se uvede oznaka za faktor mjernih traka $K=R_r / \varepsilon$ dobije se napon:

$$U_M = K \cdot \varepsilon \cdot U_N \quad \dots\dots\dots (7.9)$$

Na osnovu izvedenog izraza za računanje deformacije ε i izmjenog napona izračuna se moment uvijanja:

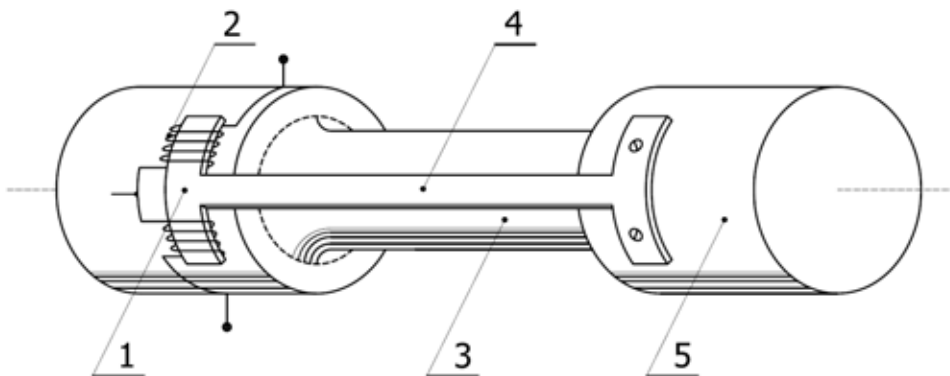
$$M_t = 2 \cdot G \cdot W_0 \cdot \varepsilon_{\max} = \frac{2 \cdot G \cdot W_0 \cdot U_M}{K \cdot U_N} = K_M \cdot U_M \quad \dots\dots\dots (7.10)$$

Klizni prstenovi, slika 7.3., treba da imaju što manji spoljašnji prečnik zbog smanjenja obodne brzine, trenja i zagrijavanja na mjestu kontakta. Oni se međusobno, a veza kliznih prstenova i vratila se postiže pomoću čaure od izolacionog materijala. Između kliznih prstenova postavljaju se odstoje čaure, slika 7.3.



Slika 7.3. Veza kliznih prstenova i vratila

7.3. Mjerenje obrtnog momenta pomoću induktivnog senzora



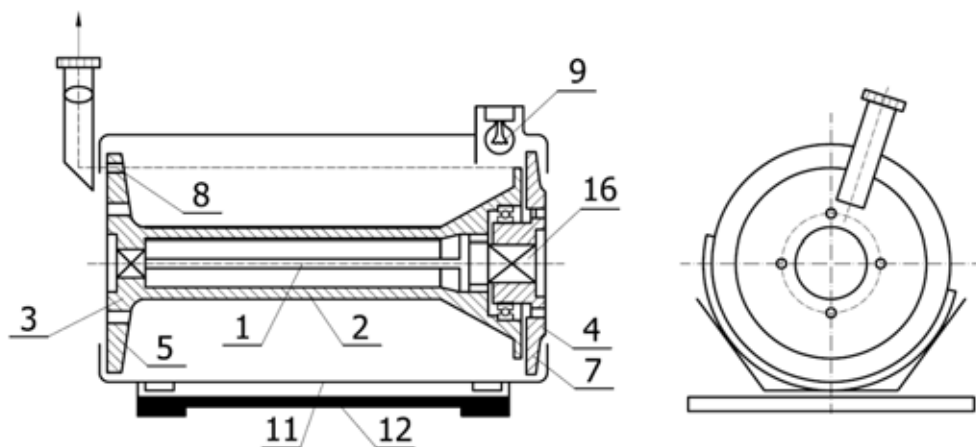
Slika 7.4. Torziometar : 1-jezgro, 2-kalem, 3-torzioni elastični element, 4-nosač jezgra, 5-vratilo

Induktivni pretvarač za mjerenje obrtnog momenta zove se torziometar. Torziometar prikazan na slici 7.4. sastoji se od jezgra kod kog je jedna strana slobodna, a druga čvrsto vezana za vratilo 5. Na slobodnom kraju jezgra 1 namotani su kalemi 2. Usljed uvijanja elastičnog dijela vratila 3 induktivni pretvarač koji ima četiri kalema povezana u Wheatstone-ov most

djeluje kao diferencijalni transformator dovodeći do neravnoteže mosta. Usljed obrtanja javlja se napon direktno proporcionalan obrtnom momentu i registruje se na registracionom instrumentu.

7.4. Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim torziometrom sa stroboskopskim indikatorom

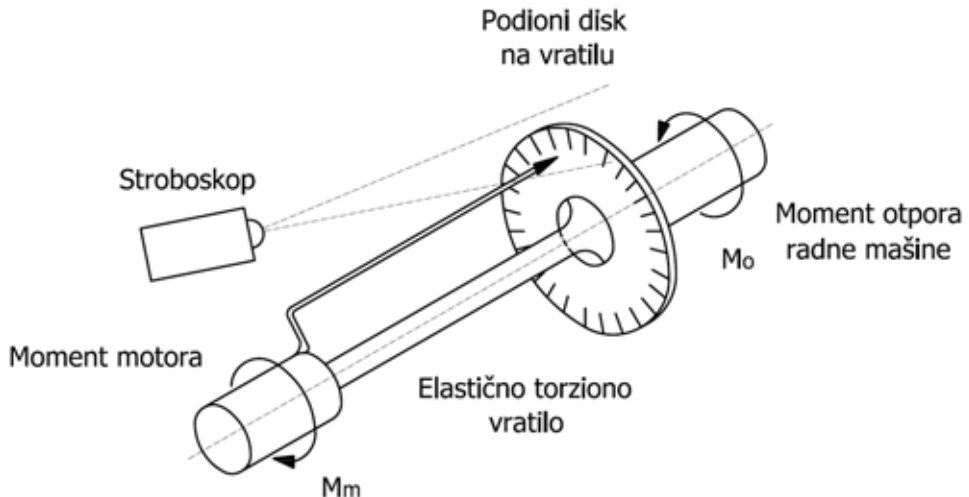
Za mjerenje obrtnog momenta koji djeluju na centrifugalnim pumpama, ventilatorima, kompresorima i elektromotorima koriste se tenziometri sa stroboskopom. Tenzometri se postavljaju između pogona i izvršnog mehanizma. Elastični dio torziometra prenosi obrtni moment zbog čega se uvija. Na osnovu ugla uvijanja računa se obrtni moment. Ovakva vrsta torziometra koristi se za mjerenje konstantnih obrtnih momenata. Na slici 7.5. prikazana je jedna konstrukcija torziometra.



Slika 7.5. Konstrukcija torziometra sa stroboskopskim očitavanjem:
1-elastični štap, 2-cijev, 3,4-prirubnice, 5,6,7- diskovi, 8-aksijalni prorez,
9-sijalice, 10-optika, 11-oklop, 12-postolje

Elastični štap 1 smješten je u cijevi 2, na čijem kraju je prirubnica 3, a na suprotnom kraju je prirubnica 4, za koju je vezan drugi kraj elastičnog štapa. Uvijanje štapa je ograničeno na taj način što su štap i cijev djelimično nazubljeni. Pomoću prirubnice 4, torziometar se spaja sa vratilom radne mašine. Na obodu diska 7 urezana je skala, a ispod njega je disk 6 na kome se nalazi indeks. Nasuprot indeksa na disku 5 postoji uski aksijalni prorez 8 kroz koji se može posmatrati položaj indeksa u odnosu na skalu. Za osvjetljenje indeksa koristi se sijalica 9, a očitavanje se vrši pomoću optičkog sistema 10.

Očitavanje mjerene vrijednosti vrši se na principu stroboskopskog efekta, slika 7.6. Oznake na skali mogu se raspoznati bez obzira na obrtanje diskova.



Slika 7.6. Princip rada torziometra sa stroboskopom

Gledanjem kroz prorez indeks i skala se vide u jednom trenutku pri svakom obrtanju diskova, tj. vidi se samo bljesak.

Kako se bljesak javlja pri svakom obrtanju stvara se utisak mirne slike. Za brojeve obrtaja vratila manje od 600 u minuti slika treperi. I pored toga brzina obrtanja kao i njen smjer mogu biti proizvoljni, vodeći računa da naprezanja diskova usljed centrifugalne sile ne prekorače dozvoljenu granicu.

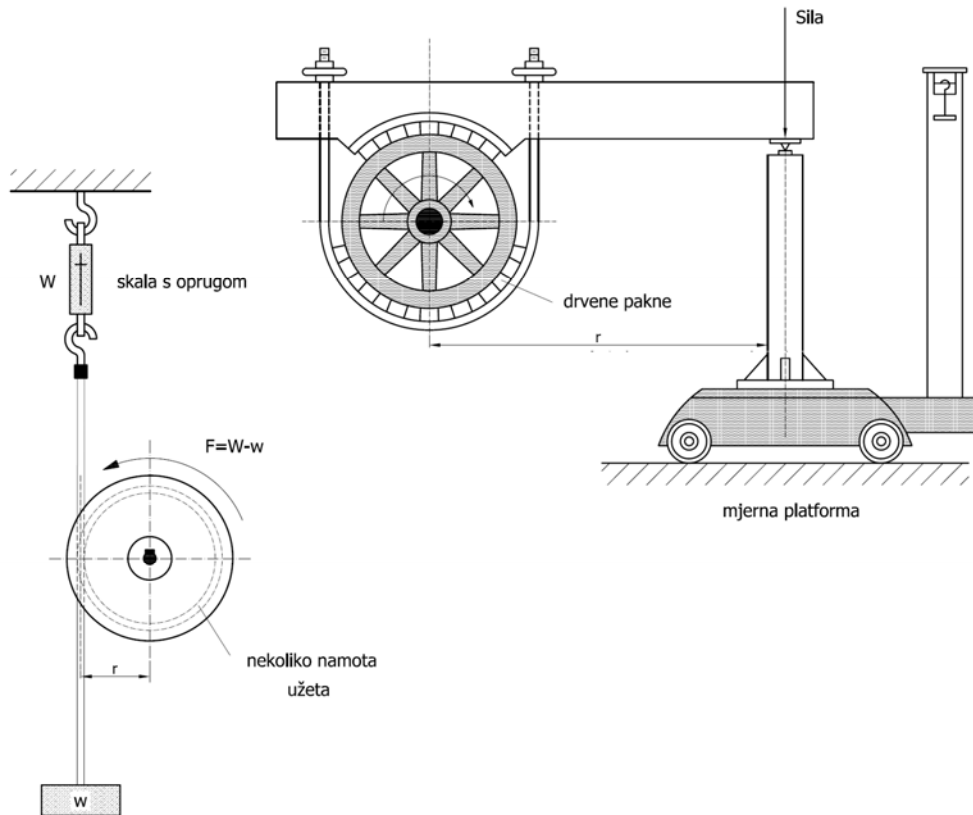
Kalibracija torziometra vrši se pomoću dvije poluge koje se učvršćuju na prirubnice 3 i 4 čiji se suprotni krajevi opterećuju jednakim tegovima. Dužina poluge pomnožena sa teretom daje veličinu momenta koji opterećuje elastični štap. Prateća dokumentacija svakog torziometra je dijagram kalibracije koji pokazuje zavisnost obrtnog momenta i ugla uvijanja štapa. Ugaona brzina mjeri se pomoću tahometra.

Na osnovu izmjenjenog momenta pomoću torziometra i ugaone brzine pomoću tahometra može se odrediti snaga $P = M \cdot \omega$.

Tačnost torziometra iznosi $\pm 0,5\%$ za opterećenje do polovine punog opterećenja predviđenog za dati elastični štap. Za opterećenje od četvrtine do polovine punog opterećenja tačnost mjerenja je $\pm 1\%$. U kompletu za mjerenje postoji nekoliko elastičnih štapova različitih prečnika od kojih svaki ima svoj opseg mjerenja. Mjerenje se vrši onim štapom kod kog je opterećenje između polovine i punog opterećenja.

7.5. Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim dinamometrima

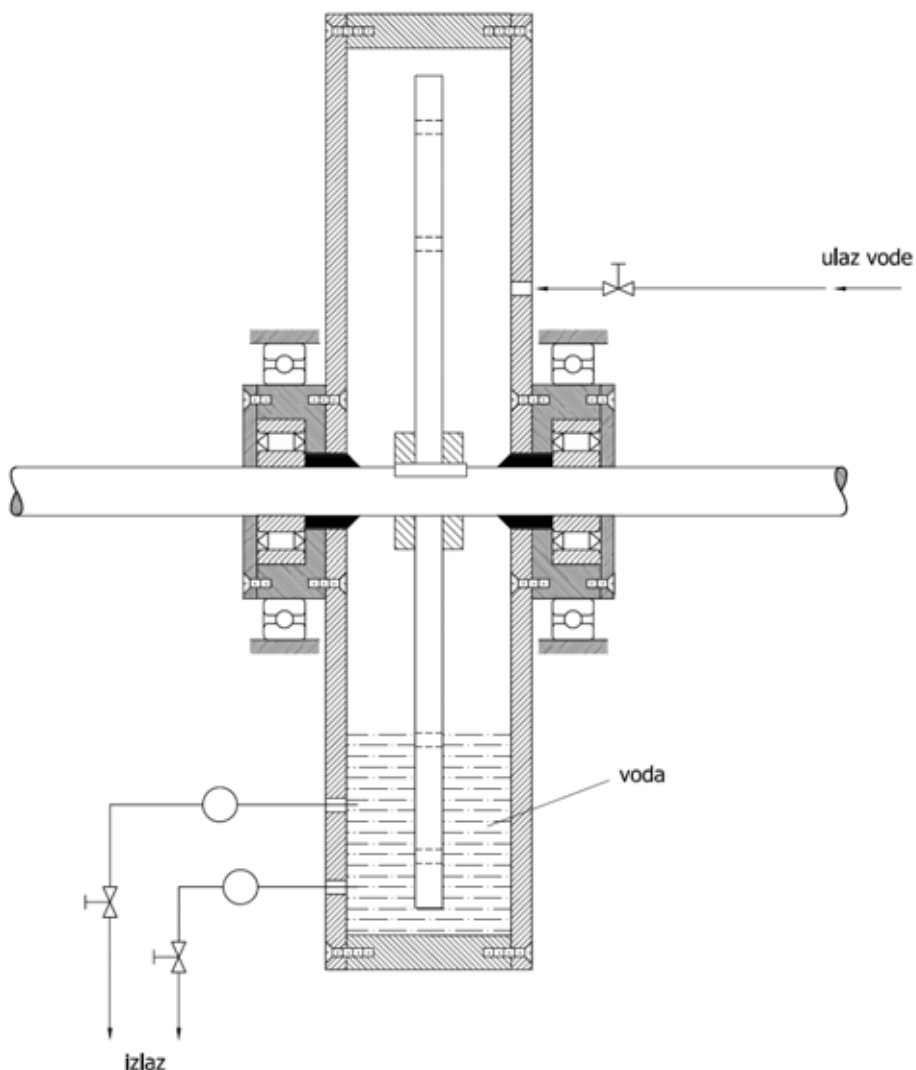
Najjednostavniji tip apsorpcionog dinamometra je **prony** kočnica, koje su striktno razvijene na čistoj frikciji (trenju) preko kog se konvertuje mehanička energija u toplotu. Postoji više tipova **prony** kočnica, dva su prikazana na slici 7.7.



Slika 7.7. Dva tipa prony kočnice

Drugi tip dinamometra funkcioniše na sličnim principima a to je vodena kočnica, koja koristi trenje u fluidu, koja usljed toga u fluidu razvija toplotu na račun ulazne mehaničke energije. Najjednostavniji primjer dinamometra sa kočenjem vodom je prikazan na slici 7.8. Kapacitet je funkcija dva faktora a to su brzina i nivo fluida (vode). ApSORpcija snage je aproksimativno funkcija kvadrata brzine, a apSORpcija na određenoj brzini može biti kontrolirana podešavanjem nivoa fluida (vode).

Ovaj tip dinamometra može biti napravljen za znatno veće kapacitete nego obična prony kočnica, jer se razvijena toplota može lako odvsti cirkulacionim sistemom kako radnog medija (fluida), tako i hlađenjem kućišta. Kućište dinamometra je oslonjeno na ležajeve sa valjčanim kotrljajnim tijelima, time je omogućena rotacija. Kod svakog drugog uređaja apsorpcionog tipa elementi teže da rotiraju sa ulaznim vratilom gonjene mašine. Kod prony kočnice, apsorpcioni element je cijeli sklop kočnice, dok je to kod vodene kočnice kućište. U svakom slučaju rotacija je posljedica čiji je uzrok uređaj na kome se mjeri sila.



Slika 7.8. Presjek tipične vodene kočnice

Mjerenjem sile na poznatom poluprečniku, obrtni moment može se dobiti iz izraza:

$$T = F \cdot r$$

Ako je poznata ugaona brzina, snaga je definisana relacijom:

$$P = 2\pi T \omega$$

gdje su:

T – obrtni moment

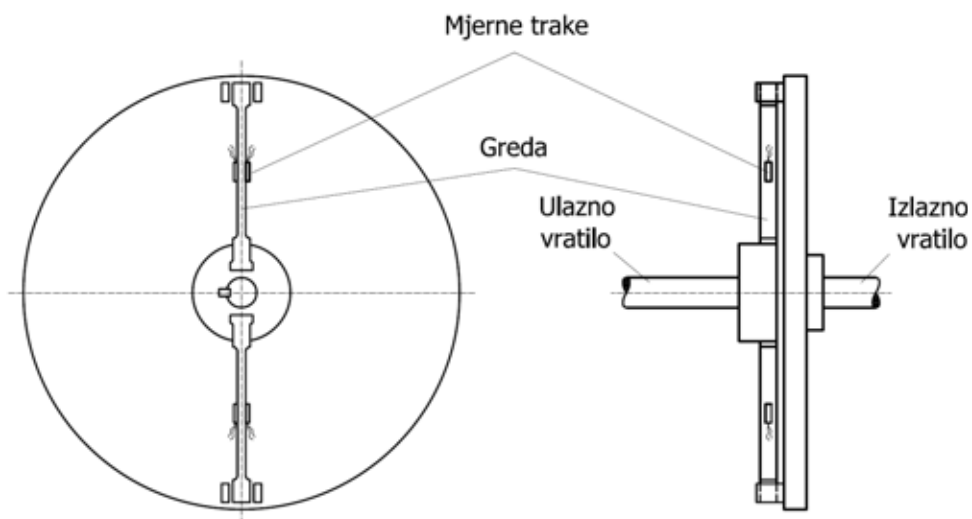
F – sila mjerena na poluprečniku r

P – snaga

ω – broj obrtaja u sekundi

7.5. Transmisioni dinamometri

Transmisioni dinamometri se mogu smatrati pasivnim uređajima. Postoje različiti tipovi transmisionih dinamometara. Različiti tipovi se koriste kod zupčastih sklopova, te kod remenih i lančanih prenosnika.



Slika 7.9. Transmisioni dinamometar sa gredom i mjernim trakama za mjerenje obrtnog momenta

Osnovu transmisionih dinamometara čini elastična epruveta koja je kalibrirana za određena naprezanja. Dinamometri ovog tipa su dostupni u izvedbama od 12 do 3500 Nm. Transmisioni dinamometar sa gredom i

mjernim trakama za mjerenje obrtnog momenta prikazan je na slici 8. Ovaj tip dinamometara je osjetljiv na promjene temperature.

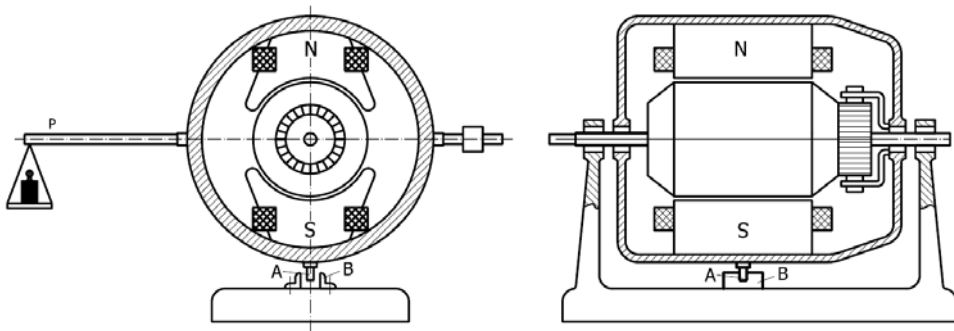
7.6. Mjerenje snage pomoću kočnica

Mjerenje snage vrši se:

- transmisionim i
- apsorpcionim metodama

Prethodno navedene metode mjerenja obrtnog momenta i preko njega preračunavanja snage spadaju u transmisione metode. Metoda mjerenja snage pomoću kočnica spada u apsorpcione metode. Zavisno od toga da li se radi o energetske mašinama kao što su turbine, motori sa unutrašnjim sagorijevanjem, ili o radnim mašinama kao što su pumpe, ventilatori, kompresori, mašina se prilikom određivanja obrtnog momenta pogoni ili koči.

Za mjerenje snage motora najčešće se koriste električne kočnice tzv. elektrodinamometri. Na slici 7.10. prikazan je elektrodinamometar kod kojeg je rotor oslonjen na dva ležišta u postolju.



Slika 7.10. Elektrodinamometar

Stator se zajedno sa polovima oslanja na vratilo preko dva kotrljajuća ležaja tako da se oko vratila može zakretati, odnosno njihati. Ograničenje zakretanja postiže se graničnicima A i B na postolju. Za stator su vezane dvije poluge. Na kraju jedne poluge nalaze se tegovi za uspostavljanje ravnoteže prije mjerenja.

Prilikom mjerenja korisne snage ispitivanog motora, elektrodinamometar radi kao generator. Rotor se pri obrtanju, slika 7.11, obrće, a tegovima mase m_t uspostavlja se ravnoteža. U provodnicima A i B rotora usljed

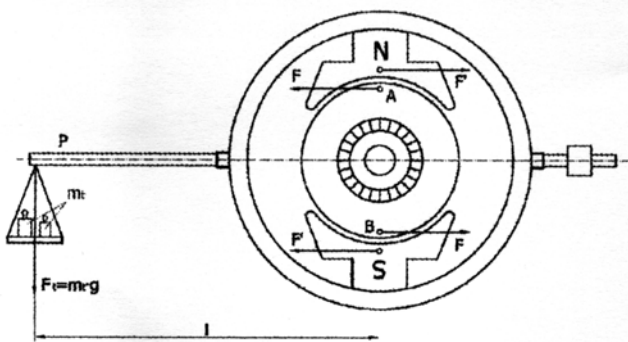
djelovanja magnetnih polova stvara se struja I . Provodnici presijecaju magnetno polje pa se javljaju sile F - F , koje obrazuju spreg suprotnog djelovanja u odnosu na obrtanje. Sile reakcije F' - F' obrazuju spreg suprotnog smjera koji nastoji da zakrene stator. Moment motora jednak je vrijednosti momenta sile F' - F' i iznosi:

$$M = F_t \cdot l = m_t \cdot g \cdot l \quad \dots\dots\dots(7.11)$$

gdje je:

F_t – sila tegova

l – udaljenost sile od ose vratila.



Slika 7.11. Sile u elektrodinamometru kada radi kao generator

Snaga motora može se odrediti nakon što se izmjeri broj obrtaja n odnosno ugaona brzina ω

$$P = M \cdot \omega = \frac{2\pi}{60} g \cdot m_t \cdot l \cdot n \quad \dots\dots\dots(7.12)$$

Vrijednost snage izračunate prema navedenom izrazu treba uvećati za iznos gubitaka trenja u ležištima vratila i ventilacionih gubitaka. Dodatne vrijednosti gubitaka se odrede i kao konstante pridodaju izmjerenim vrijednostima za svako pojedinačno mjerenje.

7.7. Ostali načini mjerenja obrtnog momenta i snage

Mjerenje pojedinačnih veličina vrši se ponaosob jednim instrumentom. Međutim za mjerenje snage ili stepena iskorištenja, koji su po prirodi proizvod ili količnik dvije mehaničke veličine koristi se složenijsa oprema ili više uređaja. Tako npr. za mjerenje snage treba odrediti obrtni moment i

broj okretaja tj. moraju se izmjeriti dvije nezavisne veličine i naći njihov proizvod.

Primjer 1.

Za određivanje snage motora koristi se kočnica, koja se hladi vodom. Pri tome se rad trenja pretvara u toplotu, od čega 25% odlazi u okolicu, a ostalo se predaje rashladnoj vodi. Ako se voda zagrije za 30°C i pri tom troši 1500 kg/h rashladne vode, specifičnog toplotnog kapaciteta 4,2 kJ/kg·K, onda odrediti:

- snagu motora i
- kočioni moment na obimu kočnice ako motor ima 1200 min⁻¹.

Rješenje:

- Snaga motora se pretvara u toplotu, a 75 % te toplote se predaje rashladnoj vodi, s toga vrijedi sljedeći bilans

$$0,75 \cdot L = m_w \cdot c_w \cdot \Delta t ,$$

iz kojeg se dobija tražena snaga motora:

$$L = \frac{1}{0,75} \cdot m_w \cdot c_w \cdot \Delta t = \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1500}{3600} \cdot 4,2 \cdot 30 = 70 \text{ kW} .$$

- Iz izraza za snagu motora

$$L = M \cdot \omega = M \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} ,$$

dobija se izraz za obrtni moment motora, dakle slijedi

$$M = \frac{30 \cdot L}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot 70 \cdot 10^3}{\pi \cdot 1200} = 559 \text{ Nm}.$$

8. MJERENJE VIBRACIJA

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Uzroci pojave vibracija
3. Mjerni lanac za mjerenje vibracija
4. Kriteriji za ocjenu vibracija
5. Uklanjanje vibracija uravnoteženjem
6. Dinamička ispitivanja

8.1. Uvod

Vibracije mašina i uređaja su posljedica neispravnosti tih tehničkih sistema. Vibracije predstavljaju periodičko ili neko drugo kretanje dijelova mašina i uređaja. Imaju sljedeće karakteristike:

- frekvenciju,
- amplitudu,
- brzinu i
- ubrzanje.

Frekvencija vibracija predstavlja recipročnu vrijednost perioda $f=1/T$ (Hz).

Period vibracija je vrijeme potrebno za jedan ciklus. Za rotor (tijelo koje rotira oko ose), koji se kreće konstantnim brojem obrtaja u minuti, frekvencija iznosi $f = n / 60$ (Hz), a ugaona brzina $\omega = 2\pi f$ (rad / s). Frekvencija vibracija kreće se od dijela herca do nekoliko stotina herca

Brzina vibracija je promjenjiva veličina u svakom dijelu ciklusa. Kada su u pitanju harmonijske oscilacije (vibracije koje se odvijaju prema sinusnom zakonu), u početnom trenutku brzina je jednaka nuli, a u toku vremenskog intervala se mijenja. U opštem slučaju brzina vibracija je data izrazom:

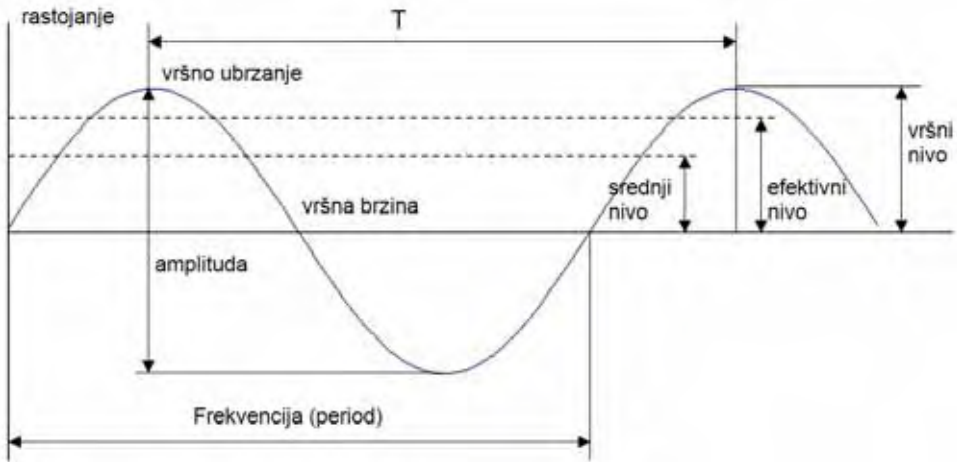
$$v = \frac{dx}{dt}$$

Ubrzanje vibracija je promjenjivo i dato je izrazom:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Kretanje je periodično ako tačka nakon određenog vremenskog intervala zauzima isti polazni položaj. Kretanje koje se vrši prema harmonijskom zakonu dato je izrazom i prikazano na slici 8.1.

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$



Slika 8.1. Vremenska funkcija vibracija

Harmonijske vibracije su slobodne vibracije. Osim slobodnih vibracija postoje i amortizujuće vibracije kada osim sile koja izaziva vibracije djeluju i druge sile zbog čijeg djelovanja objekt vibrira. Takva je npr. sila otpora.

Diferencijalna jednačina slobodnih vibracija ima oblik:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega^2 x = 0$$

$$2\delta = \frac{\mu}{m} \quad \omega^2 = \frac{c}{m}$$

gdje je:

m – masa vibrirajućeg dijela,

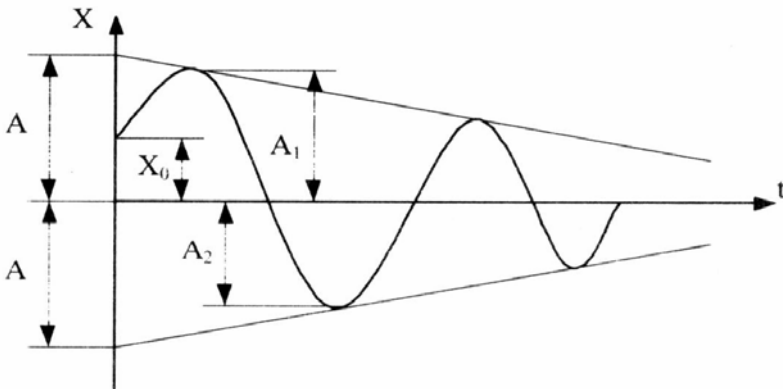
μ - koeficijent otpora,

c – krutost,

ω - ugaona brzina.

Zavisno od veličine δ mogu nastupiti tri slučaja:

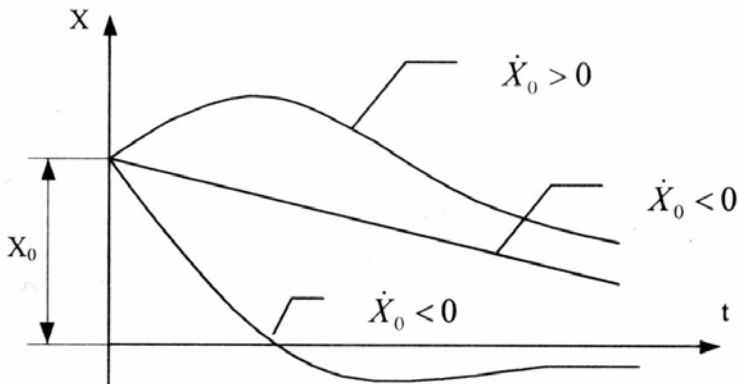
- $> \omega$ -aperiodično kretanje,
- $= \omega$ - granični slučaj aperiodičnog kretanja,
- $< \omega$ - prinudni slučaj aperiodičnog kretanja.



Slika 8.2. Slučaj prividno periodičnog kretanja, $\delta < \omega$

Period slobodnih prigušenih vibracija je razmak između dva uzastopna prolaska materijalne tačke u istom smjeru i dat izrazom:

$$T_p = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - \delta^2}}$$



Slika 8.3. Slučaj aperiodičnog kretanja, $\delta > \omega$

Prinudne neprigušene vibracije nastaju djelovanjem prinudne sile koja se mijenja po zakonu:

$$F_\Omega = f(t) = F_0 \sin(\Omega t + \beta)$$

Diferencijalna jednačina ovih vibracija ima oblik:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = h \cdot \sin(\omega t + \beta)$$

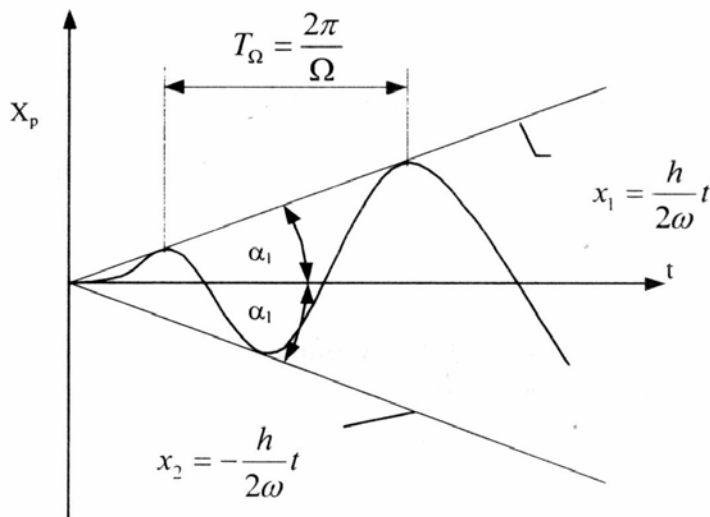
gdje je:

Ω - ugaona frekvencija,

β - početna faza

$$h = \frac{F_0}{m}$$

F_0 – maksimalna vrijednost prinudne sile



Slika 8.4. Grafik prinudnih vibracija

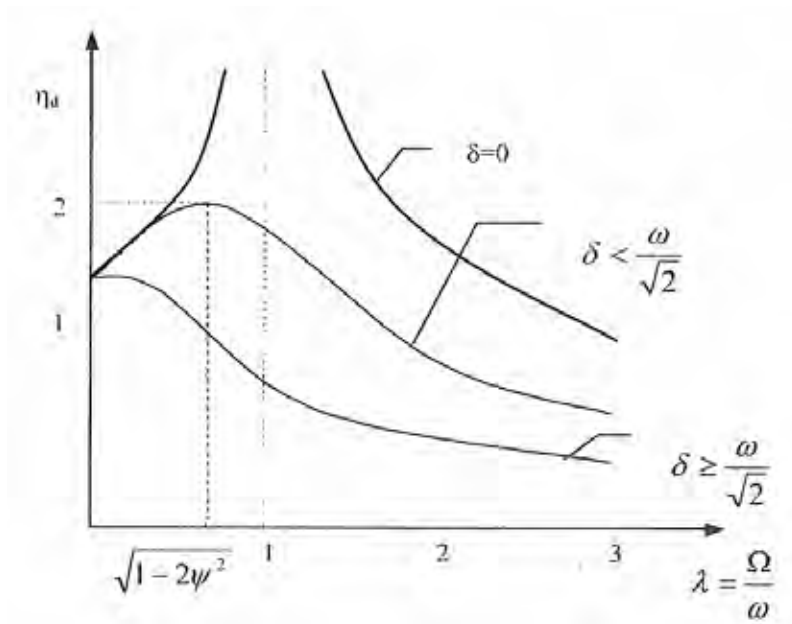
Prinudne prigušene vibracije rezultat su djelovanja prinudne sile i sile otpora. Diferencijalna jednačina ovih vibracija data je u obliku:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega^2 x = h \cdot \sin(\Omega t + \beta)$$

Homogeno rješenje diferencijalne jednačine prinudnih prigušenih vibracija određuje sopstvene vibracije, a partikularno prinudne vibracije.

Rezonanca nastaje u slučaju kada je frekvencija poremećajne sile Ω jednaka frekvenciji sopstvenih vibracija ($\Omega = \omega$).

Rezonantni dijagrami pokazuju zavisnost $\lambda = \frac{\Omega}{\omega}$ (bezdimezionalni koeficijent poremećaja) od η_d (dinamički faktor pojačanja) koji je funkcija λ i ψ ($\Psi = \frac{\delta}{m}$). Rezonantni dijagrami različiti su za različite vrijednosti δ , slika 8.5.



Slika 8.5. Rezonantni dijagrami

8.2. Uzroci pojave vibracija

Pojavu vibracija tehničkih sistema mogu prouzrokovati različiti uzroci. Najčešće su to:

- neuravnoteženost rotacionih sistema,
- nedovoljna dinamička krutost kućišta i temelja sistema,
- poremećaj centričnosti spojnice i ležaja,
- nagib vratila,
- pohabani, ekscentrični ili oštećeni zupčanci,
- loši pogonski kaiševi i lanci,
- loši ležajevi,
- odstupanje obrtnog momenta,
- elektromagnetne sile,
- aerodinamičke sile,
- hidraulične sile,

- olabljjenost spojeva,
- "prolazak" kroz rezonancu,
- zaribavanje
- zatupljen rezni alat i drugi uzroci

U principu, nije teško uočiti koji dio tehničkog sistema nije ispravan pa dolazi do pojave vibracija. Na takvim dijelovima vrši se mjerenje s ciljem da se dobiju kvantitativne vrijednosti mjerenih parametara vibracija. Na osnovu rezultata mjerenja donesi se zaključak da li se takav sistem nalazi u granicama dozvoljenog rada, da li treba na njemu vršiti intervencije održavanja i koji su to uzroci doveli do pojave vibracija.

U tabeli 8.1. dat je pregled uzroka neispravnosti i karakteristika vibracija koje su posljedica djelovanja specifičnih uzroka.

8. 2. 1. Uticaj vibracija na mašine i opremu

Na dijelove mašina i uređaja uticaj vibracija manifestuje se na različite načine kao što su:

- a) pojava plastičnih i elastičnih deformacija, lomova i havarija usljed zamora materijala naročito na mjestima koncentracije napona.
- b) povećano trenje, veći energetski gubici i manji radni efekti mašine.

Sa aspekta funkcionalnosti mašina i elektronske opreme vibracija su štetne. Prema nivou amplitude i frekvencije mašina i uređaja moraju odgovarati utvrđenim graničnim vrijednostima. U suprotnom javljaju greške funkcioniranja, nepravilan rad, loš proizvod i sl. Tako nastaju slijedeći problemi:

- izlaganje prekomjernim vibracijama ležišta turbine dovodi do povećanja opterećenja i kraćeg radnog vijeka,
- kvalitet obrađenog komada na brusilici postiže se samo kada su vibracije u propisanim granicama,
- nivo vibracija izvan propisanih granica utiče negativno na rad elektromotora i generatora,
- na uticaj vibracija posebno je osjetljiva elektronska oprema. Prekoračenje dozvoljenog nivoa vibracija dovodi do pojave fizičkog kontakta i promjene karakteristika električnih kola.

U svim navedenim slučajevima nakon pojave vibracija ukoliko je izmjereni nivo prekoračen moraju se poduzeti mjere da se vibracije smanje ili uklone. Dozvoljeni nivo vibracija određen je propisima za odgovarajuće mašine i uređaje.

Slučaj	Uzrok pojave vibracije	Amplituda vibracija	Faza	Stroboskopska slika
1	<ul style="list-style-type: none"> • Neuravnoteženost obrtnih dijelova 	Konstantna		Još vidljiva
	<ul style="list-style-type: none"> • Ekscentričnost ose obrtanja i ose vođenja 	Linearno proporcionalno veličini poremećaja	Konstantna	Referentna
	<ul style="list-style-type: none"> • Mehaničke reakcije • Elektromagnetne reakcije 	Linearno proporcionalno veličini poremećaja		Linija
	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidodinamičke reakcije 	Linearno proporcionalno veličini poremećaja		
2	<ul style="list-style-type: none"> • Nesaosnost osa spojenih obrtnih vratila • Nesaosnost ose rukavca u odnosu na osu ležaja • Ugibanje vratila • Nedovoljna mehanička krutost, tj. labavost veze sa temeljom 	Konstantna	Konstantna	1 do 3 referentne linije
3	<ul style="list-style-type: none"> • Povećan zazor u kliznom ležaju • Neodgovarajući viskozitet ulja 	Konstantna	Promjenljiva	Lagano rotira
4	<ul style="list-style-type: none"> • Loše ozubljenje u reduktoru • Neispravan kaišni prenos • Oštećen klizni ležaj • Inercijalne sile koje se reproduktuju na osi rotacije 	Promjenljiva	Neppravilna	Višestruka i promjenljiva
5	<ul style="list-style-type: none"> • Dejstvo magnetnog polja na električnim mašinama 	Konstantna	Konstantna ili lagano promjenljiva	Višestruka
6	<ul style="list-style-type: none"> • Inercijalne sile dijelova koji vrše reverzibilno kretanje 	Konstantna	Konstantna	Višestruka
7	<ul style="list-style-type: none"> • Sile trenja u kliznim ležajevima 	Promjenljiva	Postepeno promjenljiva	1 referentna linija
8	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrauličke i pneumatske sile 	Konstantna	Konstantna	Višestruka
9	<ul style="list-style-type: none"> • Kavitacione sile i hidraulički udari 	Konstantna	Lagano promjenljiva	Lagano rotira
10	<ul style="list-style-type: none"> • Elektromagnetne sile usljed eksplozije plinova 	Konstantna	Lagano promjenljiva	Dvostruka

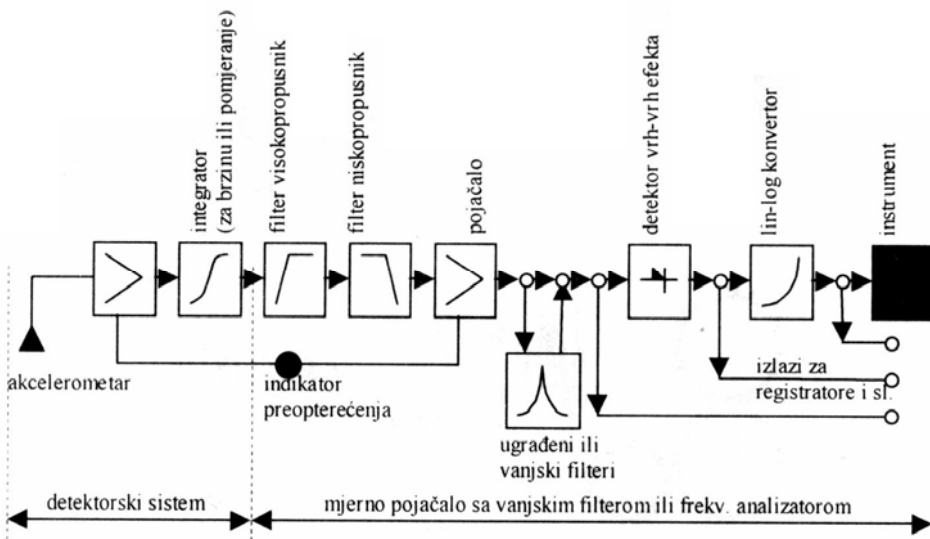
Tabela 8.1. Pregled uzroka i karakteristike vibracija tehničkih sistema

Često je potrebno mjeriti vibracije u slučaju kada se vrši ispitivanje proizvoda; mašina i konstrukcija na dinamičku izdržljivost. To se vrši na ispitnim vibracionim stolovima.

8.3. Mjerni lanac za mjerenje vibracija

Kao i kod svih mjerenja neelektričnih veličina električnim putem i kod mjerenja vibracija postoje tri segmenta:

- detekcije, odnosno mjerenja vibracija koje se obavlja pomoću uređaja koji neelektričnu veličinu pretvaraju u električni signal. Signal se može na odgovarajući način pretvarati, filtrirati i registrirati,
- analize, koja predstavlja identifikaciju uzroka koji dovode do pojave vibracija, bilo u vremenskom ili frekventnom domenu i
- intervencije, koja podrazumjeva radnje koje treba obaviti da se uklone postojeći uzroci koji su doveli do pojave vibracija.



Slika 8.6. Mjerni lanac za mjerenje vibracija

Na slici 8.6. prikazna je šema mjernog lanca za mjerenje vibracija. Prvi u mjernom lancu uređaja za mjerenje vibracija je pretvarač koji vibracije pretvara u odgovarajući električni signal. Detektor vibracija ili akcelerometar može biti sistem od više dijelova (integrator, diferencijator).

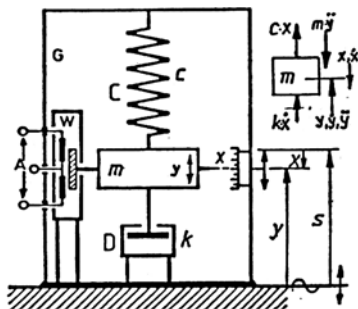
8.3.1. Mjerni pretvarači vibracija

Mjerenje mehaničkih translatornih i rotacionih vibracija vrši se pomoću senzora koji se mogu podijeliti na:

- pretvarače za mjerenje sile i veličine pomjeranja,
- pretvarače za mjerenje translatornih i rotacionih veličina pomjeranja,
- kontaktne i bezkontaktne pretvarače.
- pretvarače za apsolutno i relativno mjerenje,
- mehaničke i električne pretvarače
- aktivne i pasivne pretvarače.

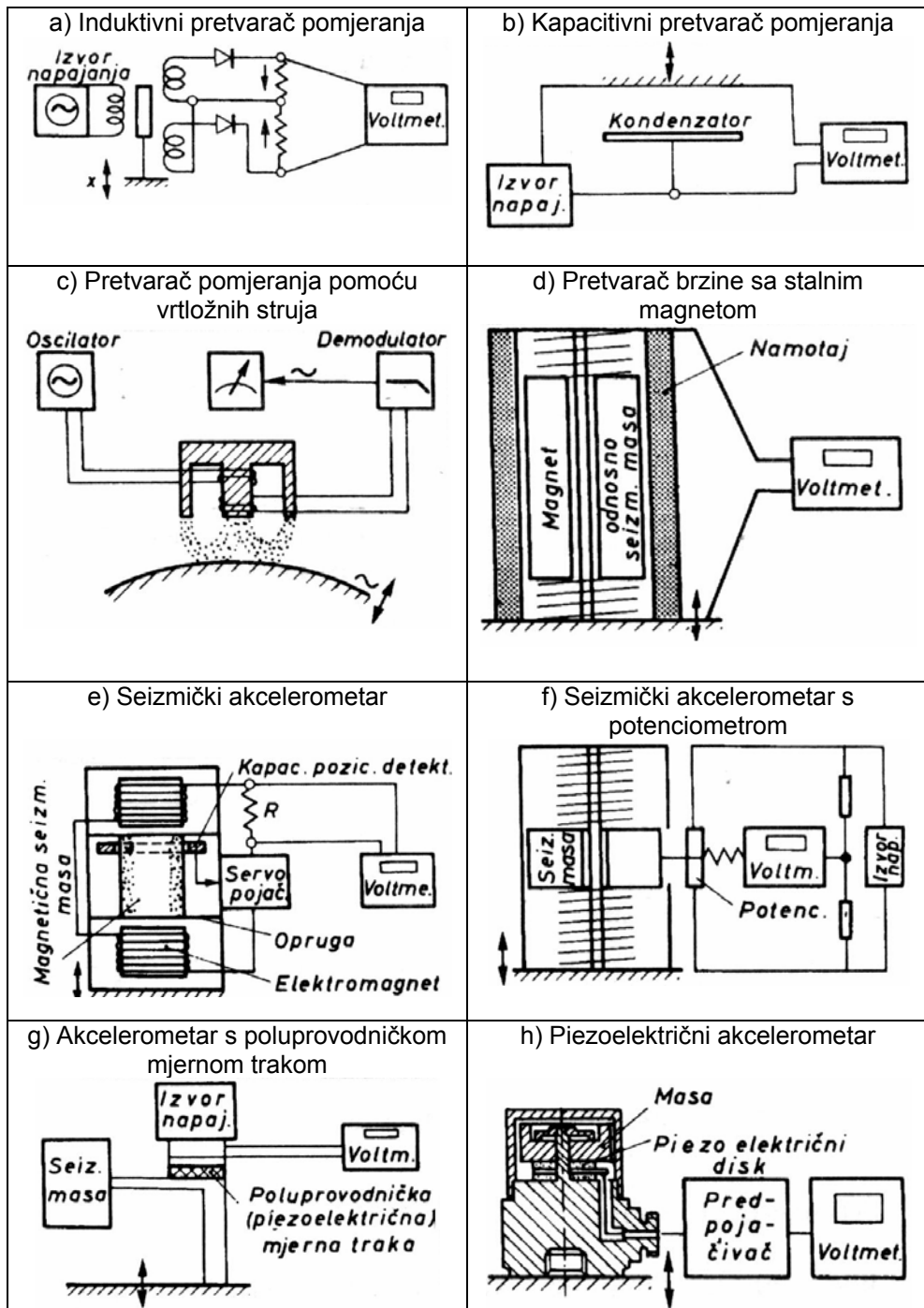
Prema principu rada pretvarači koji se koriste u uređajima za mjerenje vibracija biti:

- induktivni,
- kapacitivni,
- piezoelektrični,
- elektromagnetni,
- seizmički,
- poluprovodnički i
- pretvarač koji radi na principu vrtložnih struja.



Slika 8.7. Induktivni pretvarač vibracija sa diferencijalnim transformatorom

Na slici 8.8. date su šeme navedenih pretvarača. Najčešće su u upotrebi piezoelektrični pretvarači. Njihove karakteristike su mala veličina i masa, frekventni opseg od 0,2 do 2500 Hz, a njima se mogu mjeriti frekvencije do 60 kHz.



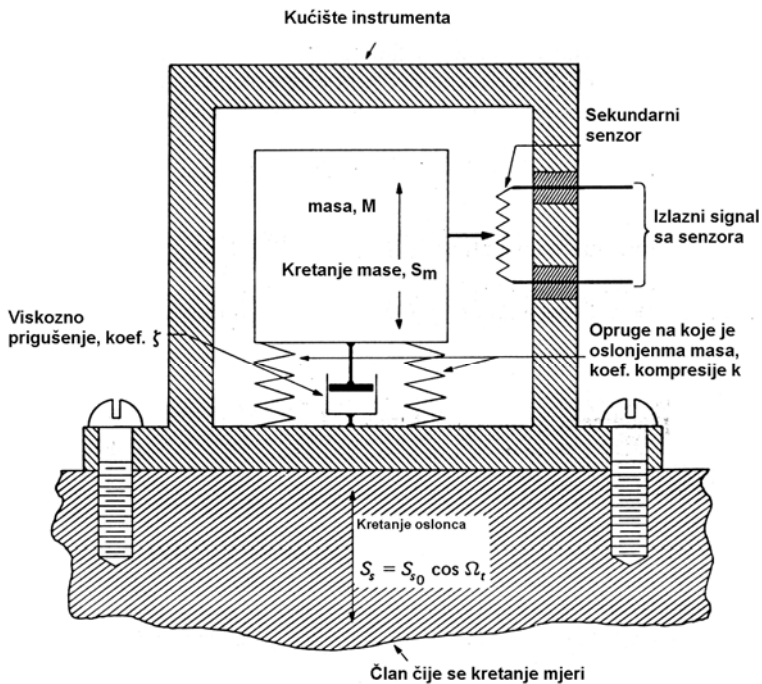
Slika 8.8. Šema pretvarača za mjerenje linijskih vibracija

Pretvarači relativnog pomjeranja mjere relativno pomjeranje mase koja vibrira u odnosu na vanjsku fiksnu tačku.

Pretvarači apsolutnog pomjeranja sadrže seizmički slog koji se sastoji od mase i opruge smještenih u kućištu čije se pomjeranje u odnosu na kućište prigušuje, slika 8.9. Kućište je učvršćeno za objekt koji vibrira.

Kad je takav mjerni sistem izložen djelovanju ubrzanja mijenja se položaj mase u odnosu na kućište, pa je udaljenost mase od kućišta proporcionalna ubrzanju objekta koji vibrira. Masa nastoji u toku vibriranja kućišta ostati u položaju mirovanja. Odgovarajućim dimenzioniranjem mase i prigušenja (opruge), mogu odrediti različite veličine pomjeranja.

Senzor ubrzanja, radi mjerenja pomjeranja mase, povezan je sa nekim električnim dijelom, kao što je npr. elektrootporna mjerna traka, kapacitivni, induktivni, optički ili poluprovodnički pretvarač koji pomjeranje pretvaraju u električni signal.



Slika 8.9. Induktivni pretvarač vibracija sa seizmičkim sklopom

Odgovarajućom konstrukcijom ovaj pretvarač se može koristiti za mjerenje svih karakteristika vibracija. Mjerenje rotacionih vibracija postize se na sličan način samo se obezbijedi da se masa pomjera rotaciono a ne translatorno kao u navedenom slučaju.

Diferencijalna jednačina kretanja mase pretvarača u odnosu na kućište je

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + c x = m \frac{d^2 s}{dt^2}$$

gdje je:

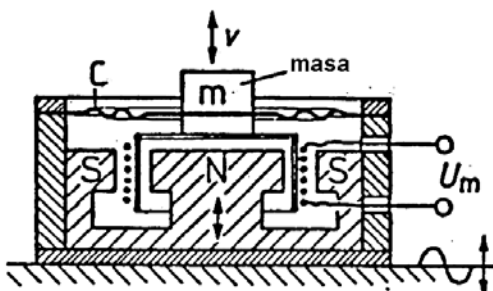
$m \frac{d^2 x}{dt^2}$ sila relativnog ubrzanja

$m \frac{d^2 s}{dt^2}$ pobudna sila rezultat vibriranja objekta mjerenja

$k \frac{dx}{dt}$ prigušna sila

$c x$ sila u opruzi.

Generatorski - induktivni pretvarači ubrzanja rade na principu mjerenja i pretvaranja brzine vibracija magnetne jezgre ili zavojnice u magnetnom polju. Pretvarač, slika 8.10, sastoji se od: permanentnog magneta, pomične zavojnice, seizmičke mase m , opruge ili elastične membrane za učvršćenje zavojnice ili seizmičke mase i kućišta koje se veže za mjereni objekat.



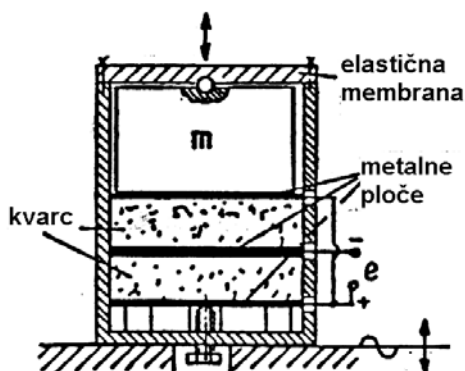
Slika 8.10. Elektrodinamički pretvarač za mjerenje vibracija

Pri djelovanju vibracija na kućište objekta, usljed tromosti seizmičke mase zavojnica se pomjera u zračnom rasponu magnetnog polja magneta. Mijenja se permeabilnost i induktivnost strujnog kruga i javlja napon proporcionalan brzini translatorskog kretanja zavojnice. Generatorski ili aktivni pretvarači proizvode napon na elektrodinamičkom principu, a mjere relativne brzine kretanja. Ovi pretvarači se koriste kod mjerenja translatorskih i ugaonih ubrzanja pomoću deriviranja signala mjerenja.

Piezoelektrični pretvarači ubrzanja služe za mjerenje ubrzanja na osnovu mjerenja sila, bez pomjeranja seizmičkih masa. U kućištu pretvarača ugrađene su piezoelektrične pločice koje su elastično učvršćene pomoću membrane a prislonjene na seizmičku masu, slika 8.11.

Kad se kućište, koje je vezano za objekat koji vibrira, pomakne u smjeru x , okomitom na površinu pločica, usljed inercije seizmičke mase, javlja se sila

F koja izaziva na pločicama piezoelektrični naboj. Sila F je proporcionalna ubrzanju, kome je proporcionalan i izlazni napon pretvarača. Osjetljivost pretvarača se povećava sa više slojeva pločica.



Slika 8.11. Piezoelektrični pretvarač

Koji će se mjerni pretvarač koristiti zvisi od njegovih frekventnih karakteristika. Za objekte koji vibriraju u području od 5 do 100 kHz, koriste se piezoelektrični pretvarači ubrzanja. Otpornički pretvarači se koriste do 750 Hz, a potencijometrijski do 20 kHz, dok se induktivni koriste za frekvencije do 80 Hz. Svi pretvarači su osjetljivi na promjene temperature pa treba uračunati u rezultat i grešku usljed temperature.

Mjerni sistem koji se koristi u pogonskim uslovima sastoji se od pretvarača, mjernog instrumenta sa pojačivačem i filtera. Pomoću ovakve konfiguracije omogućeno je mjerenje vibracija i frekventna analiza vibracija.

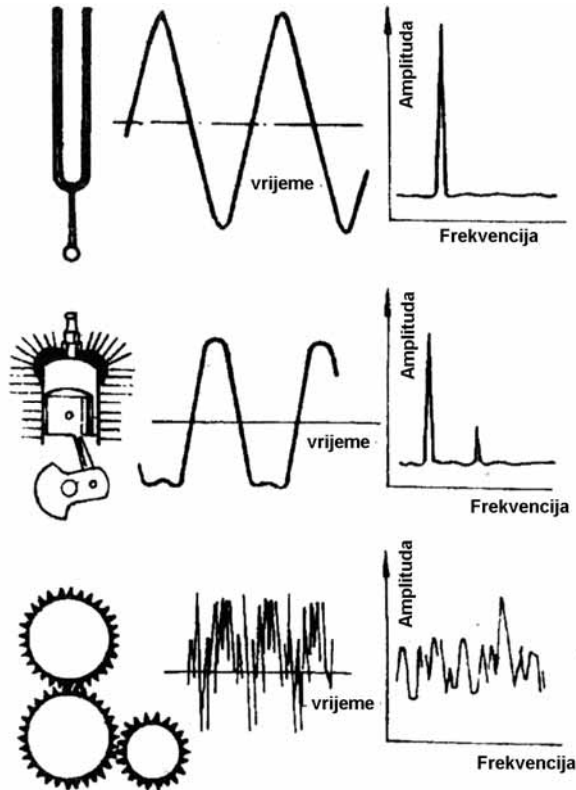
Tako dobiveni signal ide do drugog dijela mjernog lanca. Snimljeni signali vibracija sadrži osim glavne informacije i niz sporednih koje treba odstraniti.

8.3.2. Frekventna analiza

U cilju utvrđivanja izvora vibracija potrebno je osim određivanja ukupnog nivoa vibracija izvršiti i separaciju po frekvencijama. Taj postupak zove se frekventna analiza, a rezultat predstavlja frekventni spektar. To se postiže filtriranjem signala vremenskog zapisa vibracija na instrumentu koji se zove analizator.

Prikazivanje amplituda u funkciji je vremena je vremenski domen koji nije pogodan za razmatranje složenih pojava, jer se snimljeni signal sastoji od velikog broja komponenti koje djeluju istovremeno, a čije uticaje treba odrediti i po amplitudi i po frekvenciji. Na slici 8.12. dati su neki slučajevi izvora vibracija i njihove vibracije u vremenskom i frekventnom domenu.

Frekventna analiza je postupak kojim se složena vremenska funkcija razlaže na pojedine frekventne komponente. Grafički prikaz vibracija u funkciji frekvencija zove se frekventni spektar ili spektar. Snimljeni spektar sadrži u sebi cijelo stanje ispitivane mašine uključujući geometrijsku tačnost i kvalitet montaže.



Slika 8.12. Prikaz karakterističnih signala u vremenskom i frekventnom domenu

Vrijednost dobivenih rezultata mjerenja zavisi od:

- izabrane metode,
- korištene opreme,
- izbora i broja mjernih mjesta,
- izbora filtera i još nekih drugih parametara.

Skoro svi instrumenti imaju mogućnost mjerenja amplitude preko nekih drugih veličina stanja: pomijeranja, brzine i ubrzanja. Međutim najčešće se koristi brzina vibracija pošto ona u sebi sadrži linearnu mjeru amplitude i frekvencije.

Kod mehaničkih vibracija razlikuju se:

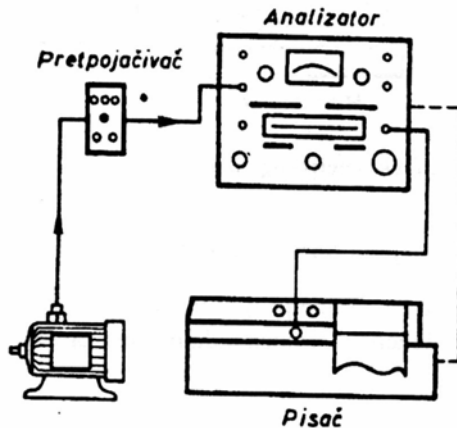
- periodični harmonijski,
- periodični neharmonijski i
- stohastički neharmonijski signali.

Navedeni signali prikazani su na slici 8.12. redom kako su navedeni. Zvučna viljuška proizvodi periodične harmonijske signale, klip motora sa unutrašnjim sagorijevanjem periodične neharmonijske signale, a zupčanici u sprezi slučajne signale.

Snimljeni signal se može prikazati na **linearnoj i logaritamskoj** skali. Prvi prikaz se koristi za signale sa niskofrekventnom komponentama, a logaritamski jednako dobro za sve komponente po cijeloj frekventnoj osi, naročito za snimljene visokofrekventne vibracije.

Svaka od izmjerenih veličina vibracija daje korisne informacije. Tako se na osnovu ukupne amplitude može zaključiti koja je veličina problem.

Priroda problema ne može se otkriti bez frekvencijske analize. Frekvencijska analiza može se vršiti pomoću analognih i digitalnih filtera. Na slici 8.13 prikazan je mjerni sistem za frekvencijsku analizu pomoću analognog analizatora koji se sastoji od mjernog pojačavača i skupa analognih filtera čija je promjena sinhronizovana sa promjenom mjerne trake na pisaču.



Slika 8.13. Frekventna analiza pomoću analognog analizatora

Vremenski domen

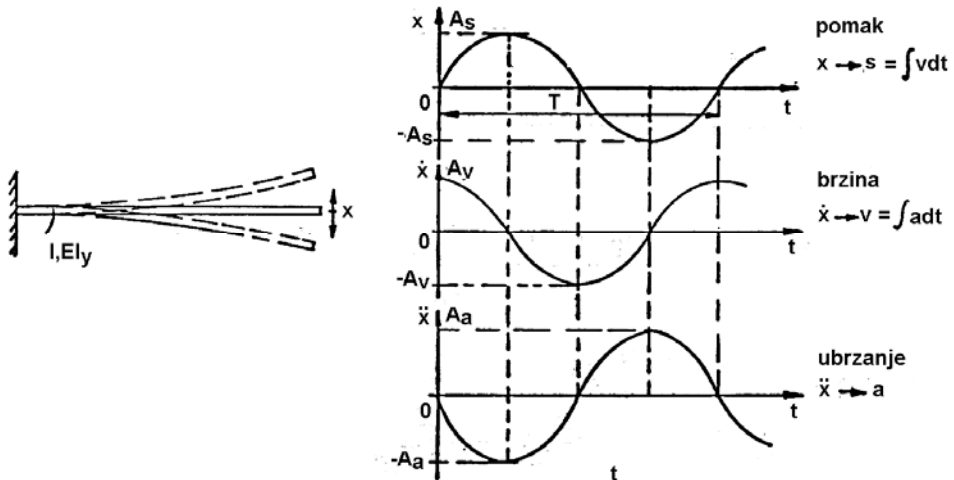
Signali tj. mjerene veličine mehaničkih vibracija u vremenskom području su $x(t) = s(t)$

Pomjeranje $s(t) = \int v(t)dt = \iint a(t)dt^2$

Brzina $v(t) = ds/dt = \int a(t)dt$

Ubrzanje $a(t) = d^2s/dt^2$

Grafički prikaz ovih funkcija dat je na slici 8.14.



Slika 8.14. Parametri harmonijskih funkcija u funkciji vremena

Navedene međuzavisnosti signala vibracija potrebne su kod izbora mjerene veličine i senzora za mjerenje. Dovoljno je izmjeriti jednu veličinu, a zatim odrediti preostale dvije.

Frekventni domen

Za harmonijske vibracije vrijedi slična analogija kao u vremenskom domenu. Iz spektra jedne mjerene veličine mogu se izračunati preostale dvije. Periodične vibracije se smiju predstaviti pomoću Fourierove sinteze kao zbir harmonijskih vibracija. Zavisnosti su date slijedećim relacijama:

$$\text{Put } s(t) = A_s \cos 2\pi f t$$

$$\text{Brzina } v(t) = -A_v \sin 2\pi f t \text{ za } A_v = 2\pi f A_s$$

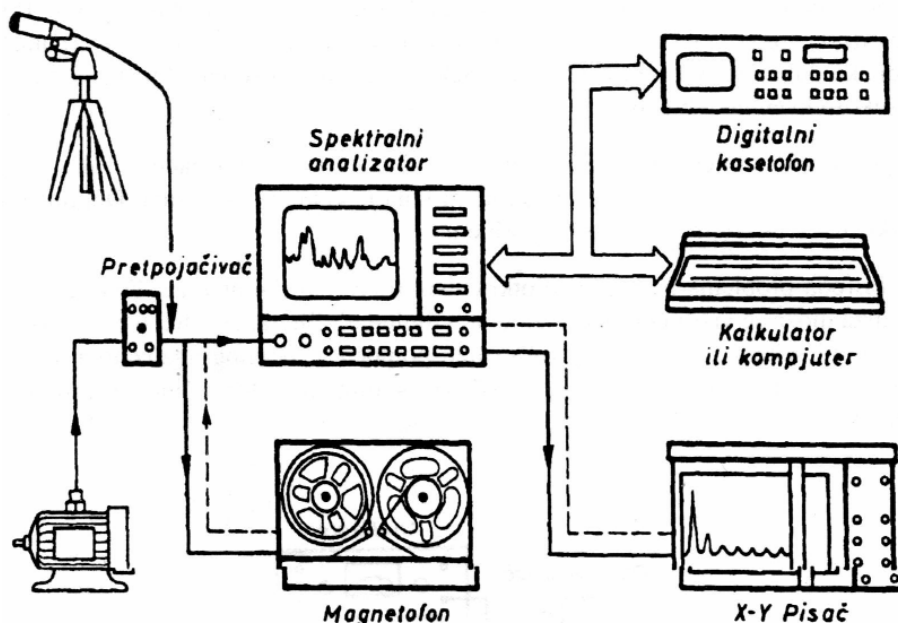
$$\text{Ubrzanje } a(t) = -A_a \cos 2\pi f t \text{ za } A_a = (2\pi f)^2 A_s$$

Vidi se da su kod stalne amplitude A_s pomjeranje odnosno put $s(t)$, amplituda brzine $v(t)$ koja iznosi A_v i amplituda ubrzanja $a(t)$, A_a linearno, odnosno kvadratno zavisni od frekvencije f , uz $\omega = 2\pi f$.

Kod mjerenja vibracija treba voditi računa o uticaju smetnji visokih frekvencija na tačnost rezultata. Ako je veliki uticaj ne treba mjeriti pomjeranje sa pretvaračem puta, pa zatim praviti izvod da se dobije brzina i ubrzanje vibracija. Veća tačnost se postiže mjerenjem sa pretvaračem ubrzanja a zatim integriranjem da se dobije brzina vibracija i pomjeranje.

U praksi se provodi mjerenje vibracija u vremenskom domenu na osnovu koga se dobije frekventni spektar pomoću Fourierove transformacije uz korištenje programskih paketa i računara. Softveri su bazirani na brzjoj Fourierovoj transformaciji.

Digitalni analizatori omogućavaju dobivanje konačnog spektra i praćenje promjene spektra u toku ispitivanja. Dijelovi spektra se mogu prenositi na daljinu ili registrovati na traci ili kasetofonu. Na slici 8.15 prikazana je konfiguracija digitalnog analizatora.



Slika 8.15. Analiza frekventnog spektra pomoću digitalnog analizatora

8.4. Kriteriji za ocjenu dozvoljenih vibracija mašina i uređaja

Svako mjerenje vibracija ima za cilj upoznavanje ili ispitivanje dinamičkog stanja mjernog objekta. U nekim slučajevima kada je u pitanju održavanje

vrši se ispitivanje vibracija i nastoje se otkloniti i postojeći rad mašina i uređaja urediti da radi bez vibracija. Mirnoća rada mašina zavisi od intenziteta vibracija i to:

- opterećenje mašine i okolne sredine vezano je sa intenzitetom vibracija,
- pouzdanost u radu mašina i uređaja zavisi od nivoa vibracija,
- sigurnost pogona zavisi od nivoa vibracija naročito kada je u pitanju rezonanca,
- psihološko stanje čovjeka zavisi od vibracija.

U okviru ISO postoji tehnički komitet ISO/TC 108 koji se bavi vibracijama i potresima čiji su zadaci:

- pobuđivanje vibracija na objektima u cilju njihovog ispitivanja,
- uklanjanje, smanjenje, i ograničenje vibracija uravnotežvanjem, izolacijom, i prigušenjem,
- razvoj kriterija za ocjenu uticaja vibracija na ljude i dozvoljenih granica za vibracije mašina, vozila i sistema,
- razvoj metoda i uređaja za mjerenje i kalibriranje,
- razvoj metoda ispitivanja i saradnja sa drugim ISO i IEC komitetima, utvrđivanje terminologije u ovoj oblasti.

Mnogi standardi dali su konkretne preporuke za ocjenu dozvoljenih vibracija, kao što su:

- Preporuke VDI 2056,
- DIN norme 45665, 45666,
- ISO standardi 2372, 2373, 2954,
- BS, Britanski standardi 4675, 1971,
- Francuske norme E90, E 100.

Prema propisima, amplituda i efektivna brzina vibracija su osnovne veličine na osnovu kojih se određuje stanje tehničkog sistema kada su u pitanju vibracije.

Efektivna brzina vibracija

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T v^2(t) dt}{T}}$$

Kod polifrekventnih vibracija za ocjenu je bitna tzv. ekvivalentna brzina v_{eq} pri čemu je:

Ekvivalentna brzina vibracija

$$v_{eq} = \sqrt{2} \frac{v_{ef}}{\omega_r} = \frac{\sqrt{2}v_{ef}}{2\pi f}$$

Ekvivalentna amplituda vibracija

$$A_{eq} = \sqrt{2} \frac{v_{ef}}{\omega_r} = \frac{\sqrt{2}v_{ef}}{2\pi f r}$$

8.4.1. Klasifikacija mašina prema intenzitetu vibracija

Prema navedenim propisima sve energetske i tehnološke mašine su podijeljene u nekoliko klasa, kao kriterij inteziteta vibracija uzeta je brzina vibracija v (m /s). Kod harmonijskih vibracija, amplituda vibracija služi kao mjera dozvoljenih vibracija. Prema intenzitetu vibracija mašine se svrstavaju se u sljedeće grupe:

Grupa K

U ovu grupu spadaju pojedini dijelovi mehanizama pogonskih i radnih mašina, koje su u pogonskom stanju potpuno čvrsto vezane, naročito elektromotori do 15 kW u serijskoj proizvodnji.

Grupa M

Srednje mašine, naročito elektromotori snage od 15-75 kW bez naročitih temelja i čvrsto postavljenih dijelova mehanizama i mašina do 300 kW sa obrtnim dijelovima na specijalnim temeljima.

Grupa G

Veće mašine postavljene na visokopodešenim (veliki odnos c/m), krutim i teškim temeljima sa samoobrnim masama, npr. turbogrupe, naročito takve temelje koji su izrađeni po principima lake gradnje.

Grupa D

Mašine i pogonski agregati postavljeni na visokopodešene temelje sa uravnoteženim masama.

Grupa S

Mašine i pogonski agregati postavljeni na niskopodešene temelje (elastično fundiranje) sa neuravnoteženim masama, obrtne mašine sa slabo učvršćenim masama, udarna vratila kod mlinova, mašine sa promjenjivom

neuravnoteženošću, koje mogu da rade pouzdano bez priključnih dijelova kao centrifuge, vibraciona sita, mašine za dinamičko ispitivanje materijala, vibracione mašine procesne industrije.

Svaka grupa ima nekoliko stepeni tačnosti i to:

A – vrlo dobro ili dobro,

B – upotrebljivo,

C – još dozvoljeno ali se zahtijeva poboljšanje,

D – nedozvoljeno.

Prikazane tabele predstavljaju samo preporuke koje se mogu uvažiti ili prići studijskoj analizi problema. U tabeli 8.2. dat je prikaz intenziteta vibracija za pojedine grupe u ovisnosti od v_{ef} i v_{eq} . U tabeli 8.3. date su granične vrijednosti brzina za pojedine stepene kvaliteta.

v_{ef} (mm/s)	v_{eq} (mm/s)	Grupa K	Grupa M	Grupa G	Grupa D
0,28	0,4	A	A	A	A
0,45	0,63				
0,71	1				
1,12	1,6	B	B		
1,8	2,5				
2,8	4	C	C	B	B
4,5	6,3				
7,1	10	D	D	C	C
11,2	16				
18	25				
28	40				
45	63			D	D

Tabela 8.2. Intenzitet vibracija u zavisnosti od v_{ef} i v_{eq}

	K	M	G	D
A	<0, 71	<1, 1	<1, 8	<2, 8
B	0, 71-1, 8	1, 1-2, 8	1, 8-4, 5	2, 8-7, 1
C	1, 8-4, 5	2, 8-7, 1	4, 5-11	7, 1-18
D	>4, 5	>7, 1	>11	>18

Tabela 8.3. Granične vrijednosti v_{ef} (mm / s)

8.5. Uklanjanje vibracija uravnoteženjem

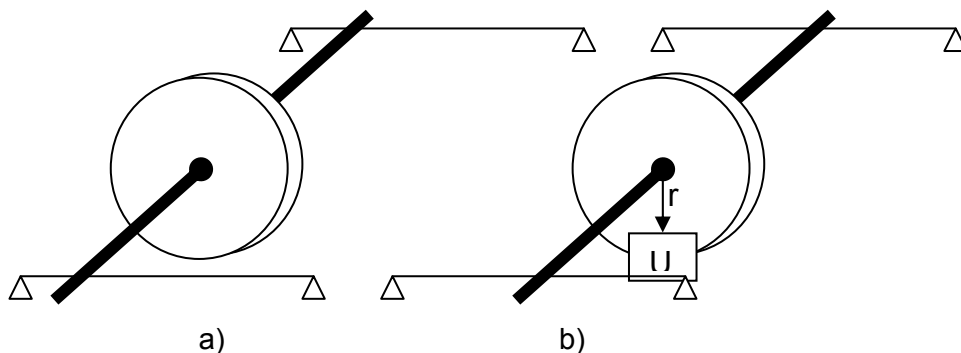
Različiti uzroci navedeni u tački 8.2. dovode do pojave vibracija. Način na koji se uklanjaju ili smanjuju također zavisi od od uzroka. Cijeni se da je najvenajčešći uzrok pojave vibracija neuravnoteženost masa rotirajućih sistema. Ona se uklanja uravnoteženjem masa rotirajućih sistema.

Uravnoteženje masa obrtnih dijelova mašina predstavlja postupak kojim se rotirajući dijelovi dovode u stanje u kojem su mase ravnomjerno raspoređene po rotoru, a kinetički pritisci na ležišta i vibracije dovedeni u dozvoljene granice. Postupak uravnoteženja sastoji se od mjerenja položaja i veličine neuravnoteženosti i uklanjanja postojeće neuravnoteženosti.

Za rotor (dio koji se obrće) kaže se da je uravnotežen kada se glavna centralna osa rotora poklapa sa osom obrtanja. U tom slučaju nema vibracija.

8.5.1. Osnovni pojmovi o uravnoteženju

Pojam neuravnoteženosti može se objasniti na primjeru rotora - diska male debljine u odnosu na prečnik koji je navučen na vratilo istog prečnika kao što je otvor rotora, slika 8.16.a. Vratilo je postavljeno na dva horizontalna oslonca. Ako se rotor zarotira, nakon izvjesnog vremena isti će se zaustaviti u proizvoljnom položaju. Sistem je, dakle, uravnotežen (vratilo, rotor) i nalazi se u indiferentnoj ravnoteži.



Slika 8.16. Primjeri objašnjenja za pojam neuravnoteženosti:
a) uravnotežen rotor, b) rotor sa dodatom masom U

Međutim ako se na rotor postavi masa - magnet na rastojanju r veličine U , i nakon izvođenja iz ravnotežnog položaja i rotacije rotor će se zaustaviti u ravnotežnom položaju, slika 8.16.b, tako da je masa U u najnižoj donjoj tački.

Da bi se rotor zaustavio, na vratilo treba da djeluje obrtni moment jednak vrijednosti $U \cdot r$, što je u stvari neuravnoteženost.

Uravnoteženje rotora, slika 8.16.b, može se postići dodavanjem mase m na prečniku na kome je masa U . Postupak uravnoteženja je dovođenje neuravnoteženog rotora u ravnotežni položaj. Kod uravnoteženja automobilskih točkova vrši se dodavanje mase olova, a kod zglobnih vratila postavljaju se limene pločice postupkom tačkastog zavarivanja.

Tačnost uravnoteženja izražava se kroz zaostalu neuravnoteženost. Zaostala neuravnoteženost zavisi od mase predmeta koji se uravnotežava. Tako npr. zaostala neuravnoteženost 100 [gr cm] za predmet mase od 10 kg je dosta visoka dok je ta ista zaostala neuravnoteženost mala za predmet mase od 1000 kg.

Preciznost ili tolerancija uravnoteženja zove se specifična neuravnoteženost ili zaostala ekscentričnost e i računa se po izrazu:

$$e = \frac{U}{m}$$

gdje je:

U – neuravnoteženost [gr mm]

m – masa [kg]

e –specifična neuravnoteženost [μm]

Troškovi uravnoteženja rastu sa porastom tačnosti. Iskustveni podaci o potrebnoj tačnosti za pojedine mašinske dijelove dati su preporukama VDI 2060.

Neuravnoteženost može biti statička i dinamička. Postupak uravnoteževanja zavisi od toga koja je vrsta neuravnoteženosti;statička ili dinamička.

8.5.2. Statičko uravnoteženje

Statičko uravnoteženje primjenjuje se na rotore oblika diska tj. rotore kod kojih je masa skoncentrisana u jednoj ravni, odnosno rotore koji su male aksijalne širine (b) i velikog prečnika (D). Tu spadaju radna kola turbomašina, kaišnici, zamajci, točila za brušenje, propeleri, elise i dr. Ovom postupku podvrgavaju se i pojedina radna kola višestepenih turbomašina, prije završene montaže, kako bi se smanjila neuravnoteženost prilikom dinamičkog uravnoteženja sklopljenog rotora.

Statičko uravnoteženje vrši se na uređajima sa paralelnim vođicama. Postupak se provodi tako što se rotor sa osovinom postavlja na paralelne

vođice. Zbog statičke neuravnoteženosti dolazi do kotrljanja rotora po vođicama, sve dok se ne uspostavi stabilna ravnoteža. Tada se obilježi vertikalni prečnik, zatim zaokrene rotor za 90° i na lakšoj strani pri obodu zalijepi probna masa od voska. Dodavanje mase vrši se sve do momenta postizanja indiferentne ravnoteže. Zatim se vrši mjerenje mase i poluprečnika te izračunava neuravnoteženost u [gr mm].

Ukoliko je neuravnoteženost veća od preporučene i dozvoljene (date u preporukama) vrši se korekcija. Tačnost postupka može se odrediti iz jednakosti aktivnog M i momenta trenja kotrljanja M_k .

$$M = M_k$$

$$\varepsilon \cdot M = f \cdot F$$

gdje je:

G – težina rotora [N]

ε – statička ekscentričnost [mm]

f – koeficijent trenja kotrljanja [mm]

Ovo je stariji način uravnoteženja koji se provodi ispitivanjem ravnoteže, ali i uravnoteženjem u jednoj ravni na mašini za uravnotežavanje. Ako je $\varepsilon < f$ onda se ovim postupkom ne može odrediti statička neuravnoteženost. Rukavci osovine pribora za uravnotežavanje treba da budu tako obrađeni da ovalnost i koničnost ne budu veći od $0,01 \div 0,15$ mm. Pribor treba da ima mogućnost horizontalnog podešavanja u uzdužnom i poprečnom pravcu.

Širina vođica b bira se prema težini diskastog rotora.

$$b = 0,35 \frac{FE}{\sigma_d^2 \cdot d} [mm]$$

gdje su:

F – statičke reakcije vođice [N],

E – modul elastičnosti materijala rukavca i vođice [N/cm²],

σ_d – dozvoljeni površinski pritisak [N/cm²],

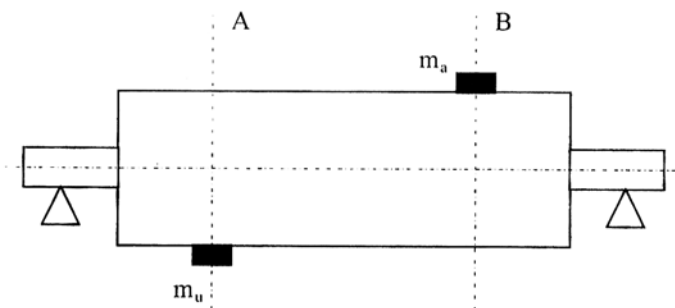
d – prečnik rukavca osovine [cm].

Postupci uravnotežavanja nazvani statičko uravnoteženje dobili su ime po tome što se koriste statičke metode stabilne i labilne ravnoteže. Ovu vrstu uravnotežavanja moguće je primijeniti samo na diskaste rotore. Tačnost metode je ograničena, a vrijeme potrebno za postizanje ravnoteže je veliko.

Zbog toga se rijetko primjenjuje. Ovo je suštinski postupak uravnotežavanja u jednoj ravni.

8.5.3. Dinamičko uravnoteženje

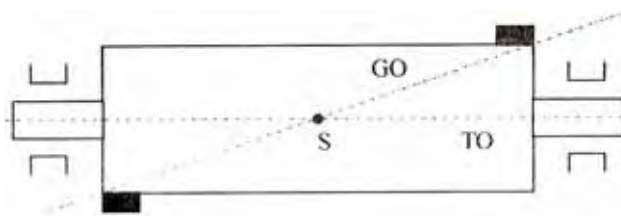
Postupci dinamičkog uravnotežavanja primjenjuju se na rotore sa tzv. aksijalnom izduženošću. Na slici 8.17. prikazan je položaj masa u ravnima A i B. Ravnj A i B su aksijalno pomjerene i nema mogućnosti statičkog uravnotežavanja izuzev kada rotor miruje.



Slika 8.17. Položaj masa na rotoru

Ako se tako statički uravnotežen rotor stavi u pokret nastaje spreg sila koji izaziva obrtno kretanje rotora oko težišta. Neuravnoteženost se može pojaviti pri rotaciji tj. pri dinamičkom ponašanju rotora.

Da bi se izvršilo mjerenje predmet se mora prethodno zarotirati. Neuravnoteženost ove vrste zove se dinamička neuravnoteženost. Rotor na slici 8.18. rotira oko ose koja je geometrijska osa odnosno osa rotacije. Ako se neuravnoteženi rotor obrće slobodno bez prinuda koje stvaraju oslonci onda je masa rotora raspoređena oko ose koja se zove težišna osa.

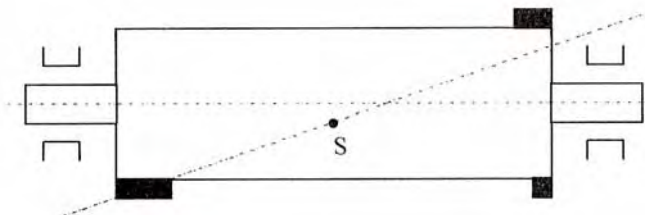


Slika 8.18. Čista dinamička neuravnoteženost

Neuravnoteženo tijelo nastoji da se obrće oko sopstvene ose inercije. Ležišta su ta koja određuju prinudnu osu rotacije zbog čega nastaju udarna opterećenja u ležajevima. Iz ovoga slijedi i definicija dinamičkog uravnoteženja koja glasi: Dinamički uravnotežiti tijelo znači dovesti do poklapanja osu inercije i geometrijsku osu tog tijela.

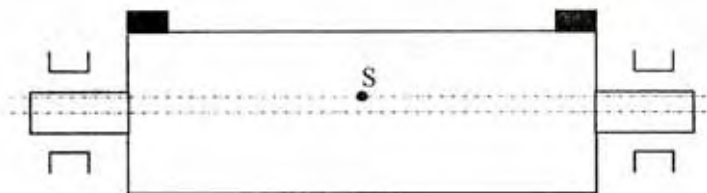
Uopšteno i za slučaj čisto statičke i čisto dinamičke neuravnoteženosti može se zaključiti da će tijelo biti uravnoteženo ako se geometrijska osa i osa inercije dovedu do poklapanja.

U praksi se rijetko susreću slučajevi čiste statičke i dinamičke neuravnoteženosti. Uglavnom su to kombinovani slučajevi dobiveni superponiranjem dva prethodna slučaja.



Slika 8.19. Statička neuravnoteženost

Na slici 8.19. je prikazan slučaj statičke neuravnoteženosti, a na slici 8.20. kombinovana statička i dinamička neuravnoteženost. Na slici 8.19. se vidi da se osa inercije pomjera paralelno u odnosu na geometrijsku i još zauzima jedan ugao sa njom.

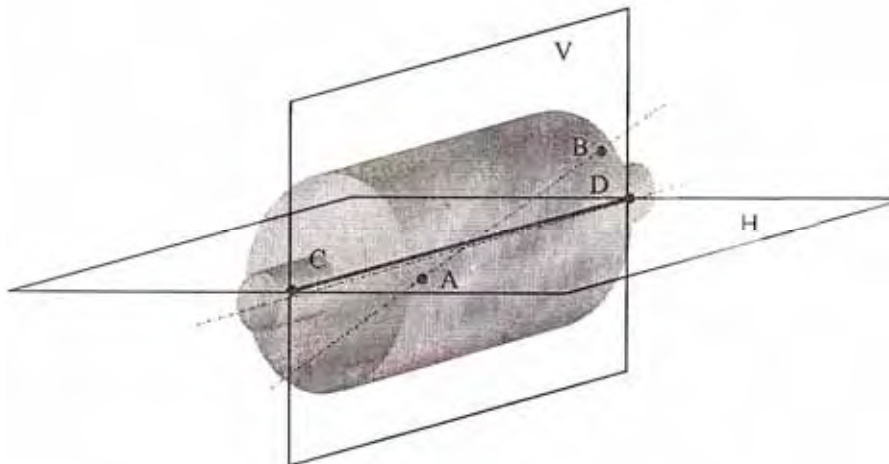


Slika 8.20. Statičko-dinamička neuravnoteženost

Cilj uravnotežavanja svodi se na težnju da se osa inercije i geometrijska osa dovedu do poklapanja, ako rotor treba da se obrće bez vibriranja. Pošto je geometrijska osa fiksna, određenim zahvatima treba pomjeriti osu inercije i dovesti je do poklapanja sa geometrijskom.

Položaj osa u prostoru određuje se sa po dvije tačke. Na slici 8.21. prikazana je geometrijska osa koja prolazi kroz ravni V i H neuravnoteženog tijela i određuje prodorne tačke A i B, dok osa inercije prolazi kroz tačke C i D. Poklapanje osa svodi se na poklapanje tačaka A i C u ravni V odnosno B i D u ravni H.

Postupak pomjeranja osa inercije provodi se dodavanjem masa m_V i m_H . Uravnotežavanje krutog (nedeformabilnog) rotora u osama koje su raspoređene po dužini ose rotacije vrši se korekcijom u dvije aksijalno pomjerene ravni. Neuravnotežena tijela, koja rotiraju, a treba ih uravnotežiti, mogu se svrstati u grupe prikazane u tabeli 8.4.



Slika 8.21. Superponiranje statičke i dinamičke neuravnoteženosti

8.5.4. Metode uravnoteženja

U principu postoje dva metoda uravnoteženja i to:

- na mašini za uravnoteženje i
- uravnoteženje u sopstevnim ležištima

Uravnoteženje na mašinama za uravnoteženje se primjenjuje prilikom izvođenja remonta rotirajućih dijelova ili cijelih agregata, ali i u toku proizvodnog procesa. Drugi način uravnoteženja u sopstvenim ležištima koristiti se u postupku održanja ali ne i u proizvodnom procesu.

Mašina za uravnoteženje

Postupak uravnoteženja provodi se tako što se ispitivani dio zarotira do odgovarajućeg broja obrtaja i izmjeri pomjeranje ili kinetički pritisak. Izmjerene veličine su proporcionalne masi uravnoteženja. Informacija se pretvra u veličinu korekcije mase na unaprijed određenom poluprečniku i postavljenoj ravni korekcije. Veličina koju pokazuje specijalna mašina za uravnoteženje su korekcijska masa i njen položaj.

Zajedničke osobine svih mašina za uravnoteženje su:

- da se kinetički pritisak izrazi preko neuravnoteženosti u usvojenoj korekcijskoj ravni koja je uzrok pojave i
- da se razdvoji međusobni uticaj neuravnoteženosti u korekcijskoj ravnima da bi se za svaku ravan mogli očitati sa instrumenta.

Grupa	Obilježje	Primjedbe	Način uravnotežavanja	Primjedbe
A	Rotori sa čvrstim vratilima i nepomjerljivim masama	Rotori elektromotora normalne gradnje, kaišnici, rotacioni dijelovi mašina alatki, zamajci i dijelovi mašina za valjanje papira i štamparskih mašina, spojnice, ventilatori od liva i presovanog liva i čvrste ventilatorske konstrukcije	Uravnotežiti u dvije ravni. Broj obrtaja prilikom uravnotežavanja manji ili jednak radnom broju obrtaja. Nikako ne preći radni broj obrtaja. Uravnoteženje sa nižim brojem obrtaja.	A1, A2
B	Rotori sa čvrstim vratilom, a pomjerljivim dijelovima: 1. sa zglobnim dijelovima koji se pomjeraju pri rotaciji,	Centrifugalni regulator, regulator parnih turbina	Uravnotežavanje u dvije ravni. Broj obrtaja jednak radnom broju obrtaja. Pri velikim neuravnoteženostima eventualno izvršiti prethodno uravnotežavanje.	B1
	2. sa čvrstim vratilom i pomjerljivim elementima koji se pri prvom zalijetanju zaustavljaju u određenoj poziciji,	Namotan rotor elektromotora, centrifuga izotopa.	Uravnotežavanje u tri faze: 1. Uravnotežavanje u 2 ravni pri broju obrtaja manjem ili jednakom pogonskom broju obrtaja. 2. Centrifugiranje sa 20% većim brojem obrtaja. 3. Ponoviti uravnotežavanje prema 1.	B2
	4. rotori čvrstih vratila sa pomjerljivim elementima koji se u centrifugalnom polju elastično deformišu.	Ventilatori lake gradnje. Doboši dreš mašina, udarni noževi mješalica.	Uravnotežavanje u 2 ravni. Broj obrtaja uravnotežavanja jednak pogonskom broju obrtaja. Pri velikim neuravnoteženostima može se izvršiti preuravnotežavanje na nižem broju obrtaja.	B3
C	Rotori sa elastičnim vratilima	Dugačka zglobna vratila, brzohodni valjci, brzohodne turbine, rotori motora trolejbusa, dugolinijski induktori elektromašina.	Uravnoteženje u više faza: 1. Uravnoteženje u 2 ravni pri nižem broju obrtaja. Ravni uravnoteženja približno 1/5 od dužine rotora. 2. Dinamičko podešavanje.	

Tabela 8.4. Vrste predmeta za uravnotežavanje

Mašine za uravnoteženje dijele se na:

- univerzalne i
- specijalne.

Na **univerzalnim** mašinama vrši se uravnoteženje svih vrsta rotirajućih dijelova. Mašine se svrstavaju prema masi dijelova koji se uravnotežavaju.

Specijalne mašine se prema namjeni dizajniraju za pojedine funkcije npr. za uravnotežavanje: automobilskih točkova, kola ventilatora pumpi, koljenastih vratila, SUS motora, spojnica i sl.

Uravnoteženje u sopstvenim ležištima

Uravnoteženje u sopstvenim ležištima bazira se na mjerenju amplituda oscilovanja dijelova mašina, čiji je rotor neuravnotežen u toku rada. U trenutku kada amplituda vibracije postane nula, rotor je uravnotežen. Ovo uravnoteženje može se vršiti u dvije korekcije ravni, a kod elastičnih rotora u više ravni.

U ravnotežavanje u sopstvenim ležištima može se podijeliti prema opremi koja se koristi na:

- uravnoteženje rotora sa brojem obrtaja manjim od 200 ob / min i
- uravnoteženje rotora sa brojem obrtaja većim od 200 ob / min.

Mjerna oprema za uravnoteženje

Za mjerenje amplituda vibracija rotora koji se obrće malim brojem obrtaja koriste se **komparatori**. Za mjerenje amplituda vibracija za brojeve obrtaja od 100-200 o/min, koriste se **vibrometri** koji sadrže indukcionu pretvarač.

Izmjerena amplituda vibracija je mjera za veličinu neuravnoteženosti. Nakon toga se na rotor postavlja alternativno nekoliko masa i nakon svake mjeri amplituda rezultujuće neuravnoteženosti. Na osnovu mjerenja dobivenih amplituda računskim putem ili grafoanalitičkom metodom odredi se položaj neuravnoteženosti rotora.

Prema broju postavljenih masa na rotor, odnosno izmjerenih amplituda oscilovanja, uravnoteženje može biti:

- sa dvije probne mase,
- sa tri probne mase,
- sa šest ili dvanaest probnih masa

Ove metode proračuna položaja i veličine neuravnoteženosti se koriste za brojeve obrtaja veće od 200. Međutim za taj broj obrtaja mogu se koristiti i specijalni uređaji za uravnoteženje uz čije korištenje se jednostavnije dolazi do rezultata i sa manjim brojem mjerenja.

Uređaji za uravnoteženje u sopstvenim ležištima prema principu rada dijele se na:

- uređaje sa podesivim frekventnim filterom i stroboskopom
- uređaje sa foto-čelijom.

Prema namjeni mogu biti:

- univerzalni i
- specijalni.

8.6. Dinamička ispitivanja

U razvoju proizvoda i sistema koriste se vibraciona i udarna ispitivanja. Za dosta mašina i uređaja mora se odrediti nivo vibracionih karakteristika bilo onih stalnih ili prelaznih. Za takva ispitivanja koristi se specijalna ispitna oprema, često planirana samo za određenu namjenu. Ova vrsta ispitivanja se koristi u automobilskoj i avionskoj ali i u namjenskoj proizvodnji.

Suština ispitivanja i mjerenja sastoji se u simulaciji ekstremnih dinamičkih uslova u kojima će se koristiti tehnički sistemi. Često je teško ili nemoguće znati ili prognozirati uslove u kojima će raditi sredstvo, mašina ili uređaj koji se dizajnira.

Dinamička ispitivanja obuhvataju faktore kao što su:

- Faktori rezonancije,
- Maksimalne amplitude i frekvencije pri kojima dolazi do razaranja ispitivanog objekta, koji se nije mogao odrediti u fazi dizajna.

Dobivene informacije koriste dizajneru da izvrši korekcije na tehničkom sistemu i propiše uslove pod kojima će se koristiti.

Drugi razlog zbog koga se vrše dinamička ispitivanja su testovi ubrzanja. Dinamička ispitivanja dijele se na:

- Vibraciona ispitivanja i
- Udarne testove.

8.6.1. Vibracioni pobudni sistemi

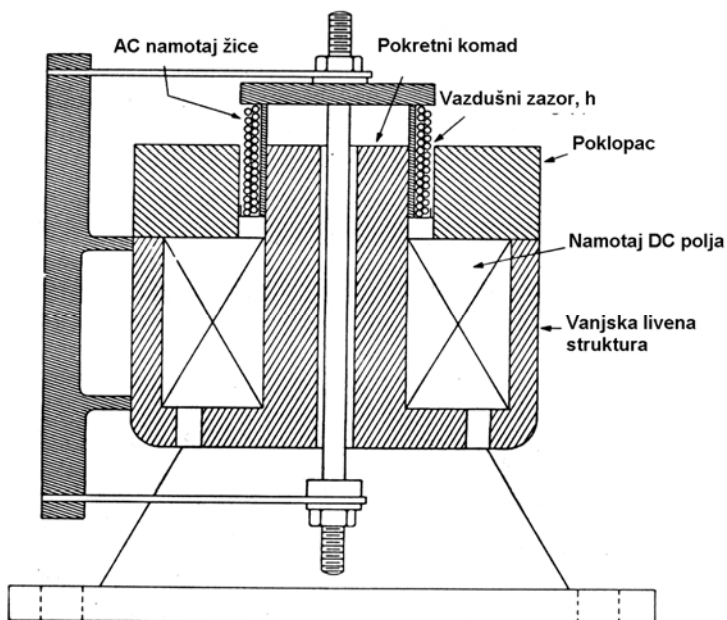
Vibraciona ispitivanja se vrše na instalacijama za ispitivanja kod kojih postoji izvor koji daje pomjeranje: takvi izvori pomjeranja zovu se pobuđivači (shaker). Pobuđivači proizvode najčešće prosto harmonijsko kretanje ali postoji i takvi kojima se ostvaruje složeno kretanje.

Prema principu pobude pobuđivači mogu biti:

- Elektromagnetni,
- Mehanički,
- Hidrauličko-pneumatski,
- Akustični.

Elektromagnetni pobudni sistemi

Sastoji se od kalema koji daje konstantan magnetni fluks kroz zračni zazor h i pokretnog kalema koji predstavlja izvor promjenljive frekvencije. Za dobivanje konstantnog polja koristi se permanentni magnet. Oslonac za kretanje kalema su fleksibilne opruge koje dozvoljavaju kalemu da se na njega prenese kretanje između dva magnetna polja, slika 8.22.



Slika 8.22. Konstrukcija glave elektromagnetnog pobuđivača

Sila F potrebna da se potresa objekat koji se ispituje, jednaka je razlici silekoja nastaje magnetnom interakcijom između vođice i polja kalema i sile potrebne za ubrzanje dijelova sistema koji služi za ispitivanje raznih objekata. U praksi se ukupna sila dobije kao zbir tezine objekta ispitivanja i svih dijelova ispitnog sistema.

Mehanički pobudni sistemi

Postoje dva osnovna tipa mehaničkih pobuđivača posmatrano prema pokretanju:

- Direktno pokretani i
- Inercijalni.

Direktno pokretani pobuđivači sadrže jednostavan ispitni sto koji dozvoljava kretanja koja se ostvaruju pomoću mehaničkih veza, kao što su: poluge, štapni i bregasti mehanizmi.

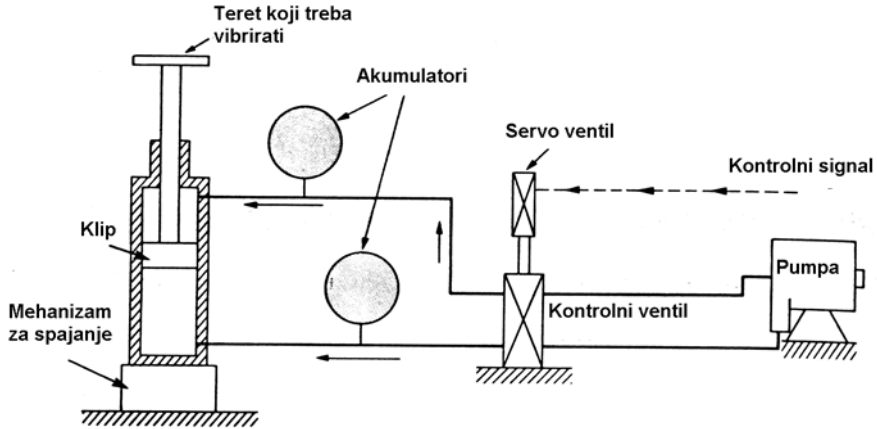
Inercijalni pobuđivači koriste rotirajuće mase kao pobudne sile. Odgovarajuća pobudna sila je dozvoljeni skup težina koji omogućava rotaciju u suprotnom smjeru što poništava djelovanje sila koje dovode do vibracija. Tako npr. ako sile djeluju u jednom pravcu x , mehanički inercijalni pobuđivači pojačavaju dejstvo sila u y pravcu. Frekvencija sistema se kontrolira pomoću motora koji imaju podesivu brzinu. Inercijalni sistemi imaju dvije osnovne prednosti:

- Jednostavno dobivanje visokih vrijednosti pobudnih sila
- Visoke amplitude vibracionih sistema ostaju nepromijenjene frekvencije tokom više ciklusa ispitivanja.

Hidraulički i pneumatski pobuđivači

Nedostatak elektromagnetnih i mehaničkih vibracionih pobudnih sistema su ograničeno opterećenje i ograničena frekvencija. Ovaj problem može se riješiti pomoću hidrauličkih i pneumatskih pobuđivača.

Na slici 8.23. je prikazan sistem hidrauličkog pobuđivača za vibraciona ispitivanja. Električki pokretan servo ventil izvršava regulaciju toka u oba krajnja položaja klipa u cilindru, pomoću akumulatora postavljenih između. Kretanje se stalno ponavlja prema sinusnom zakonu i izvršni mehanizam povezan sa vibracionim stolom pokreće sto na kome se nalazi ispitivani objekat.



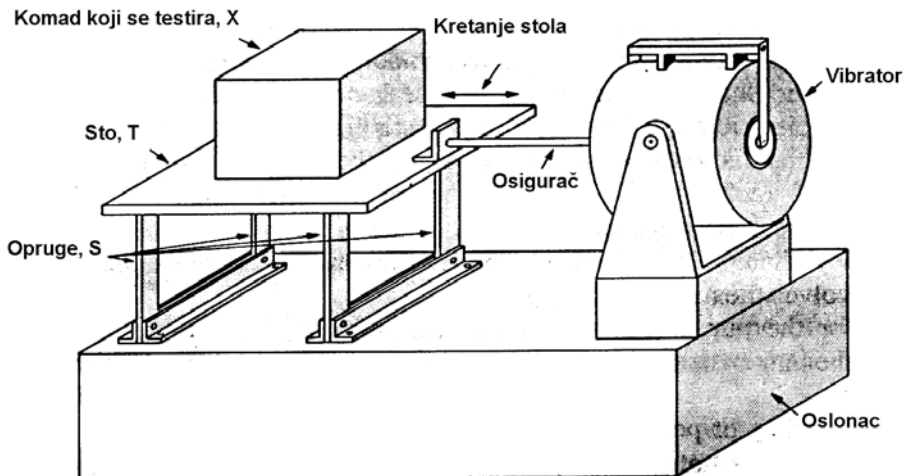
Slika 8.23. Shema hidrauličkog vibratora

Metodi vibracionih ispitivanja

Dva su osnovna metoda za dinamička ispitivanja objekata:

- metod nanošenja sinusnog opterećenja,
- rezonantni metod

U prvom slučaju ispitivani objekat se povezuje sa vibracionim stolom koji se opterećuje dozvoljeni opterećenjem i zajedno sa njim pokreće se ispitivani objekat.



Slika 8.24. Ispitna instalacija

Drugi metod koristi vezu mase i opruge koje imaju željene karakteristike prirodne frekvencije. Ispitivani objekat se postavi kao dio sistema koji se pokreće pomoću pobuđivača.

8.6.2. Udarne ispitivanja

Danas se nastoje dizajnirati mašine koje izvršavaju operacije visokim brzinama, a njihovi dijelovi imaju rotaciono i translatorno kretanje koje se odvija visokim brzinama. Porastom brzine, raste ubrzanje ali ne uvijek direktno proporcionalno porastu brzine nego kao kvadrat brzine. Veličina ubrzanja i gradijant ubrzanja rastu, a rezultujuća opterećenja mjerenih objekata postaju mnogo već od nanesenog opterećenja. O ovome se mora voditi računa u dizajnu novih mašina.

Udarne ispitivanja pripadaju ispitivanju ubrzanja. Ispitivanje ubrzanja su ona ispitivanja kod kojih se opterećenje ispitivanog objekta vrši opterećenjem ubrzanjem. Ova ispitivanja mogu biti:

- Statička kod kojih se amplituda ubrzanja malo mijenja u toku ispitivanja
- Udarne kod kojih se amplituda ubrzanja mijenja od nižih do visokih vrijednosti.

U oba slučaja osnovno je odrediti koje ispitivanje treba vršiti na objektu za vrijeme i nakon djelovanja opterećenja.

Pasivni tip ispitivanja ubrzanjem jeste konstantno ili sporo mijenjanje ubrzanja koje može dostići visoke vrijednosti. Tu spadaju centrifuge, manevarska avijacija. Cilj je ostvariti uslove koji su u upotrebi takvih sistema pogodni za čovjeka. Često se ova ispitivanja izvode kao specijalna sa posebnom opremom i za posebne namjene.

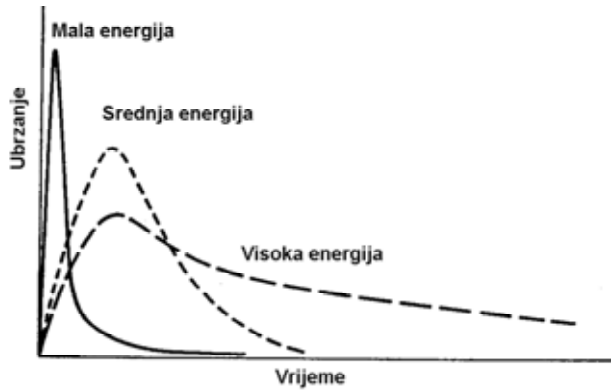
Udarne ispitivanja se provode da bi se utvrdila korisnost mnogih objekata. Za izvršavanje postupka udarnog opterećenja treba poznavati veličinu ubrzanja, vrijeme trajanja nanošenja ubrzanja i karakteristike mjerenog objekta.

Udarne ispitivanja mogu biti tzv. ispitivanja niske i visoke energije, slika 8.25.

Nisko energetska udarna ispitivanja su ona kod kojih se nanse visoke amplitude ubrzanja. u kratkom vremenskom intervalu, pa se zovu i intenzivna ili oštra opterećenja. Brzine kretanja i energija koja se pri om dobije nije velika pa se zovu nisko energetska udarna ispitivanja.

Visoko energetska udarna ispitivanja se koriste za dužine vremena koje dozvoljavaju stvaranje visokih brzina. Amplitude ubrzanja su male, a ova ispitivanja se označavaju kao impulsna ili dinamička. Ova opterećenja su

opasnija od prethodnih. Udrana ispitivanja se mogu nazvati i energetskim opterećenjem.

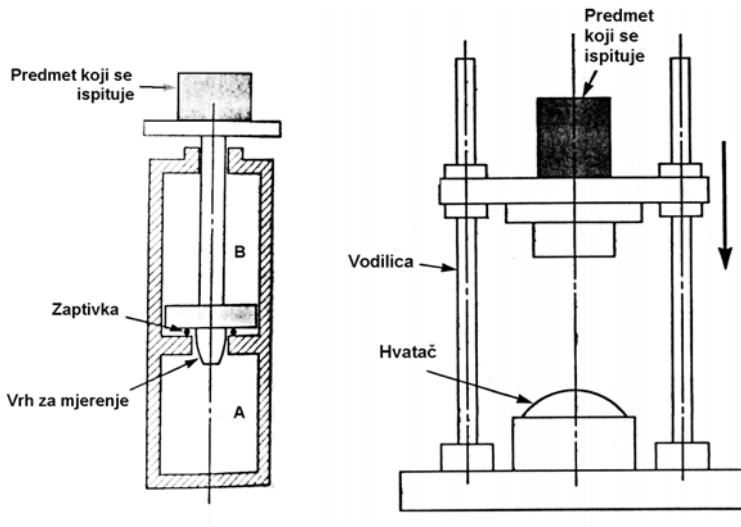


Slika 8.25. Karakteristike mehanički proizvedene energije

Sredstva i metode za stvaranje udarnih opterećenja

Da bi se postigla udrana opterećenja kao mediji se koriste komprimirani zrak, hidraulički fluid, opterećene opruge, a najčešće gravitaciono (mehaničko) opterećenje.

Na slici 8.26. dati su primjeri hidrauličkog i mehaničkog sredstva za ostvarenje udara.



Slika 8.26. Sredstva za ostvarenje udarnog opterećenja: a) hidrauličko, b) mehaničko

9. AKUSTIČKA MJERENJA

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Postavke o zvuku
3. Instrumenti, metode i standardi za mjerenje buke

9.1. UVOD

Sa porastom stanovništva i prenaseljenošću gradova, brzim tempom industrijskog razvoja i stvaranjem velikih industrijskih centara, modernizacijom i automatizacijom životnih uslova i usluga, ljudi se iz dana u dan sve više suočavaju sa problemom buke.

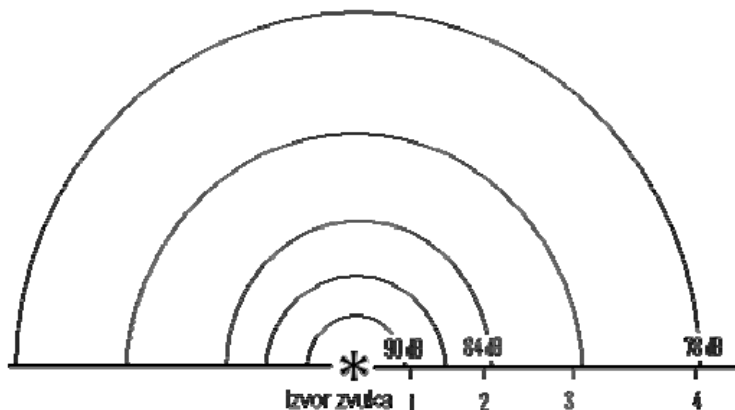
Prva saznanja i otkrića štetnog dejstva buke buke na čovjeka su starijeg datuma, ali tek poslije drugog svjetskog rata ovaj problem postaje aktuelan za društvo. Danas u svijetu, u uslovima brzog industrijskog razvoja, industrijska buka zauzima posebno mjesto i svojim štetnim dejstvom upozorava na organizovanu borbu protiv nje. Ta borba dobija vid naučne borbe i posljednjih godina postaje usmjerena na konkretne probleme. U mnogim zemljama, posebno industrijski razvijenim, u sastavu zavoda i instituta za zaštitu na radu, formiraju se grupe, odjeljenja, laboratorije koje imaju za cilj da toj borbi daju naučni karakter. Organizuju se naučne komisije, međunarodna savjetovanja i simpozijumi, gdje se na osnovu fizičkih veličina buke određuju zakonski propisi, pravila, i preporuke koje se odnose na uslove rada u industriji, stambenim prostorijama, školama, bolnicama – svugdje gdje se smatra da buka svojim dejstvom ugrožava čovjeka (organ čula sluha, nervni sistem i ljudski organizam uopšte).

Fenomen buke zahtjeva naučne spoznaje i istraživanje iz oblasti akustike i mehaničkih oscilacija čije poznavanje je vrlo kompleksno. Njeno efikasno otklanjanje traži ekipno angažovanje stručnjaka. Pored akustičara, fizičara, mašinskih i građevinskih stručnjaka ravnopravan udio u rješavanju ovih problema imaju i ljekari, sociolozi, psiholozi, službe zaštite na radu i dr. Nema sumnje, da su danas u svijetu, posebno u razvijenim industrijskim zemljama, u proučavanju buke postignuti veliki rezultati. Razrađeni su mnogi mjerni metodi i instrumenti za mjerenje i analizu, kao i metodi njenog efikasnog saniranja na nivou usvojenih propisa i normativa.

9.2. Postavke o zvuku

Buka je zvuk koji se javlja u čujnom području frekvencija od (20 ÷ 1000) Hz. Osim čujnog područja postoji infrazvuk frekvencije do 10 Hz i ultrazvuk frekvencije preko 1000 Hz. Za razmatranje u tehnici kada je u pitanju uticaj buke na čovjeka i stanje mašina i opreme bitan je čujni zvuk.

Zvuk predstavlja promjenu akustičnog pritiska, napona ili brzine zvučnog talasa koji se širi kroz neku sredinu. Izvori zvuka su tijela koja vibriraju. Zvučni talasi koje emituju mašinski sistemi su sfernog oblika, slika 9.1.



Slika 9.1. Zvučni talas

Amplituda zvučnog talasa

Ljudi su osjetljivi na jako širok opseg amplituda. Tamo gdje su visoke amplitude je prag bola, a na strani gdje su niske amplitude zvuka je prag čujnosti, što predstavlja jedva čujni zvuk pri potpunoj tišini. Jedinica za zvučni pritisak je pascal, Pa. Paskal je pritisak od jednog njutna po kvadratnom metru.

Energija ili snaga talasa je proporcionalna kvadratu amplitude. Da bi se izrazio širok opseg amplituda koristi se logaritamska skala. Uvodi se jedinica decibel ,dB kojom se određuje nivo zvuka preko omjera u logaritamskoj skali.

Frekvencija

Frekvencija zvučnog talasa izražava se u hercima, Hz. Raspon frekvencija koje daju visinu tona kod ljudi iznosi 20 do 20000 Hz.

Raspodjela akustične energije kao funkcije frekvencije zove se spektar zvuka .

U zraku se zvučni talas širi brzinom od 340 m/s. U tečnostima i kroz čvrsta tijela brzina zvuka je veća.

Normalni govor ima približno 70 dB, a zvukovi od 140 dB izazivaju bol u ušima.

9.2.1. Pojam buke

Postoje razne definicije buke. Po jednoj, buka je skup zvukova koji izazivaju nelagodnost, neprijatnost. Postoji mišljenje prema kome svaka zvučna pojava (šum, galama, lupa, govor i sl.) koja ometa rad i odmor predstavlja buku. Da bi neki zvuk nazvali bukom on mora da bude dovoljno jak, da se izdvaja od ostalih zvukova i dobro čuje. S obzirom da je buka zvuk različite jačine, i da zavisi od uslova i okolnosti u kojima se javlja i djeluje. Pri ocjenjivanju da li neki zvuk ima karakter buke ili ne, mora se ustanoviti dozvoljeni intenzitet, nivo ili jačina buke i ustanoviti da li pri tome ima ometanja odnosno izazivanje nelagodnosti i neprijatnosti u datom slučaju.

Prilikom rada mašine i uređaji proizvode buku. Zavisno od nivoa, buka može biti neiritirajuća, ali često je, kada pređe određeni nivo, štetna za fizičko i psihičko zdravlje ljudi. U fizičkom smislu povećani nivo buke utiče na oštećenje sluha, mada su psihička i fizička oštećenja usljed djelovanja buke individualna.

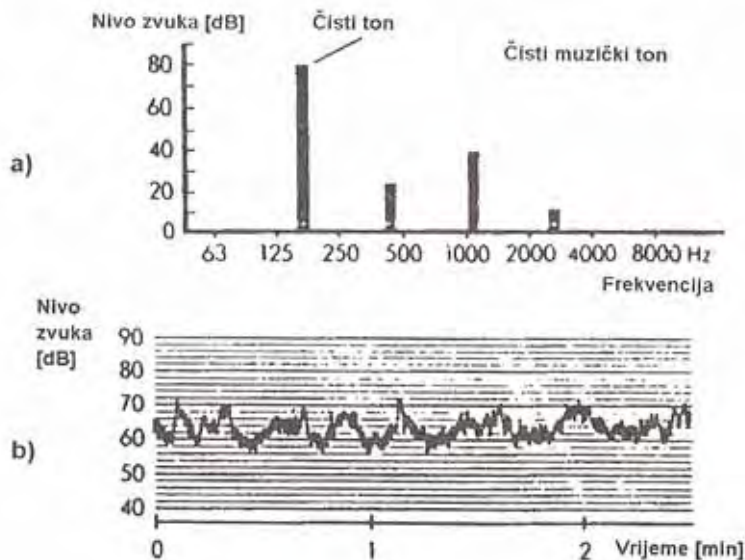
Pojava buke je često uzrok poremećaja u radu tehničkih sistema. Normalni nivo buke koji ljudski organizam podnosi je (65 ÷ 70) dB. Na tom nivou se može raspoznati govor u komunikaciji i to na udaljenosti do 1,5 m, a tačna granica između normalnog i iritirajućeg nivoa buke teško se može odrediti.

Buka je neželjeni zvuk i sadrži tonove različitih frekvencija. Čisti ton prikazan je na slici 9.2, čija je mjera frekvencija, a nivo, nivo zvuka.

Direktna buka određena je intenzitetom izvora buke i udaljenenošću od izvora. Indirektna buka zavisi od koeficijenta refleksije poda, stropa ili zida.

Amplituda zvučnog talasa (ralika u odnosu na zračni pritisak) određuje koliko će se glasno čuti buka. Frekvencija određuje visinu zvuka tj koliko brzo će se mijenjati zvučni pritisak.

Osim nivoa, frekvencija je važna karakteristika buke. Buka više frekvencije je opasnija od buke niže frekvencije pošto dijelovi mašina koji imaju više frekvencije brže vibriraju. Buka iz više različitih izvora proizvodi zvuk koji je višeg nivoa nego bilo koji iz pojedinačnog izvora. Tako npr. Ako dva izvora proizvode zvuk istog nivoa ukupan nivo zvuka je za 3 dB viši nego svaki pojedinačni. Ili, ako deset zvučnih izvora proizvodi buku ukupna buka je 10 dB višeg nivoa nego bilo koja pojedinačna.



Slika 9.2. Dijagrami nivoa zvuka u zavisnosti od:
a) frekvencije, b) vremena

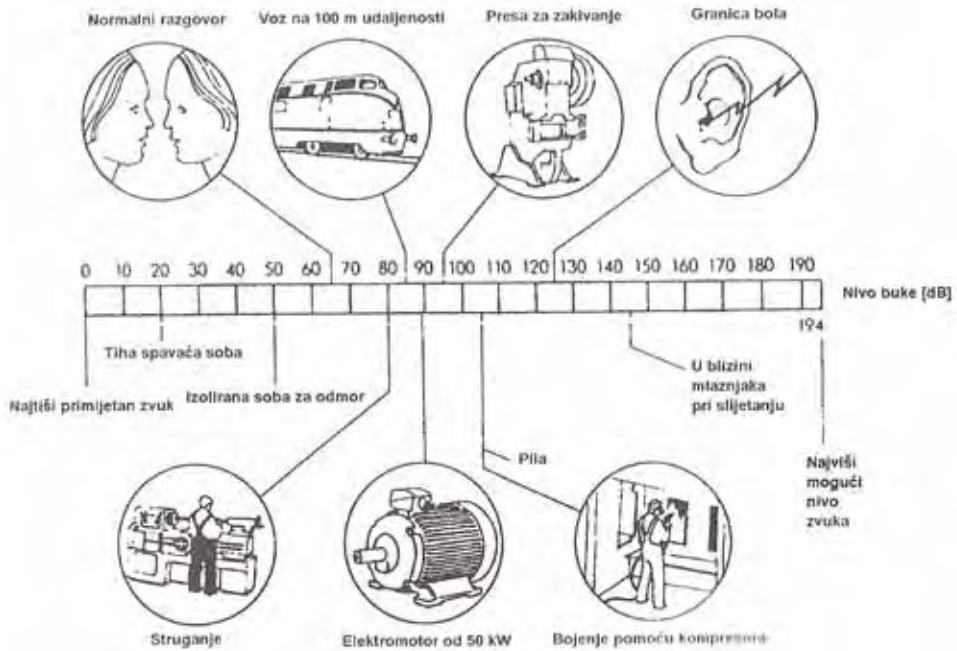
Akustični pritisak ili nivo buke u zvučnog talasa i promjena pritiska tj frekvencija usljed talasanja zvučne sredine su osnovne karakteristike buke.

9.2.2. Izvori buke

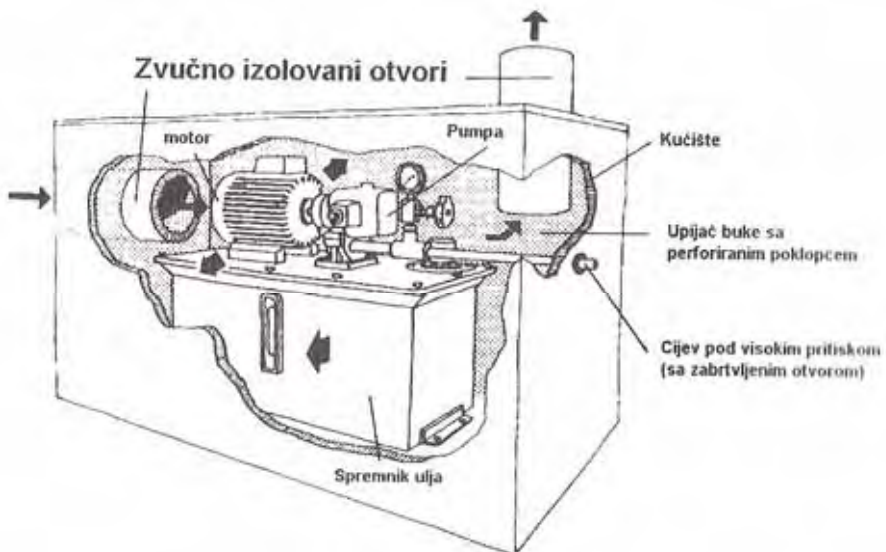
Glavni izvori buke su mašine i oprema. Do pojave buke na mašinama može doći iz različitih razloga i to kako na novim tako i na onim koje su duže vrijeme u upotrebi. To su npr. Ispuštanje zračne struje kroz ventile, pumpe, elektromotori, bučne mlaznice za komprimiran zrak, transmisije itd. Na slici 9.3. prikazani su neki izvori buke i nivoi u dB.

Buka može nastati i prilikom transporta materijala i gotovih proizvoda korištenjem kotrljača, ali i povremeno usljed udara u procesu utovara u kontejnere ili dijelove transportnog sistema. Ovi problemi mogu se prevazići zavisno od svakog konkretnog slučaja i to: minimumom ispuštanja zračne struje kroz ventile, promjenom pumpe u hidrauličnom sistemu, regulacijom rada ventilatora, instaliranjem motora i transmisije koji mirnije rade, montiranjem prigušnica na hidraulične linije itd.

U procesu transporta kotrljače se zbog bučnog rada mogu zamjeniti nekim drugim načinom transporta. Ukoliko sve to nije moguće i ako buka ne utiče na tehničko stanje sistema, odnosno ako nije posljedica poremećaja u radu mašina i postrojenja, može se vršiti ograđivanje zvučnim izolatorima, slika 9.4.



Slika 9.3. Primjeri nekih izvora buke



Slika 9.4. Ograđivanje hidrauličkog sistema

9.2.3. Karakteristike i klasifikacija buke

Prema izvorima koji proizvode buku i prema, vremnu trajanja, buka može biti: konstantno kontinuirana, konstantna i isprekidana, periodično promjenljiva buka, neperiodično promjenljiva i impulsna.




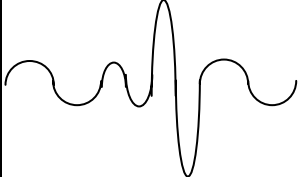

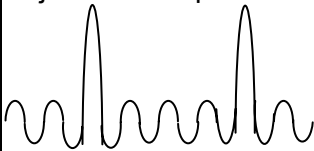
0 5 10 15 20 [dB]	Karakteristike	Izvori buke	Mjerenje
Male promjene 	Konstantna kontinuirana buka	Pumpe, elektromotori, reduktori, konvejeri	Direktno očitavanje mjerene vrijednosti
Isprekidana buka 	Konstantna ali isprekidana buka	Zračni kompresori, automatske mašine za vrijeme radnog ciklusa	Nivo buke u dB
Velike promjene 	Periodično promjenljiva buka	Masovna proizvodnja, struganje površina	Veličina buke u dB ili zvučni pritisak
Velike nepravilne promjene 	Promjenljiva neperiodična buka	Manuelni rad, struganje, brušenje	Zvučni pritisak, statistička analiza
Slični impulsi 	Ponovljeni impulsi	Automatske prese, pneumatske bušilice	Zvučni pritisak i veličina "pikova"
Pojedinačni impulsi 	Pojedinačni impulsi	Udarni čekići i prese	Zvučni pritisak i veličina "pikova"

Tabela 9.1. Karakteristike buke prema načinu promjene u vremenu

Zavisno od toga kakva je buka vrši se i odgovarajuće mjerenje. Oblik akustičnog talasa koji se dobije mjerenjem, određuje uzrok koji dovodi do pojave buke. To je važno za održavanje i planiranje održavanja rotirajućih dijelova. U tabeli 9.1. dat je pregled i veza karakteristika buke, izvora buke i mjerenje.

Karakteristike buke klasificirane su prema načinu na koji se mijenjaju u vremenu date u tabeli 9.1.

- Konstantna buka zadržava istu vrijednost za duže vrijeme ili je konstantna po intenzitetu u jednom periodu. Konstantna buka može da se prekida i ponavlja.
- Promjenljiva buka tačno se mijenja i ima neku prosječnu vrijednost koja se označava sa L.
- Impulsna buka traje vrlo kratko, manje od jedne sekunde.

9.2.4. Ciljevi mjerenja buke

Mjerenje buke je aktivnost bez koje se ne može planirati zaštita od buke kao ni formiranje baze u odnosu na koju će se prosuđivati o buci. Na osnovu mjerenja može se doći do pokazatelja valjanosti konstrukcije kada se radi o prototipu proizvoda ili stepenu eksploatacione očuvanosti same mašine ili njenih dijelova. Eksperimentalni parametri daju informaciju o geometrijskoj tačnosti, kvalitetu montaže i kompletnog dinamičkog stanja mašine.

Cilj mjerenja akustičnih parametara svodi se na:

- identifikaciju zvučnih izvora (izvora buke) koji imaju dominantan značaj,
- dobivanje baze za kontrolu mjerenja buke koja se može primjeniti na mašine i opremu i
- utvrđivanje nivoa buke i njegovo poređenje sa dozvoljenim vrijednostima za rad mašina i boravak zaposlenih u tom okruženju.

Okolina	Maksimalni nivo buke
Područje tolerantno na buku	80 dB
Poslovno područje	70 dB
Opće uredsko okruženje	60 dB
Tiho uredsko okruženje	50 dB

Tabela 9.2. Vrijednosti nivoa buke za različita područja

U tabeli 9.2 dati su nivoi buke za različita područja. Vrijednosti su poželjne i treba ih ostvariti i održavati na postojećem nivou

9.3. Instrumenti, metode i standardi za mjerenje buke

Mjerni instrumenti i metode koje se primjenjuju za mjerenje buke moraju biti u skladu sa standardima. Standardi uključuju:

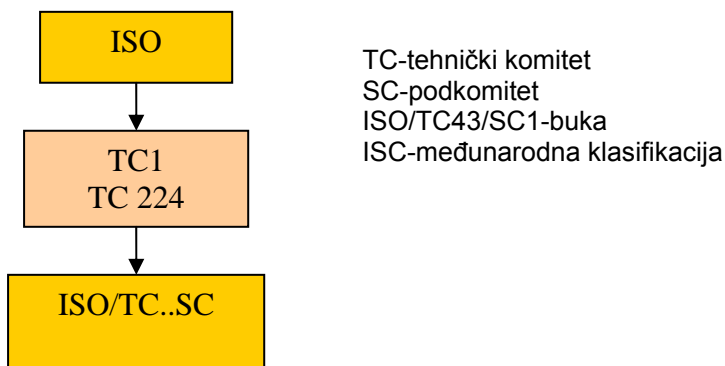
- uslove za mjerne instrumente,
- mjerne metode za mjerenje buke za različite tipove mašina i mjerne metode koje definiraju uticaj buke na čovjeka
- procjenu buke i štetnih efekata.

9.3.1. Standardi za mjerenje buke

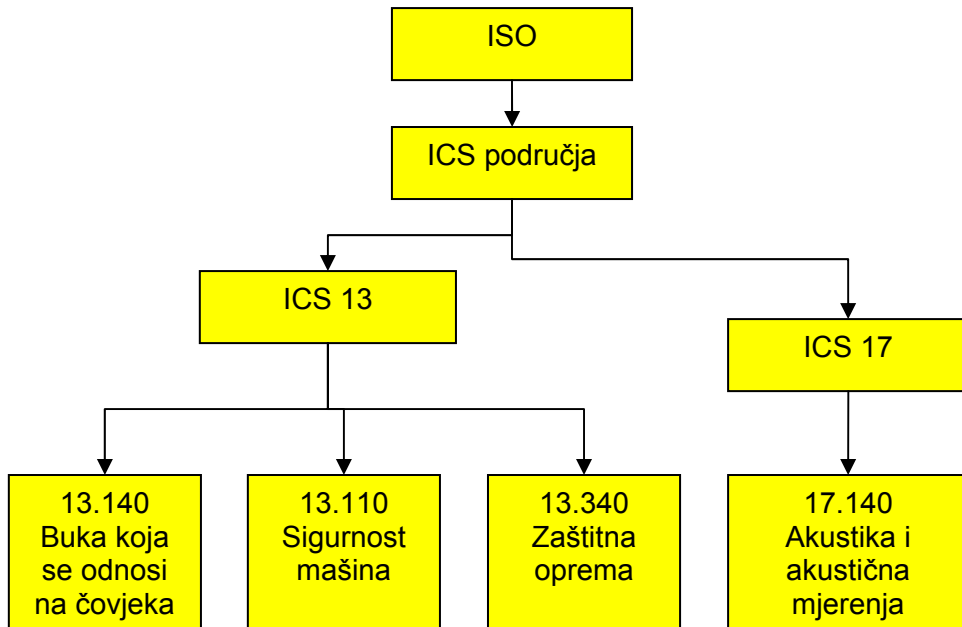
Najvažniji standardi u o području mjerenja buke obuhvaćani su standardima

- IEC (International Electrotechnical Commission) i
- ISO (International Organization for Standardization),

pri čemu je IEC nadležan u području konstrukcije instrumenata, a ISO u području mjerne tehnike, eksperimentalnih uslova, mjernih parametara i njihovih granica te rezultata mjerenja.



Slika 9.5. Standardi za mjerenje i analizu buke



Slika 9.6. Međunarodna klasifikacija standarda u području buke

Neki od standarda koji se odnose na područje buke koja djeluje na ljude 13.140 su:

- ISO 226:2003- Akustika Normalni nivo glasnosti
- ISO 1996-1:2003 Akustika - Opis mjerenja okolišne buke
- ISO 389-1:1994 Akustika - referentna nula za audiometrijsku opremu - prvi i drugi dio
- ISO 389-3:1994 Akustika - referentna nula za kalibraciju audiometrijske opreme, treći dio.

U grupi standarda 13 340 koji se odnose na zaštitnu opremu od buke su:

- ISO 4869-1:1990 Akustika-yaštitnici za uši, subjektivne metode za mjerenje pojačanja zvuka
- ISO/TR 48969-4:1998 Akustika zaštitnici za uši dio4.

U grupi 13.110 koji odnosi se na sigurnost mašina spadaju standardi:

- ISO/TR 12100-1:1992 Sigurnost mašina, osnovni koncepti, osnovni principi dizajna, prvi dio, osnove
- ISO 14121:1999 Sigurnost mašina, sigurnost principi ocjene rizika
- ISO 15534-3:2000 Ergonometrijski dizajn za sigurnost opreme.

U grupu standarda 17.140 koji se odnose na akustiku i akustična mjerenja spadaju

- 17.140.01- opće odredbe o mjerenju buke u koje spadaju standardi
- ISO 16:1975 Standardni mjerač frekvencija
- ISO 266:1997 Poželjne frekvencije
- ISO 532:1975 Metode računanja glasnosti
- ISO 1683:1983 Preferirani referentni nivoi buke
- ISO 3740:2000 Određivanje snage zvučnog izvora
- ISO 6926:1999 Zahtjevi za karakteristikama i kalibracija referentnih zvučnih izvora
- 17.140.20 - buka koju proizvode mašine i oprema
- 17.140.30 – buka koju prave transportna sredstva itd.

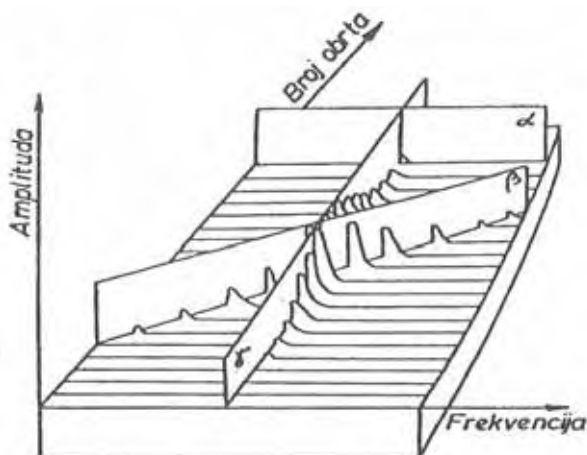
9.3.2. Uticaji na mjerenja buke

Postupak mjerenja buke mašina i uređaja odnosi se na definisanje frekvencija koje dolaze od zvučnih izvora, a mjeri se ukupni zvučni nivo i frekventni spektar.

Na snimljeni spektar najviše utiču:

- tehnološke nesavršenosti rotirajućih elemenata od čega buku najviše proizvode: ležajevi, rotor, zupčanici, turbinska kola itd.,
- postojanje prinudne sile sa pobudnom frekvencom koja je jednaka ili bliska nekoj od sopstvenih frekvenci mašina (noseća struktura, poklopci, vratila, zupčanici itd.)

Sa promjenom broja obrtaja u spektru po frekventnoj osi pomjeraju se vrhovi koji odgovaraju rotirajućim pobudama, a vrhovi koji odgovaraju sopstvenim frekvencama mijenjaju se po veličini. To se vidi iz Campbellovog trodimenzionalnog dijagrama, slika 9.7.



Slika 9.7. Campbellov trodimenzionalni dijagram

9.3.3. Instrumenti za mjerenje buke

Instrumenti za mjerenje buke vrše pretvaranje zvuka u neku drugu energiju. Pomoću mikrofona i pretvarača zvuk, se detektuje i pretvara u električni signal. Najčešće se koriste instrumenti za mjerenje buke koji rade sa ugrađenim:

- elektrostatičkim,
- elektrodinamičkim,
- piezoelektričnim i
- magnetostrikcionim pretvaračem.

Različiti instrumenti za mjerenje buke imaju mogućnost statističke ili frekventne analize primljenog signala, a mogu dalje vršiti računanje izmjerenih vrijednosti u željeni oblik ili odgovarajuće jedinice, sve zavisno od problema koji se analizira.

Najjednostavniji instrumenti su dozimetri za mjerenje buke u toku radnog dana. Međutim u industriji nivo buke je promjenljiv i složen pa se koriste i složeniji uređaji kao što su analizatori nivoa buke i analizatori intenziteta buke. Prvi mogu da vrše statističku analizu buke u toku vremena, a drugi daju informaciju o veličini buke po jedinici površine u datoj poziciji.

Uređaji za sofisticirana mjerenja u laboratorijskim i pogonskim uslovima daju frekventni spektar u vidu Campbellovog dijagrama.

Na alatnim i drugim mašinama snimanje ukupnog nivoa buke i frekventnog spektra vrši se na različitim mjernim mjestima i za različite snage sa

različitom udaljenošću mikrofona. Na osnovu frekvencije buke određuje se izvor buke i metod za kontrolu buke.

Analizom podataka dobivenih mjerenjem može se doći do informacije o izvorima buke, a s tim u vezi i preduzeti mjere za njihovo smanjenje ili potpuno uklanjanje. Od mjerača nivoa buke-zvuka se zahtijeva da mjeri zvuk različitog nivoa, spektra i oblika zvučnih talasa u različitim uslovima distribucije izvora zvuka i refleksije na granicama zvučnog polja.

Tipovi (metara) mjerača nivoa zvuka prema tačnosti mjerenja

Mjerači nivoa zvuka prema IEC 651-1979 i IEC 804-1985 , svrstavaju se u četiri grupe:

- Tip 0, laboratorijski referentni standardi namijenjeni za kalibraciju drugih metara, mjerača nivoa zvuka.
- Tip 1, precizni metri mjerači nivoa zvuka za opću namjenu ,općenito na terenu gdje se traže precizna mjerenja.
- Tip 2, mjerači opće namjene za upotrebu na terenu i za snimanje podataka nivoa buke za dalju analizu frekvencija.
- Tip 3, israživački mjerač zvuka koji služi za određivanje uslova okoline po pitanju buke.

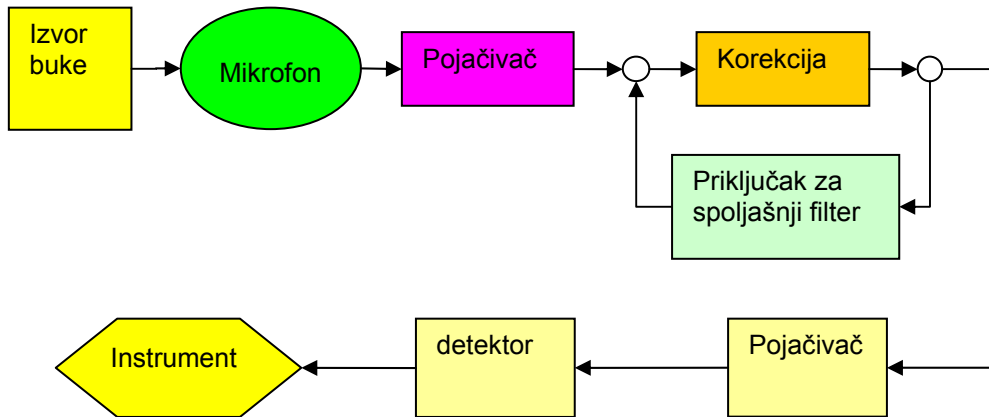
Prema složenosti mjerači buke se dijele na:

- Najjednostavnije mjerače buke ili dozimetre koji se koriste za mjerenje buke
- Analizatore nivoa buke koji se koriste u dijagnostičke svrhe

Princip rada mjerača buke

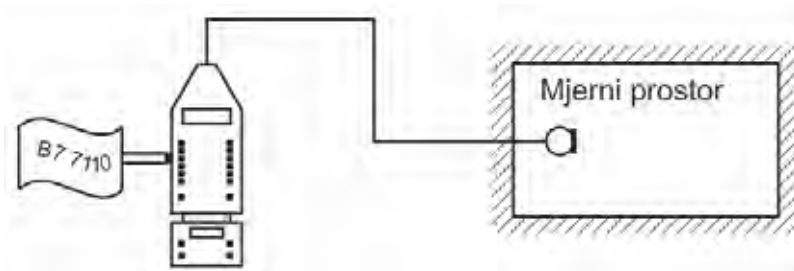
Mjerač buke, čija je shema dana na slici 9.8, je mjesto sredstvo koje reagira na zvuk slično kao čovjekovo uho i daje objektivna reproduktivna mjerenja zvučnog nivoa. Zvučni signal se pretvara u električni signal pomoću mikrofona visokog kvaliteta. Signal je slab pa se mora pojačati da bi se očitao na instrumentu. Poslije prvog pojačanja signal prolazi kroz korektivni filter. Poslije daljeg pojačanja signal je toliko jak da da otklon na instrumentu. Efektivna vrijednost signala je određena u detektoru efektivne vrijednosti. Očitana vrijednost je nivo zvuka u dB. Signal zvuka može se dobiti sa izlaznog utikača i vodi na vanjske instrumente kao što su magnetofoni, dozimetri buke ili pisači. Efektivna vrijednost, RMS, je specijalan oblik matematičke srednje vrijednosti. Važna je jer direktno

zavisu od energije zvučnog signala. Detektor vršne vrijednosti može da se ugradi ako se želi određivanje vršnih vrijednosti impulsnih signala.



Slika 9.8. Shema mjerača buke

Na slici 9.9. dat je prikaz mjerenja buke okoline i izraz za računanje nivoa buke.



Slika 9.9. Mjerenje nivoa buke okoline

$$L_{\text{eq},T} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

gdje je: p_0 – referentni zvučni tlak, $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$

$p(t)$ = vremenski promjenljiv zvučni tlak

T – interval mjerenja

Vrste mjerača buke

Na slikama od 9.10 do 9.12 su date karakteristike i izgled nekih mjerača buke.



Tehničke karakteristike:

Nivo regulacije	70 to 140 dB(A)
odstupanje	0.1 dB
preciznost	± 1.5 dB
frekvencija	20 Hz do 10 kHz
Klasifikacija	ANSI S1.25, ISO 1999 BS 6402

Slika 9.10. Dozimetar



Slika 9.11. Konfiguracija mjernog sistema NMT 3637B

Mjerni sistem za mjerenje buke prikazan na slici 9.11 čine 2 akvizicione jedinice NMT 3637B, mikrofonska jedinica za spoljnu upotrebu, tip 4198 i softver 7802, firme "Brüel & Kjar", Danska. U sastavu NMT 3637B su analizator nivoa buke, tip 4441, sistem kontroler, tip UL 0219 (PC računar), GPS prijemnik sa antenom, 35/36 TrackPakTM, GARMIN i 3 akumulatorske baterije od po 12 V. Mikrofonsku jedinicu 4198 čine, mikrofonski 4189, pretpojačavač 2669C, štitičnik od spoljašnjih uticaja (vjetra, kiše, ptica), kabl dužine 10 m i stalak. Sve komponente NMT i mikrofonske

jedinice su smještene u prenosnu vodootpornu kutiju. Sistem je autonoman u pogledu napajanja i predviđen je za duži rad na otvorenom prostoru.



Slika 9.12. Komponente mjernog sistema NMT 3637B

NMT sistem vrši akviziciju akustičkih signala, a zahvaljujući ugrađenom GPS prijemniku na raspolaganju je i trenutna pozicija sistema. NMT omogućava i integraciju sa meteo stanicom radi dobijanja podataka za temperaturu, vlažnost i pritisak. Ovaj sistem omogućava snimanje nivoa buke L_{eq} ili SPL na A ili linearnoj frekvencijskoj skali, sa SLOW, FAST, IMPULS ili PEAK detektorom. Postoji mogućnost definiranja SETL, NSETL i SENL nivoa, minimalno trajanje događaja da bi se izvršio zapis podataka na hard disk sistem kontrolera. Analiza signala je oktavna ili tercna sa korakom 1 s ili 0.5 s, u opsegu od 12 Hz do 20 KHz. Analiza se vrši sa digitalnim filterima.

10. MJERENJE PRITISKA

Sadržaj lekcije:

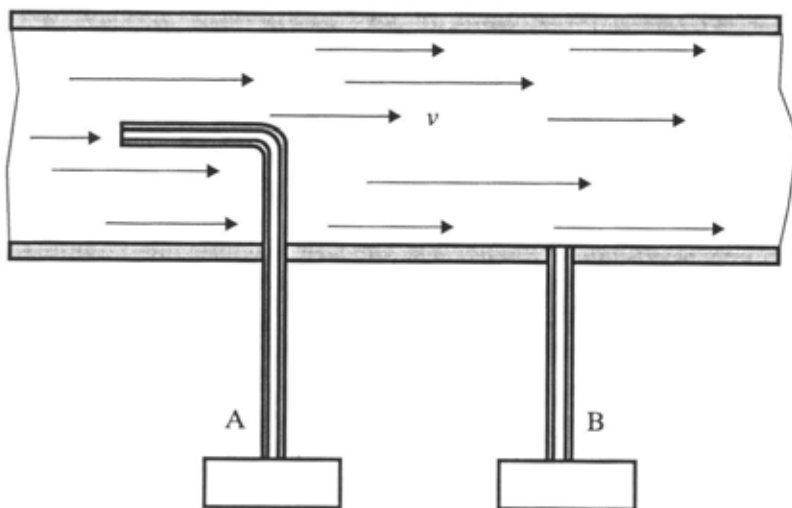
1. Uvod
2. Instrumenti za mjerenje pritiska
3. Senzori

10.1. UVOD

Pritisak fluida predstavlja djelovanje normalne sile svedene na jedinicu površine.

Razlikuju se strujni i zaustavni pritisak.

- Stvarni pritisak u nekom mediju zove se strujni pritisak i označava se sa p . Ovaj pritisak se naziva i statički pritisak.
- Zaustavni pritisak je onaj pritisak koji odgovara pritisku fluida, kada se fluid zaustavi bez gubitka energije. Zbirni pritisak nastao u posmatranoj tački zove se i totalni ili zaustavni pritisak p_t .



Slika 10.1. Veza između stvarnog (A) i zaustavnog pritiska (B)

Oznaka za pritisak je p , a osnovna SI jedinica je Pa (Pascal). Prema definiciji pritisak od jednog Pa je djelovanje sile od 1 N (Newtona) na površinu od jednog kvadratnog metra. Jedinica Pa je mala po iznosu tako da se u tehnici vrlo često koristi jedinica 1 bar koja je 10^5 veća od Pa.

Uobičajeni nazivi povezani sa mjerenjem pritiska:

- Vakuum je stanje u kome je pritisak nula, a isti naziv se koristi za mjerenje niskih pritisaka manjih od 100 Pa.
- Apsolutni pritisak je pritisak koji izmjeri u odnosu na pritisak jednak nuli.
- Relativni pritisak je pritisak mjeren s obzirom na pritisak okoline.
- Nadpritisak je pritisak viši od pritiska okoline.
- Podpritisak je pritisak niži od pritiska okoline.

Mjerenje pritiska u slučaju mirovanja fluida vrši se priključivanjem manometra montiranog na crijevo uvedeno u fluid. Složeniji je postupak mjerenja pritiska fluida koji struji. Tada treba paziti da priključak za mjerenje pritiska bude pravilno izveden da ne bi došlo do lokalnih smetnjih usljed djelovanja kinetičke energije fluida na priključnom mjestu.

10.1.1. Statički i zaustavni pritisak

Statički pritisak je pritisak fluida koji miruje u svim pravcima i ne zavisi od pravca djelovanja. Ukoliko se javi gradijenti pritiska u kontinuumu, javlja se tok fluida iz tačke višeg pritiska u područje nižeg pritiska. Ukupni pritisak, u tom slučaju nije nezavisan od pravca.

Statički pritisak se mjeri na jedan od dva osnovna načina:

- na zidu cijevi ili kućišta,
- pomoću Prandtlove sonde za statički pritisak.

Ova dva načina mjerenja prikazana su na slikama 10.2 i 10.3.

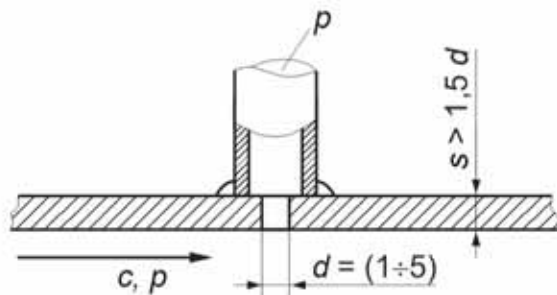
Mjerenje strujnog pritiska

Prema Newtonovom II zakonu važi za raspodjelu pritiska upravno na zakrivljenje strujnice sljedeći izraz za gradijent pritiska:

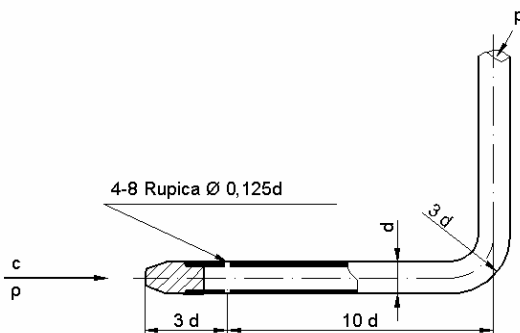
$$\frac{dp}{dn} = \rho \frac{c^2}{r} \dots\dots\dots (10.1)$$

Poluprečnik krivine $r = \infty$ za pravolinijsko strujanje, pa je $p = \text{const.}$, a to znači da će u pravoj cijevi sa pravim strujnicama, bez obzira na poprečni profil brzina i strujnih temperatura (temperaturni gradijent), pritisak u struji biti nepromjenjen. To omogućava mjerenje pritiska na mjestu, gdje nema smetnji strujanju. Takvo idealno mjesto je na primjer na samom zidu prave cijevi, odnosno prave površine kanala.

Kod mjerenja pritiska na zakrivljenim strujnicama primjenjuju se specijalne sonde. Obično su to naprijed zaobljene i zatvorene prave cjevčice sa što manjim prečnikom, koje se postavljaju u struju tako, da budu paralelne sa strujnicama na mjestu, gdje treba izmjeriti strujni pritisak. Na tom mjestu se cjevčica probuši sa 4 do 8 rupica pravilno raspoređenih po obimu (slika 10.2) radi mjerenja strujnog pritiska. Važno je da se pravilno odredi odstojanje rupica od držača sonde, kako bi lokalne smetnje bile što manje. Na taj način je Prandtl izveo svoju sondu (slika 10.3).



Slika 10.2. Mjerenje strujnog pritiska na zidu cijevi



Slika 10.3. Način mjerenja strujnog pritiska u struji fluida Prandtlovom sondom

Greške pri mjerenju strujnog pritiska zbog oblika rupice

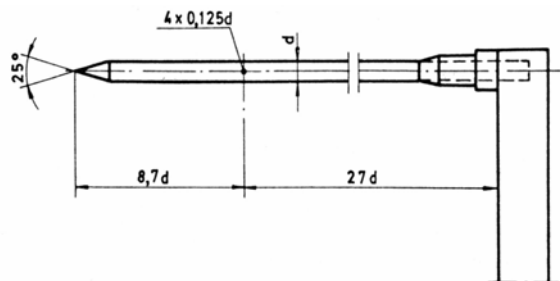
Ova greška se često zanemaruje, mada kod većih brzina ona može biti od značaja za tačnost mjerenja. Rupica može prouzrokovati lokalne smetnje, ako nije pravilno izvedena.

Rayleigh je izveo sistematska mjerenja sa različitim oblicima rupica i utvrdio da Re-broj ne utiče na grešku, već samo na oblik, veličine rupice i stepen kompresibilnosti gasne struje (Machov broj), tako da se javlja pozitivna greška koja raste sa prečnikom rupice i Machovim brojem.

Za praktična mjerenja u hidraulici primjenjuju se rupice prečnika $d=2-5$ mm, odnosno prema prečniku cjevovoda, kako ne bi došlo do začepijivanja. Važno je da se poslije bušenja rupica očisti od ostatka materijala. Osovina rupice mora biti upravna na strujni tok.

Uticaj Machovog broja

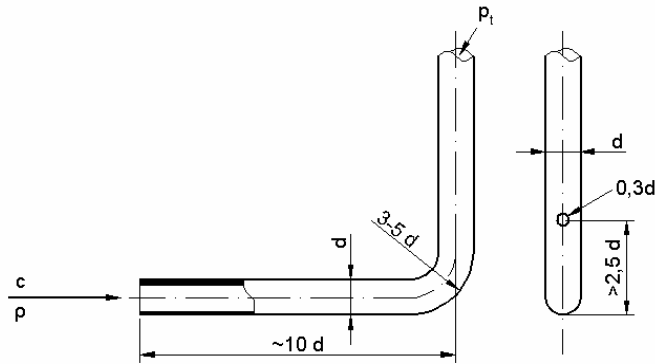
Do $M=0,8$, Prandtlovom sondom mjeri se strujni pritisak sa minimalnom greškom koja je svojstvena toj sondi, a zavisi uglavnom od njene izvedbe. Međutim, između $0,8 < M < 1$ dolazi do lokalnih kompresionih udara na sondi, tako da nastupaju veće greške koje mogu da iznose i do 6%. Prvi put se kod Prandtlove sonde pojavljuje udarni talas na nosu sonde već kod $M \sim 0,8$. Tek kod većih vrijednosti $0,85 < M < 1$, odstupanje u tačnosti mjerenja naglo se povećava, tako da se u toj oblasti strujni pritisak mora mjeriti nekom specijalnom sondom, najbolje odgovarajućom nadzvučnom sondom. Takve sonde imaju specijalan oblik, nos je zašiljen, a rupice moraju biti daleko od držača zbog kompresionog udara, slika 10.4.



Slika 10.4. Specijalna sonda

Mjerenje zaustavnog pritiska

Najjednostavniji i najtačniji način mjerenja zaustavnog pritiska je pomoću tzv. Pitotove cijevi, tj. Običnom cilindričnom cjevčicom koja je naprijed otvorena, a položena je paralelno sa strujnicom za koju se određuje strujni pritisak, slika 10.5. Greška mjerenja je mala, oko 0,2% do $M=1$ i to zbog toga što je zaustavljanje struje u cjevčici izvedeno tako brzo, da se uticaj toplote i trenja može zanemariti. Pitotova cijev je neosjetljiva na stepen kompresibilnosti u oblasti podzvučnih brzina, a isto tako i oblik cjevčice ne utiče na tačnost mjerenja.



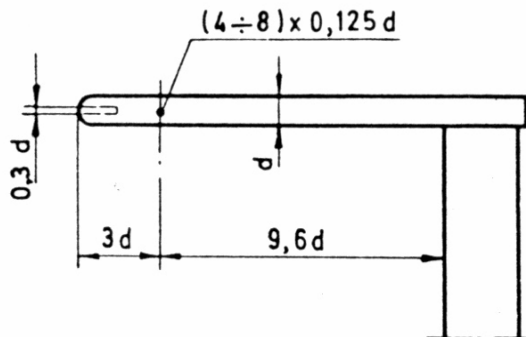
Slika 10.5. Pitotova cijev i cilindrična sonda

Za mjerenje zaustavnog pritiska može obično da posluži i tzv. cilindrična sonda sa jednom rupicom prikazana na slici 10.5, kod koje je važno da rupica bude usmjerena tačno u pravac strujanja.

Najtačniji način mjerenja zaustavnog pritiska je pomoću Pitotove sonde koja je naprijed otvorena, a položena paralelno sa strujnicom za koju se mjeri zaustavni pritisak. Istu funkciju ima i cilindrična sonda. Rupice na sondama služe za postavljanje priključaka za manometar.

Kombinovano mjerenje

Ako se mjerenje strujnog i zaustavnog pritiska vrši istom sondom, tada se koristi kombinovana sonda. Za pravolinijsko strujanje se u tu svrhu može vrlo korisno primjeniti Prandtlova sonda koja je u stvari nastala u kombinaciji iz Prandtlove sonde za mjerenje strujnog pritiska slika i Pitotove sonde (slika 10.6).



Slika 10.6. Kombinovana sonda

10.1.2. Priključna veza sonde i manomatra

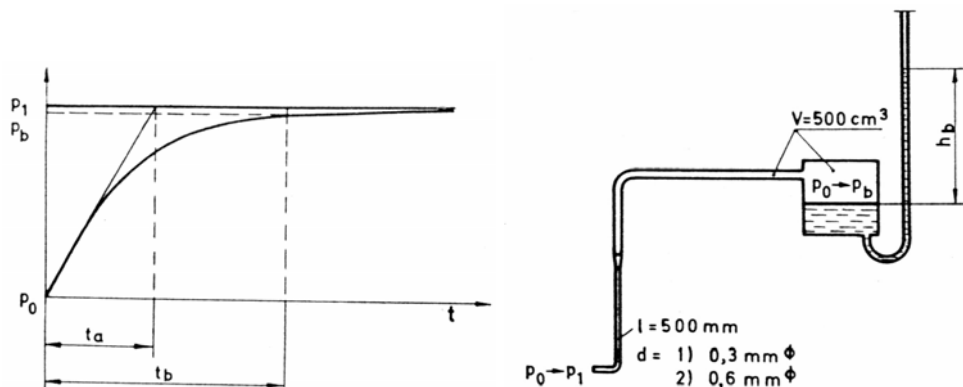
Veza između rupica na sondi za mjerenje zaustavnog, odnosno strujnog pritiska, i priključaka za spoj sa manometrom izvodi se cjevčicama koje su obično utoliko manjeg prečnika, što je sonda manja, tako da se primjenjuju i kapilarne cijevi sa prečnikom manjim od 0,5 mm.

Strujanje fluida kroz takav kapilar, pa i samu rupicu, je stoga prilično prigušeno, pa se kod svake promjene pritiska mora duže ili kraće čekati dok se na manometru ne uspostavi odgovarajući pritisak. Ako je uz to i zapremina mjernog instrumenta zajedno sa priključnim vodom velika u odnosu na kapilar u sondi, što je obično slučaj, tad će i vrijeme uspostavljanja biti dugo. Slična pojava postoji i u tehnici električnih mjerenja, gdje je kao karakteristična veličina uvedena vremenska konstanta instrumenta.

Da bi se dobila slika o uticaju prigušenja na vrijeme uspostavljanja koje je potrebno da protekne dok se stub tečnosti u manometru dovoljno smiri kako bi se izvršilo očitavanje instrumenta, uporediće se proračunata vremena uspostavljanja za dva konkretna slučaja.

Posmatraće se mjerni sistem sastavljen od jednog kapilara s unutrašnjim prečnikom d i rezervoara zapremine V na kraju kapilara. Na slici 10.7 prikazan je vremenski dijagram uspostavljanja pritiska za slučaj kad se na mjernoj rupici sonde pritisak naglo poveća od P_0 na P_1 . Kako se vidi iz dijagrama u početku će se promjena pritiska mijenjati proporcionalno sa vremenom, dok će se na kraju promjene pritiska asimptotski približavati pritisku P_1 . Vrijeme koje protekne do postizanja npr. 99% razlike pritiska $P_1 - P_0$ zove se vrijeme uspostavljanja t_b i ono je mjerodavno za utvrđivanje vremena trajanja eksperimenta.

Vremenska konstanta t_a definirana je kao vrijeme, koje bi proteklo, da bi se promjena pritiska od P_0 do P_1 , obavila proporcionalno sa vremenom.



Slika 10.7. Vrijeme uspostavljanja

10. 2. Instrumenti za mjerenje pritiska

Instrumenti za mjerenje pritiska su manometri. Postoje različite konstrukcije i izvedbe manometara urađene na različitim principima mjerenja.

Prema principu rada manometri se mogu podijeliti na tri osnovne grupe:

- Hidrostatički,
- Mehanički,
- Elektronski manometri.

Hidrostatički manometri su apsolutni instrumenti, jer oni direktno pokazuju pravu vrijednost pritiska, dok se mehanički i elektronski manometri moraju umjeravati. Za mjerenje razlike pritisaka primjenjuju se diferencijalni manometri. Mikromanometri služe za mjerenje vrlo malih pritisaka.

Podjela mjernih uređaja za pritisak prema mediju koji se koristi za rad manometara:

- Tekućinski manometri,
- Deformacijski manometri,
- Vakuometri.

Zajednička je osobina svih tekućinskih manometara da se ravnoteža sila uspostavlja posredstvom tekućine.

10.2.1. Hidrostatički manometri

Hidrostatički manometri su apsolutni manometri jer oni direktno pokazuju pravu vrijednost pritiska. Normalna sila djeluju na stub tečnosti visine h , je sila gravitacije, $F=mg=hA\rho g$, tako da je pritisak $p=h\rho g$, koji predstavlja osnovnu jednačinu svakog hidrostatičkog manometra. Uz silu gravitacije, na stub tečnosti u cijevi djeluju i kapilarne sile usljed kojih se tečnost u cijevi dodatno diže ili spušta za određenu veličinu h_k .

O ovoj činjenici treba voditi računa kod manometarskih cijevi manjeg prečnika. Spuštanje ili dizanje tečnosti h_k može se prema iskustvu odrediti iz $h_k=K/d$ u mm. Vrijednosti za konstantu K zavise od tečnosti i to za slučaj kad se iznad manometarske tečnosti nalazi vazduh, pa tako npr. za alkohol iznosi 11 mm², a za živu 14 mm².

U grupu hidrostatičkih manometara ubrajaju se:

- U-cijev,

- Obrnuta U-cijev,
- U-cijev sa jednim sa jednim zatvorenim krakom,
- Manometar sa posudom,
- Kosi manometar,
- Nagnuta U-cijev,
- Prstenasta vaga,
- Betzov manometar.

Diferencijalni manometar ili U-cijev

To je najjednostavniji manometar. Dobije se kada se oba kraja cijevi spoje na pritiske p_1 i p_2 , slika 10.8.

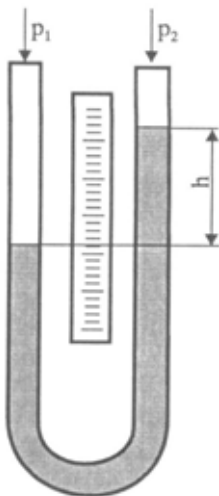
Razlika pritisaka Δp određuje se iz jednačine:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h (\rho_m - \rho_f) g \dots\dots\dots (10.2)$$

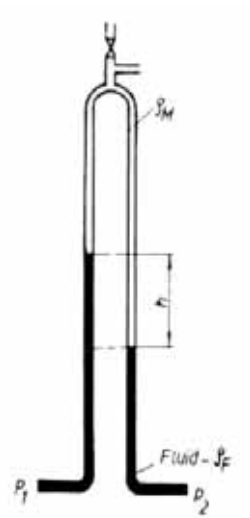
gdje je :

ρ_m - gustina manometarske tečnosti

ρ_f - gustina fluida čiji se pritisak mjeri



Slika 10.8. Diferencijalni manometar ili U-cijev



Slika 10.9. Manometar u obliku obrnute U-cijevi

Kod U-cijevi treba voditi računa da oba kraka imaju iste unutrašnje prečnike cijevi. U protivnom, uzima se u obzir uticaj kapilarnih sila i jednakosti zapremine lijevog i desnog kraka.

Manometar u obliku obrnute U-cijevi

Koriste se u slučaju kada je istom tečnosti ispunjena manometarska cijev, kao što je i tečnost čiji se pritisak mjeri, slika 10.9. Iznad tečnosti je fluid čija je gustina $\rho_m < \rho_f$ i koji se ne miješa sa radnim fluidom. Ovaj manometar se koristi za mjerenje malih razlika pritisaka u tečnostima. Upotrebom klasične U-cijevi morao bi da se primijeni, po prirodi stvari, živin manometar, a tada bi razlika stubova žive u oba kraka bila znatno manja nego kod obrnute U-cijevi gdje se koristi kombinacija tečnost vazduh.

Razlika pritisaka određuje se po obrascu:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h (\rho_f - \rho_m) g \dots\dots\dots (10.3)$$

U-cijev sa jednim zatvorenim krakom

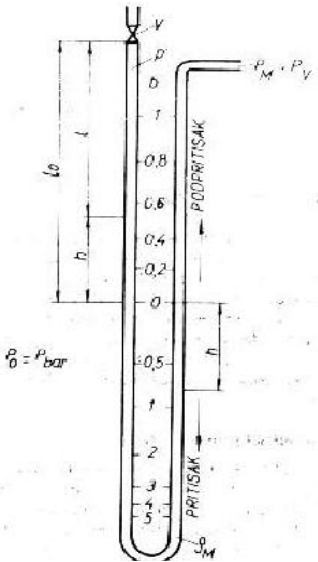
U-cijev sa jednim zatvorenim krakom prikazana je na slici 10.10. Postupak mjerenja je sljedeći: prije početka mjerenja treba otvoriti ventil V, kako bi se u oba kraka izjednačio pritisak ($p_o - p_b$) i podesila nula manometra, gdje je p_b - atmosferski pritisak.

Ventil V se mora zatvoriti prije mjerenja. Apsolutni nadpritisak se određuje na osnovu izraza:

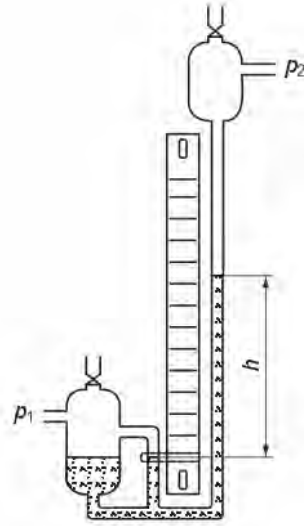
$$p_{Maps} = p_o \frac{l_o}{l_o - h} + 2h\rho_M g \dots\dots\dots (10.4)$$

a apsolutni potpritisak na osnovu obrasca:

$$p_{Vaps} = p_o \frac{l_o}{l_o + h} - 2h\rho_M g \dots\dots\dots (10.5)$$



Slika 10. 10. U-cijev sa jednim zatvorenim krakom



Slika 10. 11. Manometar sa posudom

Manometar sa posudom

Na slici 10.11. prikazan je manometar sa posudom. To je u stvari U-cijev sa jednim širim krakom, koji omogućava očitavanje stuba tečnosti uvijek od "0". Da bi se izbjegle greške zbog kapilarnih sila, prije svakog očitavanja skalu treba podesiti tako da se meniskus u lijevom kraku poklopi sa "0" na skali. Gornji rezervoar iznad kraka cijevi za priključenje pritiska p_2 služi za preuzimanje viška manometarske tečnosti ukoliko pritisak p_2 pređe dozvoljeni mjerni opseg manometra.

Manometar sa nagnutom cijevi - kosi manometar

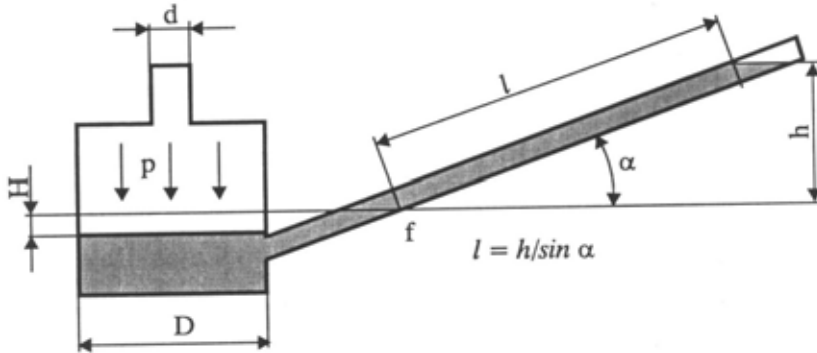
Za mjerenje malih razlika pritisaka može korisno da posluži kosi manometar (slika 10.12), odnosno razlika pritisaka. Određuje se na osnovu izraza:

$$\Delta p = h \rho_M g \dots\dots\dots (10.6)$$

gdje je:

$$h = h_1 + h_2 = x \left(\sin \alpha + \frac{A_1}{A_2} \right) = const. \dots\dots\dots (10.7)$$

Konstanta manometra se određuje posebno za svaki nagibni ugao α , pri čemu treba strogo voditi računa o položaju "0" tečnosti u kosoj cijevi jer se kod ovih manometara, naročito kad je manometarska tečnost voda, jer ona se lijepi uz staklo.



Slika 10.12. Kosi manometar

Nagnuta U-cijev

Ovaj tip mikromanometra ima dva opsega mjerenja, koji se postižu pomoću dva različita nagiba U-cijevi.

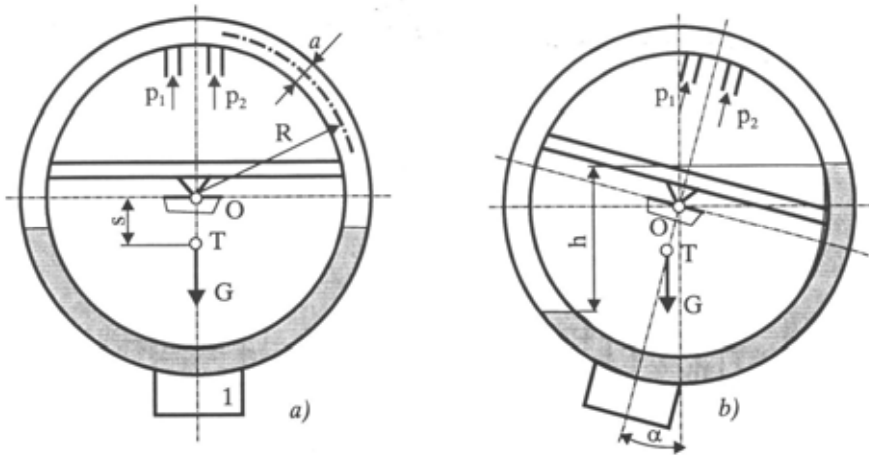
Podješavanje ugla se vrši pomoću pričvršćenih libela. Za određivanje razlike stubova tečnosti u U-cijevi postoji specijalno pokretno mjerilo koje daje razliku pritiska u paskalima. Da bi mjerenje bilo tačno, neophodno je da se gustina alkohola u manometru održava na propisanoj vrijednosti, jer u protivnom dolazi do sistematskih grešaka instrumenata.

Ovaj mikrometar se vrlo uspješno primjenjuje u klimatizaciji za mjerenje malih brzina strujanja vazduha kroz kanale. Tako se pomoću Prandtlove brzinske sonde mogu sa zadovoljavajućom tačnošću mjeriti brzine $c > 3,5$ m/s.

Prstenasta vaga

Prstenasta vaga je u stvari U-cijev u obliku torusa-prstena. Na slici 10.13 prikazana je principijelna shema ovog manometra.

Ovaj manometar se naročito koristi za mjerenje većih pritiska u cjevovodnom sistemu, npr. za mjerenje protoka u parovodovima. Za tu primjenu torus se izrađuje od specijalnog nehrađajućeg čelika. Kazaljka pokazuje zakretanje torusa na skali koja je skalirana direktno u jedinicama pritiska.



Slika 10.13. Prstenasta vaga

Razlika pritiska se određuje na osnovu izraza:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = mgr \sin \phi / RA \dots \dots \dots (10.8)$$

gdje je:

m - masa pokretnih dijelova (njen moment drži ravnotežu sa momentom sile težine razlike nivoa manometarske tečnosti),

A - površina unutrašnjeg presjeka torusa

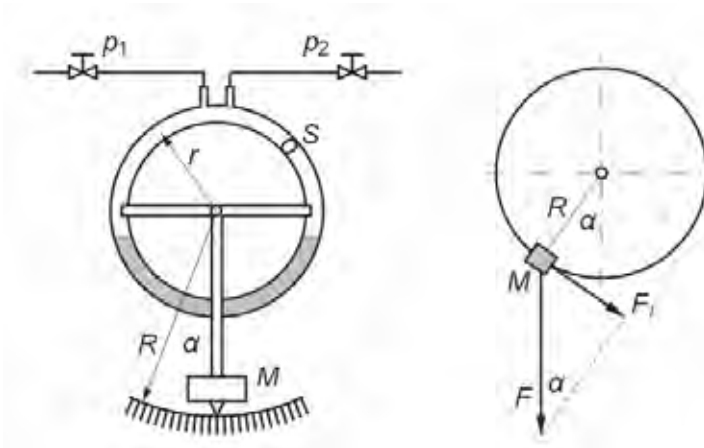
$$A = d^2 \pi / 4,$$

r - radijus težišta pokretnih dijelova

R - radijus ose torusa

Prstenasti manometar

U industrijskim pogonima se često upotrebljava kapljevinski prstenasti manometar. Prstenasti manometar je izveden iz šuplje cijevi u obliku prstena koji je djelimično ispunjen tekućinom. Kao tekućina najčešće se koristi živa, ali može biti ispunjen i vodom. Prečnik prstena je izveden u obliku poluge čiji centar je smješten na vrh brida tako da se prsten može zakretati oko središta. U središtu poluge nalazi se hvatište nosača sa utegom, tako da se zakretanje prstena prenosi na zakretanje nosača i utega.



Slika 10.14. Prstenasti manometar

Kada su priključeni pritisci na obje strane manometra jednaki, $p_1 = p_2$, poluga sa utegom je u vertikalnom položaju i otklon manometra jednak je nuli. Kada se pritisak p_2 poveća, $p_2 > p_1$, dolazi do zakretanja manometra i nakon određenog vremena uspostavlja se novo ravnotežno stanje tako da je uteg otklonjen na suprotnu stranu gdje je pritisak manji.

Mjerni signal je ugao zakretanja koji se očita kao otklon vrha utega od nultog (vertikalnog) položaja.

Karakteristika manometra za kalibraciju se izvodi iz uslova ravnoteže za tijelo koje može rotirati oko čvrste tačke, odnosno da je zbir zakretnih momenata jednak nuli. Zakretni moment sile zbog razlike pritisaka mora biti jednak i suprotan po predznaku od zakretnog momenta utega, odnosno:

$$\mathbf{M}_p = - \mathbf{M}_m \dots\dots\dots (10.9)$$

Zakretni moment je vektorski proizvod sile i vektora položaja hvatišta sile od središta zakretanja. Moment zbog razlike pritiska je:

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_p; \mathbf{F}_p = (p_2 - p_1) S \dots\dots\dots (10.10)$$

gdje je:

r - radijus prstena manometra,

S - površina presjeka cijevi.

Zakretnom momentu zbog razlike pritiska suprotstavlja se zakretni moment tangencijalne komponente F_t težine utega F . Tangencijalna komponenta se odredi iz pravouglog trokuta.

$$F_t = F \cdot \sin \alpha, F = M \cdot g, (p_2 - p_1) \cdot S \cdot r = M \cdot g \cdot S \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots (10.11)$$

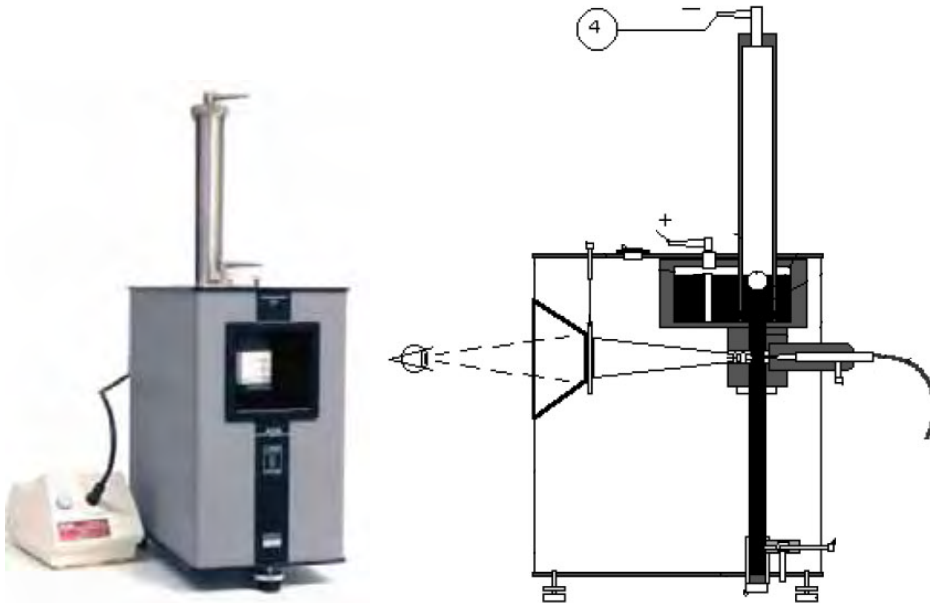
Relacija između mjernog signala α i razlike pritiska je:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{(P_2 - P_1) \cdot S \cdot r}{M \cdot g \cdot R} \right] \dots\dots\dots (10.12)$$

Za razliku od prethodnih primjera, prstenasti manometar ima nelinearnu kalibracionu karakteristiku. Posebna prednost prstenastog manometra je jednostavnost pretvaranja zakreta prstena u zakretanje klizača potenciometra i pretvaranje razlike pritiska u električni signal.

Becov (Betz) mikromanometar

Becov manometar radi na principu U-cijevi (slika 10.15). Razlika nivoa u oba rezervoara G i S mjeri se pomoću skale R koja visi na plovku C. Na staklenoj skali je ugravirana podjela koja se optičkim putem projektuje na nepokretnu skalu sa odgovarajućim povećanjem (oko 20 puta) i daje razliku pritiska u mm stuba tečnosti. Maksimalna razlika pritiska nivoa obično iznosi 300-800 mm, a za manometarsku tečnost se koriste voda i praktičan instrument, naročito za laboratorijska mjerenja. Tačnost ovih manometara je $\pm 0,5$ Pa.



Slika 10.15. Becov (Betz) mikromanometar

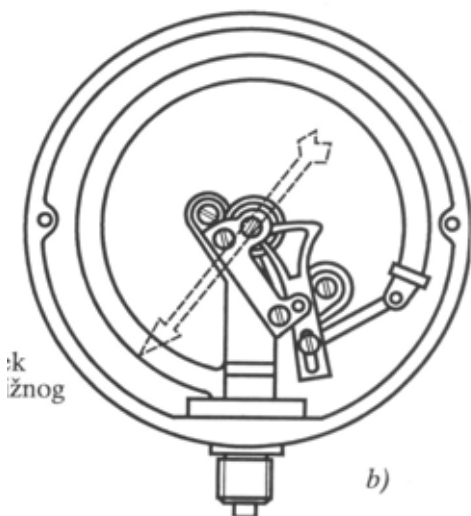
10.2.2. Mehanički manometri

U grupu mehaničkih manometara spadaju manometri sa:

- cijevnom oprugom,
- membranskom oprugom,
- nabranom oprugom

Manometri sa cijevnom oprugom

Od mehaničkih manometara najrasprostranjeniji su manometri sa Bourdonovom cijevnom oprugom (slika 10.16), kod kojih se cjevasta opruga (eliptičnog poprečnog presjeka) pod dejstvom pritiska fluida unutar cijevi širi, odnosno skuplja (kad je pritisak u cijevi niži od od atmosferskog). Pomoću zupčastog mehanizma na skali se direktno pokazuje nadpritisak, odnosno podpritisak. Ovi manometri i vakuumetri obavezno se moraju kalibrirati. Tačnost pokazivanja ovih manometara i vakuumetara zavisno od kvaliteta izrade i tačnosti kalibracije je 0,6 - 2%. Radi povećanja opsega mjerenja u manometar se ugrađuje cjevasta opruga odgovarajuće čvrstoće, tako da se oni mogu primijeniti i za pritiske od 1 do više stotina bara.



Slika 10.16. Manometri sa cijevnom oprugom

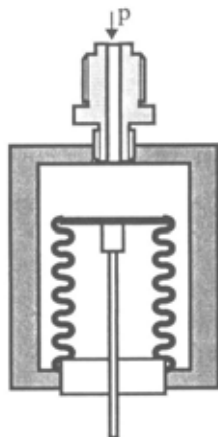


Slika 10.17. Manometar sa membranskom oprugom

Manometri sa membranskom oprugom

Pritisak djeluje na čeličnu membranu (slika 10.17), koja se deformira i pomiče pokazivački mehanizam. Ovim manometrom se mjere manji pritisci od 2 bara. Membrana lako mijenja svoje karakteristike nakon izvjesnog vremena, pa instrument treba češće baždariti. Tačnost tih manometara je $\pm 2\%$ od opsega skale.

Manometri sa naboranom cijevnom oprugom



Slika 10.18. Manometar sa naboranom oprugom

Na slici 10.18 prikazan je princip rada pretvarača manometra, koji služi za mjerenje manjih pritisaka. Često se mehanički barometri izrađuju na tom principu. Tačnost ovih instrumenata je $\pm 2\%$ od cijele skale.

10.2.3. Elektronski manometri

Za industrijsku primjenu, naročito u procesnoj tehnici, često je potrebno da se mjerni signali sa mjeraca protoka direktno koriste za automatiku procesa i računarsku obradu. Zbog toga postoje različiti električni prtevarači koji razliku nivoa u U-cijevi pretvaraju u električne signale.

Podjele elektronskih manometara

Mjerni pretvarači - senzori elektronskih manometara mogu biti:

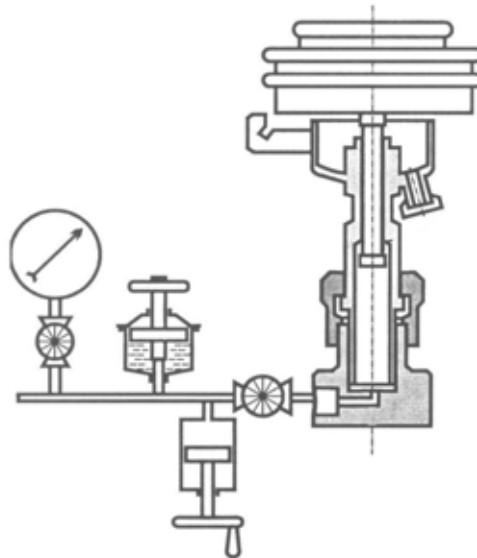
- induktivni,
- kapacitivni,

- ugljeno-mikrofonski,
- piezoelektrični,
- membrane sa uparenim mjernim trakama,
- tranzistori itd.

Prema veličini pritiska, primjenjuju se i odgovarajući mjerni davači. U elektronici pretvarača mjerni signali se obrađuju, pojačavaju, filtriraju, tako da se na pokazivačkom instrumentu pritisak ili razlika pritiska prikazuje analogno ili digitalno. Elektronski mjeraci pritiska su pogodni za mjerenje brzih promjena - oscilacija pritiska.

Po potrebi, senzori radi ugradnje na mjerno mjesto, mogu biti vrlo malih dimenzija. Tačnost mjerenja je u granicama od ± 1 do $\pm 2\%$ od punog opsega mjerenja. Ovi mjeraci pritiska uspješno se koriste za mjerenje pritiska bez cijevnog priključka, npr. za mjerenje pritiska pare, ukoliko se želi izbjeći upotreba kondenzacionih sudova. U takve svrhe moraju se primijeniti senzori koji mogu izdržati odgovarajuće visoke temperature. Svi elektronski manometri moraju se kalibrirati.

Kalibriranje mehaničkih i elektronskih manometara



Slika 10.19. Hidraulični uređaj za kalibriranje

Najčešće se za kalibriranje manometara primjenjuje hidraulički uređaj za kalibriranje, prikazan na slici 10.19. Na čelo klipa K površine $A=0,9806 \text{ cm}^2$, djeluje sa donje strane pritisak ulja, koji odgovara pritisku na manometru, a sa gornje strane tegovi raznih masa od 0,5 kg, 1 kg i više. Tegu od 1 kg odgovara pritisak ulja od jednog bara, jer je

$$P=mg/A=10^5 \text{ N/m}^2 \dots\dots\dots (10.13)$$

Manometar M koji se kalibrira, postavlja se na manometarski priključak od 1/2". Pomoću ventila V se ispusti zrak, a pomoću regulacionog ventila R se podešava veličina ulja u mjernom dijelu instalacije, tj. pritisak i to tako da tanjir sa tegovima bude na određenoj koti. Trenje između klipa i njegovih vođica se otklanja povremenim obrtanjem tanjira. Prema tačnosti pokazivanja manometri se obično dijele u tri klase (tabela 10. 1).

Klasa	0,6	1,0	2,0
Greška baždarenja	±0,4	0,8	1,6 % od pune skale
Greška u pogonu	±0,6	1,0	2,0 % od pune skale

Tabela 10.1. Klase tačnosti manometara



Slika 10.20. Manometar za umjeravanje

Standardni postupak umjeravanja manometara provodi se primjenom manometra na slici 10.20. Pritisak se računa prema izrazu:

$$p = \frac{(m_u + m_s) \cdot g}{r^2 \pi} \dots\dots\dots (10.14)$$

Deformacioni manometri

Deformacioni manometri rade na osnovu elastične deformacije materijala koja nastaje pod djelovanjem razlike pritiska. Dije se na:

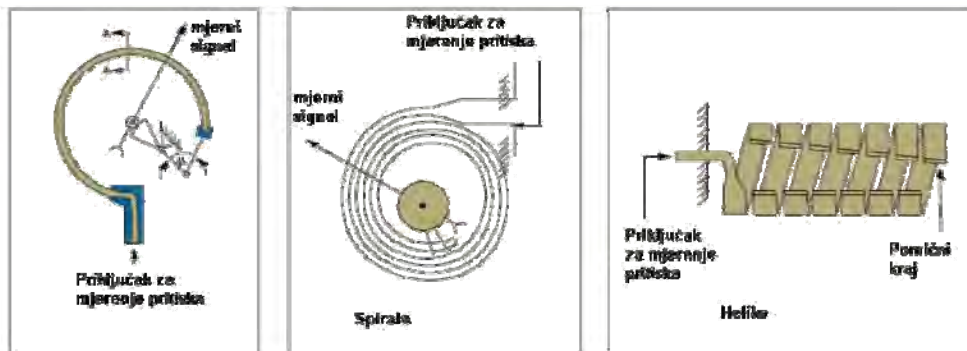
- Bourdonove cijevi,
- membrane,
- mjevove

Bourdonova cijev je najčešće u industriji upotrebljavani mjerni pretvarač manometara. Izrađen je od elastičnog i šupljeg srpa koji ima jedan kraj učvršćen za kućište instrumenta a drugi kraj je slobodan. Zbog razlike pritiska u cijevi manometra i okoline dolazi do savijanja slobodnog kraja čiji se pomak pomoću mehanizma pretvara u zakretanje kazaljke instrumenta.

Budući da je deformacija Bourdonove cijevi određena razlikom mjerenog i vanjskog pritiska, ovi manometri uvijek mjere nadpritisak iznad atmosferskog.

Mjerni signal je ugaono pomjeranje kazaljke za ugao α pa je ispitna-kalibraciona karakteristika Bourdonovog manometra linearna.

$$\alpha = K \cdot (p_1 - p_0) \dots\dots\dots (10.15)$$

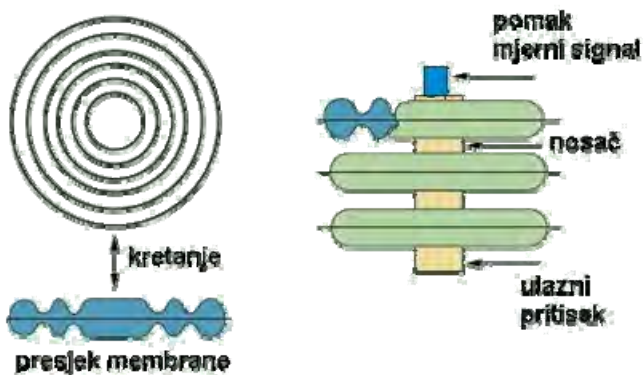


Slika 10.21. Shematski prikaz različitih izvedbi Bourdonove cijevi

Mjerni opseg Bourdonovih manometara je vrlo velik. Izrađuju se od malog mjernog opsega (0 do 1 kPa) pa do vrlo velikih mjernih opsega (0 do 100 bar). Posebnim izvedbama se zakretanje kazaljke može pretvoriti u električni signal, ili se mehanička deformacija Bourdonove cijevi neposredno pomoću rasteznih traka pretvara u električni signal



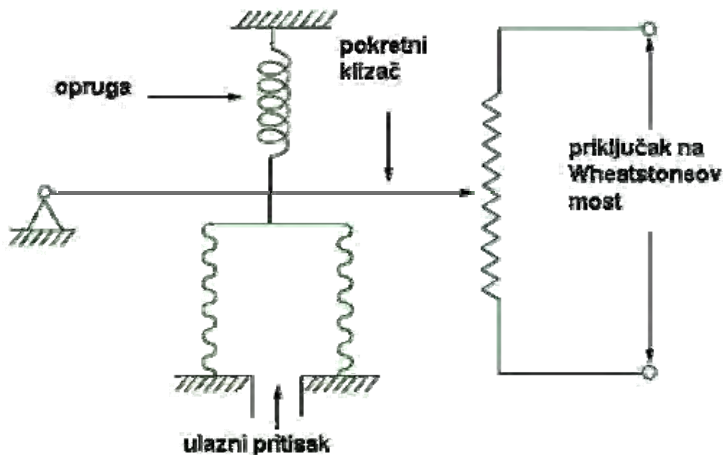
Slika 10.22. Bourdonov manometar: a) analogni (s kazaljkom), mjerni opsezi 0-1 bar, 0-50 bar, klasa tačnosti 3%, b) digitalni; mjerni opsezi 0-1 bar, od 0-100 bar, klasa tačnosti 0,25 %, mjerni signal 4-20 mA



Slika 10.23. Mjerne membrane:
a) ravna membrana, b) slog membrana (mijeh)

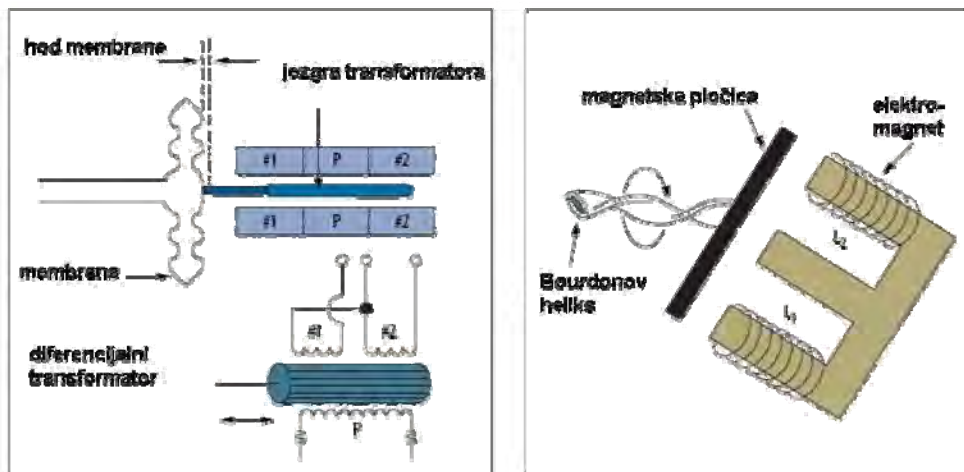
Pretvarači pritiska mogu biti ravna membrana i slog membrana-mijeh (slika 10.23).

Na slici 10.24. je prikazan je princip pretvaranja pritiska u električni signal. Pomak membrane se preko pomične grede prenosi na pomak klizača potenciometra. Promjenljivi otpornik (potenciometar) priključuje se u jednu granu otporničkog Wheastoneovog mosta, čime se kao izlazni signal dobije napon. Izlazni napon se nadalje pomoću električnog sklopa pretvara u standardni električni signal u području od 4 - 20 mA.



Slika 10.24. Pretvarač pritiska u električni signal pretvanjem pomaka membrane u pomak kliznog potencijometra

Deformacija membrane može se pomoću transformatora razlike, (slika 10.25) pretvoriti u električni signal. Transformator razlike ima sekundarnu zavojnicu spojenu od dva dijela i pomičnu jezgru. To je linearni pretvarač pomaka i često se koristi i kod drugih mjernih uređaja za pretvaranje pomaka u električni signal, na primjer kod rotametara za mjerenje protoka tekućina.



Slika 10.25. Shematski prikaz manometra sa pretvaranjem pritiska u električni signal: a) sa membranom i transformatorom razlike; b) Bourdonova cijev i elektromagnet

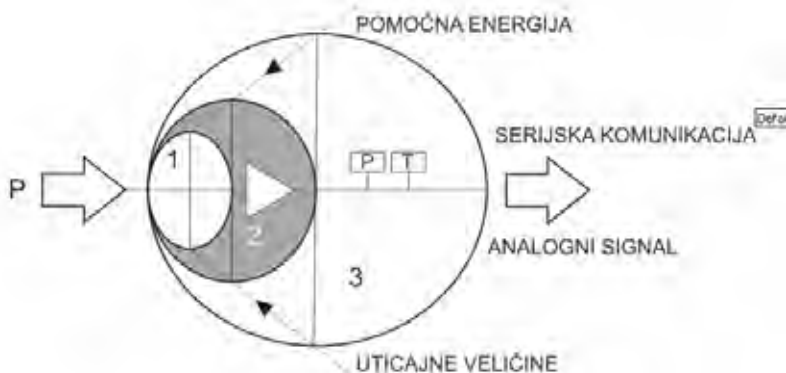
10. 3. Senzori pritiska

Klasični senzori sa Bourdonovom cevi ili sa membranom su najčešće u upotrebi, jer odlično rade, ali imaju jednu manu, zbog koje se više ne ugrađuju na važnim mjernim mjestima. Hodovi pretvaračkih elemenata kod njih iznose od 1 do 3 milimetara, za razliku od deformacija kod modernih senzorskih mjerača pritiska koji ne prelaze nekoliko mikrona. Ovi minimalni pomaci omogućuju prednosti:

- veliku brzinu odziva (standardno oko 2 ms.),
- visoku linearnost,
- otpornost na preopterećenja i
- dugotrajnost bezotkaznog rada.

Principi merenja pritiska koji se danas primenjuju, uglavnom favorizuju direktno pretvaranje fizičke u električnu veličinu a ovo, u većini slučajeva, zahtijeva izvor pomoćne energije za senzor. Pri tom treba voditi računa o tome kako da se ponište greške merenja usled uticaja temperature, gustine, parazitnih električnih veličina i drugih uticaja.

Uz pretpostavku da svi ti uticaji poništeni, može se vršiti obrada signala sa senzora. Na slici 10.26, dio označen sa 1 je senzor, a dio označen sa 2 je dio koji uz malo elektronike proslijedi signal instrumentu- transmitteru. Cjelina 3 na slici 10.26, predstavlja finalni dio pretvarača, okrenut korisniku koji omogućava vizuelno očitavanje i/ili zapisivanje pritiska. Transmitter može da izvrši konverziju signala u oblik pogodan za prenos na veću daljinu (npr. 0/4-20mA) i A/D konverziju u digitalne impulse za serijsku komunikaciju.



Slika 10.26. Shematski prikaz senzorskih uređaja

10.3.1. Podjela senzora pritiska

Senzori pritiska su glavni dijelovi uređaja za mjerenje pritiska. Mogu se podijeliti na dva osnovna načina:

- prema mjestu ili sredini u kojoj se koriste i
- prema principu rada

Prema sredini u kojoj se koriste dijele se na:

- senzore za industrijska mjerenja i
- senzore za laboratorijska mjerenja.

Prema principu rada dijele se na:

- senzore za deformaciju i
- senzore za pomjeranja koji rade na principima:
 - piezoelektričnog efekta,
 - kompenzacije sile i
 - ostalim principima navedenim i za druga mjerenja.

Senzori za industrijska mjerenja

Najvažnija osobina senzora koji treba da rade u industrijskim uslovima je stabilan i dugotrajan bezotkazni rad uređaja, bez nekog posebnog održavnja. Visoka klasa tačnosti u 90% slučajeva nije primarna, tj. 1% greške je sasvim dovoljno tačno. Od toga je značajnije da uređaj ne bude preskup. U industrijske svrhe se koriste nabrojani senzori.

Pretvarači deformacija su:

1. Piezootporni senzori - pretvarač deformacija
2. Senzori u obliku metalnih traka - pretvarač deformacija
 - metalne trake na foliji,
 - metalne trake na tankom filmu,
 - metalne trake na debelom filmu.

Pretvarači pomjeranja su:

1. Senzori na principu Holovog efekta, pretvarač pomjeranja
2. Kapacitivni senzori - pretvarač pomjeranja
3. Induktivni senzori - pretvarač pomjeranja

4. Potenciometarski senzori - pretvarač pomjeranja.

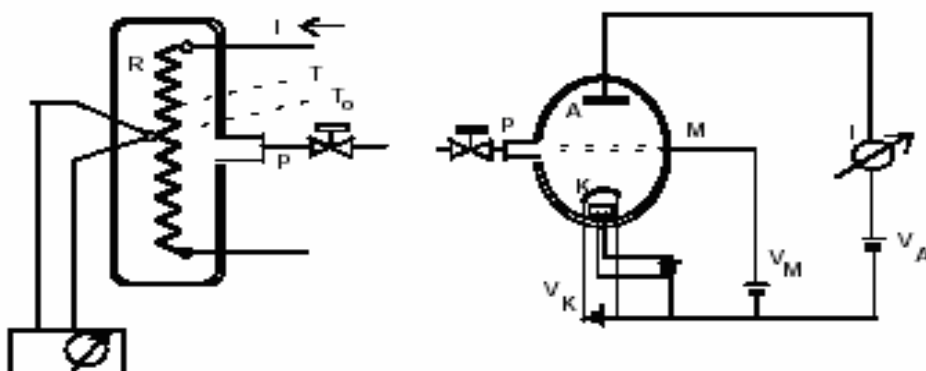
Ostali pretvarači:

1. Piezoelektrični senzori koji rade na principu piezoelektričnog efekta
2. Ostali principi
 - Pirani vakuum mjerači
 - Jonizacioni mjerači pritiska
 - Frikcioni mjerači pritiska
 - McLeodeovi kompresioni mjerači

Vakuometri-Pirani i jonizacioni

Vakuometri su manometri za mjerenje niskih pritisaka, najčešće manjih od 100 Pa. Najpoznatiji su McLeodeov, Piranijev i ionizacijski vakuumetar.

Piranijev vakuumetar (slika 10.27), se koristi za mjerenje pritisaka u liofilizatorima za liofilizaciju sojeva mikroorganizama, stanica, u proizvodnji lijekova, i također u proizvodnji vrijednih sastojaka hrane. Mjerenje niskog pritiska se zasniva na efektu promjene koeficijenta prijenosa toplote sa vruće niti, zavisno od pritiska. Osnovni dijelovi uređaja su staklena cjevčica u kojoj se nalazi žarna nit. Nit se napaja sa konstantnom strujom i električna energija pretvara se u toplotu koja se prenosi kroz hidrodinamički granični sloj oko niti na plin u okolini. Temperatura niti je određena koeficijentom prijenosa toplote i koristi se kao mjerni signal pritiska.



Slika 10.27. Shematski prikaz Piranijevog i jonizacijskog manometra

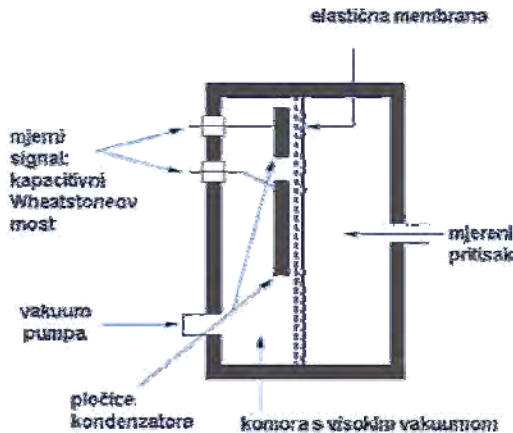
Na površini niti zavaren je termočlanak tako da se elektromotorna sila termočlanka umjerava i u zavisnosti od mjenenog pritiska. Ispitna funkcija određena je bilansom toplote za nit:

$$R(T) \cdot I^2 = S \cdot h(P) \cdot (T - T_0) \dots\dots\dots (10.16)$$

R(T) je otpor mjerne niti koji je funkcija temperature niti T, I je struja kojom se napaja nit, S je površina niti, h je ukupni koeficijent prijenosa toplote koji se mijenja sa mjerenim pritiskom p i T₀ je temperatura plina u okolini. Zbog nelinearnosti R(T) i h(P) kalibraciona funkcija je nelinearna i mora se odrediti za svaki plin posebno jer se koeficijent toplote mijenja sa sastavom plinova.

Osim temperature može se kao mjerni signal upotrijebiti i električni otpor Piranijeve niti tako da se ispitna cijev spoji u otpornički Wheastoneov most. Mjerno područje Piranijevih vakuumetara je od 1 mPa do 0,1 kPa.

Za niske pritiske, u području od 1 μPa do 10 mPa koriste se jonizacijski vakuometri (slika 10.27). Za mjerenje se koristi trioda u kojoj se nalazi plin čiji se pritisak mjeri. Osnova mjerenja je jonizacija plina do koje dolazi prijelazom naelektrisanja između katode i anode. Katoda je užarena i dolazi do termičke emisije elektrona koji se ubrzavaju zbog napona mrežice i anode. Tokom prelaza dolazi do sudara elektrona i molekula plina i plin se jonizira. Negativno naelektrisanje se prenosi sa katode na anodu, a pozitivno se prenosi u suprotnom smjeru. Ukupna struja u krugu ovisi o stupnju jonizacije i mjerni je signal za pritisak plina u triodi. Efikasnost jonizacije zavisi od vrste plina tako da se mjerni uređaj ispituje zasebno za svaki plin.



Slika 10.28. Kapacitivni pretvarač vakuuma

Kapacitivni senzori

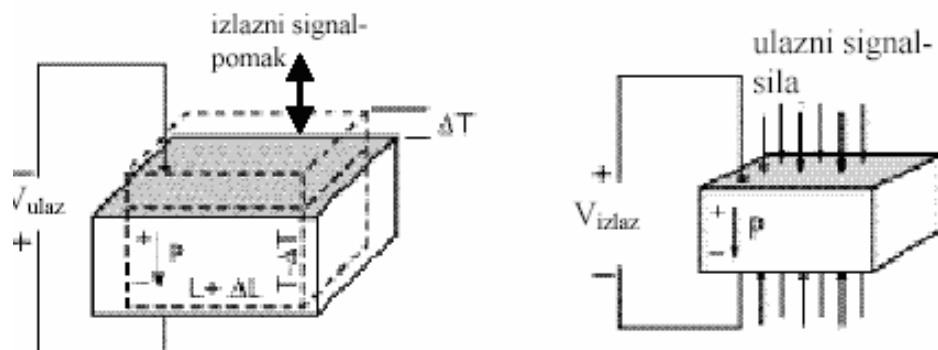
Kao pretvarači pritiska u mjernim uređajima za mjerenje pritiska, ali i u uređajima za kalibriranje i umjeravanje manometra koriste se razne vrste

pretvarača. Principijelna shema rada kapacitivnog pretvarača vakuuma data je na slici 10.28. Kapacitivni pretvarač je često korišten senzor za industrijska mjerenja.

Piezootporni senzor pritiska

Ova vrsta senzora široko je primijenjena kod industrijskih mjerača zbog svoje robusnosti, visoke klase tačnosti, brze dinamike i odlične stabilnosti. Srce sistema je silicijumska pločica-čip dimenzija, 4 x 4 x 1mm, kroz čiju su specijalno pripremljenu gornju površinu difundirana četiri električna otpora kiloomskih vrednosti, formiranih u Wheatstoneov mjerni most. Dejstvom pritiska na silicijumsku pločicu dolazi do tzv. piezootpornog efekta.

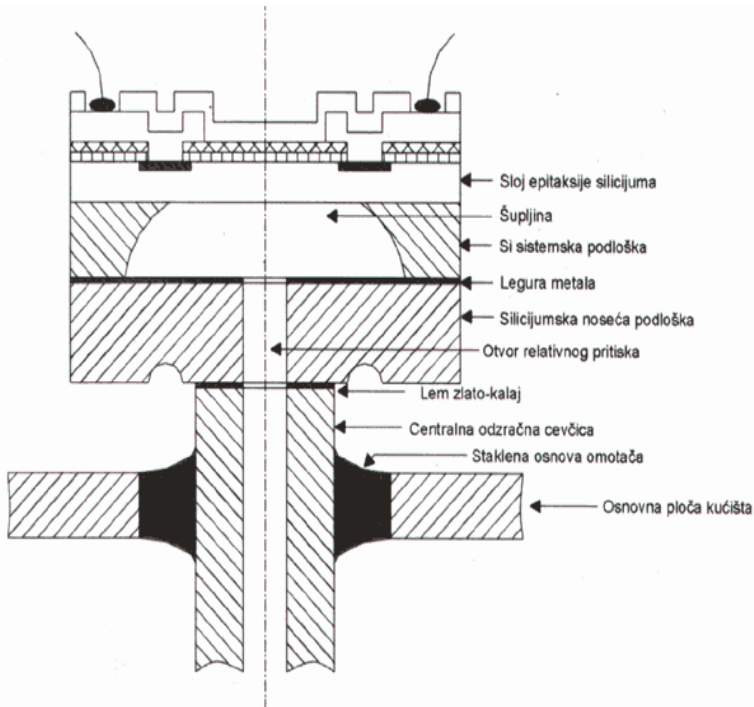
Piezelektrični efekt je pojava deformacije nekih kristala (npr. kvarc, SiO_2) i keramičkih materijala u električnom polju, i obrnuto, pojava električnog naelektrisanja na površini tih materijala ako se deformiraju djelovanjem mehaničke sile (slika 10.29).



Slika 10.29. Prikaz piezoelektrične pojave:

- a) pojava deformacije kristala zbog električnog polja,
- b) pojava električnog napona zbog deformacije kristala djelovanjem sile

Do značajne promjene specifične električne otpornosti materijala pločice, a time i do promjene vrijednosti otpora difundiranih u pločicu kod svih kristalnih materijala dolazi zbog promjenljive pokretljivosti elektrona u kristalnoj rešetki pod dejstvom sile. Kod poluprovodničkih materijala, kao što je silicijum, ova promena je oko 100 puta većeg intenziteta u odnosu na metale. To omogućava da dimenzije senzora budu male, a takođe je moguće mjeriti i veoma male opsege pritiska (reda desetak milibara).



Slika 10.30. Osnovni crtež senzora pritiska

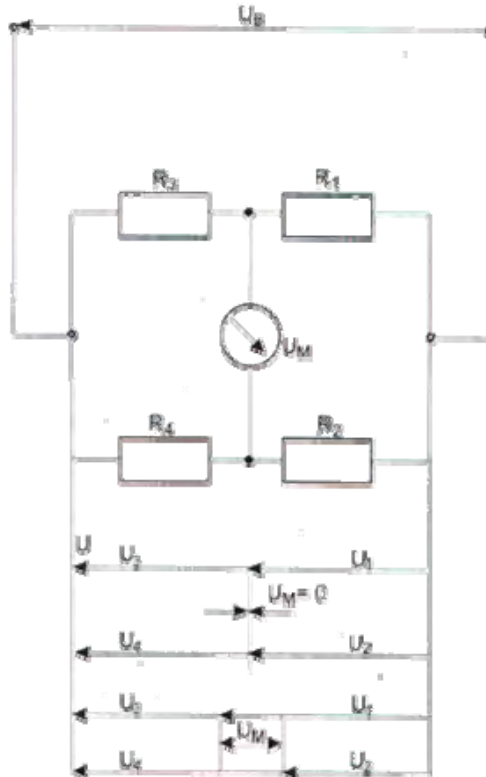
Na slici 10.30. prikazan je kompletan senzor pritiska, sa detaljnim opisom podsklopova senzora. Osnovni podsklop je sistemska podloška (vejfer). Ona se dobija tako što se Si monokristal isiječe na kriške, pazeći strogo pri tome na strukturu i orijentaciju kristala, a zatim polira. Slijedeće je implantacija i onečišćenje u cilju formiranja otpornog elektronskog Wheatstoneovog mosta. Ključna faza je formiranje membranskog Si epitaksijalnog sloja, koji se dobija nagrizanjem ili bušenjem polirane površine sistemske podloške. Električni otpori se difundiraju u ivičnu zonu membranskog sloja, jer su tu najveća fizička opterećenja i izlazni električni signal.

Sistem mora da ima bazu. Sistemska podloška pravi se od istog materijala i istih je dimenzija kao i bazna, a ove dve spajaju se pomoću specijalne metalne legure. U slučaju da se pravi senzor za relativni pritisak, bazna podloška se izbuši skroz, a u sistemske se napravi obla rupa. Ovim je završen postupak dobijanja elementarnog senzora ili čipa.

Otpori se spajaju u Wheatstoneov most radi povećanja nivoa izlaznog signala i kompenzacije temperaturnih uticaja. Izvor pomoćne energije za ovaj senzor predstavlja strujni (bilo koja konstantna vrednost između 1 i 4mA) ili naponski (između 5 i 10VDC) generator. Na slici 10.31 predstavljen je teorijski Wheatstoneov most u naponskoj varijanti napajanja. Za most

se kaže da je uravnotežen ako je izlazni signal koji se mjeri na njegovoj dijagonali jednak nuli. Ovo se ostvaruje u slučaju da je ispunjeno sljedeće:

$$R_1/R_3 = R_2/R_4 \dots \dots \dots (10.17)$$



Slika 10.31. Teorijski izgled Wheatstoneovog mosta

Most izlazi iz ravnoteže pod dejstvom sile pritiska, koja deformira kristalnu rešetku materijala od kojeg su otpori. R_1 i R_4 povećavaju svoju numeričku vrednost, a R_2 i R_3 je smanjuju. Kao rezultat toga povećava se vrijednost izlaznog signala, (U_s) na dijagonali mosta. Praktična numerička vrijednost ovog signala je od nekoliko desetina do nekoliko stotina mV.

Formula po kojoj se izračunava izlazni signal za teorijski Wheatstoneov most, je slijedeća:

$$U_s = U_b \times (R_1 \times R_4 - R_2 \times R_3) / (R_1 + R_3) (R_2 + R_3) + U_0 \dots \dots \dots (10.18)$$

U_s - Izlazni signal

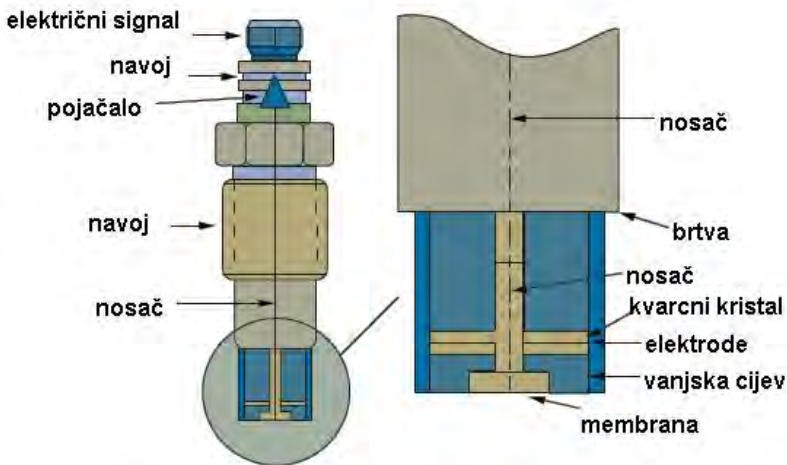
U_b - Napon napajanja

U_0 - Napon offseta

U praksi se pokazuje da su uticaji promjene temperature i drugih parametara značajni, tako da izlazni signal za ravnotežni most nije nula i polako se mijenja sa promjenom temperature. Da bi se pojave kompenzovali, obično se koristi otvorena varijanta mosta i redno paralelna veza otpornika za temperaturnu kompenzaciju.

Izvedbe piezoelektričnih senzora pritiska

Piezoelektrični pretvarači pritiska (slika 10.32), mogu se izvesti u minijaturnom mjerilu, imaju izvrsne dinamičke osobine i zahvaljujući linearnoj statičkoj karakteristici omogućuju precizno umjeravanje i veliku tačnost mjerenja. Glavna primjena piezoelektričnih elemenata je za izvedbu generatora i detektora.



Slika 10.32. Piezoelektrični pretvarač pritiska

Senzori za laboratorijska mjerenja

To su dijelovi mjerača za laboratorijsku upotrebu najviše klase. Poželjno je ostvariti 99,9% tačnosti i više, sa visokom stabilnošću mjerenja. Ovi senzori se koriste kao kontrolori i kalibratori industrijskih mjerača pritiska i radnih etalona pritiska. U grupu senzora za laboratorijska mjerenja spadaju:

1. Vibrirajući cilindar - pretvarač vibracija
2. Vibrirajući kvarcni kristal - pretvarač vibracija
3. Kvarcna Bourdonova cijev sa magnetnom povratnom spregom - kompenzacija sile

Smart transmiteri-pretvarači

Pretvarači pritiska i diferencijalnog pritiska mogu sadržati čitavu gamu pretvarača pritiska za gasove, paru i tečnosti počevši od onih najprostijih sa fiksnim opsegom i klasom tačnosti 0,5%, pa sve do SMART davača sa promjenljivim opsegom, klase tačnosti 0,1%, sa kojima može da se komunicira putem računara.



Slika 10.33. SMART pretvarači

Jedna od najbitnijih karakteristika SMART trnsmitera pritiska i diferencijalnog pritiska je modularni dizajn. To znači da svi transmiteri bez obzira da li su za pritisak ili diferencijalni pritisak i bez obzira na ćeliju koju imaju, keremičku ili polilislilikonsku, imaju potpuno istu elektroniku, displej i kućište (slika 10.33). Prilikom promjene ćelije nije potrebna nikakva ponovna kalibracija transmitera, jer podaci o svakom tipu ćelije se nalaze unutar senzora i elektronika ih odmah prepoznaje.

Postavljanje pretvarača

Setovanje davača ne zahtijeva zrak pod pritiskom, isto može da se uradi koristeći 4 tastera koji se nalaze na samom pretvaraču, ili putem personalnog računara. Nula može da se pomjera između -100% i +95% nominalnog opsega ćelije, a sam mjerni opseg je podesiv u odnosu 1:20.

Elektronika putem raznih protokola omogućava superponiran digitalni signal za prenos podataka i setovanje pretvarača putem računara i obezbjeđuje dosta podataka o samom pretvaraču i mjernom mjestu.

Svi SMART uređaji posjeduju matricu podataka u kojoj se osim vrijednosti mjerene veličine nalazi još niz podataka, na primer: najviša i najniža temperatura medija na ćeliji, najniži i najviši pritisak, broj najviših pritisaka koji su delovali na membranu, razne servisne informacije itd. Svi pomenuti

podaci se čuvaju, tako da korisnik ima potpunu informaciju o stanju pretvarača čime se povećava i pouzdanost samog mjerenja pritiska.



Slika 10.34. Postavljanje pretvarača

Kućište SMART transmitera pritiska i diferencijalnog pritiska koje štiti elektroniku od neumjerenih temperatura, vlage i korozivnih materijala je aluminijumsko i zaštićeno. U kućištu se nalazi digitalni displej i bargraf. SMART transmiteri imaju certifikate za rad u eksplozivnoj sredini (CENELEC, PTB, FM, CSA RIIS itd.) i posjeduju električni filter koji je, ustvari, zaštita od elektromagnetne interference (EMC - Electromagnetic compatibility). Pretvarač se testira u električnom polju jačine 30V/m. Upravo zbog toga razna uključivanja i isključivanja, radio oprema, elektrostatička pražnjenja ne utiču na elektroniku davača i na taj način pomenuta zaštita obezbjeđuje veoma pouzdano mjerenje.

11. MJERENJE SILE

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Instrumenti i uređaji za mjerenje sile
3. Kalibriranje dinamometara
4. Mjerni lanac za mjerenje mase

11.1. UVOD

Sila je vektorska veličina, u mehanici i tehnici jedna od osnovnih i najvažnijih veličina koje treba mjeriti i kontrolirati. Sila se definira po drugom Newtonovom zakonu kao $F = m \cdot a$. Sila gravitacije predstavlja umnožak mase i gravitacionog ubrzanja $G = m \cdot g$. Sila gravitacije sa aspekta mjerenja je važna jer je osnova za mjerenje mase i vaganje. Umjesto ubrzanja u izrazu za silu gravitacije javlja se ubrzanje gravitacije. Sila u opruzi ili elastičnom štapu data je izrazom:

$$F = c \cdot x \dots\dots\dots (11.1)$$

gdje je

c – krutost opruge ili štapa,

x – deformacija.

Djelovanjem sile dolazi do deformacije. Deformacija se može mjeriti, pa nakon toga izračunati sila. Takav način određivanja sile je indirektni postupak.

Direktnim mjerenjem može se odrediti vrijednost sile. Uređaji kojima se provodi direktno mjerenje sile zovu se dinamometri.

Opterećenje silom predstavlja način provjere i ispitivanja objekata prije njihovog puštanja u rad. Silom se opterećuju mostovi kako bi se provjerila i dokazala upotrebljivost objekta. Krovne i stadionske konstrukcije u pravilu se provjeravaju nakon izrade i montaže opterećenjem u vidu sila. Takve tačno poznate sile dovode do pojave elastičnih deformacija ispitivanih objekata.

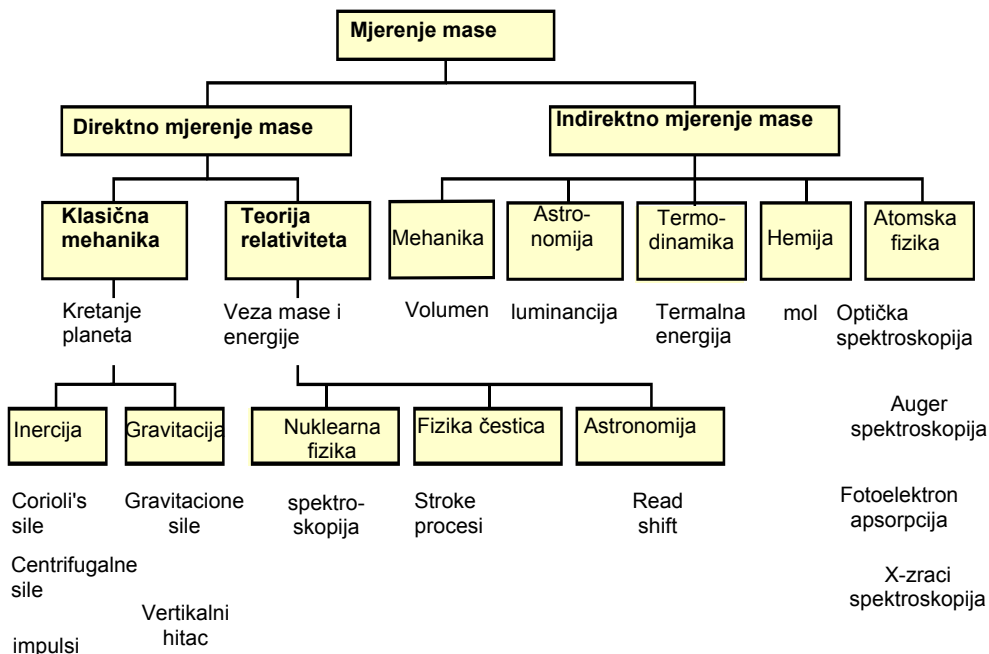
Nakon upotrebe nosećih užadi, zatega visokih objekata ili mostova, zakonom su propisani uslovi pod kojima ih treba ispitati. Jedan od koraka koji se u tom postupku moraju obaviti jeste i ispitivanje sile u užetu ili zatezi.

Posebnu ulogu u mjerenju sile zauzima mjerenje mase, gravimetrija ili tehnike vaganja koja ima veliku ulogu u automatskim linijama pakovanja u raznim oblastima industrije; prehrambenoj, hemijskoj, farmaceutskoj.

Industrijske vage za vaganje sirovina i kabastih gotovih proizvoda su nezamjenljive u procesnoj industriji, metalurgiji itd.

11.1.1. Metodi i principi određivanja mase i sile

Masa se može odrediti direktno i indirektno. Direktno određivanje mase vrši se u klasičnoj mehanici i u teoriji relativiteta. U klasičnoj mehanici to se radi za kretanje planeta, a u teoriji relativiteta da se uspostavi veze između mase i energije. Indirektno određivanje mase se vrši u mehanici, astronomiji, termodinamici hemiji i atomskoj fizici. Detaljnije podjele date su na slici 11.1.



Slika 11.1. Metodi i principi određivanja mase

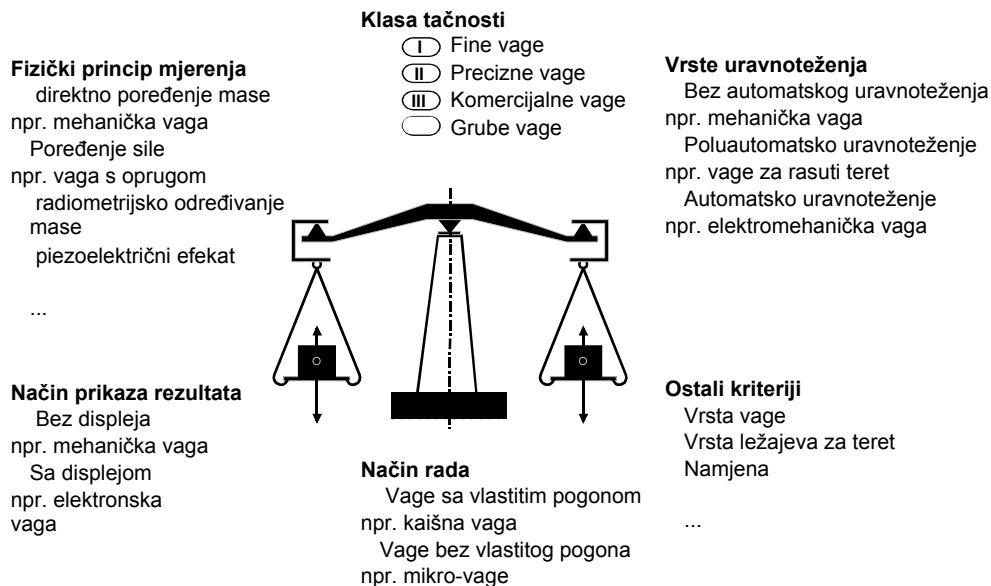
11.1.2. Kriteriji za uravnotežavanje masa

Mjerenje mase je vaganje ili uravnotežavanje i predstavlja aktivnost mjerenja koja se može posmatrati sa različitih aspekata:

- Fizičkih principa mjerenja odnosno konstrukcije vaga,
- Oblik rada,

- Klasifikacija mjerenja prema tačnosti rezultata koji se trebaju dobiti vaganjem,
- Drugi kriteriji,
- Klasifikacija .

Kriteriji za klasifikaciju prikazani su na slici 11.2.

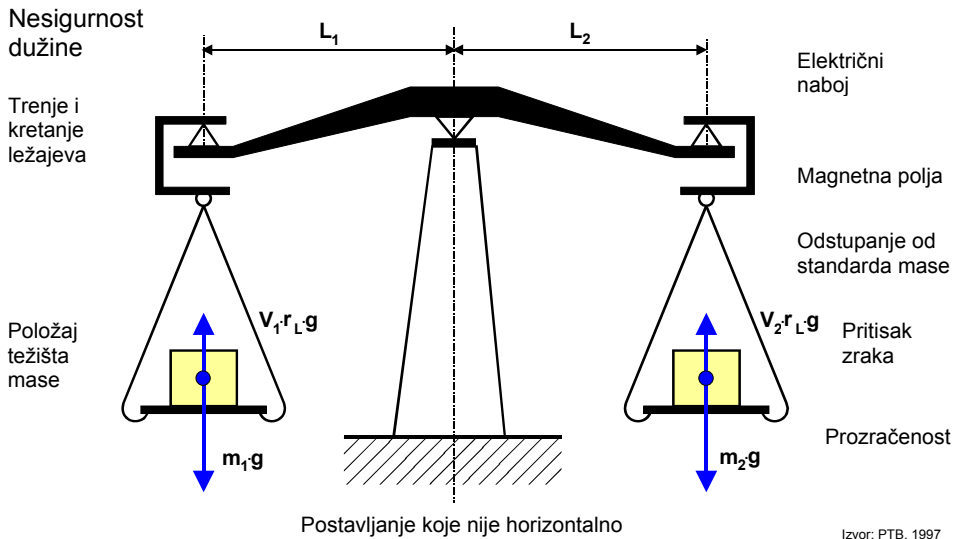


Slika 11.2. Kriteriji za klasifikaciju uravnotežavanja

11.1.3. Greške pri mjerenju

Pri mjerenju mase uspostavlja se ravnoteža lijeve i desne strane vage. Pri tom se javljaju greške koje utiču na rezultat mjerenja.

Na slici 11.3 su date greške i mjesta na kojima se one javljaju kod prostih mehaničkih vage.



Slika 11.3. Greške mjerenja mehaničkih vaga

11.2. Instrumenti i uređaji za mjerenje sile

Direktno mjerenje sile ostvaruje se specijalnim uređajima koji se zovu dinamometri. Rad dinamometara može biti zasnovan na različitim principima. Dinamometri prema principu rada mogu biti:

- mehanički,
- električni,
- hidraulični,
- pneumatski.

Prema funkciji mogu biti:

- potezni i potisni,
- za ispitivanje kompresije

Za mjerenje sile mogu se koristiti različite vrste pretvarača, a najčešće:

- tenzometraske mjerne trake,
- induktivni pretvarači,
- kapacitivni pretvarači,
- piezoelektrični pretvarači.

Osnovni zahtjevi koje svaka konstrukcija dinamometra mora da zadovolji su:

- visoka osjetljivost u cijelom opsegu mjerenja, odnosno brzo reagiranje na promjenu sile,
- mala inercija,
- praktičnost i ekonomičnost u radu.

Električni dinamometri se češće koriste jer imaju manju inerciju, veću tačnost i osjetljivost u odnosu na mehaničke i hidrauličke.

11.2.1. Mehanički dinamometri

Postoje dva osnovna pristupa mjerenju sile odnosno vaganju, i to direktno poređenje i indirektno poređenje pomoću kalibriranih pretvarača. Direktno poređenje je tehnika balansa odnosno nulta metoda. Balans se kod mehaničkih vaga uspostavlja putem jednakosti momenata. Najstarije vage su napravljene da rade na ovom principu. Metod jednakosti momenata zove se i metod simetrije. Sila i njeno djelovanje na kraku se izjednačuju sa nekom drugom silom koja djeluje na drugom kraku. Na ovaj način se vrši vaganje odnosno direktno određivanje sile na drugom poznatom kraku. Na slici 11.4. prikazane su vage koje rade na principu simetrije i višestepene vage.

Pomoću ove vage mjeri se teret W , za što se koriste manji tereti W_p i W_s . Uzima se da je W_p nula kada se vrši graduiranje skale. Tereti W_1 i W_2 mogu se zamijeniti teretom W . Kod vaganja postoji relacija poluge:

$$T \times b = W_s \times a \text{ i } T \times c = W_1 \cdot e / d + W_2 h \dots\dots\dots (11.2)$$

Sa slike se vidi da postoji proporcija dužina $h/e = f/d$, pa je:

$$T \times c = h (W_1 + W_2) = h \cdot W \dots\dots\dots (11.3)$$

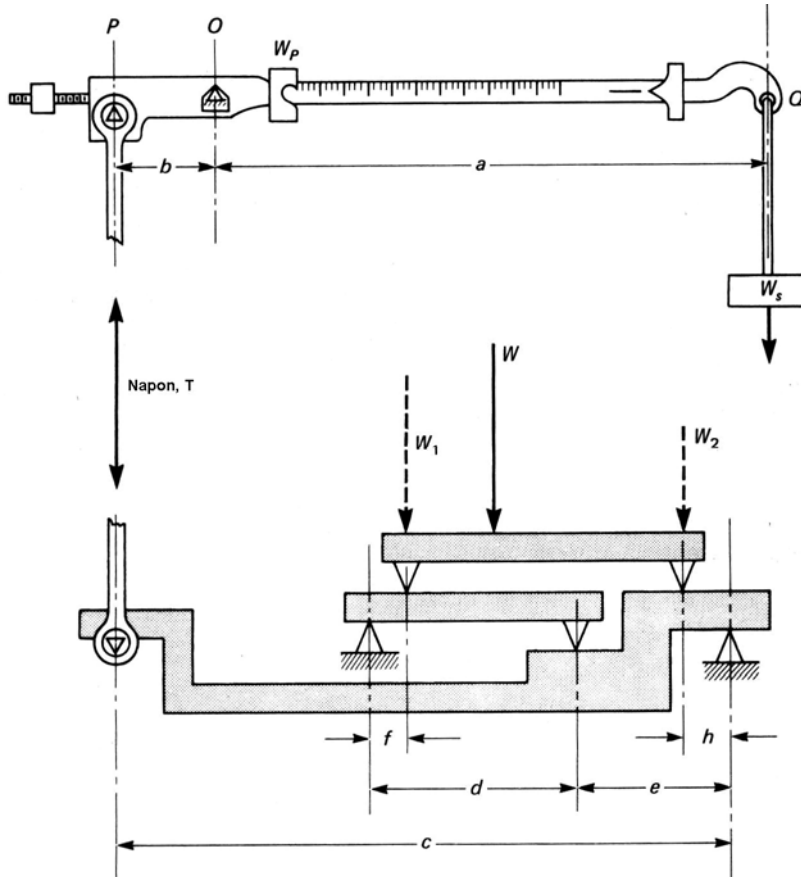
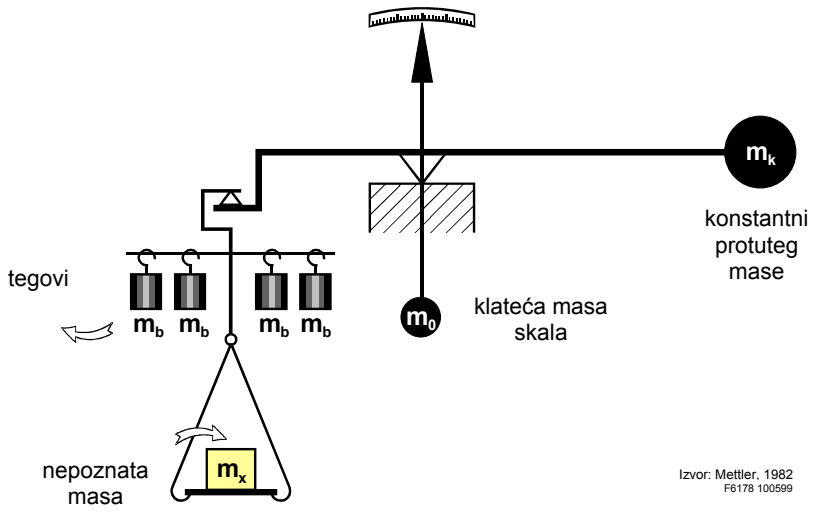
Kombinacijom prethodnih izraza dobije se :

$$W_s \cdot a / b = W \cdot h / c \text{ ili } W = W_s (a \cdot c / b \cdot h) = R W_s \dots\dots\dots (11.4)$$

gdje je:

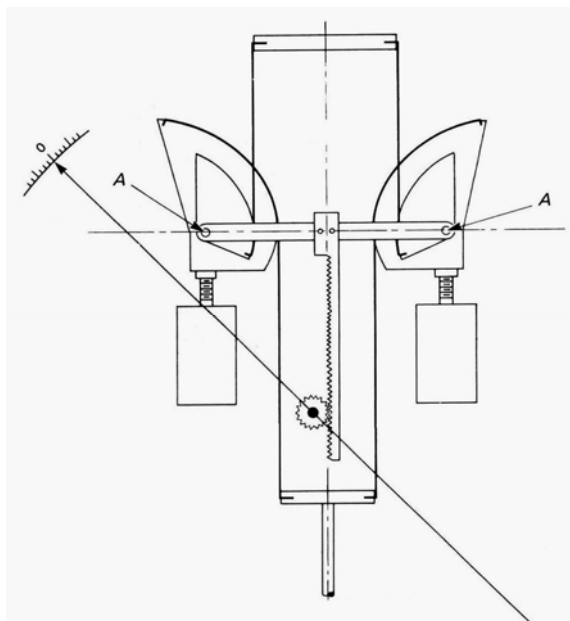
$R = ac/bh$ - faktor množenja skale.

Dinamički odgovor ovakvih skala zavisi od prirodne frekvencije i prigušenja. Prirodna frekvencija zavisi od kretanja mase, faktora R i sila.



Slika 11.4. Višestepeni sistem za vaganje

Drugi tip mjernog sredstva za mehaničko mjerenje sile je mehanizam sa klatećom skalom. U suštini to je višestepeni mehanizam sa konstantnim dužinama. Ulaz ili direktna sila ili sila proporcionalna težini okači se na štap. Kad se to uradi dolazi do umirivanja postepenim kretanjem dijelova mehanizma oko tačkaka A. Kretanjem se aktivira zupčasti sistem vezan za kazaljku koja se pomjera i pokazuje na skali masu ili silu. Ovakav princip mehaničkog djelovanja (slika 11.5) ugrađen je u mehaničke dinamometre različitih izvedbi.



Slika 11.5. Osnovna konstrukcija klateće skale

11.2.2. Elastični mjeri pretvarači

Više vrsta mehaničkih pretvarača koriste elastične članove ili njihovu kombinaciju za mjerenje sile. Rezultat je linearnost između ulaza i izlaza pretvarača. Veličina krutosti se uzima direktno kao mjera proporcionalnosti za silu ili opterećenje ili kao sekundarni pretvarač da se pretvori pomjeranje u drugi oblik izlaza. Najčešće je to električni signal.

Elastični članovi zadovoljavaju relaciju:

$$K = F / y, \dots\dots\dots(11.5)$$

Gdje je:

F – nanesena sila koja se mjeri,

y – ukupno skretanje (pomjeranje),

K - konstanta krutosti.

Za elastični element se određuje konstanta K zavisno od toga koji je element. U tabeli 11.1. su dati neki elastični elementi i njihove konstante K kao i jednačine iz kojih se one dobivaju.

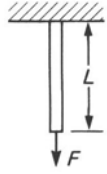
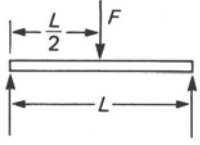
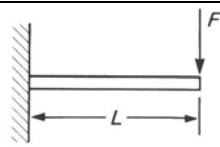

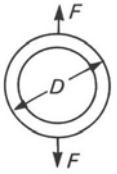
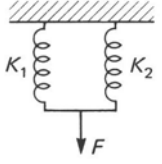
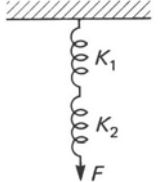
	Elastični element		pomjeranje	Konstanta K
A		F – opterećenje L – dužina A – presjek y – istežanje E – modul elastičnosti	$y = \frac{FL}{AE}$	$K = \frac{AE}{L}$
B		F – opterećenje L – dužina E – modul elastičnosti	$y = \frac{1}{48} \frac{FL^3}{EI}$	$K = \frac{48EI}{L^3}$
C		l – moment inercije	$y = \frac{1}{3} \frac{FL^3}{EI}$	$K = \frac{3EI}{L^3}$
D		F – opterećenje D_m – prečnik zavoja N – broj zavoja E_s – modul smicanja D_w – prečnik žice	$y = \frac{8FD_m^3 N}{E_s D_w^4}$	$K = \frac{E_s D_w^4}{8D_m^3 N}$
E		F – opterećenje D – prečnik prstena E – modul elastičnosti I – moment inercije	$y = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi}\right) FD^3}{16 EI}$	$K = \frac{16}{\left(\frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi}\right)} \frac{EI}{D^3}$
F		K_1 – konstanta opruge 1 K_2 – konstanta opruge 2	$y = \frac{F}{K_1 + K_2}$	$K = K_1 + K_2$
G		F – opterećenje	$y = F \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)$	$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)}$

Tabela 11.1. Elastični elementi i konstante

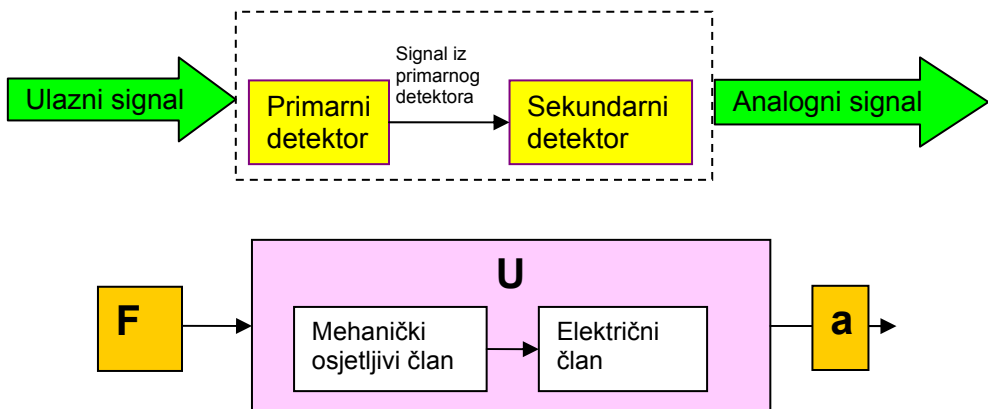
Konstrukcija elastičnih pretvarača

Dizajn detektora - transducera elementa je funkcija od kapaciteta i potrebne osjetljivosti i prirode sekundarnog transducera. Zavise od prirode ulazne veličine: da li je statička ili dinamička.

Sve slučajeve nije moguće analizirati, ali se može uzeti u obzir nekoliko osnovnih faktora. Što je veća osjetljivost i maksimalni izlaz po jedinici ulaza to su bolje karakteristike koje transducer ima.

Elastični član treba da ima što manju krutost u odnosu na deformacije koje proizvodi opterećenje - sila. To se postiže kombinacijom faktora uticaja. Često je potrebno kreirati krutost konstrukcije ćelije opterećenja na račun osjetljivosti i tada konstruirati sekundarni dio pretvarača. Drugi faktor koji uključuje osjetljivost je vrijeme odziva ili vrijeme postizanja ravnoteže. Ovo je funkcija prigušenja i prirodne frekvencije. Brzi odziv znači i visoku prirodnu frekvenciju i potreban je elastični član i visoka krutost.

Napon u materijalu je ograničavajući faktor u bilo kom članu za silu. Treba da naponi ostanu ispod granice elastičnosti i to ne samo u nekim tačkama nego na svim mjestima. Zaostali naponi utiču na ukupno naponsko stanje. Ukoliko se sabiraju sa postojećim, naponi rastu i javlja se nelinearnost i histerezis. Na dizajn i primjenu ćelija za silu utiču i proizvođačke tolerancije. Na slici 11.6. data je blok shema mjernog sredstva prvog reda za mjerenje sile.



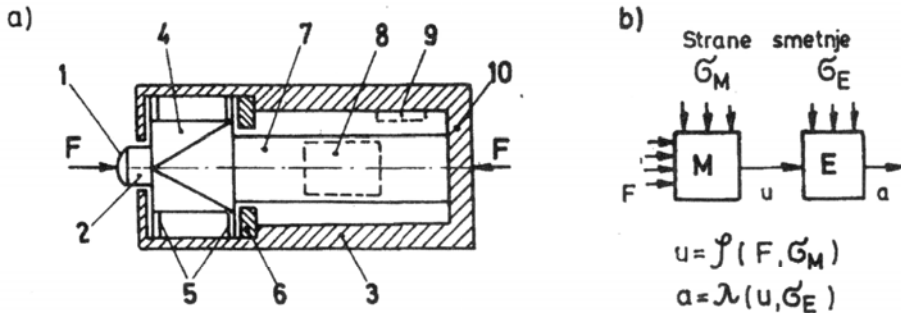
Slika 11.6. Blok dijagram senzora za silu

Mehanički elastični članovi su opruge koje pretvaraju silu - masu u elastično pomjeranje opruge ili elastičnog prstena.

Na mehanički osjetljivi član, koji je sastavni dio svakog pretvarača sile, djeluje se silom F . Kao izlaz iz primarnog dijela pretvarača javiće se kao odgovor signal U . Ako je mehanički osjetljivi član opruga, odgovor na djelovanje sile je pomjeranje opruge. Dakle, mehanička veličina - sila ili

masa se pretvaraju u odgovarajuće pomjeranje. Pomjeranje se u odgovarajućem mehaničkom, električnom ili nekom drugom sekundarnom pretvaraču transformira u signal druge vrste. Ako je mjerni sekundarni dio pretvarača električni onda se na izlazu javlja električni signal.

Na slici 11.7. dana je shema pretvarača za silu i izvedbeni dijelovi pretvarača.



- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1. Kontaktne površine za prijem sile | 6. Graničnik |
| 2. Dio za prijenos sile | 7. Elastični element |
| 3. Kućište | 8. Zbirni uređaj |
| 4. Raspoređivač | 9. Električni dio |
| 5. Selektor | 10. Oslonac za prijem sile |

Slika 11.7. Konstruktivna shema mjernog pretvarača za silu

Svi dijelovi ne učestvuju podjednako u mjerenju sile. Mjerenje direktno zavisi od dijela za prijem i prijenos sile, raspoređivača pomoću koga se sila dovodi na elastični član, pretvarača i selektora koji odvaja samo silu u pravcu mjerenja dok se sile u drugim pravcima zanemaruju. Osim toga pretvarač posjeduje kućište i dio koji ga štiti od preopterećenja. Svi ostali dijelovi ne učestvuju direktno u mjerenju sile.

Prema konstruktivnoj izvedbi mehaničko električni pretvarači mogu se podijeliti prema načinu nastajanja reakcije veze na :

- Pretvarače odvojenog djelovanja kod kojih reakcija nastaje usljed deformacije električki reaktivnog člana
- Pretvarači zajedničkog pretvaranja kod kojih se reakcija veze ostvaruje deformacijom elastičnog i električnog člana.
- Pretvarači sa kompenzacijom sile kod kojih se reakcija stvara električnim uravnoteženjem.

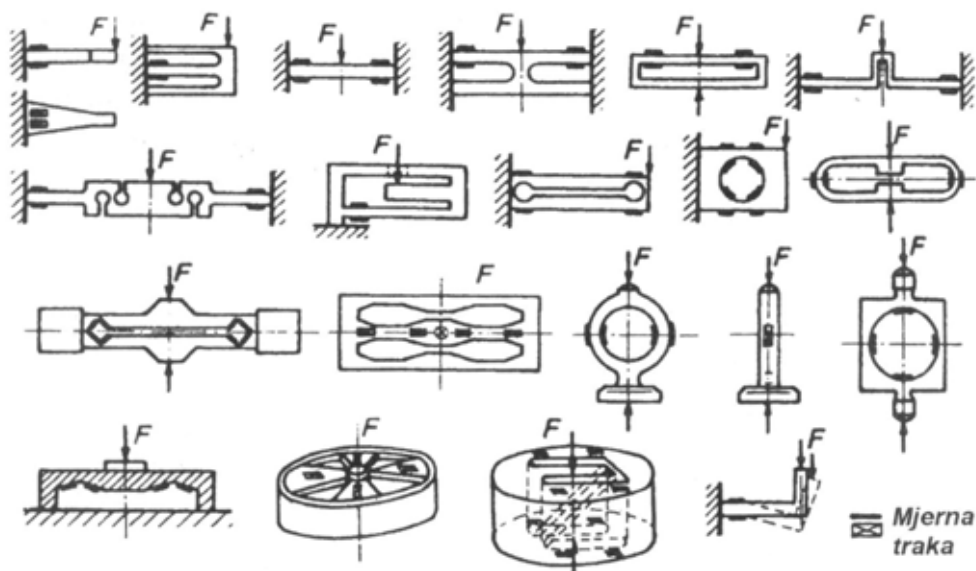
Suvremeni pretvarači rade na prvom principu na prethodno opisani način.

Pretvarači drugog tipa mehaničko opterećenje prenosi na aktivni materijal bilo da je on električni ili magnetni. Pri tome se mehanička deformacija očituje u pojavi napona. Zbog toga se i zovu pretvarači zajedničkog djelovanja odnosno elastično-električnog pretvaranja.

Treći tip pretvarača stvara reakciju elektromagnetnim putem. Kompenzacija u kolu se vrši sve dok se deformacija ne svede na nulu.

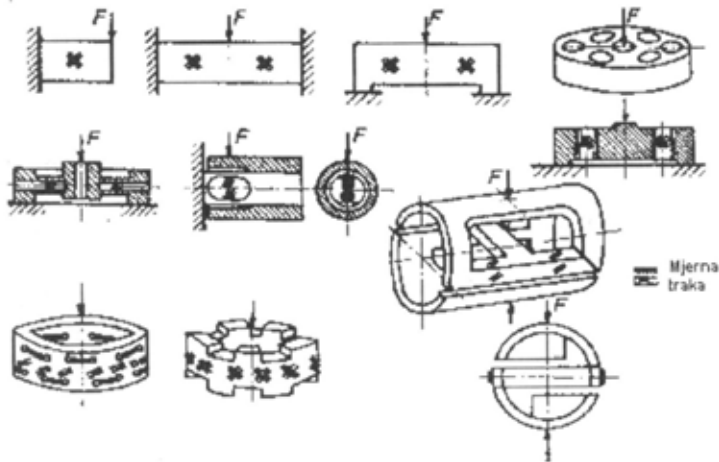
Vrste elastičnih članova

Elastični članovi mjernih pretvarača za silu mogu biti različiti zavisno od toga kakve će napone izazvati vanjsko opterećenje; smičuće, aksijalno, napone savijanja ili složene napone. Uglavnom se koriste elastični članovi za savijanje dati na slici 11.8. koji sadrže mjerne trake. Broj mjernih traka zavisno od tipa, konstrukcije i vrste mjernog mosta može biti različit. Mjerni opseg je od 100 N do 10 kN. Osnovni oblik elastičnog člana za savijanje je u obliku konzole sa dvije ili četiri mjerne trake dati u tabeli 11.1.



Slika 11.8. Elastični članovi za savijanje sa tenzometarskim trakama

Elastični elementi za smicanje prikazani su na slici 11.9. a njihov mjerni opseg je u granicama od 10 kN do 1 MN.

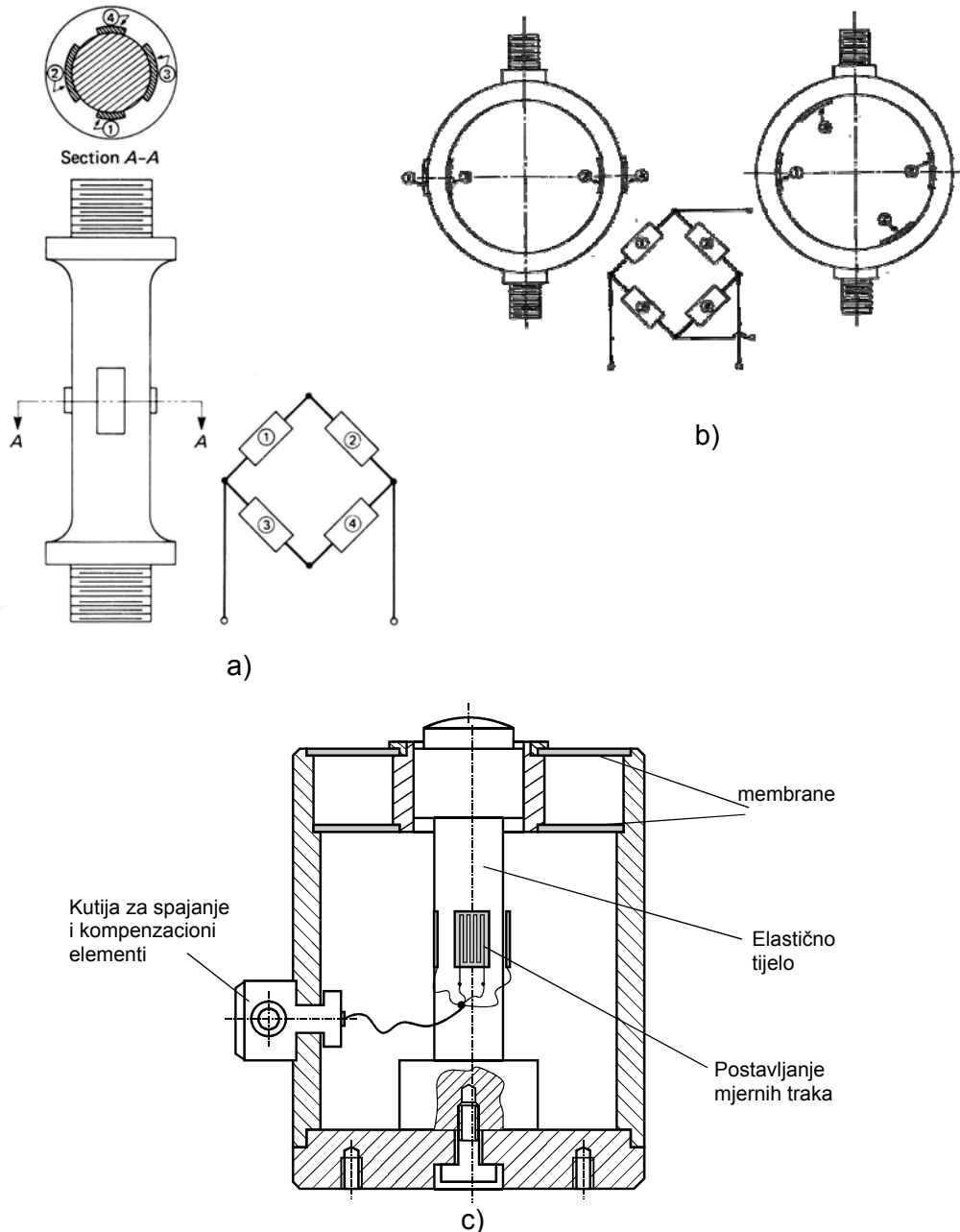


Slika 11.9. Elastični članovi za smicanje sa tenzometraskim trakama

11.2.3. Elektrootporni tenzometarski dinamometara

Za mjerenje sila gotovo isključivo se koriste električni dinamometri. Mjerenje sila električnim dinamometrima se svodi na mjerenje deformacija mjernim trakama na štapu ili prstenu opterećenom silama istezanja ili pritiska, slika 11.8.

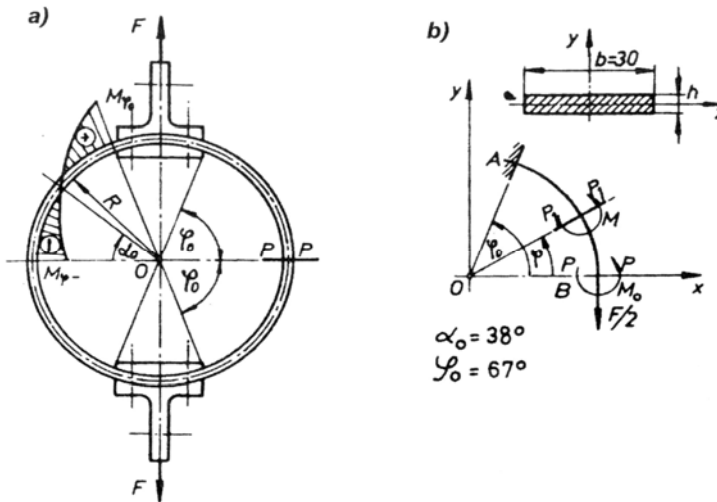
Da bi se povećala osjetljivost pri mjerenju malih vrijednosti sila, dinamometar se izrađuje u obliku prstena, a mjerne trake povezuju u most. Pri konstrukciji dinamometra štap ili prsten treba da budu tako dimenzionirani da ostanu u elastičnom području. Najvažnija osobina je krutost elastičnog elementa.



Slika 11.10. Električni dinamometar
 a) mjerna ćelija opterećena na pritisak ili istežanje,
 b) mjerna ćelija sa ćelijama opterećenja raspoređenim po obimu
 prstenastog dinamometra, c) mjerna ćelija sa membranom

Proračun i karakteristike tenzometarskih dinamometara

Usljed djelovanja sila koje se mjere, bilo zatežućih ili pritiskujućih unutar konstrukcije dinamometra javljaju se sile i momenti. U presjeku P-P javlja se unutrašnja zatežuća sila $F/2$ i moment savijanja M_0 . Krutost elastičnog prstena računa se na osnovu najveće deformacije Δl u pravcu djelovanja sile F pomoću Casteliagnove teoreme, slika 11.11.



Slika 11.11. Opterećenje dinamometra:
a) izgled opterećenja, b) presjek i računaska shema

U proizvoljnom presjeku P-P moment savijanja je:

$$M = M_0 - \frac{1}{2} F \cdot R (1 - \cos\varphi) \dots\dots\dots (11.6)$$

Ukupna energija defomacije prstena jednaka je zbiru energija četiri simetrične četvrtine tijela dinamometra.

$$A = 4 \int_0^{\varphi_0} \frac{M^2 R}{2EI_z} d\varphi \dots\dots\dots (11.7)$$

gdje je:

E – modul elastičnosti prstena,

M – moment u proizvoljnom presjeku,

I_z – moment inercije presjeka.

Kako presjek P-P ostaje nedeformisan, nagib elastične linije jednak je nuli,

$$\frac{\partial A}{\partial M} = 0, \text{ pa je:}$$

$$M_0 = \frac{1}{2} FR \left(1 - \frac{\sin \varphi_0}{\varphi_0} \right) \dots \dots \dots (11.8)$$

a deformacija Δl u pravcu djelovanja sile

$$\Delta l = \frac{\partial A}{\partial F} = \frac{FR^3}{EI_z} \left(\frac{1}{2} \varphi_0 + \frac{1}{4} \sin 2\varphi_0 - \frac{\sin^2 \varphi_0}{\varphi_0} \right) \dots \dots \dots (11.9)$$

Krutost dinamometra kao elastičnog tijela računa se prema izrazu:

$$K = \frac{F}{\Delta l} = \frac{EI_z}{R^3 \Phi_0} \dots \dots \dots (11.10)$$

Zavisno od vrijednosti debljine dinamometra (h), te za $\varphi = 67^\circ$ i $\Phi_0 = 0,043$ date su vrijednosti krutosti dinamometra u tabeli 11.2.

Oznaka	h [mm]	$R = \frac{1}{2}(D+h)$ [mm]	$I_z = \frac{bh^3}{12}$ [cm ⁴]	R^3 [cm ³]	$K = \frac{EI_z}{R^3 \Phi_0}$ [kN/mm]
K ₁	2,6	68,80	$4,4 \cdot 10^{-3}$	326	0,6
K ₂	3,3	69,15	$9 \cdot 10^{-3}$	330	1,2
K ₃	4,2	69,60	$18,5 \cdot 10^{-3}$	337	2,5
K ₄	5,3	70,15	$37,5 \cdot 10^{-3}$	344	5,0
K ₅	6,8	70,90	$78,8 \cdot 10^{-3}$	355	10,0

Tabela 11.2. Krutosti dinamometara

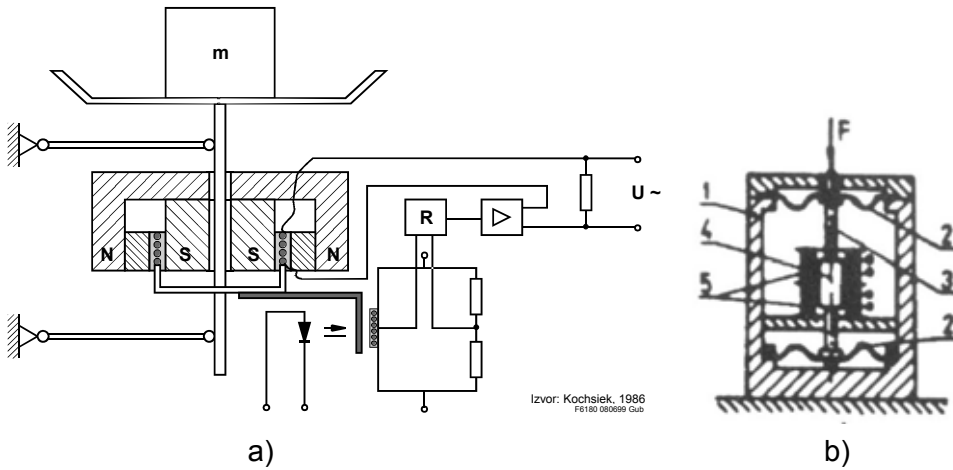
Dinamometri se mogu koristiti za mjerenje komponenata otpora rezanja i svaka od tih komponenata može se posebno izmjeriti na osnovu deformacije koju ona izaziva. Za mjerenje svake komponente formira se posebna sprega.

11.2.4. Elektromagnetni dinamometri

Osim električnih koriste se i elektromagnetni dinamometri koji rade na induktivnom principu. Prema konstrukciji mogu biti dinamometri sa:

- membranom,
- cijevnim elementom,
- prstenastim elastičnim članom.

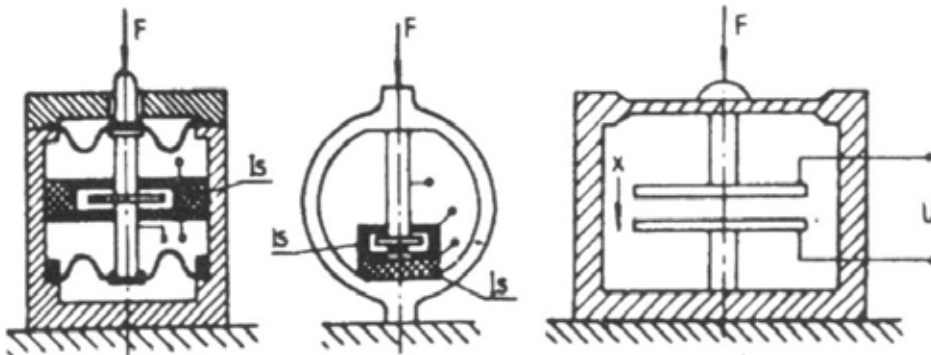
Na slici 11.12.a prikazana je ćelija opterećenja sa elektromagnetnom kompenzacijom sile.



Slika 11.12. a) Elektromagnetna kompenzacija sile;
b) Induktivni dinamometar sa membranom
1 - tijelo, 2 - membrana, 3 - štap, 4 - jezgro, 5 – kalem.

11.2.5. Kapacitivni dinamometri

Djelovanjem sile na kapacitivni mjerni pretvarač, kapacitet kondenzatora se mijenja, slika 11.13. Najčešće se koriste pretvarači za silu sa membranama, sa prstenastim članom i cjevastim elastičnim članom.

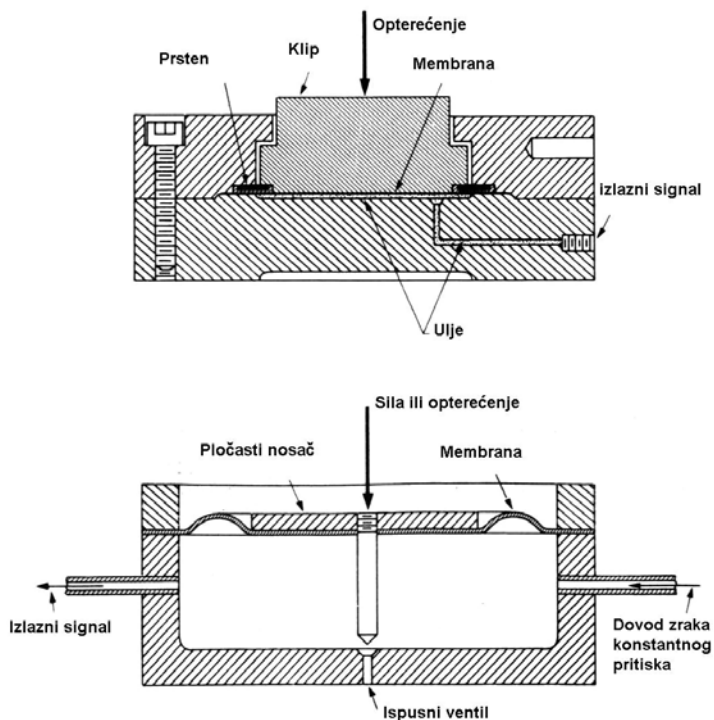


Slika 11.13. Kapacitivni pretvarači sile

Kapacitivni pretvarači sile se koriste za mjerenje sila od 10N do 10 MN. Imaju male dimenzije pa su pogodni za ugradnju na ograničenim prostorima, imaju male sile trenja i otporne sile.

11.2.6. Hidraulički i pneumatski dinamometri

Ako se sila nanosi na jednu stranu klipa ili membrane, a na drugoj strani djeluje određeni pritisak, treba uspostaviti ravnotežu sila. Na tom principu rade hidraulički i pneumatski pretvarači za silu, slika 11.14.



Slika 11.14. Presjeci hidraulične i pneumatske ćelije za silu

Klip u hidrauličkom dinamometru ne dodiruje zidove mjerne ćelije. Kada mjerena sila djeluje na membranu ona se pomjera i time dovodi u kretanje klip koji može da vrši mala kretanja. Pomjeranja klipa se mogu dalje transformirati u signal koji se mjeri i daje informaciju o veličini sile-opterećenje ili pritiska. Ovi pretvarači su velikog kapaciteta 22 MN i tačnosti $\pm 0,5\%$. Osjetljivi su na temperaturne promjene što se može riješiti postavljanjem nule. Temperaturne promjene u toku mjerenja mogu unijeti grešku od 0,25% sa 10 stepeni promjene temperature.

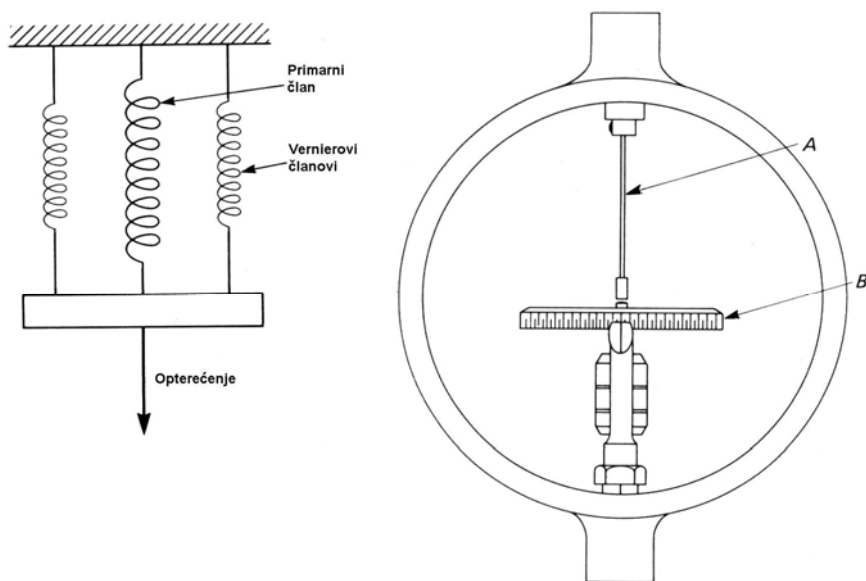
Pneumatska ćelija je slična hidrauličkoj i radi na sličan način. Razlika je u medijeu koji je u ovom slučaju gasoviti. Pneumatske ćelije koriste membrane za uspostavljanje ravnoteže, umjesto klipova. Promjene opterećenja su velike pa se mjerna membrana mora uravnoteževati postepeno.

11.3. Kalibriranje dinamometara

Postoje različite vrste kalibracija koje se mogu koristiti za ocjenu karakteristika elastičnih članova za silu. Ponekad je dovoljno provjeriti na vrijeme sklop i izabrati jednu od više standardnih graduacija skala.

11.3.1. Kalibriranje mehaničkih dinamometara

Za oprugu elastične mjerne ćelije, na slici 11.15, određuje se nesigurnost konstante krutosti koja je posljedica dimenzionalnih tolerancija koje mogu biti 9%. U vrijeme sklapanja vrši se brza i jednostruka kalibracijska provjera i izbor jedne od dvije ploče i reducirati nesigurnost iz ovog izvora na polovinu vrijednosti. Četiri ploče bi trebalo da to reduciraju za $\pm 2,5\%$. Postupak se koristi ne samo za mjerna sredstva za mjerenje sile nego i za druge razne jeftine instrumente koji imaju skalu.



Slika 11.15. Kalibracija mehaničkih dinamometara

Kada su opruge primarni pretvarač onda se vrši podešavanje aktivnih navoja opruge i krutost opruge. Ako ćelija sadrži sekundarni pretvarač i on se mora kalibrirati npr. podjela skale voltmetra. Na slici je prikazan postupak minimiziranja nepotrebnih tolerancija. Ukupno opterećenje se dijeli između primarnog člana (opruge u ovom slučaju) jednog ili više vernier članova, manje opruge na slici. Dizajnom se može odrediti da vernier članovi nose 10% ili manje ukupnog opterećenja. Oni su svrstani

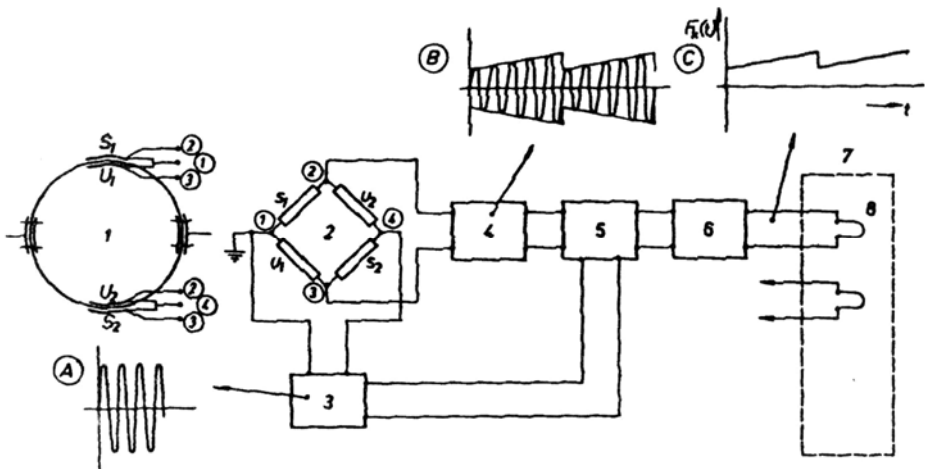
prema krutosti tako da je nesigurnost sklopa ćelije manja nego što je specificirano npr. $\pm 0,2\%$. Ovakav postupak se koristi za širok opseg elastičnih instrumenata.

Deformacija se koristi da se mjeri nanoseno opterećenje, a mjeri se preciznim mikrometrima. Ponovljive mikrometerske postavke dobiju se pomoću pokretnog-vibracionog tankog štapića. Štapić A se pokreće električnim putem a mikrometersko vreteno B pokazuje, uz naznačeno prigušenje, koliko je kretanje.

Naponi u elastičnim elementima mogu se računati za savijanje prema proračunu datom u prethodnom proračunu dinamometra za određivanje momenata.

11.3.2. Kalibriranje električnih dinamometara

Kalibriranje dinamometra vrši se na način prikazan na slici 11.16. Na elastični dinamometar se zalijepe četiri mjerne trake i to dvije sa spoljašnje a dvije sa unutrašnje strane. Spoljašnje trake obilježene su sa S_1 i S_2 a unutrašnje sa U_1 i U_2 . Sve četiri trake su aktivne i povezane tako da se temperaturno kompenziraju. Trake su priključene na mjerni most 2, koji se napaja pomoću generatora 3.



Slika 11.16. Kalibracija tenzometarskih dinamometara:

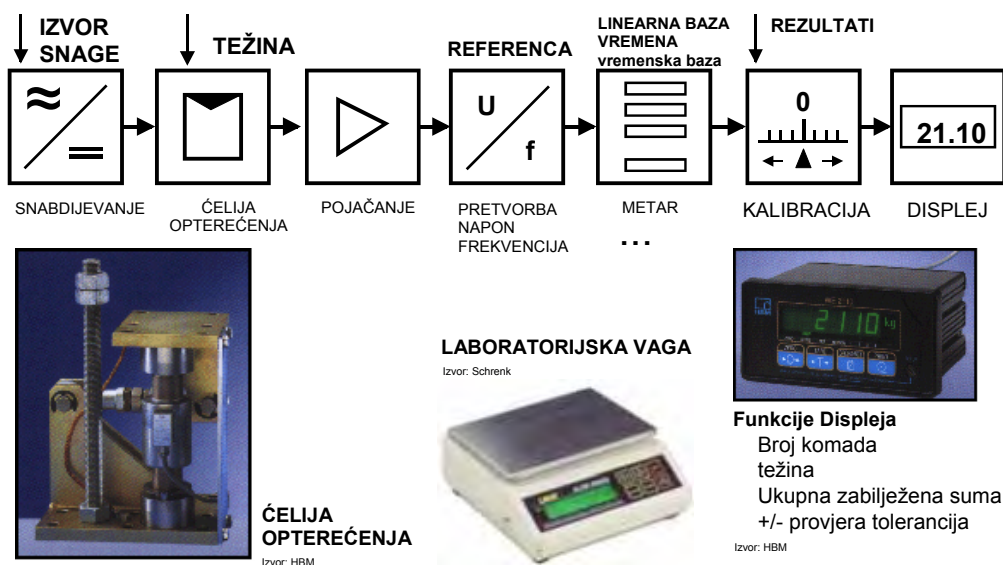
1-dinamometar, 2-mjerni most, 3-generator za napajanje mosta, 4-pojačalo, 5-demodulator, 6-filter, 7-oscilograf, 8-galvanometar

A-oblik signala za napajanje mjernog mosta, B-oblik signala dejstva mjernih traka sa nosećom frekvencijom oscilatora, C-Demodulirani i filtrirani signal doveden na galvanometar oscilografa-mjerna veličina

Napon na pojačalo se dovodi sa strane indikatora 2, 3. Nakon demoduliranja signal se filtrira i dovodi na galvanometar i oscilograf. Svaka od komponenata mjernog lanca ima svoje karakteristike. Kalibracija dinamometra se vrši mjerenjem karakteristika krutosti dinamometra. Mjere se deformacije Δl koje nastaju kada se nanese opterećenje ili izvrši rasterećenje. Opterećenje se vrši pomoću tegova mase 5, 10, 15, 20, 25 kg.

11.4. Mjerni lanac za mjerenje mase

Mjerenje mase se može ostvariti pomoću mjernog lanca koji ima dijelove prikazane na slici 11.17.



Slika 11.17. Mjerni lanac za mjerenje mase.

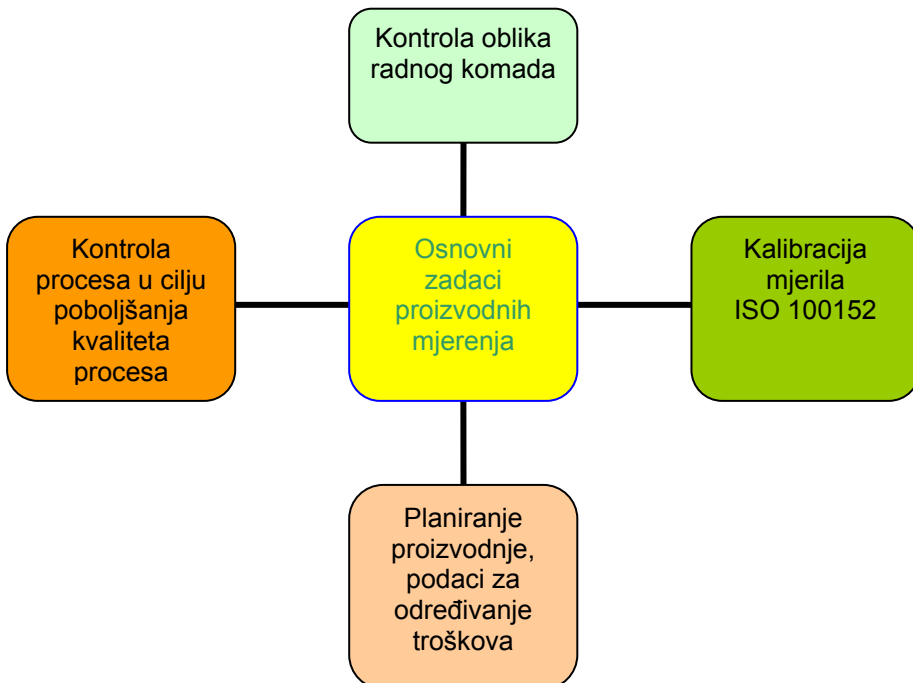
12. PROIZVODNA MJERENJA

Sadržaj lekcije:

1. Ciljevi i zadaci proizvodnih mjerenja
2. Razvoj proizvodnih mjerenja
3. Podjela proizvodnih mjerila

12.1. Ciljevi i zadaci proizvodnih mjerenja

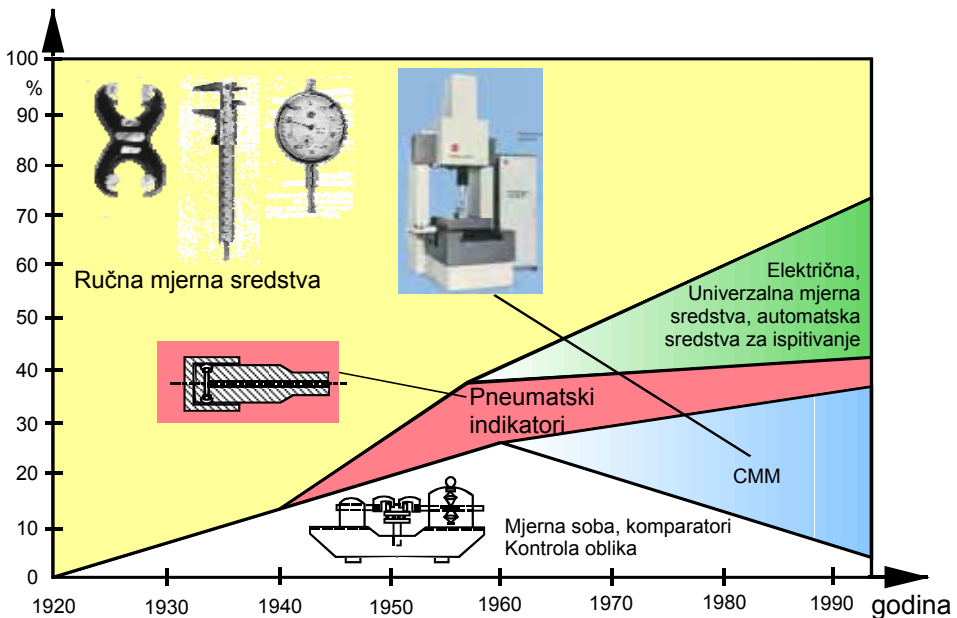
U proizvodnji mašina uređaja, alata i svih drugih proizvoda postoje mjerenja koja se moraju raditi tokom cijelog proizvodnog procesa kako bi proizvod imao određene karakteristike. Postoji čitav niz mjerenja koja se izvode sa različitim mjerilima kako bi se dobili željene karakteristike proizvoda. Proizvodna mjerenja odnose se na mjerenje dužine, uglova, kvaliteta površina i oblika i položaja. Osnovni zadaci proizvodnih mjerenja su prikazani na slici 12.1.



Slika 12.1. Zadaci proizvodnih mjerenja

12.2. Razvoj proizvodnih mjerenja

Najstarija mjerila su ručna mjerila, ali istovremeno i najviše korištena i u današnje vrijeme. Gotovo trećina ukupne upotrebe mjerila u proizvodnji pripada upravo ručnim mjerilima. To je zbog toga što su jednostavna za korištenje, jeftina i prenosiva. Na slici 12.2. prikazan je razvoj mjerila za mjerenja u proizvodnji odakle se vidi da su električna mjerenja i automatska sredstva mjerenja sve zastupljenija kao i višekoordinatna koordinatna mjerna tehnologija. Etalonska mjerenja ne zauzimaju veliki dio mjerenja prema procentu ali su neizbježna i uslov su mjernog jedinstva i razmjene roba.



Slika 12.2. Razvoj mjerila za proizvodna mjerenja

12.3. Podjela proizvodnih mjerila

Mjerila za dužine mogu se razvrstati na različite načine i prema različitim parametrima. U principu mogu biti:

- Jednostruka i
- Višestruka

U jednostruka mjerila spadaju mjerila koja se koriste za mjerenje i kontrolu samo jedne veličine. To su:

- Granična mjerila,
- Tolerancijska mjerila,
- Lenjiri bez skale,
- Mjerne ploče,
- Šabloni i kalibri.

Višestruka mjerila koriste se za mjerenje više vrijednosti mjerne fizičke veličine ili mjernog odstupanja. To su:

- Lenjiri sa skalom,
- Mjerila sa nonijusom,
- Mikrometarska mjerila,
- Komparatori,
- Mjerni mikroskopi.

Prema principu mjerenja mogu biti:

- Mehanička,
- Optička,
- Električna itd.

12.3.1. Jednostruka mjerila

Granična mjerila

Etalon je mjerilo ili proizvodni fenomen koji predstavlja utjelovljenu dimenziju sa tačno određenom karakteristikom. Utjelovljene mjere nemaju dijelovi koji se mogu mijenjati za vrijeme mjerenja. Zavisno od njihove namjene granična mjerila mogu biti paralelna u vidu blokova ili paralelna granična mjerila ili u obliku štapića cilindričnog oblika.

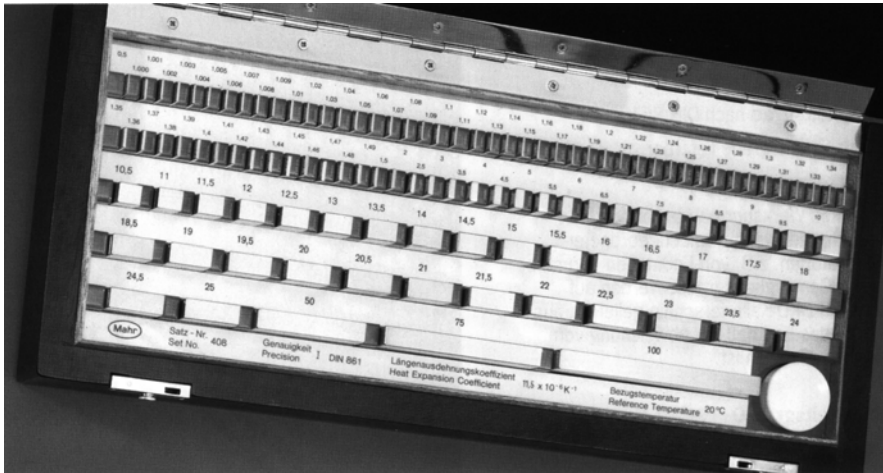
Paralelna granična mjerila

Najčešće se koriste mjerila za provjeru dužina. To su granična mjerila. Zovu se etaloni za dužine i koriste se u industriji i u laboratorijama. Korištenjem ovih mjerila postiže se zadovoljavanje tačnosti u procesu mjerenja dužinskih veličina. Granična mjerila imaju visok nivo tačnosti i stabilnosti pa ukoliko se koriste na ispravan način rezultat dobiven

korištenjem graničnih mjerila može se smatrati da je tačan, odnosno, da je istinita vrijednost mjerene veličine.

Materijal graničnih mjerila

Blokovi graničnih mjerila izrađuju se od visokougleničnog čelika ili keramike u obliku pravougaonika. Isporučuju se u kompletima, slika 12.3.



Slika 12.3. Komplet graničnih mjerila za dužinu

Dimenzije blokova u kompletu su različite, a broj blokova u kompletu je različit. Broj blokova je uvijek toliki da se može složiti željena dužina. Dimenzije blokova su najčešće 9 x 30 mm za blokove dužine do 10 mm, a 9 x 35 za blokove preko 10 mm dužine.

Klasa tačnosti graničnih mjerila

Granična mjerila za dužine izrađuju se u pet klasa tačnosti za određene namjene i to:

- 00,
- kalibraciona K,
- 0,
- I,
- II.

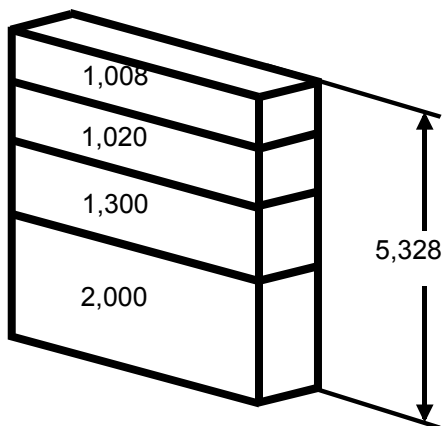
Mjerila klase tačnosti 00 su ona koja služe za kalibraciju na početku postupka kalibracije svakog kompleta graničnih mjerila. Osnovna uloga graničnih mjerila ove klase tačnosti je da posluže kao etalon proizvođačima graničnih mjerila kao i u laboratorijama gdje se umjeravaju mjerila. Koriste se u kalibracionim laboratorijama.

Kalibraciona granična mjerila se koriste za kalibraciju drugih mjerila jer se njihovim korištenjem mogu ispuniti zahtjevi koji se traže od mjerila za kalibraciju.

Klase graničnih mjerila 0, I, II tačnosti koriste se opću provjeru mjerila. Npr. klasa 0 koristi se za provjeru mjerila kojima se želi postići velika preciznost. Klasa I se koristi u provjeri mjerila kojima se vrše mjerenja u proizvodnji od kojih se zahtijeva velika tačnost.

Slaganje blokova paralelnih graničnih mjerila na poznatu dužinu.

Obično se kompleti blokova sastoje od 32 do 112 komada datih u odgovarajućim veličinama sa osnovnim dimenzijama 1 mm i 2 mm. Na slici 12.4. prikazan je način slaganja poznate veličine kako bi se mogla provjeravati mjerila.



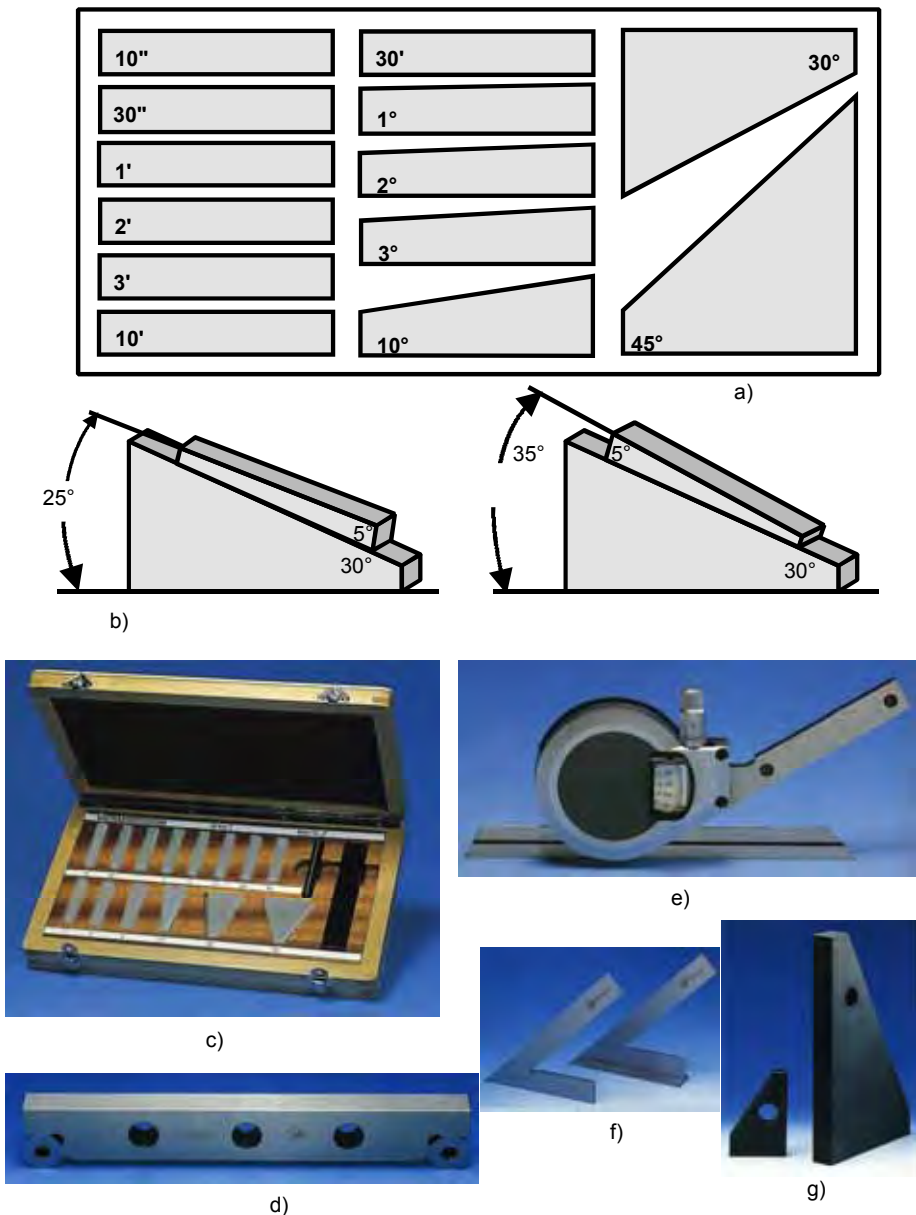
Slika 12.4. Slaganje graničnih mjerila da se dobije željena veličina

Grupe blokova	Broj blokova u grupi	Podjela u (mm)	Veličina blokova u (mm)	Korišteno
1	9	0,001	1,001-1,009	1
2	9	0,010	1,100-1,090	1
3	9	0,100	1,100-1,900	1
4	9	1,000	1,000-9,000	1
5	9	10,00	10,00-90,00	-

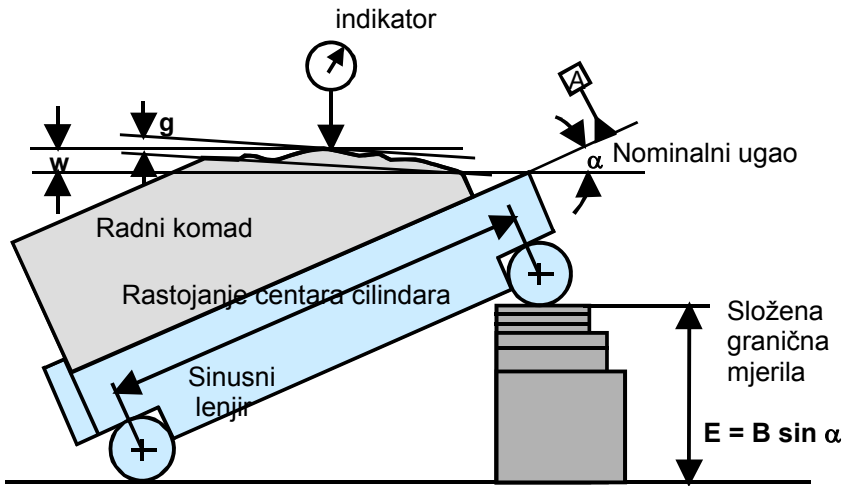
Tabela 12.1. Set graničnih mjerila koji sadrži 45 blokova

Ukoliko se želi dobiti poznata veličina od 5.328 mm, za njeno slaganje može se iz kompleta prikazanog u tabeli 12.1. uzeti određeni broj blokova. Prvo se iz kompleta uzme blok iz grupe blokova 1 čija je dužina 1,008, zatim iz grupe 2 blok 1,020, iz grupe 3 blok 1,350 i iz grupe 4 blok 2.000.

Osim za kontrolu dužina granična mjerila se mogu koristiti i za kontrolu uglova. Na slici 12.5. su prikazana kako se koriste i isporučuju i neke od izvedbi.



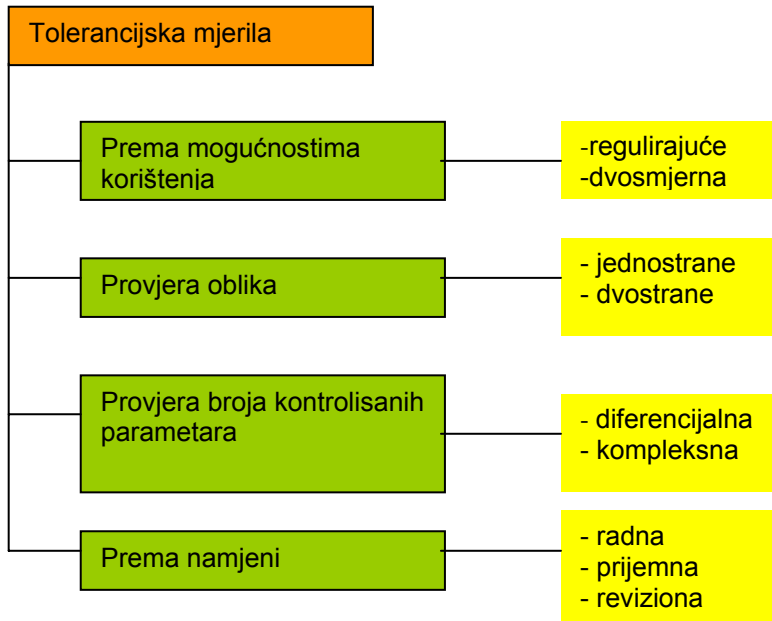
Slika 12.5. a) Granična mjerila za ugao, b) Slaganje graničnih mjerila za željeni ugao, c) Granična mjerila za uglove, d) Sinusni lenjir za formiranje uglova sa mjernim blokovima, e) Univerzalni uglomjer, f) Različiti kontrolnici za uglove DIN 875, g) Granitni uglomjer za pravi ugao



Slika 12.6. Granična mjerila za ugao

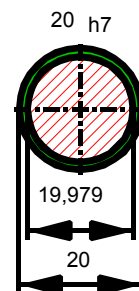
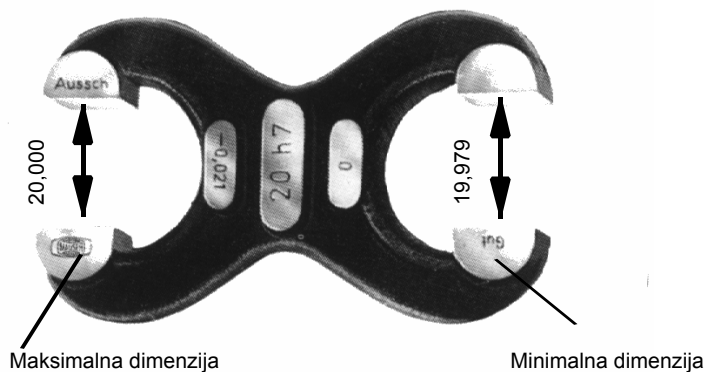
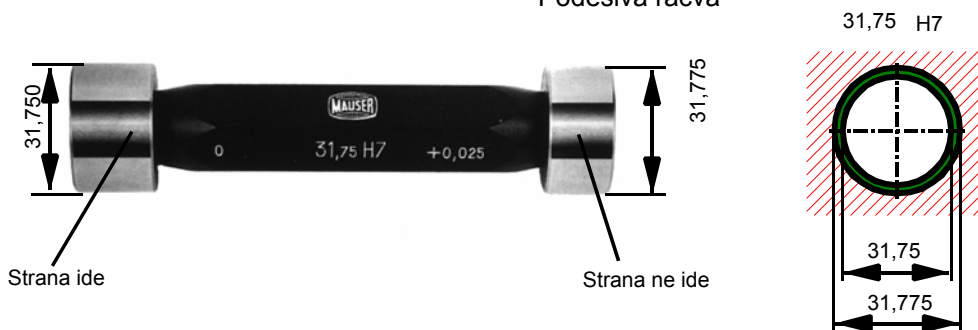
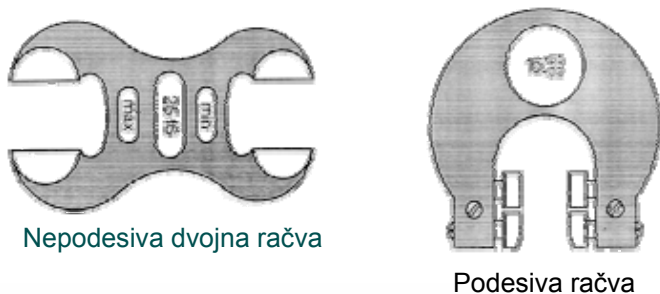
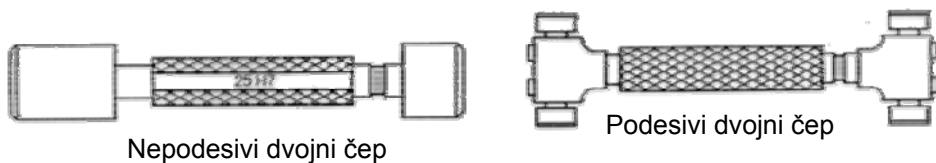
Tolerancijska mjerila

Kontrolnici ili tolerancijska mjerila služe za kontrolu proizvoda. Postoje različiti načini kako se mogu razvrstati tolerancijska mjerila, a prikazani su na slici 12.7.



Slika 12.7. Podjela tolerancijskih mjerila prema različitim kriterijima

Tolerancijska mjerila se izrađuju u dva osnovna oblika: u vidu račvi za kontrolu spoljašnjih i u vidu čepova za kontrolu unutrašnjih dužinskih mjera. Kontrolnicima ili tolerancijskim mjerilima se povjerava da li se kontrolisana veličina nalazi u granicama dozvoljenih odstupanja, ali se ne utvrđuje vrijednost kontrolisane veličine niti mjerno odstupanje. To su čvrsta mjerila sa stranom „IDE“ i „NE IDE“.



Slika 12.8. Tolerancijska mjerila, račve i čepovi

Korištenjem račve i čepa, slika 12.8, može se odrediti da li je kontrolirana dimenzija u granicama dozvoljenih tolerancija, iznad ili ispod njih. Komadi se na osnovu toga mogu svrstati u dobre, loše i one za doradu.

Prema namjeni kontrolnici se dijele na:

- Radne
- Prijemne i
- Revizione

Radionička radna mjerila se koriste neposredno u proizvodnji, prijemna za prijem, a revizona za završnu kontrolu proizvoda i kontrolu radnih mjerila. Prije svega, revizona mjerila služe za provjeru i prijem radnih kontrolnika.

Prema konstrukciji kontrolnici mogu biti:

- čvrsti i
- podesivi

Podesivi regulacioni omogućavaju neutralisanje habanja i podešavanje mjerila za kontrolu dimenzija različitih vrijednosti i različitih odstupanja.

Prema obliku mjerila mogu biti:

- jednostrana i
- dvostrana

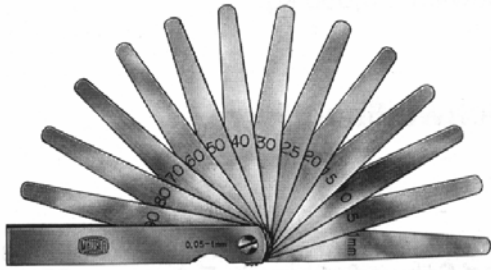
Tolerancijska mjerila, osim za dužine, mogu se koristiti i za kontrolu uglova. Koristi se princip svjetlosnog procjepa koji je veći ukoliko je odstupanje od dozvoljene mjere veće.

Ostala jednostruka mjerila

U ostala jednostruka mjerila mogu se ubrojati lenjiri bez skale, šabloni, mjerne ploče i kalibri, sve prikazano na slikama 12.9 do 12.12.

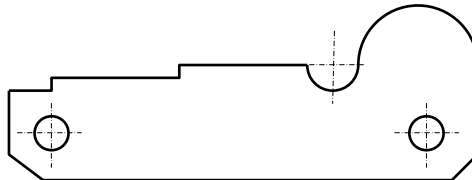


Slika 12.9. Šabloni za kontrolu koraka i profila navoja

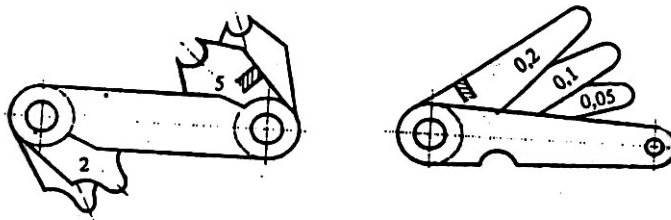


Broj komada u setu	Dimenzije (mm)
13	0,05 - 0,1 - 0,15 - 0,2 - 0,25 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 0,9 - 1
20	0,05 do 1 mm sa korakom 0,05 mm
20	0,1 do 2 mm sa korakom 0,1 mm

Slika 12.10. Listići



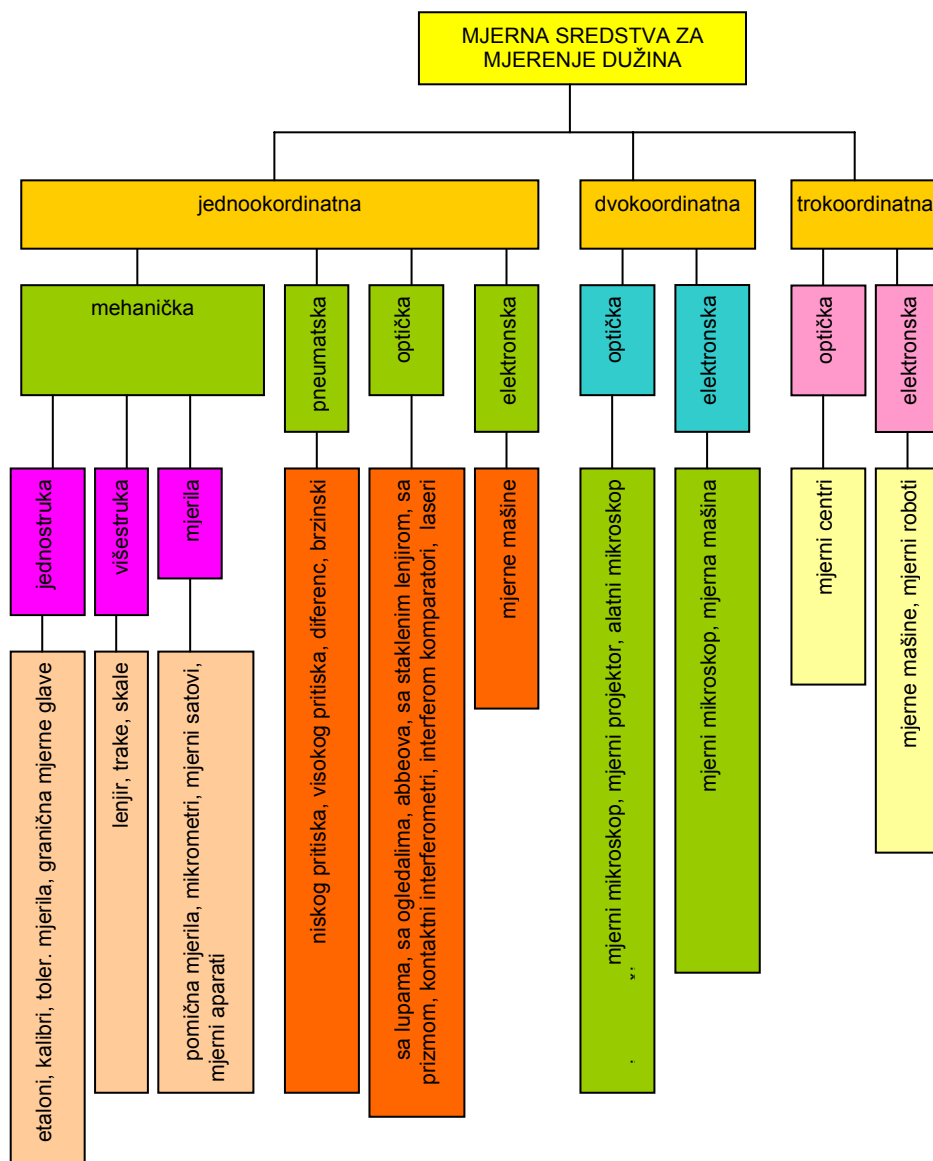
Slika 12.11. Šablon za kontrolu složenog profila



Slika 12.12. Šabloni za kontrolu radijusa

Mjerila za dužine

U proizvodnim mjerenjima se mjere i kontroliraju dužine na različite načine i različitim mjernim sredstvima. Kako ova knjiga ne obuhvata posebno mjerenja dužina i sve metode mjerenja u proizvodnji, na slici 12.13 data su mjerna sredstva za dužine i različiti pristupi mjerenju dužina.



Slika 12.13. Podjela mjerila za dužine

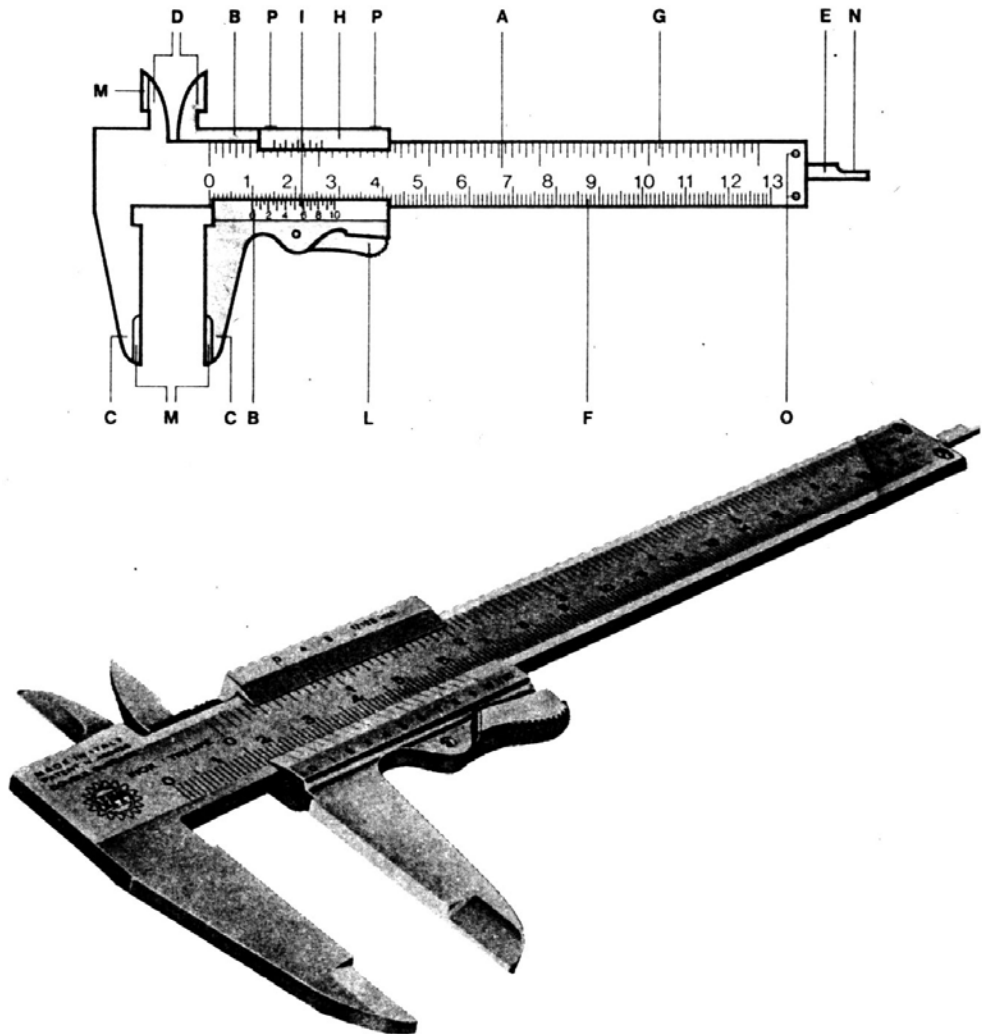
Višestruka mjerila

Najčešće korištena višestruka mjerila su:

- mjerila sa nonijusom,
- mikrometri i
- komparatori.

Mjerila sa nonijusom

Univerzalno pomično mjerilo izrađuje se sa različitim opsegom mjerenja i sa različitim skalama nonijusa. Podjela na nonijusu se izrađuje kao podjela jednog mm skale na deset, dvadeset ili pedeset dijelova, slika 12.14. To zavisi kolika se tačnost želi postići mjerenjem sa pomičnim mjerilom.



Slika 12.14. Mjerilo sa nonijusom

Glavni dijelovi pomičnog kljunastog mjerila:

- A Lenjir,
- B Klizač,

- C Mjerni kraci za spoljašnja mjerenja,
- D Mjerni kraci za unutrašnja mjerenja,
- E Šipka za mjerenje dubina,
- F Milimetarska skala,
- G Colovna skala,
- H Colovna skala nonijusa,
- I Milimetarska skala nonijusa,
- L Kočnica klizača,
- M Oštrice krakova za mjerenje uzanih proreza, rupa, navoja itd.,
- N Suženi kraj šipke za mjerenje dubine uzanih procijepa, rupa itd.,
- O Vijci za učvršćivanje vođice klizača na zadnjoj strani lenjira,
- P Mali vijci za korekciju eventualne greške paralelnosti krakova.

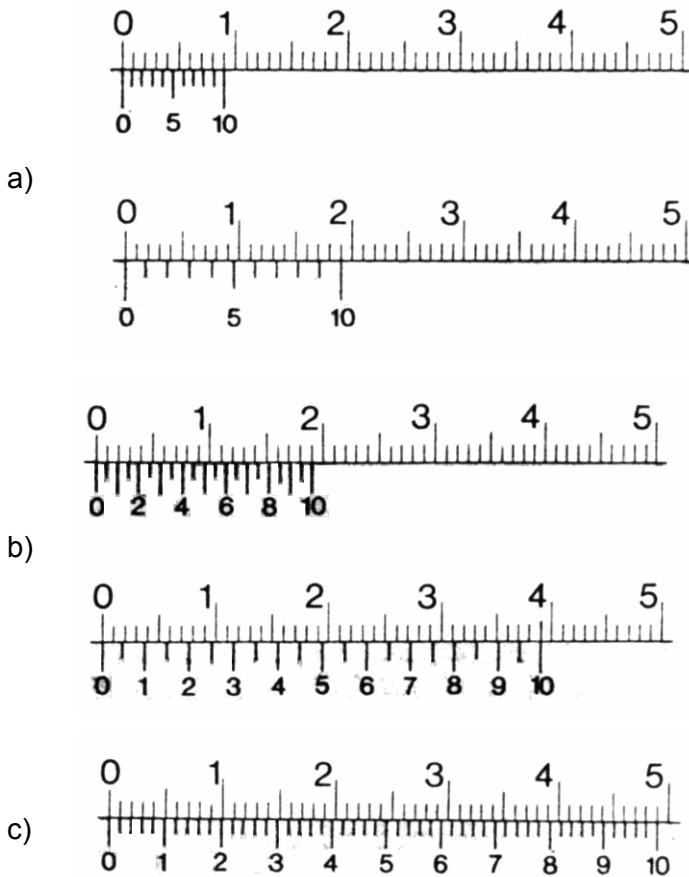
Pomična kljunasta mjerila koja se koriste u metaloprerađivačkoj industriji imaju opsege mjerenja od 130 do 500, pa i više mm. Dužina krakova raste proporcionalno dužini mjerila i obično se kreće od 40 do 150 mm.

U odnosu na nonijuse kojim su opremljena pomična kljunasta mjerila se dijele na slijedeći način.

- Mjerila sa nonijusom od deset podjeljaka. Nonijus sa deset podjeljaka (jednostavan ili dvostruki) tačnost mjerenja $1/10=0,1$ mm.
- Mjerila sa nonijusom od dvadeset podjeljaka. Nonijus sa dvadeset podjeljaka (jednostavan ili dvostruki) tačnost mjerenja $1/20=0,05$ mm.
- Mjerila sa nonijusom od pedeset podjeljaka. Nonijus sa pedeset podjeljaka, tačnost mjerenja $1/50=0,02$ mm.

Izbor mjerila zavisi prvenstveno od zahtijevanog stepena tačnosti mjerenja, odnosno praktično od dozvoljene tolerancije izrade predviđene crtežom predmeta koji se mjeri.

Koriste se za mjerenje vanjskih i unutrašnjih dimenzija, a tačnost zavisi od podjele na skali nonijusa. Mogu biti sa analognom skalom ili digitalnim očitavanjem.



Slika 12.15. Poređenje pomičnih mjerila sa deset (a), dvadeset (b) i pedeset (c) podjeljaka

Mikrometri

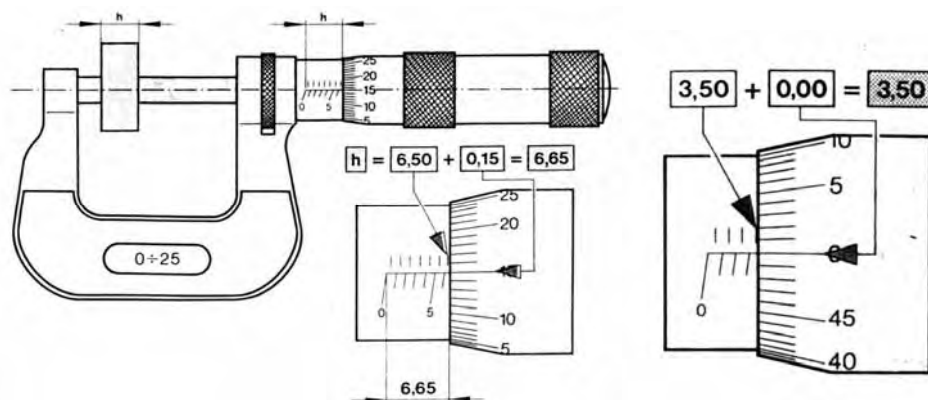
Postoje tri tipa mikrometara:

- za spoljašnja mjerenja,
- za unutrašnja mjerenja,
- za mjerenja dubina.

Ta tri tipa se međusobno razlikuju po obliku, ali princip rada i mehanizam koji obezbjeđuje tačnost očitavanja su identični kod sva tri tipa mikrometara.

Mikrometri spadaju u prosta mjerila za mjerenje dužina i izrađuju se za različite opsege mjerenja, i sa različitom tačnošću mjerenja.

Mjerno područje mikrometara po pravilu iznosi 25 mm bez obzira na veličinu otvora njegovog tijela. Granica od 25 mm je uzeta zato da bi se izbjegle greške pri izradi mikromerarskog mehanizma, što bi za posljedicu imalo netačnosti pri mjerenju. Na primjer, suviše dugačko mjerno vreteno bi se moglo kriviti. Mikrometri ostvaruju tačnost mjerenja od 1/100 mm pri mjernom području od 25 mm.



Slika 12.16. Mikrometar i skale mikrometra

Komparatori

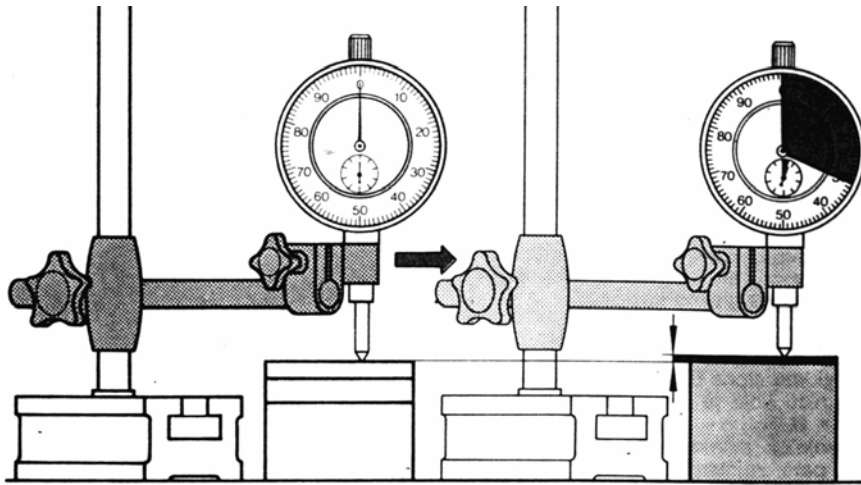
Komparatori rade na različitim principima a najčešće su konstruirani da rade na:

- mehaničkom
- pneumatskom
- električnom i
- kombinovanom principu.

Kao i prethodna dva navedena mjerila koriste se za mjerenje dužina u proizvodnim procesima i održavanju.

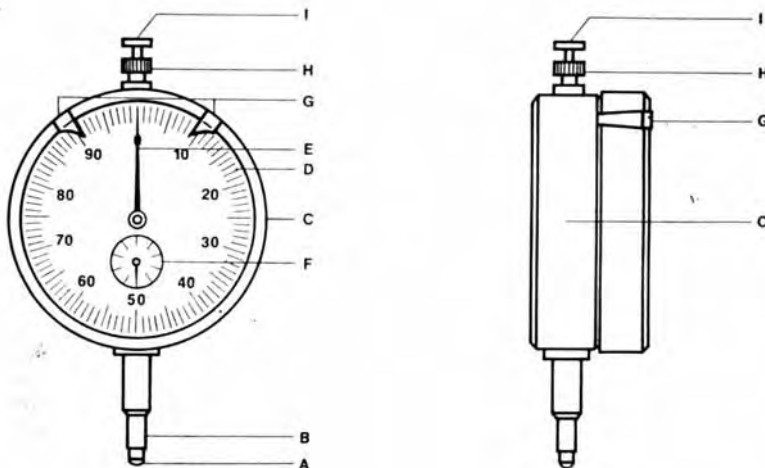
Mehanički komparatori

Komparator je instrument koji se koristi za kontrolu grešaka oblika predmeta, kao i za uporedna mjerenja (utvrđivanje razlike) mjera predmeta koji se kontroliše i odabranog etalona prikazan na slici 12.17. Kako komparator predstavlja uporedno mjerilo, on tokom upotrebe mora biti povezan sa nekom referentnom osnovom. U tu svrhu se koriste odgovarajući nosači.



Slika 12.17. Komparator

Mehanički komparatori imaju glavne dijelove prikazane na slici 12.18.



Slika 12.18. Dijelovi komparatora

A Mjerni pipak se oslanja na površinu predmeta koji se kontrolira, a na pokretnu polugu B je učvršćen navojnom vezom.

C Kućište u koje je smješten mehanizam za uveličanje.

D Skala u stotim dijelovima milimetrima.

E Glavna skala za stote dijelove milimetra.

F Milimetarska skala.

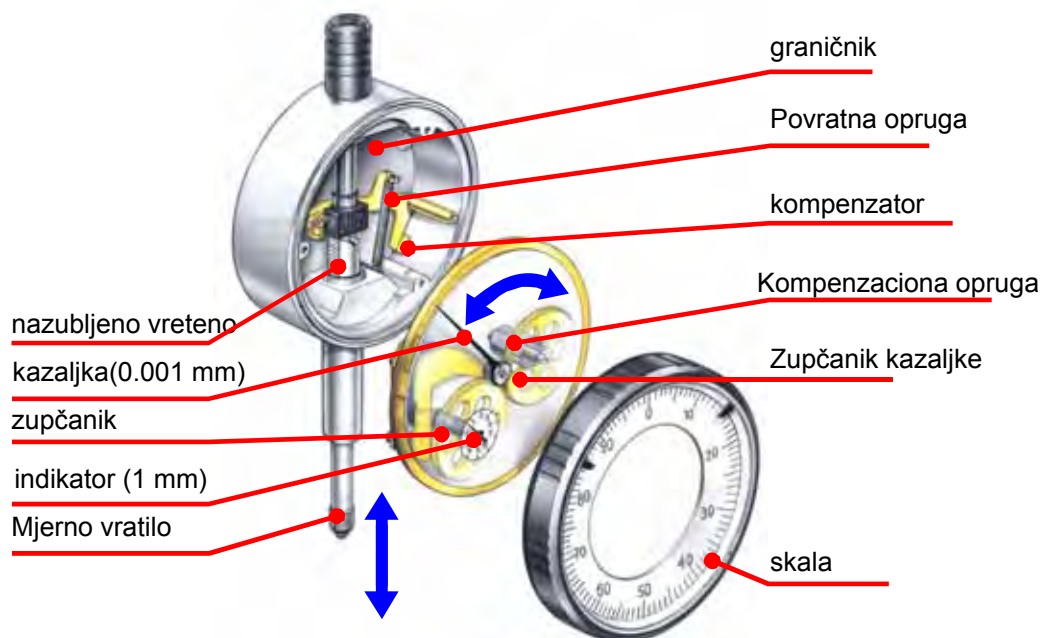
Kazaljka se pomjeri za jedan podjeljak kada glavna kazaljka komparatora obavi puni krug na skali stotih dijelova milimetra.

G Pokretni pokazivači koji se mogu pomjerati po obimu kućišta, a postavljaju se na granice željenog tolerancijskog polja.

H Zavrtanj za nulovanje komparatora.

Kod drugih tipova nulovanje se obavlja zakretanjem skale.

I Dugme za odizanje pipka.



Slika 12.19. Dijelovi komparatora

Mehanički komparator radi na principu skretanja kazaljke, koje se kod mehaničkih komparatora sa zupčanicima ostvaruje pomoću sistema za prenos mjerene veličine putem zupčanika, odnosno njihovog prenosnog odnosa. Na slici 12.20 prikazan je postupak mjerenja dužine pomoću mehaničkog komparatora.

Tačnost i područje mjerenja

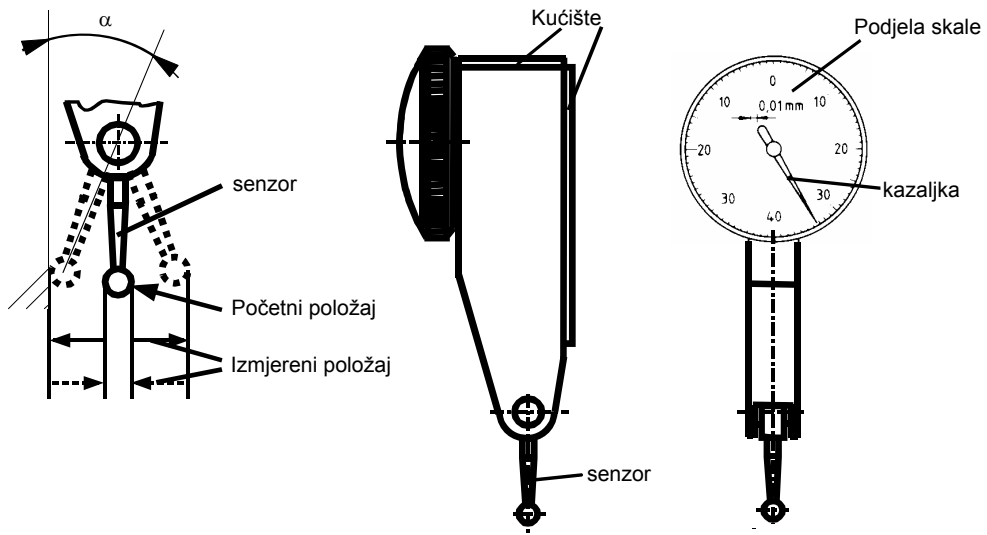
Mehanizam komparatora za uveličavanje prikazuje svako pomjeranje pipka od 1mm kao kretanje glavne kazaljke za jedan puni krug skale.

Cijela kružna skala podijeljena je na sto jednakih podjeljaka, a svaki od njih odgovara pomjeranju od $1/100=0,01$ mm, što ujedno i predstavlja tačnost mjerenja.

Pomjeranja veće od 1 mm se registrišu drugom skalom i kazaljkom za registriranje pomjeranja u mm, pri čemu jedan podjeljak odgovara pomjeranju za jedan milimetar. Mjerno područje komparatora ograničeno je na 10 mm, što znači da maksimalni hod mjernog pipka iznosi 10 mm.

Kod nekih preciznijih tipova komparatora može da se postigne tačnost mjerenja od 0,005 do 0,002 mm, pa čak kao kod minimetra, tačnost od $1\mu\text{m}$ ($1/1000=0,001\text{ mm}$).

Područje mjerenja ovih mikrometara visoke tačnosti je ograničeno na 1 mm, pa čak i manje.



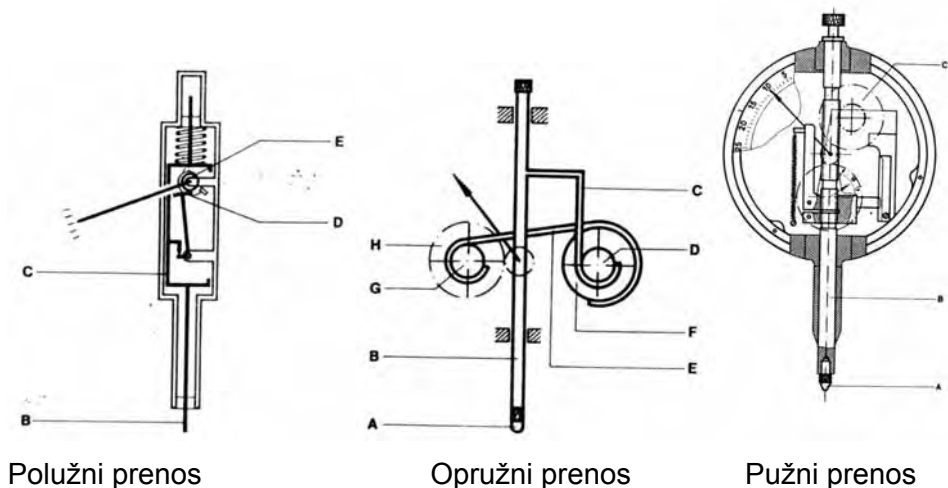
Slika 12.20. Postupak mjerenja dužine pomoću komparatora

Vrste mehaničkih komparatora

Prenos mjerene veličine kod mehaničkih komparatora može se ostvariti pomoću:

- zupčanika,
- poluga,
- opruga,
- puža.

Na slici 12.21 su prikazani neki od navedenih komparatora.



Slika 12.21. Vrste mehaničkih komparatora

Pneumatski komparatori

Kod pneumatskih komparatora "mjerni pipak" predstavlja sloj sabijenog vazduha koji izlazi iz jednog siska. Radni predmet postavljen ispod mjernog siska mijenja, zavisno od svoje kote, vrijednost debljine tog sloja vazduha, a time i izlazni pritisak na sisku.

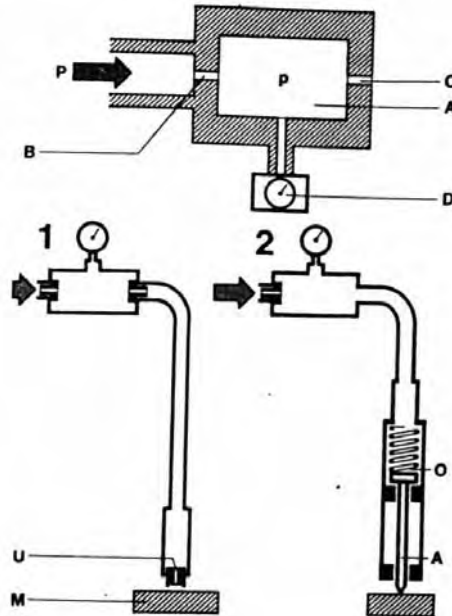
Na varijaciji tog pritiska, koji se može pratiti na nekom manometru, počiva princip rada pneumatskog komparatora. Pošto ne postoji mehanički kontakt između radnog predmeta i komparatora eliminiraju se moguće greške usljed elastičnih deformacija i grešaka instrumenta.

Ovi mjerni aparati zahvaljujući velikom uveličavanju grešake pri prenosu omogućavaju mjernje sa tačnošću reda veličine od $1 \mu\text{m}$.

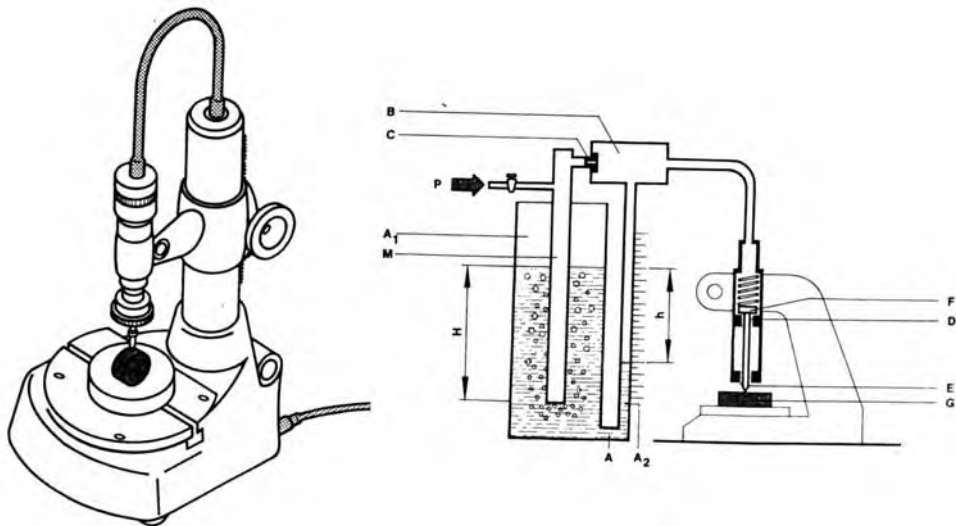
Komora pritiska A sa dva siska B i C se napajaju sabijenim vazduhom konstantnog pritiska P, slika 12.22.

Pritisak P u komori A zavisi od presjeka otvora sisaka B i C.

Ako je B konstantan onda manometar D koji služi za mjerenje pritiska P registruje promjene pritiska u C. Ako se presjek C povećava pritisak P opada i obratno. Promjene pritiska mogu da se prate: sistemom direktnog strujanja (1) kod kojeg između izlaznog siska U i površine radnog predmeta M postoji izvjestan zazor ispunjen vazduhom povišenog pritiska, sistemom indirektnog strujanja (2) kod kojeg je izlazni sisak zamijenjen zatvaračem O oblika ventila, čije je vreteno u dodiru sa radnim predmetom.



Slika 12.22. Dijelovi pneumatskog komparatora

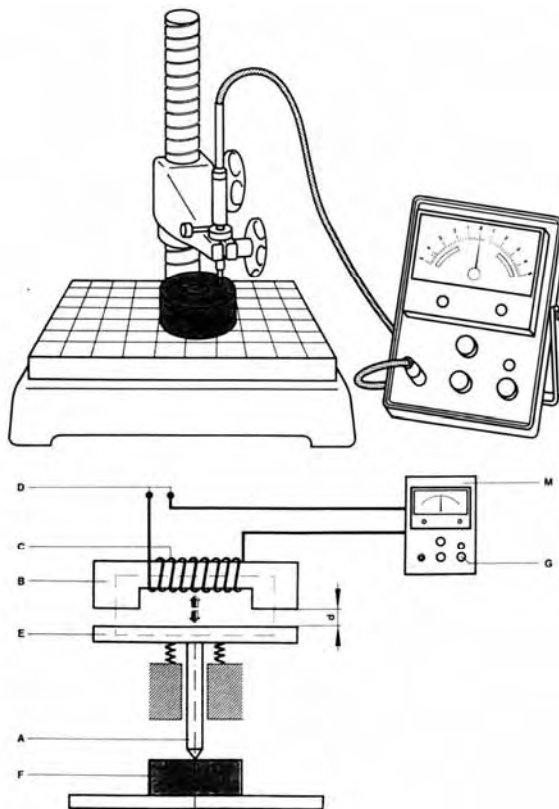


Slika 12.23. Shema rada pneumatskog komparatora

Na slici 12.23 je prikazan pneumatski komparator sa shemom funkcioniranja. Zrak za napajanje, doveden preko reduktora pritiska i prečistača na vrijednost P , ulazi u mjerac, gdje se stabilizira na strogo konstantan pritisak H . Pošto je vrijednost pritiska P veća od pritiska H , pri kojem radi mjerac, to će višak zraka prelaziti u komoru A_1 . Zrak pod

pritiskom H napaja komoru pritiska B preko siska C, a izlazi na otvor D mjerne glave. Uslijed pomjeranja mjernog pipka E, čvrsto spojenog sa ventilom F, zavisnog od promjene mjernog predmeta G, mijenja se i veličina izlaznog otvora za zrak, što izaziva promjenu pritiska h , koji se registrira na manometru A, a postoji između ulaznog siska C i izlaznog siska D. Pritisak se u manometru očitava kao vrijednost vodenog stuba. Jedan njegov kraj čini sud A_1 a drugi stub A_2 . U sud A_1 je uronjena cijev M, čiji se otvor nalazi na dubini H, a koja služi da stabilizira pritisak zraka u mjeracu i da ga održi konstantnim. Cijev A_2 ima podjeljke i mjeri vrijednost pritiska h . Vrijednost h odgovara razlici nivoa vode u sudu vode A_1 i samoj cijevi A_2 . Nivo vode u cijevi A_2 zavisi od promjene protoka zraka na otvoru D mjerne glave. Da bi se olakšalo očitavanje pri mjerenju kote u cijevi A_2 se nalazi obojena voda, podjeljci su dati direktno u μm , a pomjerljivi pokazivači postavljaju na granice tolerancijskog polja kote koja se kontrolira. "Nulovanje" cijevi A_2 manometra pneumatskog komparatora se vrši na osnovu etalon-predmeta.

Elektronski komparatori



Slika 12.24. Elektronski komparator

Elektronski komparatori određuju željenu kotu posebnim mjernim pipcima, a zatim mehaničku veličinu pretvaraju u električnu.

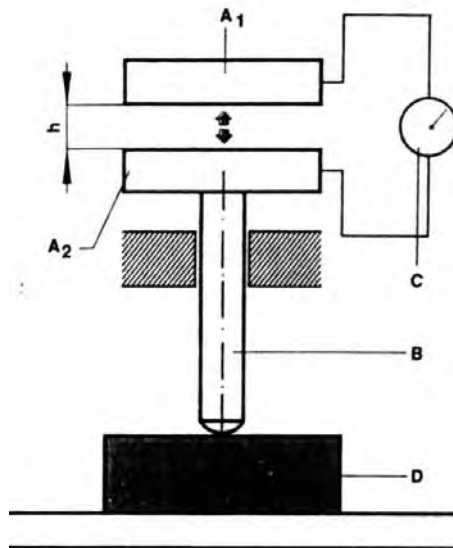
Zbog njihove osjetljivosti, tačnosti i prilagodljivosti ovi instrumenti nalaze višestruku primjenu ne samo za tačnu kontrolu i mjerenje predmeta nego takođe i za regulaciju mašine za obradu (na primjer, brusilice), odnosno za kontinuiranu kontrolu predmeta tokom ciklusa mašinske obrade. Elektronskim komparatorima se mogu registrirati promjene mjera veličine $0,1 \mu\text{m}$.

Glavni dijelovi ovih instrumenata su: mjerni pipak, pretvarač, pojačalo, indikator i nosač. Mjerni pipak je element koji je u dodiru sa radnim predmetom. Njegov oblik je prilagođen radnom predmetu i njegovim karakteristikama. Pretvarač prima mehaničke impulse i pretvara ih u električne veličine. Pojačalo čini elektronski sklop.

Elektronski sklop pojačala pojačava električne impulse iz pretvarača i šalje ih indikatoru, odnosno na instrument za kontrolu na čijoj se skali vrši direktno očitavanje brojčane vrijednosti veličine.

Kapacitivni komparatori

Komparatori koji vrše mjerenje na bazi promjene kapaciteta nekog kondenzatorasu kondenzatorski komparatori. Na slici 12.25 prikazana je shema jednog takvog kapacitivnog komparatora u kojem kolo struje naizmjeničnog napona zatvara kondenzator čija je strana A_1 nepokretna, a strana A_2 pokretna i povezana sa mjernim pipkom B.



Slika 12.25. Kapacitivni komparator

Odstupanje mjere predmeta D u odnosu na nazivnu se pretvara u promjenu jačine struje usljed promjene rastojanja h (dielektrično rastojanje).

A₁ Nepokretna strana kondenzatora,

A₂ Pokretna strana kondenzatora spojena sa mjernim pipkom,

B Mjerni pipak,

C Mjerni instrument, indikator intenziteta struje,

D Radni predmet.

Tipična upotreba komparatora jeste u svrhu kontrole i to:

- upravnosti,
- paralelnosti elemenata,
- paralelnosti alatnih mašina,
- paralelnosti pri pozicioniranju radnih komada na alatne mašine,
- cilindričnosti,
- koničnosti,
- saosnosti,
- odstupanja od položaja,
- odstupanja simetričnosti.

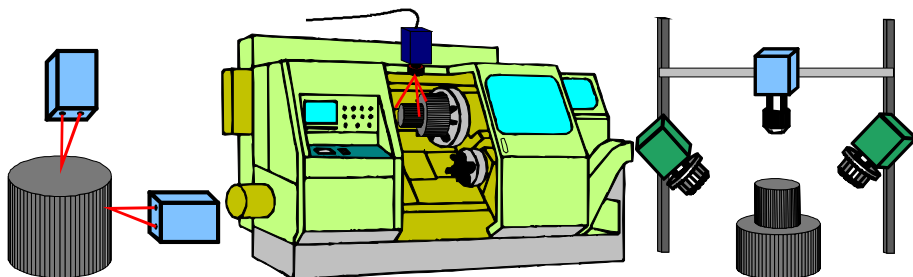
13. OPTIČKA MJERENJA

Sadržaj lekcije:

1. Uvod
2. Podjela optičkih mjerenja u proizvodnji
3. Mjerni uređaji na bazi nekoherentnog svjetla
4. Mjerenja na bazi optoelektronike
5. Laserska metrologija

13.1. Uvod

Potreba za brzim i preciznim mjerenjima geometrijskih karakteristika sve je više prisutna u proizvodnom mašinstvu. To dolazi zbog činjenice da rastu zahtjevi za kvalitetom, usljed konkurencije ali i automatizacije procesa proizvodnje. Tendencija je da se dizajniraju i razvijaju mjerna sredstva integrirana u proces proizvodnje, a to su visoko precizna optičko elektronička sredstva za mjerenje geometrije i mikrogeometrije. Osim čisto optičkih mjerenja koja se provode mjernim sredstvima i uređajima koji rade na principima geometrijske optike, sve češće se koriste i mjerna sredstva koja rade na principima fizičke optike i njene kombinacije sa elektronikom.



Slika 13.1. Predprocesna, procesna i postprocesna optička mjerenja

Optička mjerenja u proizvodnji imaju primjenu u svim fazama proizvodnje, slika 1. Prvo se koriste u predprocesnim mjerenjima, u kontroli proizvoda i procesa i za postprocesnu kontrolu proizvoda.

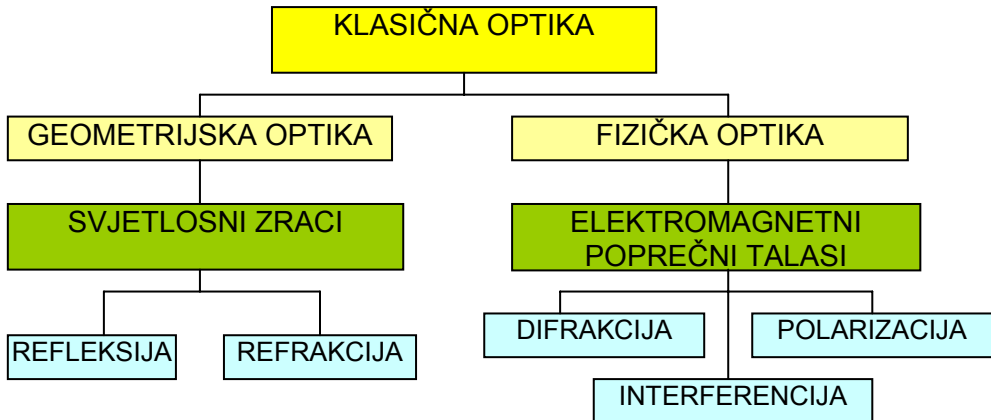
Prednosti optičkih mjernih sredstava ogledaju se u: visokoj tačnosti, visokoj rezoluciji, fleksibilnosti i univerzalnosti mjernih sredstava, velikoj brzini mjerenja, maloj kontaktnoj površini, jednostavnoj vezi sa mikroprocesorima.

Nedostaci optičkih mjerenja su: greške u optoelektroničkim komponentama, stabilnost mehaničkih komponenti, karakteristike površina, nije moguće poređenje rezultata sa taktinim sondama.

13.1.1. Osnove optike

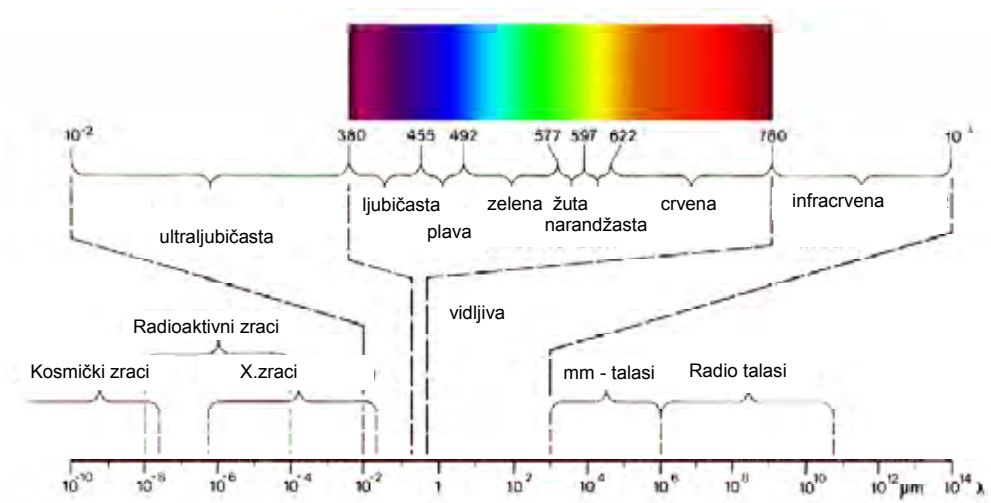
Poznato je da se klasična optika može podijeliti na:

- geometrijsku optiku i
- fizičku optiku, slika 13.2.



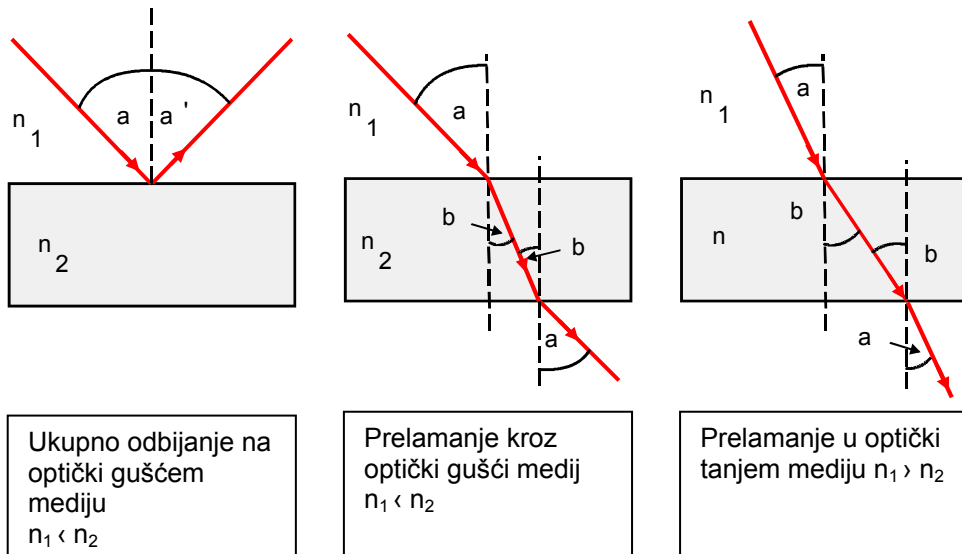
Slika 13.2. Podjela optike

Mjerni uređaji su konstruirani na principima optike, elektromagnetnog spektra odnosno svjetlosnog spektra. Svjetlosni spektar ima ultravioletno područje talasnih dužina, vidljivo područje i infracrveno područje talasnih dužina. Odgovarajuća talasna dužina svjetlosti se koristi za određene vrste mjerenja, slika 13.3. Svjetlosni zrak je nosilac informacije i njegove karakteristike određuju vrstu mjerenja i principe na kojima su postavljena mjerenja.

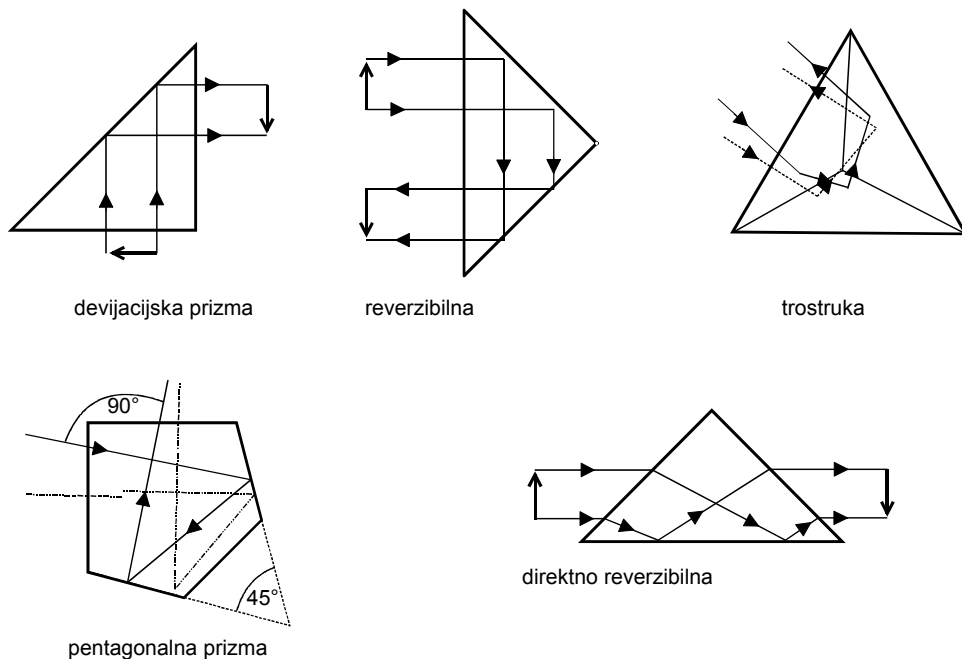


Slika 13.3. Elektromagnetni spektar

Geometrijska optika obuhvata svjetlosne talase koji imaju osobine refleksije (odbijanja) i refrakcije (prelamanja), slika 13.4.



Slika 13.4. Prelamanje svjetlosti



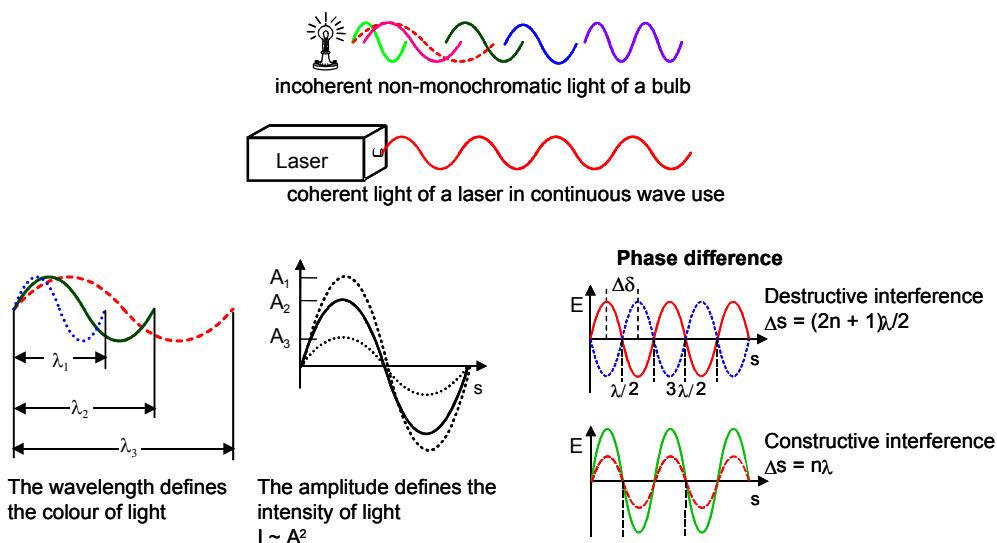
Slika 13.5. Ogledala i prizme

13.1.2. Karakteristike svjetlosti

Ogledala se koriste za modifikaciju svjetlosnog talasa - zraka koja se vrši u procesu mjerenja. Ogledala reflektuju zrake svjetlosti pod istim uglom pod kojim zrak pada na ogledalo. Koriste se u interferometrijskim mjerenjima. Retro reflektori reflektuju svjetlo upadnog i odbijenog zraka paralelno. Sastoje se od tri međusobno okomite površine postavljene pod pravim uglom. Funkcija ogledala može se dopuniti i poboljšati korištenjem prizmi da bi se izbjegli nedostaci ogledala. Svi nabrojani elementi služe u optičkim uređajima za vođenje zraka.

Fizička optika obuhvata elektromagnetne talase koji imaju osobine difrakcije, interferencije i polarizacije.

U fizičkoj optici talasi se posmatraju kao elektromagnetni. Na slici 13.3. dat je spektar svih talasa od ultravioletnih preko vidljivog područja do infracrvenih. Na slici 13.6. su dati izvori nekoherentne i koherentne svjetlosti.



Slika 13.6. Koherentni i nekoherentni talasi

Nekoherentna svjetlost je hromatska svjetlost koju emituje svjetlosni izvor kao što je sijalica.

Koherentnu svjetlost emituju laseri u kontinuiranom talasu. Talasna dužina svjetlosti određuje i boju svjetlosti λ iz spektra boja. Svaka boja ima svoju talasnu dužinu.

Amplituda talasa definira intenzitet svjetlosti. Veća amplituda svjetlosnog zraka znači i veći intenzitet svjetlosti.

Interferencija je pojava sabiranja talasa pri čemu može doći do pojačanja ili slabljenja novonastalog talasa.

Sočiva su optički elementi koji fokusiraju paralelni svjetlosni zrak na razdaljinu koja je jednaka udaljenosti od fokusa i zavisi od talasne dužine korištene svjetlosti. Svaka talasna dužina se fokusira u vlastitu tačku. Ako tačka koju formira izvor svjetlosti ide u fokus sočiva dolazi do kolimacije. Kada su dva zraka kombinirana tako da njihovi fokusi su u jednoj tački poprečni presjek svjetla zavisi od udaljenosti fokusa od individualnih sočiva.

Polarizacija nastupa kada se nepolarizovana svjetlost transformira u polarizovanu. Polarizatori vrše modifikaciju intenziteta svjetlosti. Postoje ploče koje konvertuju linearno polarizovanu svjetlost u kružno polarizovanu kada optička osa dvostruko odbijajućeg materijala zahvata ugao od 45° sa pravcem polarizacije svjetlosti. Kružno polarizovana svjetlost sadrži dva parcijalna zraka koji imaju faznu razliku od 90° . Iz tog razloga pomenute ravne ploče se koriste da generiraju dva posebna zraka sa odgovarajućim faznim pomakom svjetlosnog zraka.

Cijepanje svjetlosnih zraka u dva posebna zraka vrši se sa semireflektujućim ogledalima. Intenzitet može varirati u širokom području kroz dielektrične slojeve. Debele staklene ploče obično proizvode i neusklađenost zraka.

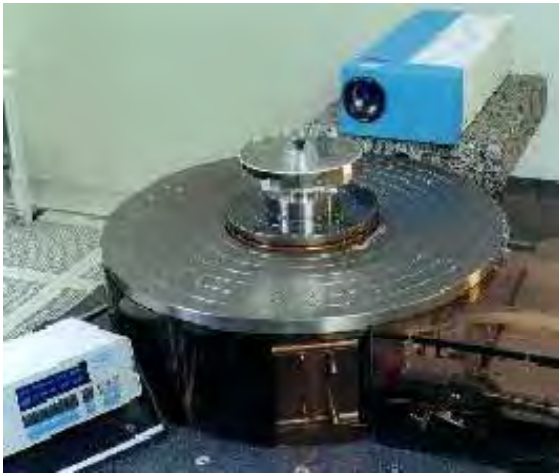
13.2. Podjela optičkih mjerenja u proizvodnji

Principi geometrijske optike kao osnovni fizički principi iskorišteni su za konstrukciju optičkih mjernih sredstava koja su široko primijenjena u proizvodnim mjerenjima i kontroli. Hromatski zrak nekoherentne svjetlosti nosi signal koji se koristi kod mjernih sredstava kao što su:

- mjerni mikroskopi i teleskopi,
- profil projektori,
- Moiré tehnika,
- tehnika silueta,
- fotogrametrija
- fazna modulacija, i druge.



a) Fotogrametrija-
izračunavanje položaja na
osnovu postavljenih
oznaka; mjerni opseg 10 x
10 m x 10 m



b) Autokolimacija, mjerni
rang do 9000 lučnih sekundi



c) Mikroskopija; tačnost do
0,1 μm .

Slika 13.7. Mjerenja na bazi nekoherentne svjetlosti

Karakteristike monohromatske koherentne svjetlosti iskorištene su za mjerenja kao što su:

- interferometrija,
- difrakcija,
- laserska triangulacija,
- lasersko skeniranje,
- holografija,
- konfokalna mjerenja.

Mjerni principi iskorišteni su za više mjernih procedura pa je u tabeli 13.1 dat pregled principa i odgovarajućih mjernih procedura.

Princip mjerenja	Procedura mjerenja
Triangulacija	Fotogrametrija Fringe projector Light sectioning tehnika Distance sensors
Vrijeme of flight measuring	Lasersko skeniranje Pulse ranging
Interferometrija	Konvencionalna interferometrija Interferometrija sa bijelom svjetlosti
Traženje fokusa	Procedura traženja fokusa Konfokalna mikroskopija
Transmisija svjetlosti	Mjerni mikroskopi Profil projektori
Procedure sa upadajućim svjetlom	Mikroskop sa upadajućim svjetlom Tehnike svjetlosnih traka

Tabela 13.1. Principi i procedure optičkih mjerenja

Optoelektroničko mjerenje dužine je mjerenje rastojanja proporcionalno svjetlu kako bi se odredio razmak između mjernog objekta i senzora. Nakon toga se odgovarajućom procedurom dekodiranja primljene mjerne svjetlosti dobije informacija o mjerenoj razdaljini od mjernog objekta do senzora. Današnja tehnologija optičkih mjerenja, tj. korištenja svjetlosti u svrhu mjerenja može se svesti na pet različitih mogućnosti.

Postupci se dijele na one koji zavise:

- od vremena putovanja svjetlosnog zraka duž mjernog puta,
- brzine kretanja zraka,
- zatim rasporeda intenziteta svjetlosti na detektor,

- položaja kroz triangulaciju,
- faze podešavanja između mjerenog i referentnog svjetla ili određivanje pravca polarizacije kada se određuje oblik objekta.

Uobičajeno je da se u svim procedurama na strani sa koje se emituje svjetlo postavi više izvora svjetla, dok su na prijemnoj strani odgovarajući foto detektori koji vrše selekciju prema nekoj od pomenutih procedura. Karakteristike koje treba naći mogu biti različite kao npr. spektralni sastav, gustina svjetlosnih zraka, polarizacija, spektralna osjetljivost itd. Navedene procedure kojima se prenosi informacija putem svjetlosti, vode do razvoja različitih optoelektričnih mjernih postupaka.

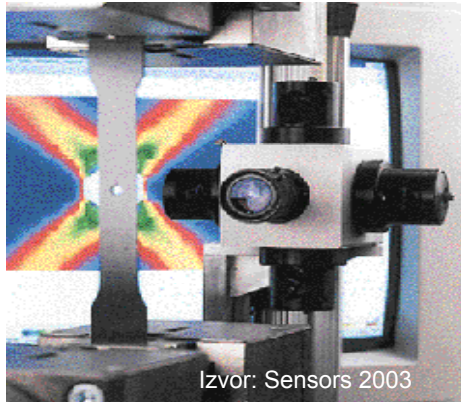


Slika 13.8. Kontrola kvaliteta površine

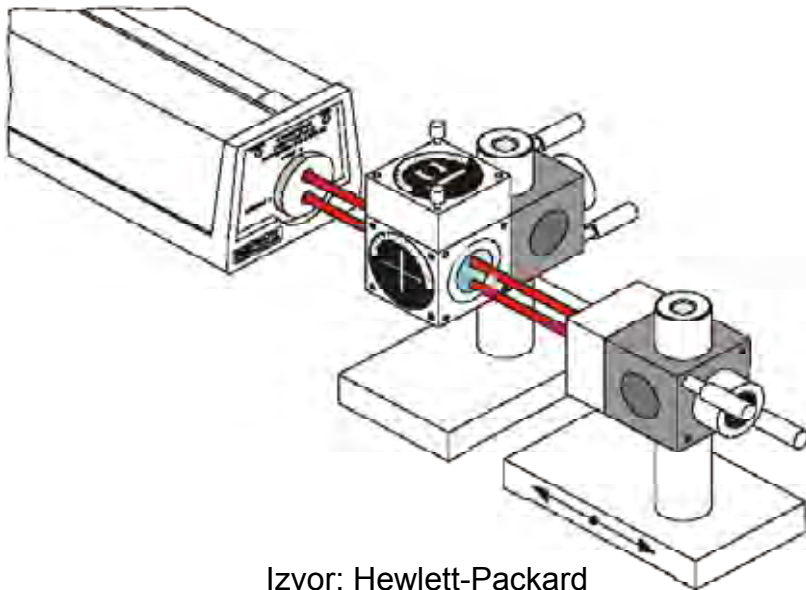
Interferometrija sa bijelom svjetlošću koristi se za između ostalog i za kontrolu kvaliteta površina. Na slici je prikazana kontrola kvaliteta površine uzorka koja je $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ na uzorku čije su dimenzije $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ (slika 13.8).

Laserskom holografijom mogu se mjeriti pomjeranja a nakon toga računati naponi u različitim vrstama konstrukcija gdje to nije moguće uraditi drugim metodama (slika 13.9).

Interferometrijskim mjerenjem razmaka može se postići relativna nesigurnost manja od 5×10^{-7} (slika 13.10).



Slika 13.9. Laserska holografija



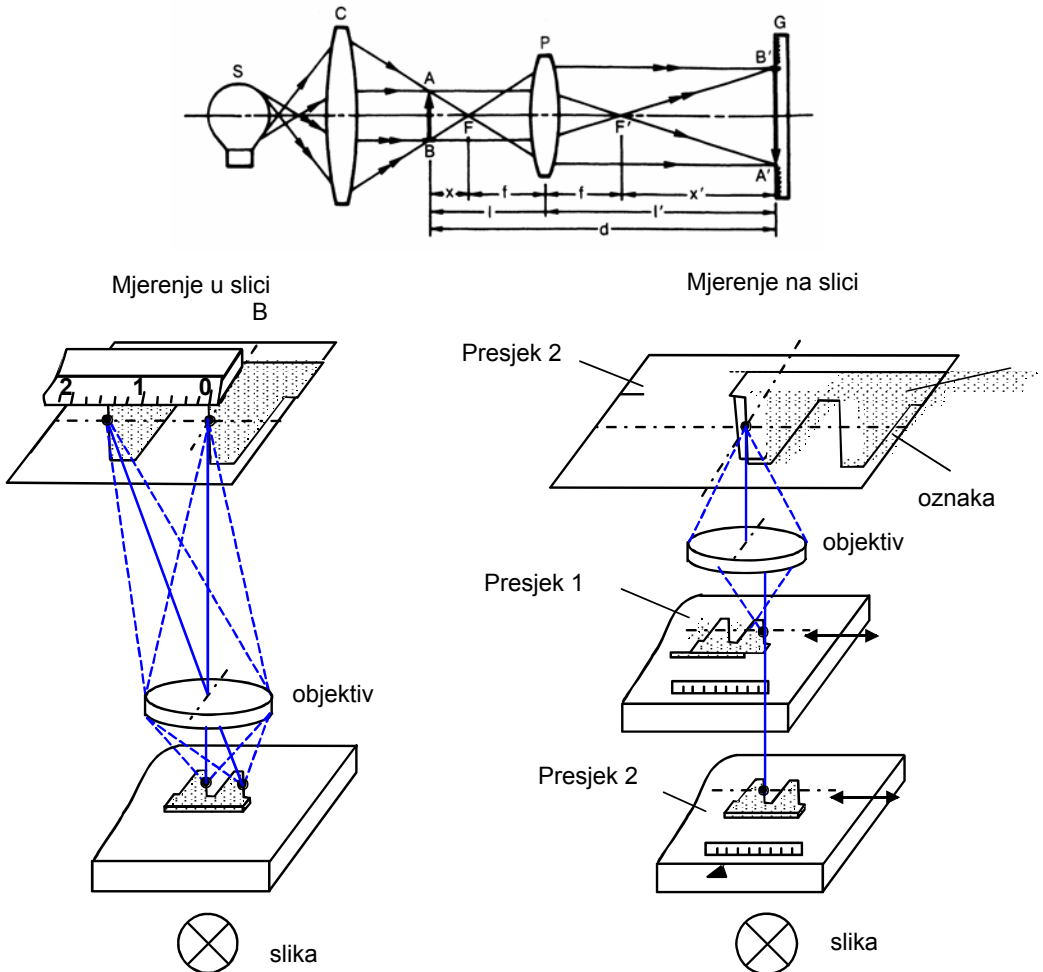
Slika 13.10. Mjerenja na bazi koherentne svjetlosti

13.3. Mjerni uređaji na bazi nekoherentnog svjetla

13.3.1. Profil projektori i mjerni mikroskopi

Optički mjerni uređaji koji se najviše koriste u određivanju geometrijskih karakteristika proizvoda su mjerni mikroskopi i profil projektori.

Sa oba ova uređaja mogu se odrediti brzo i ekonomično dvodimenzionalne koordinate mjernih objekata sa jednom mjernom ravni. Suština rada jeste uvećanje predmeta koji se mjeri ili kontrolira kako bi se uočile ili izmjerile neke karakteristike. Slika mjerenog objekta se optički uvećava, prikazuje na displeju i posmatra kroz okular mikroskopa. Princip rada profil projektoru prikazan je na slici 13.11.



Slika 13.11. Profil projektori

Svjetlosni zrak iz izvora bijele svjetlosti-sijalice pada na sočivo C, prelama se i preko mjerenog objekta AB pada na projekciono sočivo P i na zaslonu - ekranu pravi uvećanu i obrnutu sliku objekta, koji se posmatra na profil projektoru.

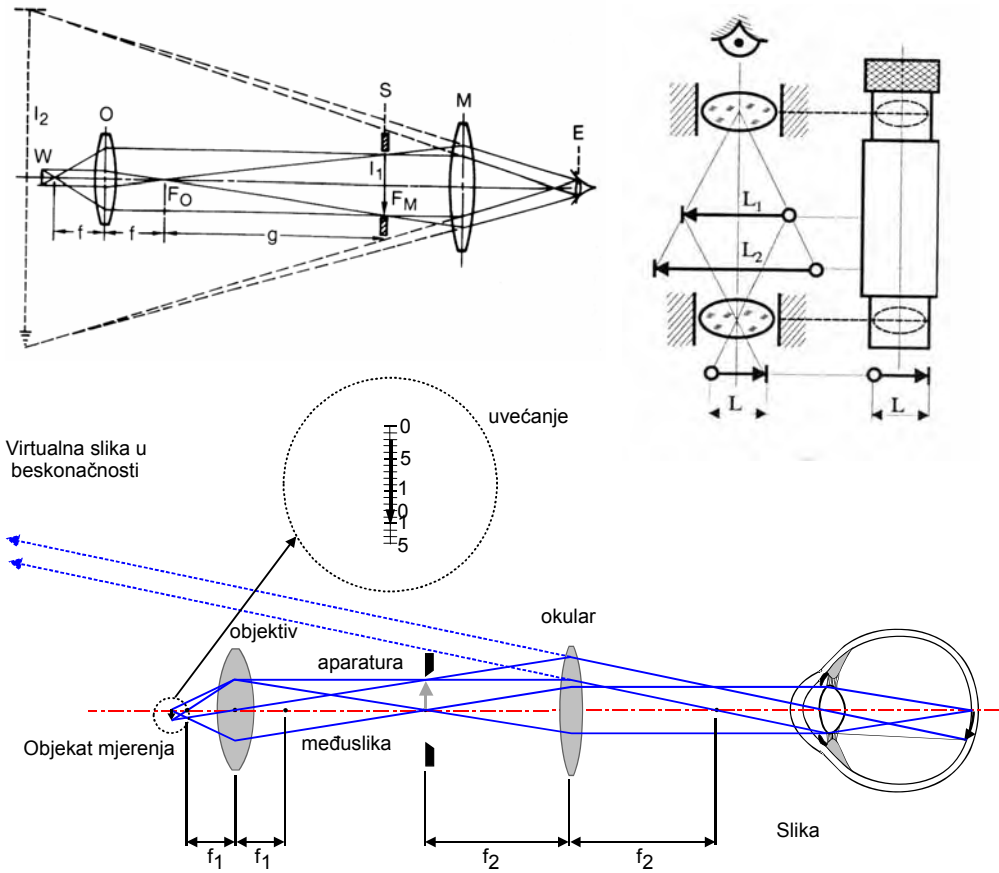
Savremeni profil projektori se koriste u dvije različite varijante. U oba slučaja sjenka mjerenog objekta putem preciznih mjernih ogledala se uvećava i usmjerava na ekran. Mjerni rang profil projektoru je u opštem slučaju veći nego kod mjernih mikroskopa tako da čak i veći objekti se mogu direktno mjeriti bez korištenja linearnih modula. Npr. mogu se provjeravati kontrolna mjerila na osnovu korisničkog uzorka projektovanjem profila.

Kod oba mjerila i mikroskopa i profil projektoru mjerni objekat se postavi i stegne pomoću dvije pokretne ploče koje su okomite jedna na drugu. Kontrolor i vršilac mjerenja postave neki znak u definirani prostor sa stranicom koja je uvećana kako bi se moglo izvršiti provjeravanje.

Princip rada mjernog mikroskopa prikazan je na slici 13.12.

Mikroskop radi na principu da se poslije uvećanja mjerenog objekta optička slika tretira kao realni objekat koji je zaokrenut za 180 stepeni. Takva slika se dalje može uvećavati. Stvarna slika dijela I_1 (međuslika), se formira korištenjem sočiva O koje je sastavni dio objektiva. Tada se takva slika uvećava uvećanjem E i stvara slika I_2 , koja je virtualna i nevidljiva i zato se mora postaviti ekran u realnu ravan. Efektivno uvećanje je proizvod pojedinačnih uvećanja objektiva i okulara.

Greške u mjerenju mogu se pojaviti zbog promjena u prikazivanju skale koje se javljaju usljed fokusiranja objekta na mjernu ploču. Za ostvarenje mjerenja osvjetljenje se postavlja vertikalno na ravnu ploču na kojoj je mjereni objekat. Tamno polje koje ne može osvijetliti svjetlost je ispod objekta, a sve oko objekta je osvijetljeno. Obično se takva slika objekta šalje dalje tamo gdje se prikazuje profil mjerenog radnog komada. Fizički princip mjerenja mikroskopom zasniva se na uvećanju mjerenog komada, slika 13.12. Na slici je dat prikaz uvećanja objekta kroz sistem sočiva mikroskopa.



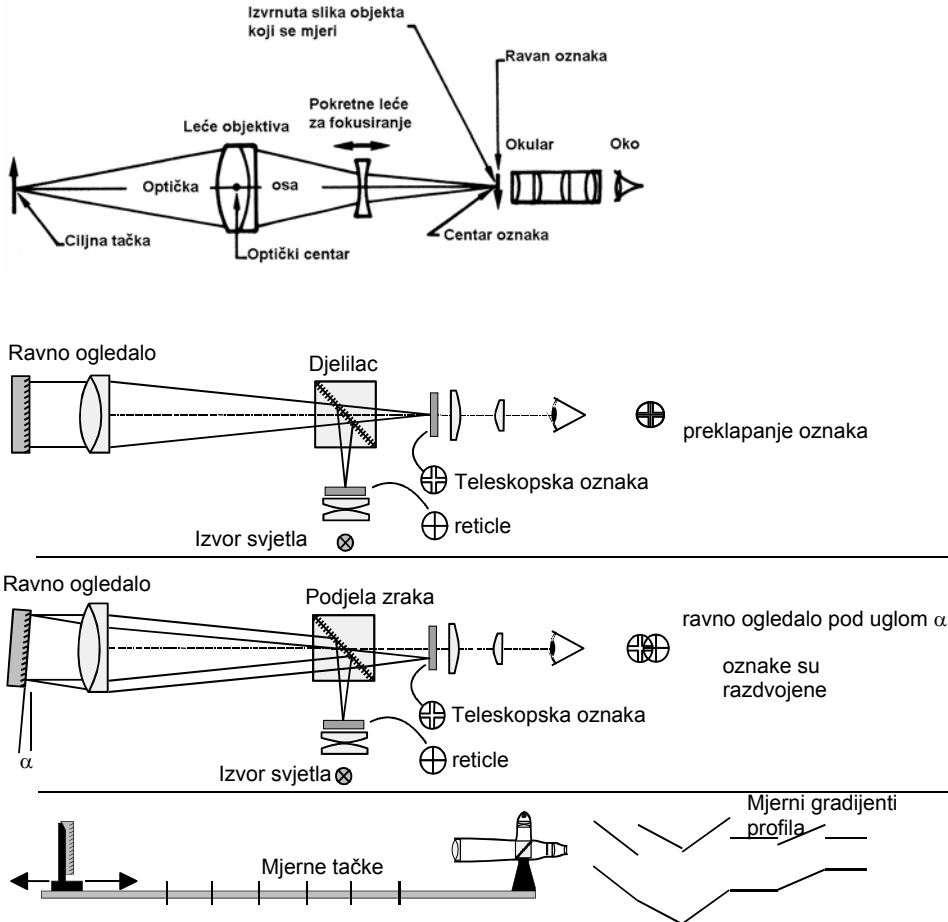
Slika 13.12. Princip rada mjernog mikroskopa

13.3.2. Teleskopi

Teleskopi se koriste za poravnanje i uspostavljanje referentnih linija. Najjednostavniji oblik teleskopa je prikazan na slici 13.13.

Ukoliko se obavlja i mjerenje sa teleskopom dodaje se optički mikrometar. Svaki teleskop ima dio koji omogućava podizanje dijela zbog poravnanja.

Teleskopi sa autokolimacijom se koriste za direktna ispitivanja. Mjere se odstupanja od uglova pomoću optičkih osa teleskopa. Rade na principu mjerenja poprečnih odstupanja izjednačavajući ih sa postavljenom oznakom. Optička osa teleskopa koja je definirana okularom teleskopa i jedna vanjska prostorna referentna oznaka služe kao referentna linija koja se zove linija izjednačavanja.



Slika 13.13. Princip rada teleskopa za poravnanje

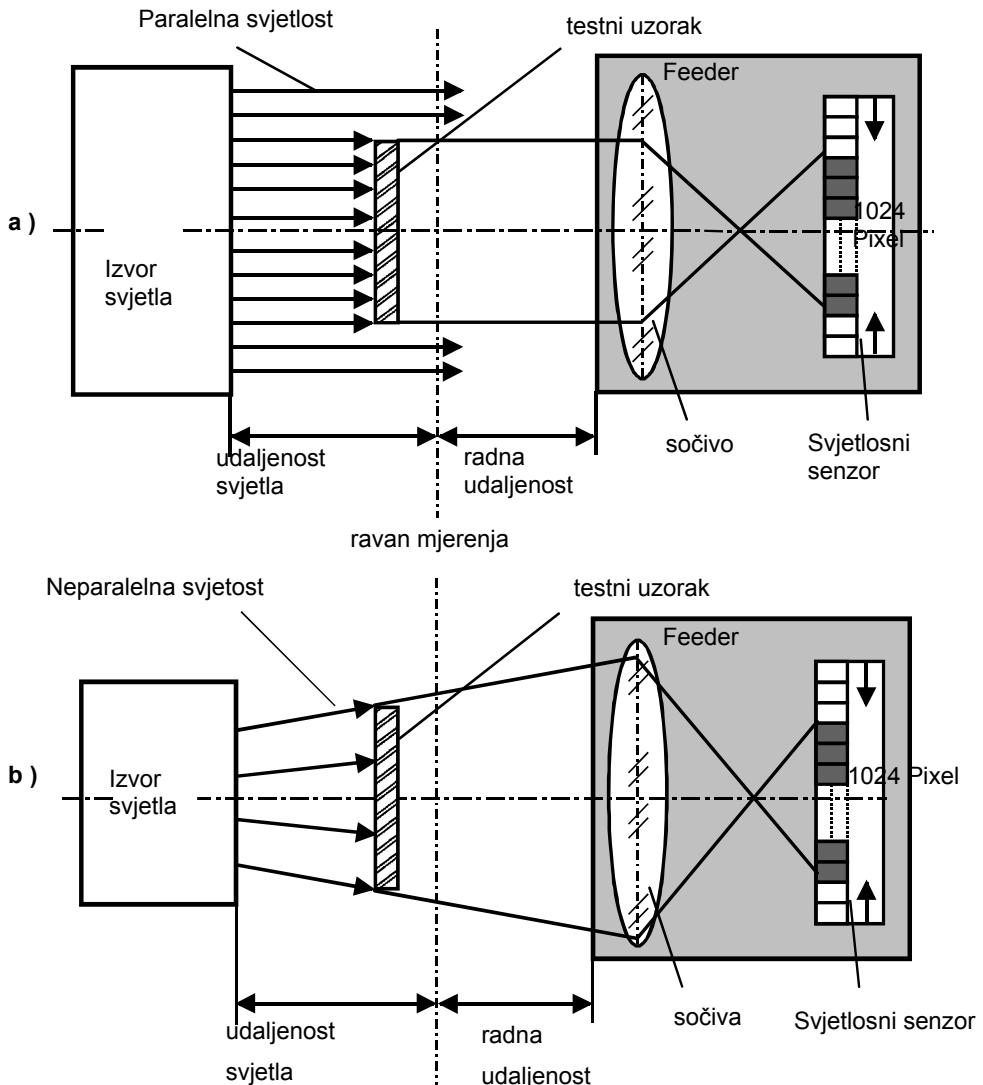
Slijedeći tačno poravnanje teleskopa sa vanjskim znakom teleskop zadržava krutost u prostoru. U toku mjerenja mogu se javiti problemi sa promjenom skale koje nastaje u funkciji od rastojanja. Teleskop se mora ponovo fokusirati sa promjenom rastojanja. Naime, sa porastom rastojanja od mjerne oznake, smanjuje se skala. To ima za posljedicu povećanje mjerne nesigurnosti. Rješenje se nalazi u odgovarajućem izboru mjernih oznaka, kroz promjenljive skale. Teleskop treba podesiti tako da obje ose budu poravnate. To je primjena nultog metoda.

Mjerna nesigurnost teleskopa zavisi od rezolucije oka, izvedbi i karakteristika dijelova teleskopa i rastojanja mjerne oznake od teleskopa. Mjerna nesigurnost data je izrazom:

$$\Delta y = \pm (a + L/b) \mu\text{m} \dots\dots\dots (13.1)$$

13.3.3. Tehnike silueta

Mjerenje tehnikama sjenke prikazano je na slici 13.14. Uređaj koji koristi ove tehnike sastoji se od izvora svjetlosti koja ne prolazi kroz mjereni objekat koji pravi sjenku, nego samo pored njega. Takvi zraci padaju na sočivo, prelamaju se kroz sočivo i padaju na zaslon na kome se vidi slika objekta. Pomjeranjem objekta između izvora svjetlosti i sočiva povećava se ili smanjuje slika objekta.

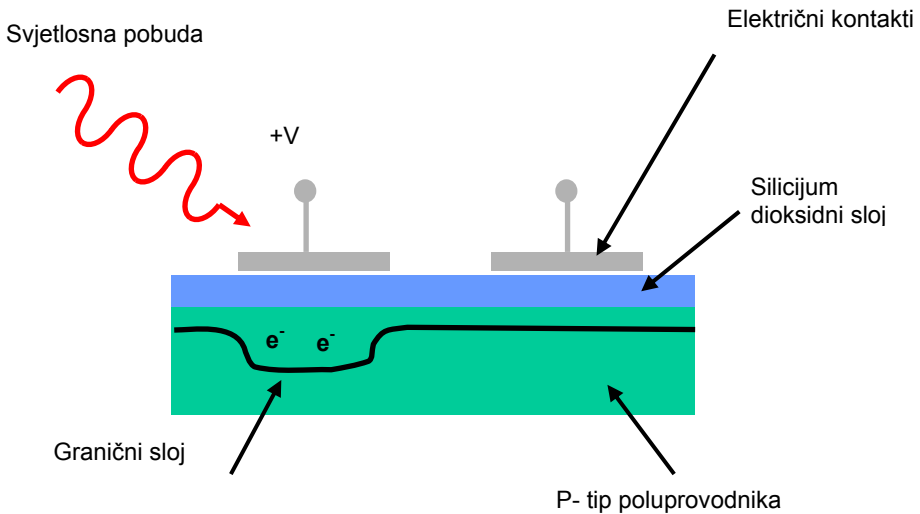


Slika 13.14. Tehnika silueta

13.4. Mjerenja na bazi optoelektronike

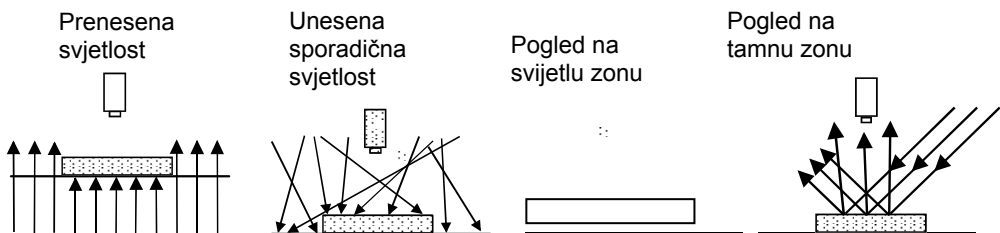
Na bazi optoelektronike napravljeni su optoelektronički mjerni elementi i oni su dio mjernih sredstava za vršenje mjerenja u proizvodnji. Osnovni optoelektronički elementi koji se integiraju u svako optoelektroničko sredstvo koje se koristi za mjerenja ispunjavaju slijedeće zadatke:

- stvaranje-generiranje naelektrisanja,
- sakupljanje naelektrisanja,
- prenos naelektrisanja,
- detekciju naelektrisanja



Slika 13.15. Princip rada CCD kamera (charge couple camera)

Tipovi osvjetljenja za rad CCD kamera prikazani su na slici 13.16.



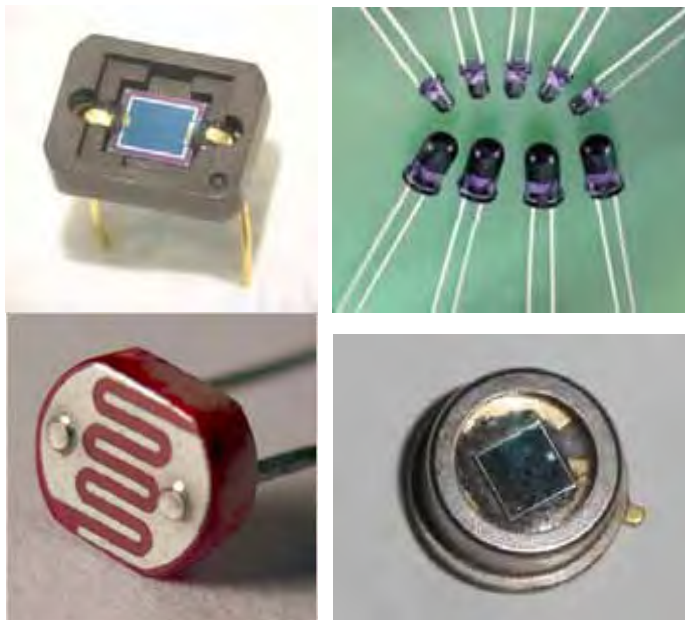
Slika 13.16. Neke vrste osvjetljenja-pobude za rad CCD kamere

Kako je prikazano na slici osvjetljenje se može ostvariti:

- osvjetljenjem svjetlošću čiji su talasi paralelni,
- sporadični ili difuzni,
- usmjereni u određenom pravcu prema svijetloj ili tamnoj zoni ili i
- stroboskopskom lampom i
- strukturiranim osvjetljenjem.

CCD senzori (charge coupled device), slika 13.15, su poluprovodnički senzori koji se sastoje od matrixa i elektrode. Na elektrodi se skupljaju elektroni koji nastaju tokom izlaganja djelovanju svjetlosti. Broj elektrona koji nastaju direktno zavisi od intenziteta i vremena izlaganja. Pošto se elektroni skupe na izolatoru ispod elektrode oni se transportuju sistemom koji se zove CCD element koji to konvertuju u naponski signal koji je po svom karakteru video signal. Elektroni-pixeli kod preslaganja mogu biti složeni u matricu pa čine CCD čip koji je osnovni element CCD kamere.

Korištenjem specijalnih komponenti moguće je CCD kamere primijeniti u području termografije za tehničku dijagnostiku sistema i procesa.



Slika 13.17. Fotodiode i fotootpornici

Mjerenja koja koriste CCD kamere su vrlo bliska ljudskoj percepciji i zato se koriste u industrijskim mjerenjima. CCD kamerama se radi image processing. Postoje tri osnovna koraka u procesiranju slike

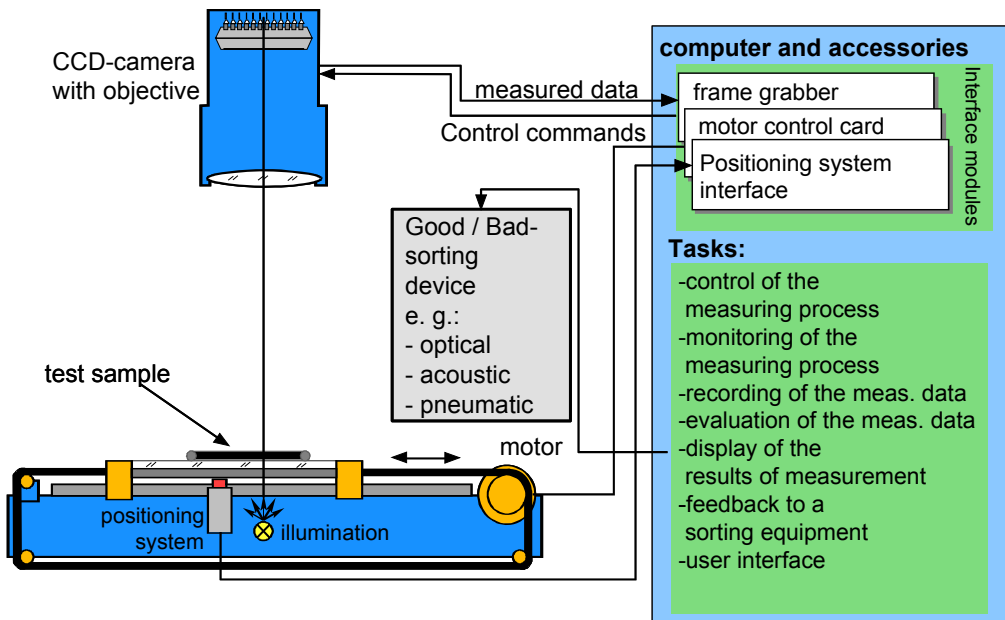
Bilježenje slike ⇒ uređenje i prenošenje slike ⇒ procesiranje slike

Prvi korak je dobiti podatke za oblik -sliku pomoću CCD kamere. U drugom koraku podatke treba prevesti u digitalni oblik i poslati u računar gdje se izvršava treći korak, a to je procesiranje podataka.

Po funkciji koju vrše, CCD kamere mogu biti detektori a to su fotodiode i fotootpornici, slika 13.17.

13.4.1. Optičko elektronički mjerni uređaj

Optičko elektronički mjerni instrument može se koristiti za različite namjene, a prva je kontrola procesa sa mogućnošću sortiranja dobrih i loših dijelova i naravno skupljanje geometrijskih podataka o proizvodu. Uređaj se sastoji od CCD kamere koja emituje svjetlost na uzorak, dobiva se slika mjenog uzorka, a podaci se prosljeđuju u računar, slika 13.18.



Slika 13.18. Optoelektronički mjerni uređaj za sortiranje 2D radnih komada

Kontrola metalnih površina

Metalne površine kontroliraju se pred početak ulaska u proizvodnju. Pogodne metode koje se koriste prilikom kontrole su 2D slike stvarne površine. Da bi se to postiglo koriste se optoelektroničke metode kao što je prethodno pomenuta kontrola CCD kamerom. Metoda se može koristiti i za kontrolu trošenja alata.

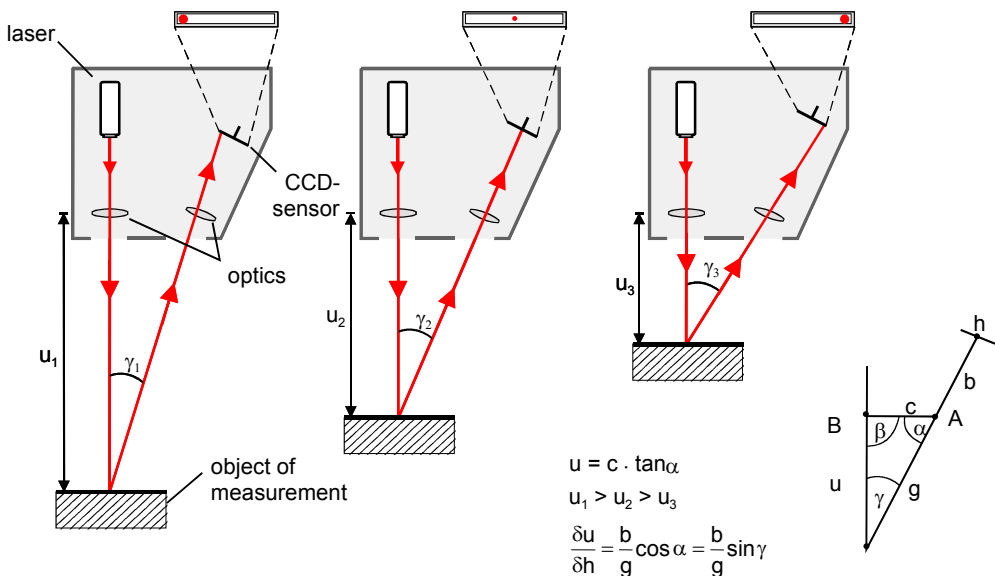
Za proizvodnju velikog broja proizvoda potrebno je da dva dijela budu u tačnom odnosu jedan prema drugom, npr. alat i radni komad. Da bi se to postiglo potrebno je da se poznaje pozicija najmanje jednog od dva dijela pri čemu se mora položaj mjeriti i kontrolirati. Rezultat koji se dobije koristi se kasnije za kontrolu rukovanja sistemima. Kontrola se postiže upotrebom CCD camera naročito u automobilskoj industriji. U drugim granama industrije manje se koriste ovi vidovi kontrole.

13.4.2. Princip trokuta

Postupak mjerenja rastojanja primjenom principa trokuta

Senzori čiji se rad zasniva na laserskom trokutnom principu služe za mjerenje rastojanja. Princip trokuta je relativno star princip ali se dosta razvio nakon razvoja poluprovodnika. Razvoj laserskih dioda, detektora, analognog i digitalnog procesiranja signala omogućio je izradu brzog i na različite smetnje slabo osjetljivog senzora.

Princip trokuta (lat. *triangulum* - trokut) je mjerni princip koji se zasniva na određivanju jedne stranice trokuta i dva ugla, slika 13.19. Ako je poznata stranica AB, stranicu trokuta CD moguće je odrediti kada se odrede dva ugla α i γ .



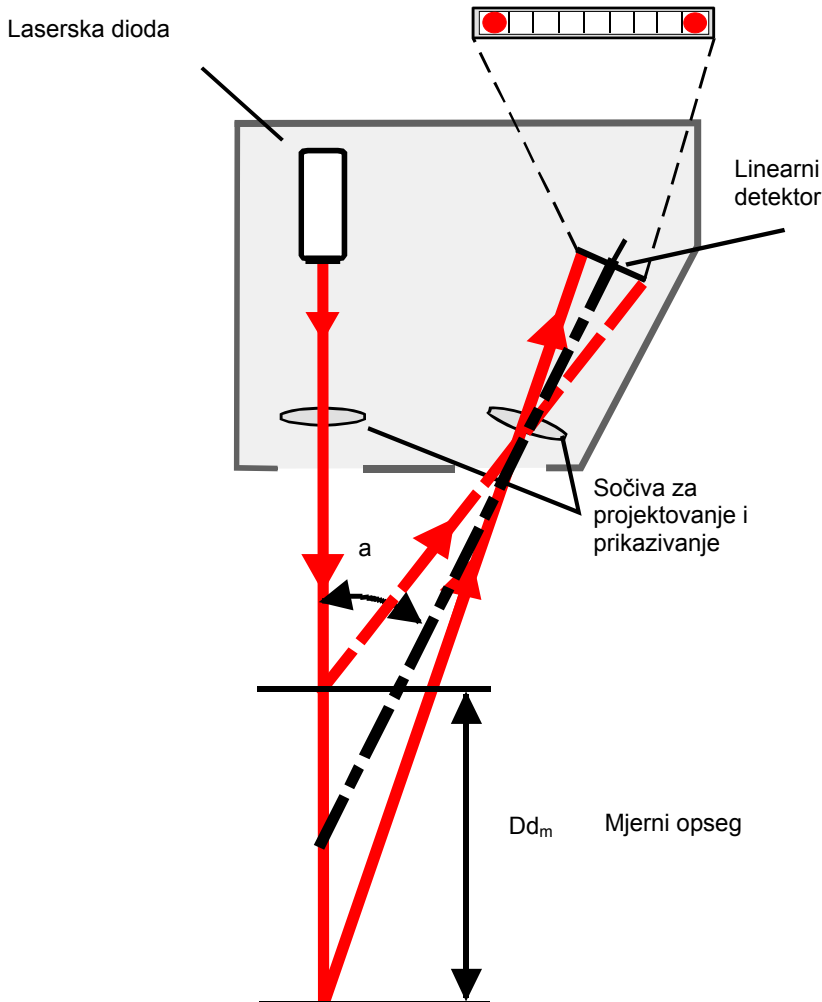
Slika 13.19. Princip trokuta

Trokutni senzor koji se koristi za primjenu principa trokuta, slika 13.20, sastoji se od laserske diode, linearnog detektora, sočiva pomoću kojih se usmjeravaju zraci. Svjetlo iz laserske diode pada na mjereni objekat a

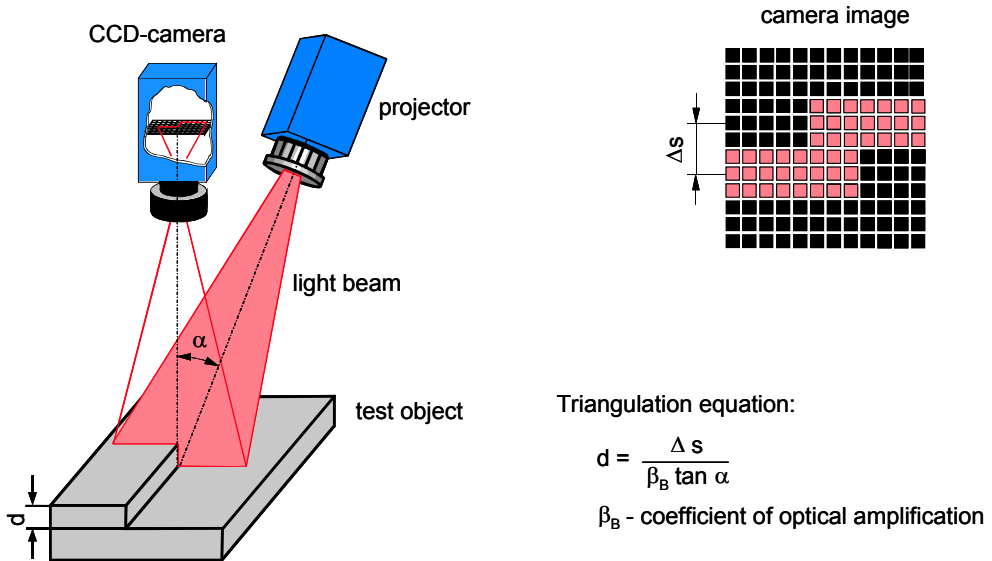
zatim se pomoću sočiva usmjerava na ccd detektor. Korištenjem sinusnog zakona određuju se rastojanja.

Kada iz nekog svjetlosnog izvora, svjetlost obasjava dio površine radnog komada koji se mjeri.

Dio svjetla se reflektuje od radnog komada i registrira na CCD detektoru i dobije se dvodimenzionalna slika. Na osnovu izraza za trokutni princip izračuna se traženo rastojanje. U jednačini se pojavljuje koeficijent optičkog pojačanja, slika 13.21.



Slika 13.20. Trokutni senzor



Slika 13.21. Triangulacija

13.4.3. Optičke skale

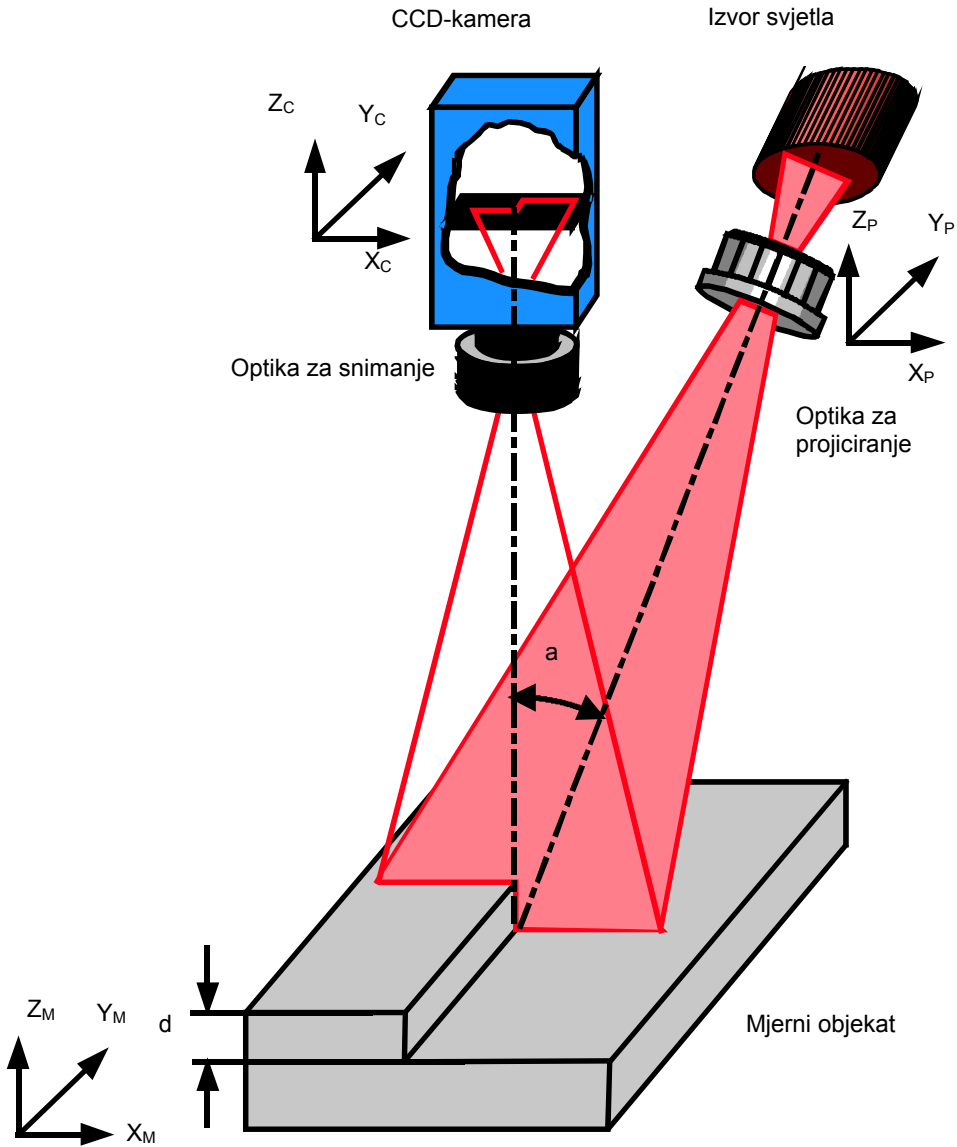
Optičke skale se koriste u robotici i to su linearne skale mašinskih alata i koordinatnih mjernih mašina. Izrađuju se od čelika, stakla i kombinacije stakla i keramike (zerodur). Mjerna nesigurnost optičkih skala je mala, a također i rezolucija.

Optička skala se sastoji od izvora svjetlosti koja obasjava kolimaciona sočiva, nakon čega dolazi do index - referentne rešetke sa vrlo sitnom podjelom. Nakon prolaska kroz rešetku svjetlost pada na mjereni komad, odbija se od njega, skreće pomoću višestranne prizme, ponovo prolazi kroz referentnu rešetku a zatim na detektore.

13.4.4. 3D Moiré procedura i projektovanje linija

Trodimenzionalni postupci pri kojima se pojavljuju naizmjenične linije spada u postupke pravljenja projekcija ili topometrijske postupke. Mjerenje se provodi korištenjem kamera postavljenih u različitim pravcima. Uzorak se postavi na nepokretnu podlogu i od nje odvoji tako da može biti osvijetljen. Na cijeloj podlozi na kojoj je uzorak javljaju se tamne i svijetle linije koje se "lome" na dijelu na kom se nalazi komad. Koordinate mjenog radnog komada se računaju u računaru mjernog uređaja po principu trokuta, slika 13.23.

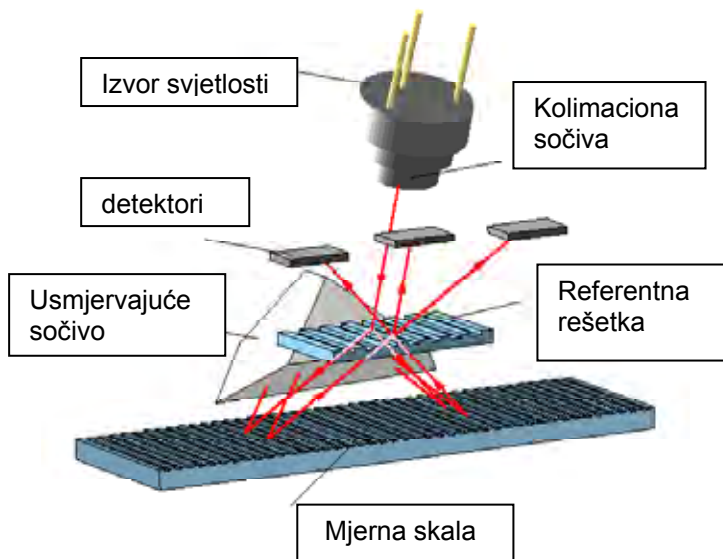
Na početku prije mjerenja treba postaviti tačno projektor odnosno kameru i odrediti parametre. To se radi putem računarski postavljenih parametara.



Slika 13.22. Stvaranje slike pomoću CCD kamere i mjerenje

Mjerna nesigurnost se eliminira smanjenjem razdaljine između linija. Koriste se za registriranje trodimenzionalne topografije površine radnog ili kontroliranog, mjenog komada. Tipična primjena je u ispitivanju oblika deformiranih površina i mjerenju oscilacija.

Koriste se i u digitalizaciji slobodnih površina kao što su površine kalupa i modela u postupcima RP, i reverzibilnom inženjeringu.



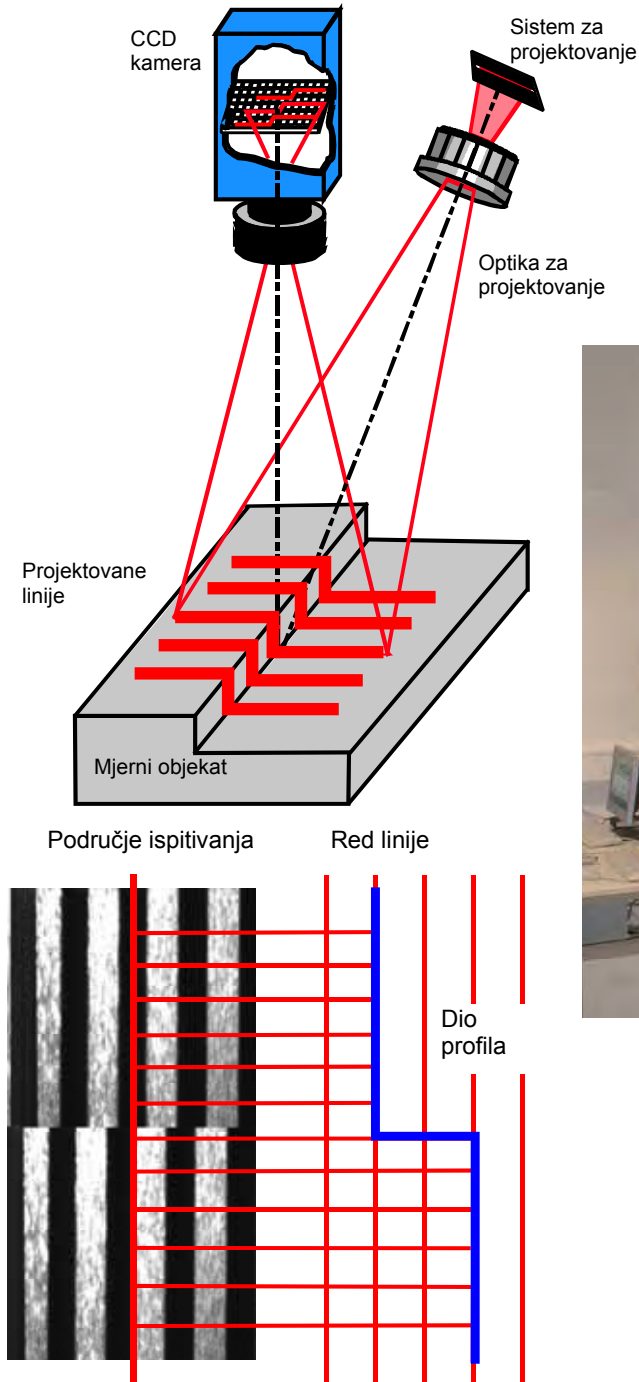
Slika 13.23. Optička skala

13.4.5. 3D fotogrametrija

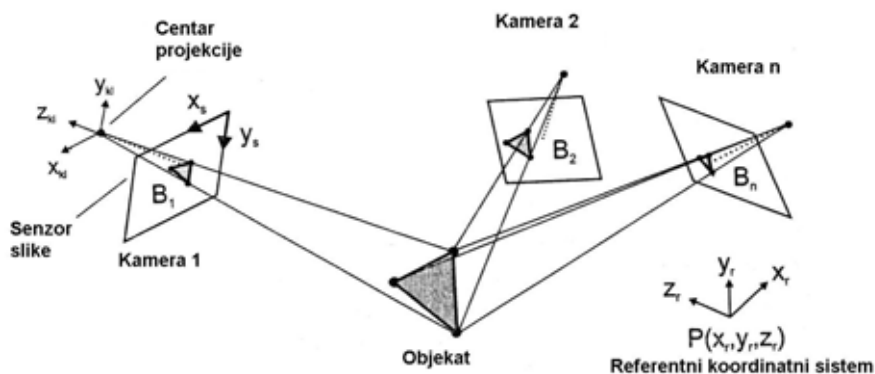
To je procedura registriranja slika zasnovana na trokutnom principu. Postupkom se simultano registriraju 3D koordinate velikog broja tačaka mjenog objekta. Objekat se registrira sa najmanje dvije strane uz korištenje analognih ili digitalnih kamera. Može se isti postupak provesti i sa jednom kamerom ali je potrebno vršiti snimanje iz više pravaca. 3D koordinate se računaju u prostoru i stvaraju sliku mjernog objekta. Uključivanjem kamera iz više pravaca posmatranja više tačaka se registrira pa se smanjuje mjerna nesigurnost rezultata. Na slici 13.25. prikazan je princip fotogrametrije.

Mjereni objekat se nalazi između nekoliko kamera od kojih svaka "snima" mjereni komad sa svoje strane. Ukupni podaci u vidu 3D koordinata tačaka se objedinjavaju i na osnovu njih se stvara prostorna slika objekta. Fotogrametrijska mjerna tehnika služi kao mobilna koordinatna mjerna mašina. Koriste se za mjerenja velikih objekata u zrakoplovstvu, brodogradnji, i izradi postrojenja velikih industrijskih objekata.

Druga primjena fotogrametrije jeste ispitivanje malih objekata zapremine manje od 1 m^3 sa malim mjernim nesigurnostima od oko 1:15000 u malom vremenskom intervalu od nekoliko sekundi. Rjeđe se koristi za određivanje položaja i identifikaciju rukovanja i procesa obezbjeđenja kvaliteta tokom izrade proizvoda.



Slika 13.24. Princip projektovanja linija i oprema

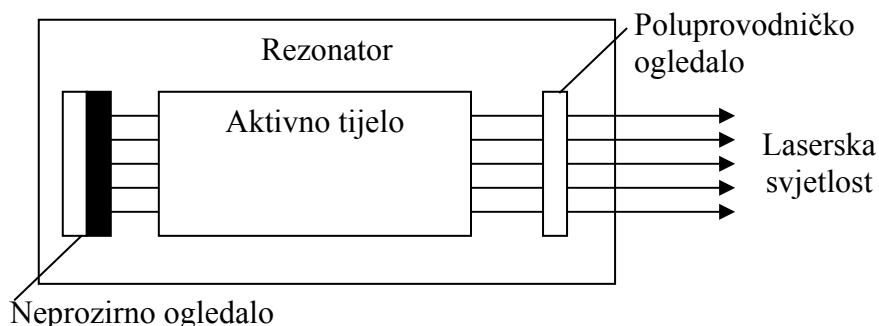


Slika 13.25. Princip fotogrametrije

13.5. Laserska metrologija

13.5.1. Osnove rada lasera

LASER je svjetlosni pojačivač u kojem se pojačava svjetlost uz pomoć indukovanog zračenja atoma (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Osnovne karakteristike svjetlosti koju emitira laser su: koherentnost, monohromatičnost i linearna polariziranost. Intenzitet emisije laserskog snopa mnogo je veći u odnosu na druge izvor svjetlosti. Oni omogućavaju i fokusiranje snopa zračenja u jednu tačku, što omogućava da se laserom vrši rezanje. Na bazi laserske tehnologije konstruirani su mjerni sistemi. Laserski efekat se ostvaruje pomoću tri osnovna dijela, a to su: aktivno tijelo, rezonantni sistem i pobuđivač, slika 13.26.



Slika 13.26. Laserski efekat

Aktivne materije su obično čvrsti, tečni i gasoviti materijali, među kojima se poluprovodnici, organska jedinjenja i plastične mase.

Ako je aktivna materija kristal rubina onda je to rubinski laser, na koji može da se djeluje pobudnim sistemom lampi bljesklica-stroboskopskih lampi. Lampom se osvjetljava aktivno tijelo i stvara laserski efekat.

Da bi se u potpunosti postigao efekat, aktivni materijal se stavlja u rezonator koga čine dvije reflektirajuće površine koje su ravna, parabolična ili sferna ogledala. Proces reflektiranja zraka u rezonatoru se višestruko ponavlja, nagomilava se energija u aktivnom tijelu i svjetlost se pojačava. Nagomilana energija se emitira u obliku impulsa laserske svjetlosti kroz poluprovodničko ogledalo.

13.5.2. Podjela lasera

Prema agregatnom stanju laseri se dijele na:

- čvrste,
- tečne i
- gasne.

Prema režimu rada mogu biti:

- impulsni,
- kontinuiranog zračenja,

Prema principu rada pobudnog sistema mogu biti laseri sa:

- optičkim,
- električnim,
- hemijskim pobuđivanjem.

Zavisno od aktivne materije laseri mogu biti:

- atomski,
- jonski,
- molekularni.

13.5.3. Primjena lasera u mjerenju

Laserski mjerni sistemi se koriste u proizvodnim mjerenjima za:

- najtačnija mjerenja dimenzija rastojanja i pomjeranja,

- izradu pozicioniranje, dijagnostiku, podešavanje i montažu savremenih krupnoagregatnih alatnih mašina (obradnih centara, agregatnih mašina),
- kontrolu pomoćnih kretanja i krivolinijskih pomjeranja sklopova kod alatnih i drugih mašina,
- upravljanje alatnim mašinama,
- mjerenje hrapavosti i defekata površina,
- kontrolu mjerne tehnike,
- razvoj novih laserskih mjernih pretvarača,
- procesnu aktivnu kontrolu kvaliteta,
- dijagnostiku mašina,
- provjeru okomitosti površina,
- provjeru tačnosti podioka skala sa kinematičkim parovima,
- izradu preciznih optičkih skala i difrakcionih rešetki u optičkoj industriji.

Laserska mjerenja i kontrola mogu se vršiti u statičkim i dinamičkim uslovima uz bezkontaktno djelovanje mjernog sistema.

U metaloprerađi i mašinogradnji mjerenja dimenzija i rastojanja su zastupljena sa oko 85 do 95%. Laserski mjerni sistemi su najtačniji u savremenoj mornoj tehnici pa se koriste i kao etaloni.

Primjena laserske metrologije može se podijeliti prema postupcima koji se provode a to je:

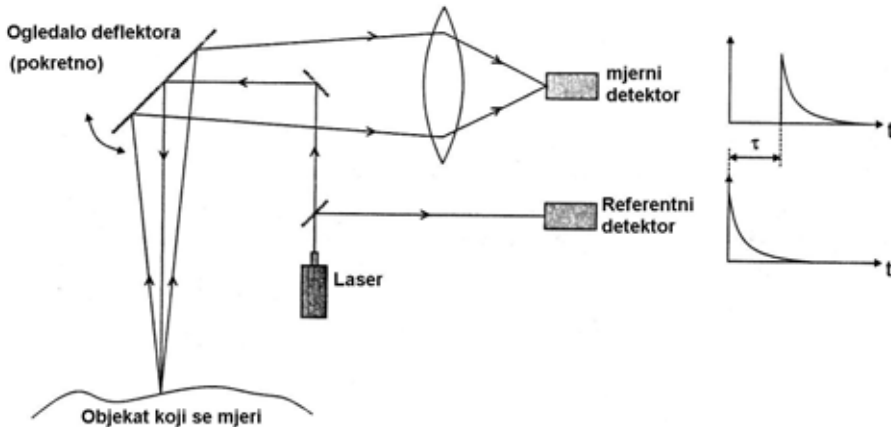
- princip trokuta kod koga se koriste trigonometrijske metode računanja rastojanja koja se mjere,
- procedure mjerenja vremena prolaska zraka do mjenog objekta i nazad
- procedure autofokusa.

Na osnovu navedenih procedura mogu se vršiti različita mjerenja geometrijskih karakteristika proizvoda. Prvi princip trokuta je prethodno opisan.

13.5.1. Određivanje rastojanja na bazi izmjenog vremena

Procedura se koristi za mjerenje rastojanja, posebno kada su u pitanju veliki mjerni komadi. Mjeri se vrijeme koje je potrebno da laserski zrak dođe do mjenog komada i da se vrati. Na osnovu vremena i poznate brzine

svjetlosti može se tačno odrediti mjereno rastojanje. Na slici 13.27. prikazan je put laserskog zraka koji putuje do ogledala, zatim pada na mjereni objekat, reflektuje se, a zatim sočivima usmjerava u tačku detektora.



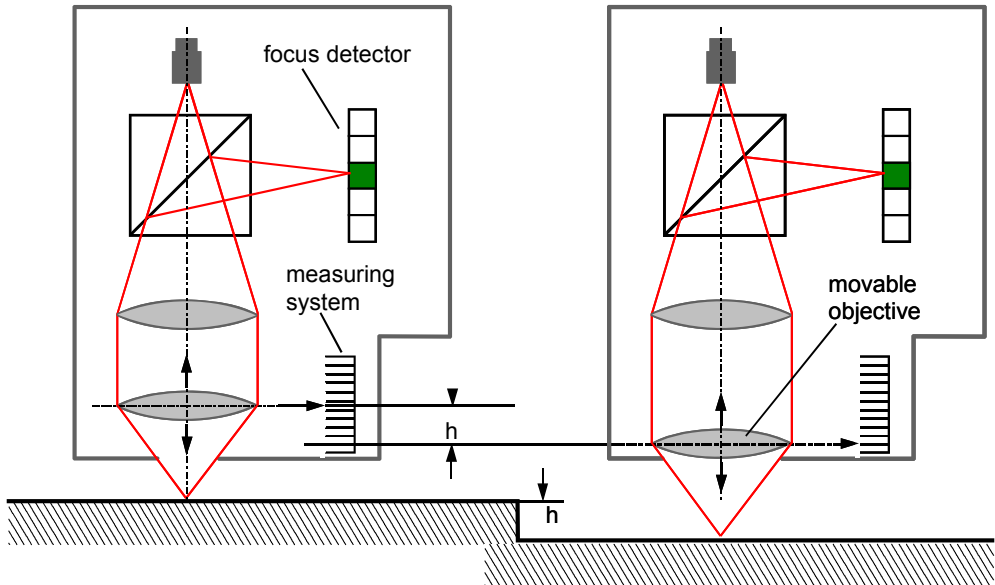
Slika 13.27. Procedura određivanja rastojanja na osnovu mjerenja vremena

13.5.2. Procedure autofokusa za linearna mjerenja

Autofokus procedura odnosi se na mjernu proceduru koja se izvršava sa kalibriranom dužinom fokusa zbog oštine i jasnoće slike. Tu se mogu razlikovati dvije procedure. Prva je video autofokus procedura a druga laserska autofokus procedura.

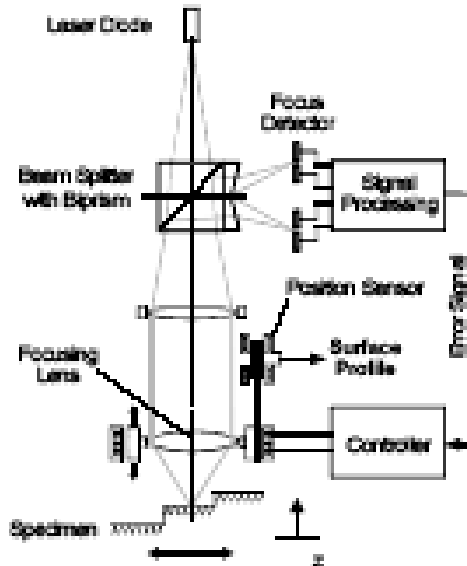
Prva procedura odnosi se na mjerenje rastojanja reflektovanjem mjernog objekta na CCD senzor određivanjem stepena oštine kontrasta refleksije i dobivanja informacije o mjerenom rastojanju. Koristi se za CNC kontrolne trokoordinatne mjerne mašine.

Mnogo više je u upotrebi laserska autofokusna procedura koja se koristi u tehnici kompaktnih diskova. Koherentna laserska zraka iz laserske diode se dijeli na glavne vertikalne zrake. Dio zraka ide u pravcu polarizacije i može proći kroz dijagonalno postavljene višeslojne dielektrike u kojima se dijele zraci. Nakon toga linearno polarizovana svjetlost ide do kolimatora, prolazi kroz njega i prelazi u cirkularno polarizovanu svjetlost. Mjerni objektiv je postavljen na pokretni kalem i fokusira lasersko svjetlo na mjereni objekat. Svjetlost se zatim reflektuje od površine radnog komada ponovo prolazi kroz mjerni objektiv, slika 13.28.

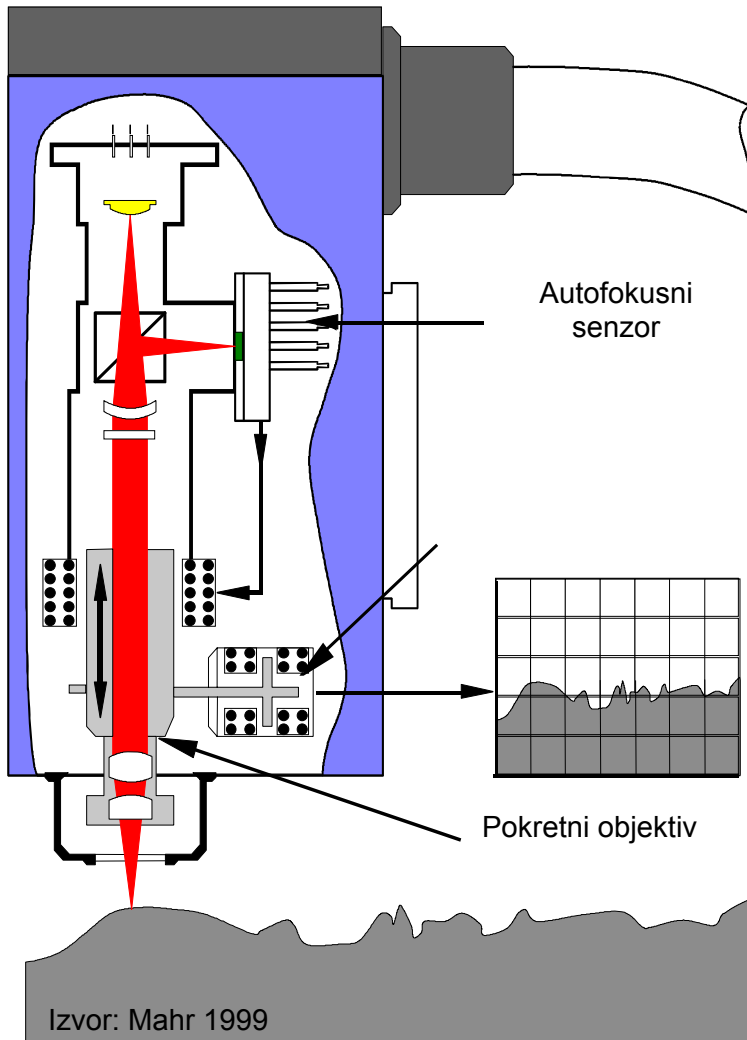


Slika 13.28. Autofokusna procedura

Rezultujući polarizirani vektor je zarotiran za 90° oko ose zraka tako da se mjerna svjetlost reflektuje prema fokus detektorima. Autofokusna procedura je primijenjena na određivanje stanja površina. Na slici 13.29. prikazan je mjerni sistem za mjerenje kvaliteta površine, čiji je sastavni dio autofokusni senzor.



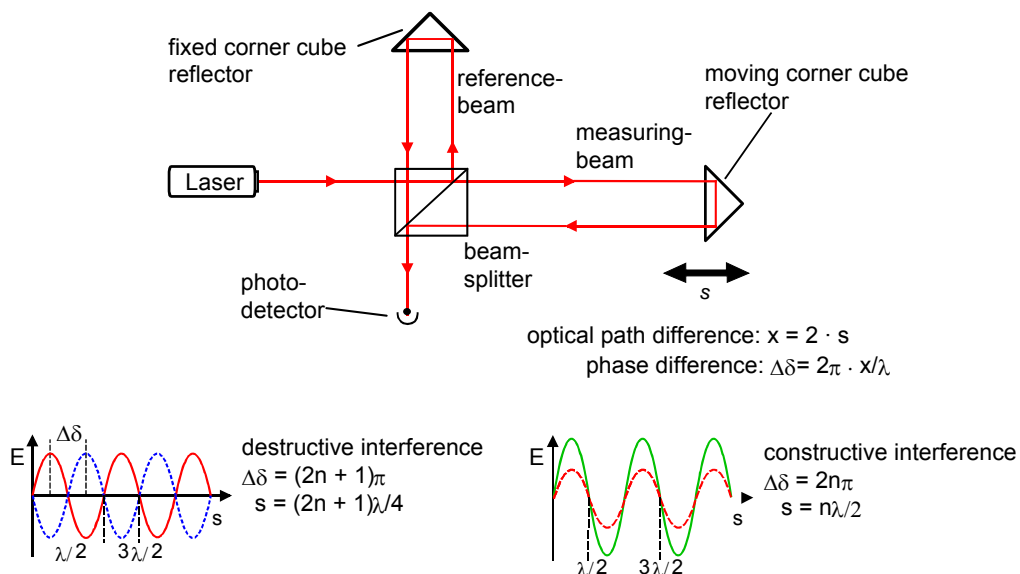
Slika 13.29. Autofokusni senzor



Slika 13.30. Mjerenje kvaliteta površine uređajem sa autofocusom

13.5.3. Interferometrija

Fizička osnova interferometrijskih procedura su koherentni svjetlosni talasi koji putuju različitim putevima. Osnova rada laserskih interferometara, slika 13.30. je cijepanje elektromagnetnih talasa, kao i njihovo ponovno spajanje nakon prelaska različitih puteva. Obje komponente mogu biti iste kao što je to u slučaju Michaelsonovog interferometra.

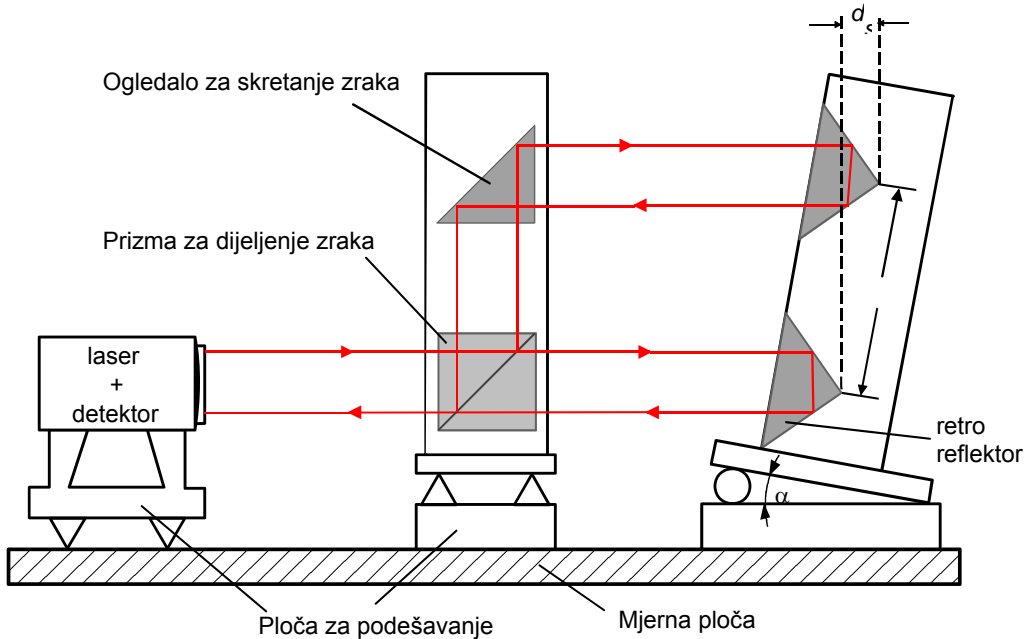


Slika 13.31. Michaelsonov interferometar

Preduslov za interferenciju je signal koji se može ocijeniti kao referenti, konstantne faze, koji se sastoji od dva parcijalna talasa. Karakteristika koja se zove "koherencija dva talasa" nastaje kada se ispuni uslov da je razlika puteva parcijalnih zraka manja nego dužina zraka koherentne svjetlosti koja se koristi.

Laserski ulazni zrak u interferometar se dijeli. Dobiveni zraci se tada reflektuju od ogledala poslije prelaska puteva od ogledala i nazad. Nakon što su prešli navedene puteve vraćaju se u tačku interferencije. Zavisno od faze parcijalnih talasa intenzitet talasa koji se registriraju je između maksimalne vrijednosti i potpunog poništenja talasa.

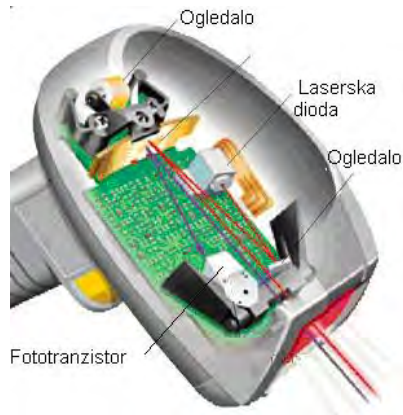
Laserski interferometri se koriste za mjerenje dužina, precizna mjerenja uglova i pravosti. Područje u kom se primjenjuje najčešće je proizvodnja alata, posebno za visoko precizne mašine. Mašine čiji je pogon kontroliran laserskim interferometrima služe u proizvodnji složenih komponenti sa proizvodnim tolerancijama izraženim u nanometrima.



Slika 13.32. Primjena laserske interferometrije za goniometriju

13.5.4. Laserski skeneri

Kao i sva prethodno navedena mjerna sredstva i laserski skeneri su mjerni sistemi za određivanje dimenzija radnog komada. Rade na principu svjetlosne barijere. Optički put između izvora lasera i fotodetektora se prekida kada se između njih postavi radni komad koji se ispituje. Princip i struktura laserskog skenera dati su na slici 13.33.



Slika 13.33. Strukturna shema laserskog skenera

Laserski zrak koji se odašilje pada na rotirajuće poligonalno ogledalo gdje je skenirajući rang određen brojem uglova poligonalnih ogledala. Reflektovani laserski zrak tada dolazi do sočiva čiji fokus je tačka odbijanja zraka koje se vraćaju do poligonalnog ogledala koje uvijek pod istim uglom skreće zrake u istom pravcu tako da iza sočiva su zraci stalno paralelni. Paralelni zraci nailaze na drugo sočivo sa fotodetektorom smještenim u fokusu drugog sočiva. Između dva sočiva postavlja se objekat koji se mjeri i on pravi sjenku na detektoru kada je ogledalo postavljeno pod nekim određenim uglom. Kada se postavi pod tačno određenim uglom, detektor pokazuje opadanje intenziteta svjetlosti. Dužina trajanja opadanja intenziteta svjetlosti omogućava računanje geometrije komada. Prečnik radnog komada datog na slici proporcionalan je uglu $\Delta\Phi$ kada se na optičkom putu postavi mjereni objekat. Mjeri se trenutni ugao poligonalnog ogledala. U ovom slučaju jedan laser i jedan fotodetektor su dovoljni za skeniranje pri čemu se podrazumijeva da je mjerno područje veće od mjenenog objekta.

Postoje u osnovi dvije metode mjerenja predmeta:

- Mjerni objekat se skenira nekoliko puta, a nakon svakog skeniranja objekat se okreće. Postupak okretanja sjenke omogućava dobivanje informacije o profilu geometrije radnog komada.
- Mjerenje se vrši sa dva ili tri skenera u isto vrijeme. Skeneri su postavljeni jedan u odnosu na drugi pod uglom od 90° ili 60° . Pošto laserski zrak ima konačno širenje on ne daje sjenku iznenada, nego nalazi ugao formiranja sjenke

Rezolucija koja se postiže korištenjem skenera je ispod $1\mu\text{m}$. U toku mjerenja postiže se brzina od 400 skeniranja u sekundi.

14. KOORDINATNA METROLOGIJA

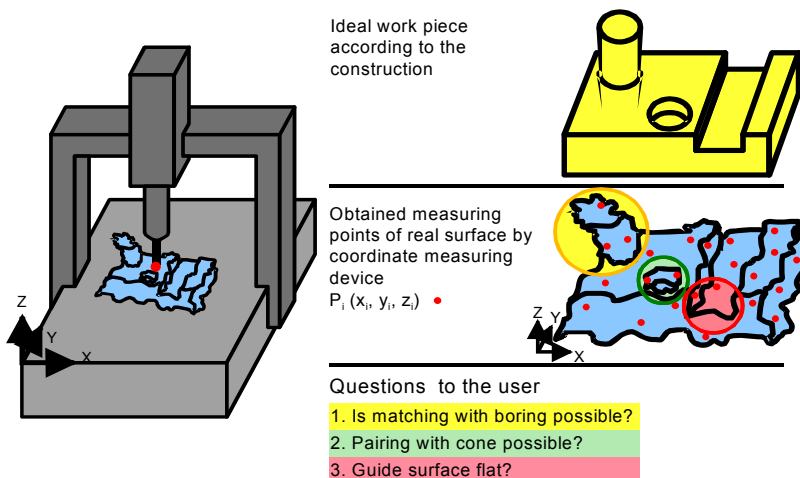
Sadržaj lekcije:

1. Principi koordinatne metrologije
2. Koordinatne mjerne mašine
3. Mjerenje na koordinatnoj mjernoj mašini
4. Mjerna nesigurnost
5. Primjena koordinatne metrologije

Sa porastom složenosti oblika proizvoda, geometrija proizvoda postaje sve komplikovanija za mjerenje i kontrolu. Zbog toga je potrebno primjenjivati u kontroli i mjerenju takva mjerna sredstva koja su precizna, brzo izvršavaju veliki broj operacija mjerenja, a pri tom je njihova primjena ekonomski opravdana. Koordinatne mjerne mašine su takva mjerna sredstva koja su izuzetno fleksibilna i efikasna u kontroli geometrijskih karakteristika radnog komada.

14.1. Principi koordinatne metrologije

Karakteristike na kojima se bazira postupak za koordinatnu metrologiju su idealizirana geometrija radnog komada sa svim osobinama koje taj komad posjeduje. Karakteristika procedure je i matematički opis pojedinih tačaka na površinama u naznačenom području, koje su najvažnije za radne operacije koje se izvode na radnom komadu. Na slici 14.1. prikazan je princip koordinatne metrologije.



Slika 14.1. Princip koordinatne metrologije

Registriranje tačaka, površine radnog komada, može se ostvariti na različite načine. Osnovno je da sva sredstva koja koriste principe koordinatne metrologije bilježe stvarnu geometriju radnog komada i određuju odstupanja u odnosu na idealnu-željenu geometriju. Postupak se ostvaruje korištenjem koordinatnih mjernih mašina koje se zovu i skraćeno CMM (Coordinate Measuring Machines). U principu, svaka koordinatna mjerna mašina je mjerno sredstvo koje mjeri sve tri dimenzije radnog komada.

U kombinaciji sa odgovarajućim softverom, pomoću koordinatnih mjernih mašina mogu se dobiti različite informacije o proizvodu kao što su geometijske karakteristike prizmatičnih, rotaciono-simetričnih i rotaciono-nesimetričnih radnih komada.

Koordinatne mjerne mašine su osnovni predstavnik koordinatnih mjernih sredstava koja se koriste za mjerenje (opisivanje) 3D radnog komada. Koordinatna mjerna mašina često nije dovoljna za mjerenje nekih objekata ili radnih komada zbog velikog broja tačaka koje u kratkom vremenskom periodu treba da obradi. Zato se koriste i drugi principi koordinatne metrologije. Najpoznatija su dva:

- Trokutni mjerni sistem
- Fotogrametrijski mjerni sistem.

Termini koji se koriste u koordinatnoj metrologiji

Najčešća funkcija industrijske metrologije, bez obzira kojim se sredstvima mjerenja koristila, jeste određivanje odstupanja stvarnog radnog komada od dizajniranog. Odstupanja se javljaju u pogledu dimenzionalnih karakteristika, oblika i položaja. Oblik radnog komada može se opisati njegovim elementima i prostornim položajem jednih dijelova u odnosu na druge. Kada je u pitanju radni komad koriste se sljedeći termini.

Specificirana odnosno zahtijevana geometrija definira idealni oblik komada. Takav oblik se predstavlja dizajnom proizvoda i teži napraviti u proizvodnji. Proizvodnjom se ne dobije komad željenih dimenzija i oblika što je posljedica djelovanja različitih uticaja.

Dobije se komad koji ima **aktuelnu** geometriju koja je posljedica svih uticaja koji su se javili od dizajna do izrade komada.

Razlika stvarne-aktuelne geometrije i željene geometrije predstavlja **devijaciju** koja je treća karakteristika elementa.

Za vrijeme mjerenja, stvarna geometrija se opisuje stvarnim, pojedinačnim tačkama koje leže na površini radnog komada. Mogu se eventualno uvesti aproksimacije realne geometrije tako što će se zanemariti neke karakteristike kao što su izbočine ili nepravilnosti radnog komada. Mjerenje

radnog komada samo je slika realnog komada koji se opisuje u matematičkom obliku.



Slika 14.2. Odstupanje realnog komada od željenog

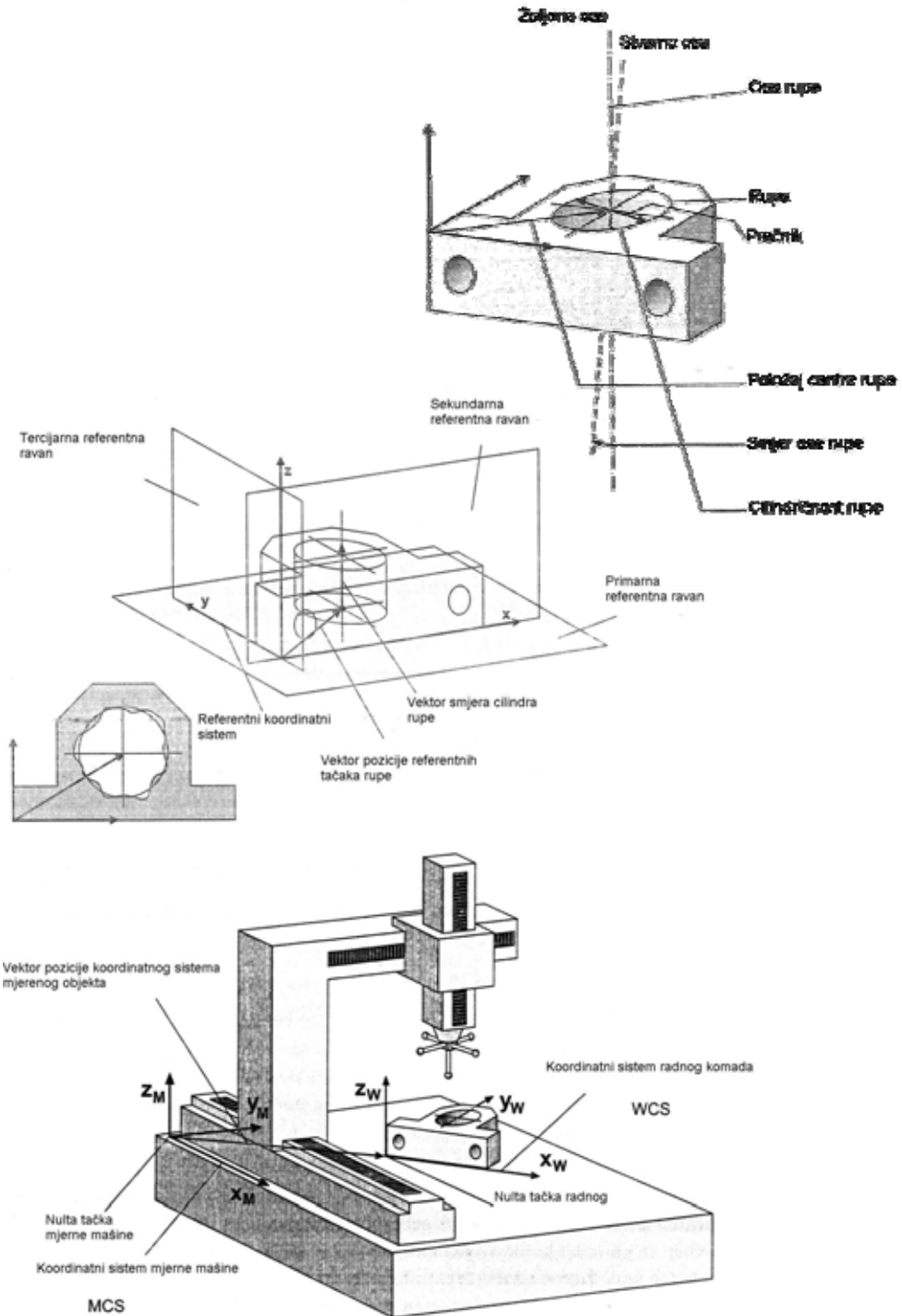
Geometrija radnog komada može biti idealna odnosno željena i stvarna odnosno realna.

Idealna geometrija odlikuje se željenim dimenzijama, položajem i oblikom. Ova geometrija, kako joj ime kaže, postoji samo u dokumentaciji i ona je cilj proizvodnog procesa. Proizvesti objekat koji je što bliže dimenzijama, oblikom i položajem komadu koji se izrađuje jeste cilj svake dobre proizvodnje. Međutim to je nemoguće, pa se u procesu izrade komada dobije realna geometrija koja ima odstupanja u odnosu na idealnu. Odstupanja se ogledaju u odstupanju dimenzija, položaja i oblika.

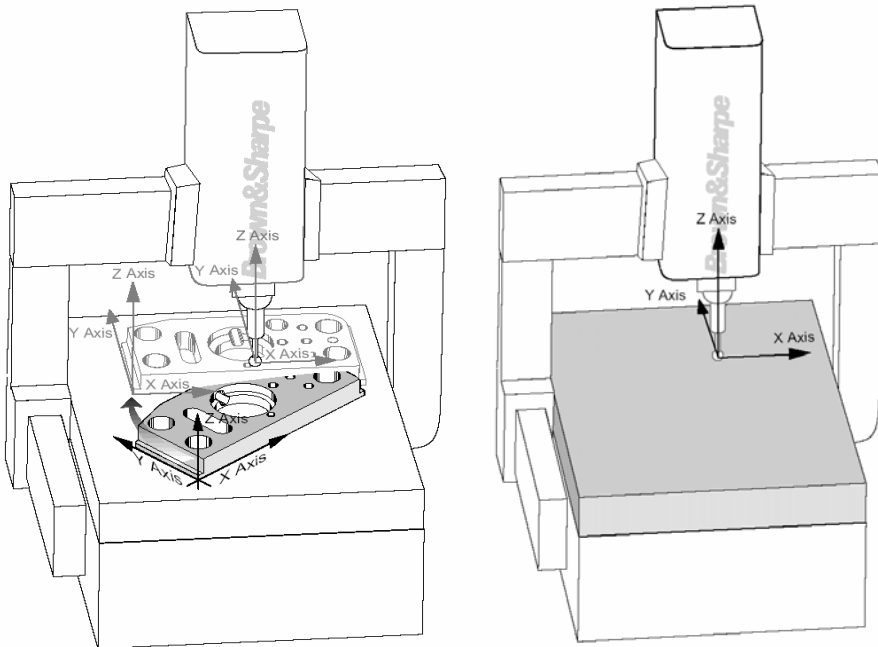
Realna geometrija se opet može posmatrati kao makro i mikro geometrija. Pod makro geometrijom se podrazumijevaju stvarne dimenzije, stvarni oblik i stvarni položaj komada. Mikro geometrija obuhvata valovitost i hrapavost površina komada.

Oblik elemenata i geometrija radnog komada su definirani osobinama i atributima. Na slici 14.3. objašnjena je idealna geometrija elemenata na primjeru bušenja rupe. U tom slučaju karakteristika je geometrijski element i to cilindar. Matematički opis cilindra daje geometrijske parametare sa karakteristikama, dimenzijama i oblikom.

Da bi se moglo suditi o odstupanjima oblika elemenata vrši se stalno poređenje obje geometrije. I specificirana i aktuelna geometrija su definirane geometrijski ekvivalentnim elementom. Ekvivalentni element je opisan jednačinama čiji se parametri računaju za diskretne vrijednosti mjerenja i porede sa parametrima specificirane geometrije. Poređenje se izvršava numerički. Kompenzacioni cilindar koji se računa na osnovu mjernih tačaka se uzima kao kompenzacioni element čiji parametri određuju stvarnu geometriju izbušene rupe.



Slika 14.3. Geometrijski element i njegove osobine



Slika 14.4. Referenti koordinatni sistem i koordinatni sistem elementa

Primjeri na slici 14.4 pokazuju kako se računa kompenzacioni cilindar, dimenzionalno odstupanje prečnika i odstupanje pojedinih mjernih tačaka koje opisuju cilindar tj. oblik koji odstupa od idealnog.

Kartezijev koordinatni sistem	Cilindrični koordinatni sistem	Sferni koordinatni sistem

Slika 14.5. Koordinatni sistemi koji se koriste u koordinatnoj metrologiji

Prethodno opisano mjerenje ne daje nikakvu informaciju o položaju cilindra tj. položaju rupe na radnom komadu. Mora se definirati i referentni sistem u odnosu na koga se određuju elementi kao što je bio navedeni cilindar. U principu postoje različiti koordinatni sistemi kao što su Kartezijev, cilindrični i sferni prikazani na slici 14.5 koji se koriste kao referentni.

Za element se koristi referentni sistem elementa. Referentni sistem se postavi i u odnosu na njega se vrši mjerenje. Npr. osa referentnog sistema može biti osa koja spaja centre dvije rupe na radnom komadu. Jedna od osa referentnog sistema elementa je vertikalna osa paralelna vertikalnoj osi koordinatne mašine. Treća osa je okomita na ove dvije. Na taj način se formira koordinatni sistem radnog komada koji je karakteristika radnog komada, kao što su rupa i površina karakteristike radnog komada. Referentni sistem radnog komada čine tri ravni. Koordinatni mjerni sistem mjernog sredstva je Kartezijev koordinatni sistem. Koordinatni sistem radnog komada usklađen je i sa koordinatnim sistemom koji se koristi za numeričke analize.

Iz dosad izloženog može se zaključiti da koordinatna metrologija služi za mjerenje geometrijskog odstupanja. Koristeći koordinatnu metrologiju mogu se dobiti oblik, proporcije i nepravilnosti u izradi komada. Koordinatnom metrologijom mogu se dobiti i makrogeometrijske karakteristike kao što su dimenzije i položaj. Nepravilnosti prvog i drugog reda prema DIN 4760 mogu se mjeriti pomoću CMM. Mogućnosti koordinatne metrologije zavise najviše od sistema proba.

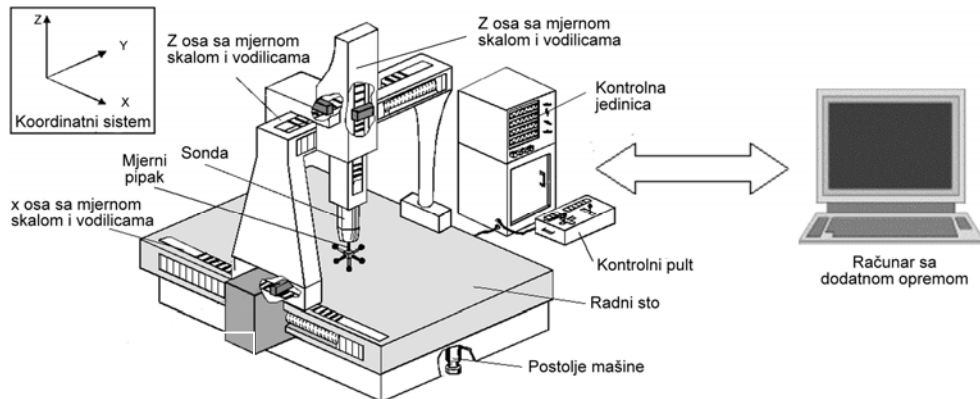
14.2. Koordinatne mjerne mašine

Koordinatne mjerne mašine su moćni mjerni sistemi. Danas se mnogo koriste u proizvodnim pogonima velikih, ali i malih proizvodnih preduzeća. Mjerno sredstvo pomoću koga se vrši mjerenje koordinata u prostoru na površinama radnog komada zove se koordinatna mjerna mašina (CMM). Pomoću nje je moguće simultano mjerenje koordinata traka istovremeno u sva tri pravca. Koordinatna mjerna mašina koristi Kartezijev koordinatni sistem.

Uobičajena konstrukcija mašine sastoji se od tri međusobno okomite vođice-ose označene sa x , y , z , slika 14.6. Ose z i y zovu se ram.

Obično ram nosi sistem sondi kojim se vrši mjerenje i koji sadrži senzore. Mašina je postavljena na postolje na kome je i pogon mašine. Prihvatanje radnog komada vrši se na ploči koordinatne mjerne mašine. Svaka vođica ima svoj pogon i sistem za očitavanje. Koordinatna mjerna mašina ima ormarić u kome je smještena upravljačka i prilagodna elektronika. Na

njemu postoji i pokazivač i upravljački pult s kojeg se koordinira radom mašine. Ram nosi na sebi nosač sa mjernom sondom koja može imati jedan ili više dodirivača, o čemu će se kasnije posebno govoriti.



Slika 14.6. Dijelovi koordinatne mjerne mašine

14.2.1. Tipovi koordinatnih mašina

Sve koordinatne mjerne mašine mogu se podijeliti na :

- mašine kojima se ručno radi kako sa osama tako i na komadima,
- mašine sa motorizovanim pogonom osa-vođica, a ručnom manipulacijom sa komadima,
- mašine sa motorizovanim pogonom osa i računarski kontrolisanim operacijama (CNC mod).

Postoje i druge kombinacije ali se sve može svesti na ove tri osnovne. Svaka konstrukcija koordinatne mjerne mašine sastoji se od mehaničkih sklopova, pogona, sistema za mjerenje dužina i sistema proba, kontrolne i izvršne konzole i računara sa perifernim sredstvima za izlaz rezultata mjerenja. Zavisno od tipa mašine postoje druga dodatna sredstva kao što su mobilni ili rotirajući stolovi, mehanizmi proba, temperaturni senzori mehanizmi za pričvršćenje. Na slici 14.7 prikazani su osnovni tipovi koordinatnih mjernih mašina.

Univerzalni tipovi koordinatnih mjernih mašina su:

- stubni tip,
- konzolni tip,

- portalni tip,
- mostni tip.



Portalni tip
Pokretni most



Horizontalni tip
Horizontalna ruka



Mostni tip



Konzolni tip



Specijalna namjenska
CMM



Robotska CMM

Slika 14.7. Tipovi koordinatnih mjernih mašina.

Razvijen je i poseban tip u kinematskom smislu sličan robotu. Ovakve koordinatne mašine imaju visoko prilagodljiv dizajn i dva sistema mjerenja. Jedan je sistem mjerenja uglova, a drugi su 3D mjerne probe. Ovakve mjerne mašine imaju jednostavne operacije i male dimanzije. Koriste se za kontrolu dimenzija u proizvodnim pogonima, na linijama za kontrolu oblika, položaja i dimenzija komada kod kojih odstupanja spadaju u mala i srednja.

Stubni tip

Namijenjen je za mjerenje radnih komada dimenzija koje ne prelaze $0,25 \text{ m}^3$. Tačnost stubnih koordinatnih mašina je visoka, jer se kroz krutost i podešavanje osa može postići mala mjerna nesigurnost od $1 \mu\text{m}$. Područje primjene je u provjeri kontrolnih alata i prizmatičnih komada i komada oblika vratila.

Horizontalni tip

Ovaj tip CMM je najčešće korištena mašina. Danas se proizvodi u različitim varijantama i konstruktivnim rješenjima. Dimenzije mašina se kreću kod nekih tipova od onih sobne veličine do ručnog mjernog sredstva. Primjenjuje se za kontrolu poluzavršenih radnih komada i proizvoda od lima kao i provjeru ulaznih sklopova za vozila, vazduhoplovstvo i konstrukcije za fabrička postrojenja.

Portalni tip

Jedan od češće korištenih tipova koji pokriva najveći broj dimenzionalno različitih komada koji se mjere u proizvodnoj metrologiji. Tipični predstavnik ove grupe mašina ima mogućnost da mjeri zapreminu od 1 do 2 m³. Karakteristika ovog tipa je i velika krutost konstrukcije.

Postoje dvije varijante:

- nosač probe je mobilan sklop, a radni komad je fiksiran na mjernoj ploči,
- mjerna ploča je mobilna a radni komad se za nju fiksira, dok je nosač nepokretan i vezan sa osnovnom strukturom koordinatne mjerne mašine.

Područje primjene mjernih mašina portalnog tipa je za mjerenje radnih komada i malih i srednjih sklopova mašina i sredstava u konstrukciji vozila.

Konstrukcija sa pokretnim mostom

Namijenjena je za mjerenje velikih objekata. Koordinatna mjerna mašina može mjeriti u prostoru objekte dimenzija 16x6x4 m³. Namijenjena je prije svega za mjerenje dugih vozila i objekata kao što su veliki alati za oblikovanje, avionske konstrukcije i komponente turbo mašina.

I pored razlika u konstrukciji sve koordinatne mjerne mašine su opće upotrebe. Svaka konstrukcija nosi fiksni i mobilni mehanički dio. Sredstvo koje se koristi kao osnova-baza za mjerenje mora imati značajnu krutost, osjetljivost na vibracije i mogućnost da ih minimizira što se postiže vibraciono izolacionim ležajevima.

Za dijelove koordinatne mjerne mašine koristi se tvrdi kamen-granit, čelik ili čelični liv. Sto mašina je napravljen od granita. Granit je tvrdi, jeftiniji i lakši, a ima i niži temperaturni koeficijent širenja u odnosu na čelik, pa su manje promjene dužina.

Zbog slabe provodljivosti adaptivnost sklopa CMM na promjene temperature je dobra tako da nema ni deformacija koje su posljedica temperature. Da bi se izbjegli uticaji kratkotrajnog djelovanja temperature na mjerno sredstvo granit se može zamijeniti i aluminijem. Sa promjenom temperature aluminij mijenja svoje dimenzije mnogo više nego kamen, ali zbog velike provodljivosti deformacije su mu vrlo male. Drugi materijali koji se koriste u koordinatnoj metrologiji su keramike jer imaju niži temperaturni koeficijent širenja kao i kompozitni materijali čija je težina mala, a visoka stabilnost. Sve što koordinatna mjerna mašina ima više komponenti, ona ima i veću mjernu nesigurnost. Svaka komponenta sa sobom nosi i dodatnu mjernu nesigurnost kao što su vođice, ležajevi, pogon mjernog sistema i sistema proba, itd.

CMM imaju karakteristike koje zahtijeva trište. Prvo, CMM kupuju mala i srednja preduzeća, ali i velike kompanije. U srednjim preduzećima koja imaju fleksibilnu proizvodnju u razvoju i ispitivanju proizvoda koriste se koordinatne mjerne mašine. One se upotrebljavaju ne samo za kontrolu rezanih nego i drugim tehnologijama izrađenih komada. Treba pomenuti da je sve više plastičnih dijelova i proizvoda od plastike. Mala i srednja preduzeća proizvode komponente kao što su odljevci, alati za injekciono brizganje, električne komponente, tanki metalni dijelovi, kućista, elektrode i druge proizvode. Koordinatne mjerne mašine mogu se koristiti i u prijemnom odjelu.

Ručno vođenje mjerenja

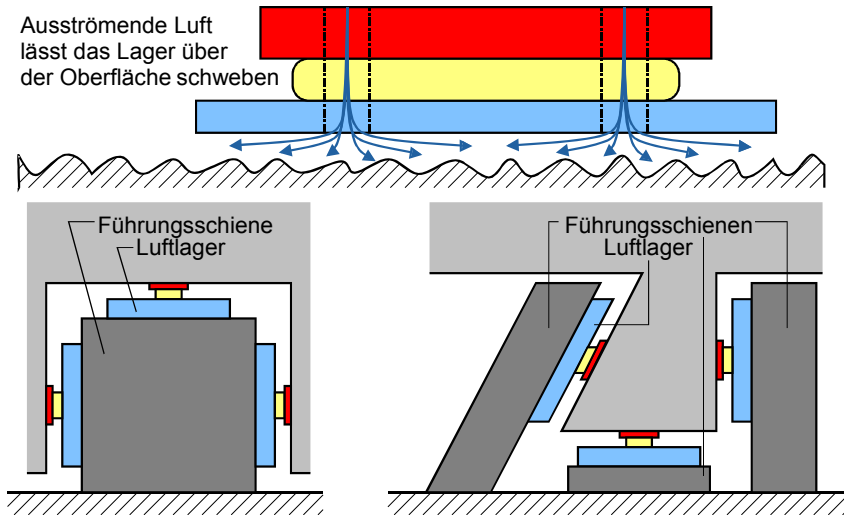
Mjerna mašina je male mase, ima mjerni sistem proba sa mogućnošću matematičke korekcije svih geometrijskih grešaka tj. mjernih nesigurnosti manjih od 4 do 8 μm . To se može se postići u manuelnom skeniranju. Zbog korištenja specijalnih keramika i fiberom ojačanih plastika za izradu skala mašina zadržava se stabilnost i neosjetljivost i na temperaturama od 20-30 °C.

Često je potrebno izvršiti i trodimenzionalno mjerenje na prizmatičnim dijelovima radnih komada koji imaju standardnu geometriju (cilindri, konusi, profili i površine slobodnog oblika). Koordinatne mjerne mašine treba da imaju veliki mjerni rang, srednju tačnost i lakoću rukovanja, što naravno treba posmatrati zajedno sa cijenom mašine.

14.2.2. Vođice, pogon, ležajevi

Komponente mehaničke tačnosti mjernih sredstava su ravnost i okomitost vođica kojima se označavaju pravci kretanja mjernog sredstva ili referentnog koordinatnog sistema. Za izradu vođica se koriste granit ili

čelik. Zračni ležajevi se koriste kada su vođice izrađene od kamena ili keramike. Vođice od keramike imaju veliku krutost, zadovoljavajuće termičke karakteristike, otpornost na koroziju, visoku otpornost na habanje. Antifrikcijski ležajevi se koriste u slučajevima kada su vođice izrađene od čelika. Zračni ležajevi imaju prednost jer ne dolazi do izražaja stick-slip efekat. Preuzimaju i velika statička i dinamička opterećenja. Antifrikcijski ležajevi mogu nositi velika opterećenja, a da se istovremeno postigne i visoka tačnost mjerenja.



Slika 14.8. Ležajevi koordinatne mjerne mašine

Svi tipovi mašina se pokreću pogonima sa električnim servo motorima. Kontrola motora vrši se preko operativnog sistema putem kontrole rada CMM ili kroz kontrolne programe koji se izvršavaju u računaru mjerne mašine. Postoje različiti prenosi od pogona do mobilnog sklopa kao što su zavojnice, zupčanici, frikcionni prenos i sl. Izbor sistema prenosa CMM zavisi od cijene i tehničko-tehnoloških zahtijeva kao što su: krutost, dinamičko ponašanje, habanje, tolerancije itd.

Sistem za mjerenje dužine

Ose zajedno sa cjelokupnom opremom namijenjenom za mjerenje dužine predstavljaju sisteme za mjerenje dužine. Sistemi za mjerenje dužine obuhvataju nosače sondi i mehanizme koji se postavljaju između mjerenih komada i sistema za dodirivanje tj. sondi. Za mjerenje se koriste različiti mjerni sistemi, a najčešće induktivni, optoelektronički ili laserski. Mjerni sistemi su direktno odgovorni za tačnost CMM. Postavljaju se tako da pokazuju veličinu u većoj rezoluciji nego što je mjerna nesigurnost CMM. Cilj mjernih sistema je minimiziranje odstupanja koja nastaju pri mjerenju.

Prema principu Abbe-ovog komparatora tijelo kojim se mjeri mora biti poravnato sa objektom mjerenja ili mora imati što manji razmak. Zbog konstruktivnih razloga vođice i mjerni sistemi ne mogu se poklopiti ali se mogu postaviti u paralelan položaj i time približiti tehnološkoj tačnosti. Zbog različitih vrsta nesavršenosti vođica, i drugih uticaja mjerena odstupanja se javljaju u obliku 21 komponente: 9 translacija, 9 rotacija, i tri devijacije uglova.

14.2.3. Sistem sondi

ISO standardima koji se odnose na koordinatnu metrologiju definiran je termin koji se koristi za senzor putem kojeg se ostvaruje veza između površine mjerenog komada-objekta i mjernog sistema za dužinu. Koristimo termin proba što znači dio koji dodiruje, opipava radni komad .

Probe koje se koriste u koordinatnim mjernim mašinama mogu se podijeliti na:

- optičke i
- mehaničke (taktilne).

Mehaničke probe imaju:

- Sistem prekidača
- Mjerni sistem

Mehanički prekidači mogu biti:

- elektromehanički i
- elektroakustični

Mjerni sistemi mehaničkih proba mogu biti:

- induktivni
- kapacitivni ili
- piezoelektrični.

Optičke probe imaju:

- optičke senzore prekidače
- optički mjerni sistem i
- okular

Optički senzori prekidači su fotoelektrični senzori. Optički mjerni sistem može biti:

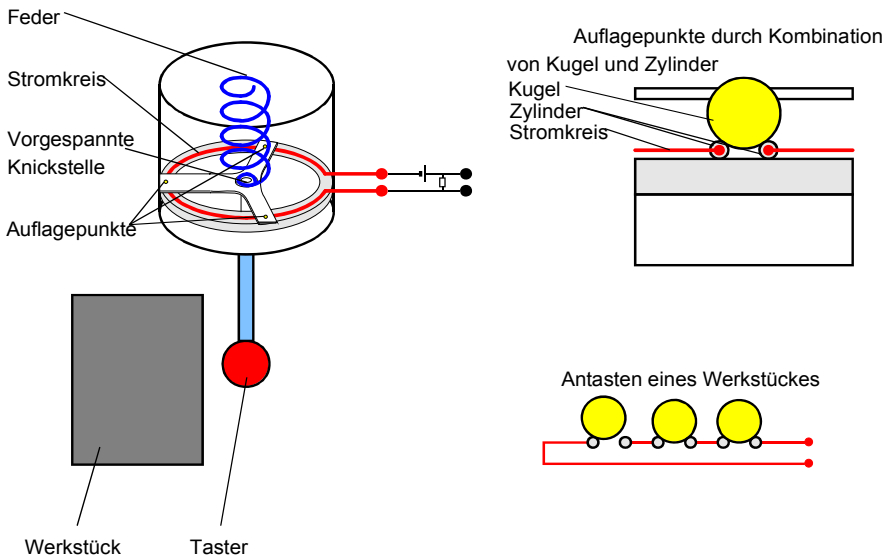
- CCD (charge coupled device)
- Laser trokutni senzor
- Teodolit trokutni senzor
- Fotogrametrijsko stvaranje slika

Mnogi mjerni sistemi koji se danas koriste rade sa mehaničkim sondama. Savremeni sistemi u koordinatnoj metrologiji rade na optičkim nekontaktnim principima. Kod mehaničkih proba ostvaruje se fizički dodir završetka senzora sa radnim komadom. Senzor može imati različite oblike završetaka proba kao npr: loptasti cilindrični, konični, diskasti, špicasti itd.

Mehanički sistem senzora često ima loptasti završetak. Loptasti završetak izrađuje se od rubina, stakla, čelika, ima visoku otpornost na habanje, a njihovi prečnici i prostorni položaj mogu se precizno kalibrirati. Optički senzori i CCD kamere sa koje formiraju sliku objekta se sve više koriste zato što se tako smanjuje vrijeme mjerenja.

Mehanički-kontaktne senzori spadaju u prekidno dodirne mjerni sisteme.

Prekidno dodirni mjerni senzori

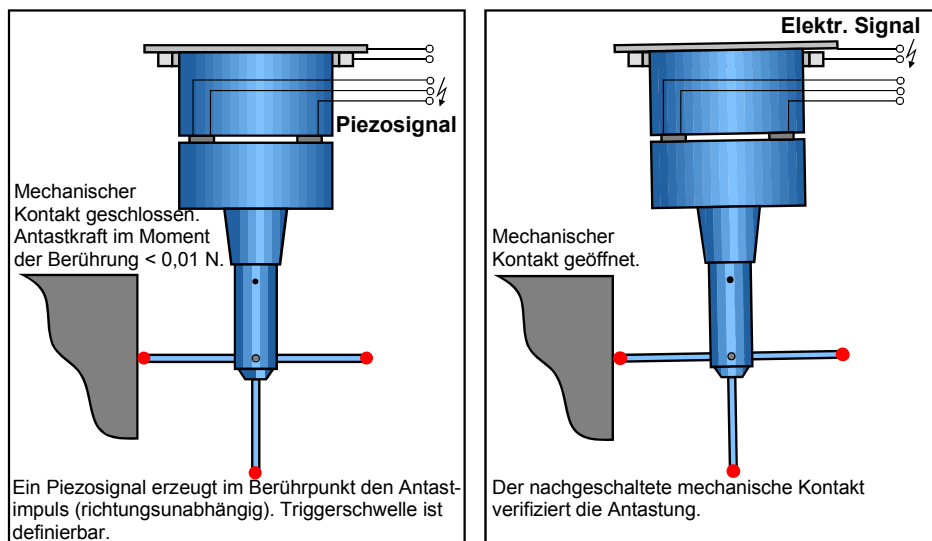


Slika 14.9. Princip rada prekidača sa kontaktom

Uobičajeni prekidač, slika 14.9. ima prednapregnut sistem koji se sastoji od tri dodirne tačke pomoću kojih je pero probe elastično pričvršćeno u pravcu šest prostorno mogućih stepeni slobode. Jednostavna verzija prekidača ima mehanizam koji je konstruiran kao električni kontakt. Odmah nakon što pero dodirne radni komad, električni kontakt se otvori i mjerenje razmaka

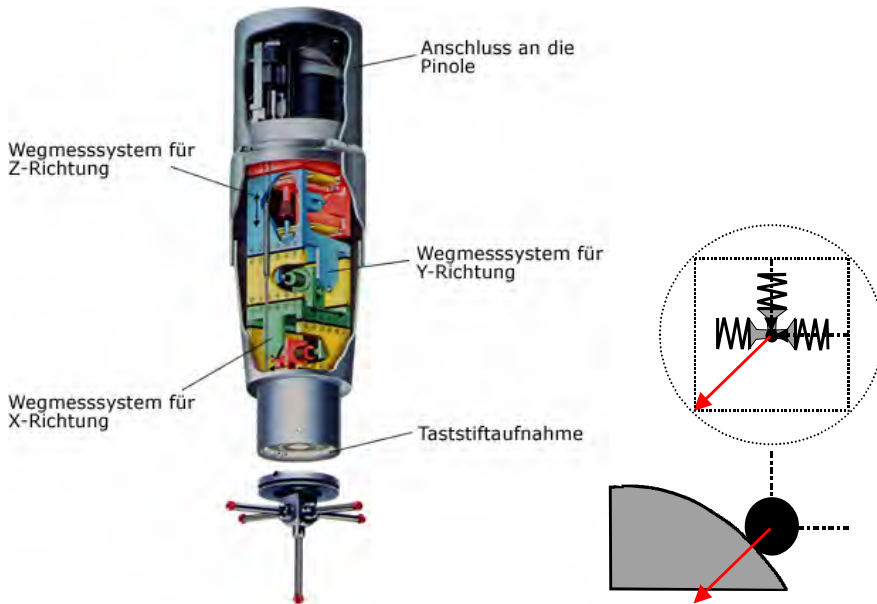
duž osa x, y, z i b je prepoznato i zabilježeno. Ovakve probe imaju koordinatne mašine sa niskom tačnošću. To je zbog toga što vraćanje pera probe u prvobitni položaj nije ravnomjerno jer su tri tačke raspoređene pod uglom od 120° , pa dolazi do različitih stepeni savijanja pera.

Zbog toga se koriste piezoelektrični senzori kao dodatak mehaničko električnim kontaktima. Ovo ne mijenja osjetljivost niti u jednom pravcu rada ali je izloženo manjoj sili pritiska pri kontaktu, a to opet smanjuje grešku. Glavni dio senzora je pero koje može biti dugo i do 200 mm i teško do 200 grama. Pero se može mijenjati. Elektronička analiza piezo signala omogućava povećanu tačnost mjerenja. Podaci se skupljaju ne samo u toku dodira radnog komada i površine nego i neposredno nakon toga. Mjerene vrijednosti se tada ekstrapoliraju i tako uklone uticaji mogućeg savijanja probe ili elastičnosti radnog komada. Mehanički kontakt ima ulogu da potvrdi da je došlo do kontakta probe i radnog komada.

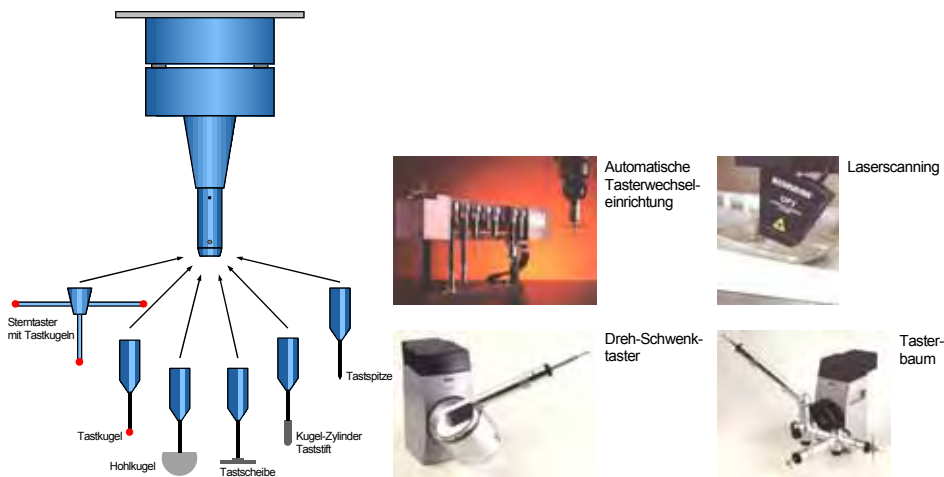


Slika 14.10. Mehanički kontakt sonde i mjerenog komada i piezo signal

Da bi se mjerenje ubrzalo može se više proba montirati na jedan nosač pa da tako mjere u više pravaca istovremeno. Na slici 14.11. dat je presjek jedne mjerne probe sa ilustracijom kontakta.



Slika 14.11. Presjek probe i način ostvarivanja kontakta



Slika 14.12. Različiti završeci proba i probe

14.2.4. Softver za koordinatne mjerne mašine

Softver koji se koristi za rad CMM je univerzalni i pokriva sve standardne funkcije CMM. Ukoliko se želi mjeriti neki prizmatični dio osnovnom softveru se dodaju specijalne funkcije. Svaki standardni softver uključuje:

- statistiku i procesnu kontrolu,
- mjerenje dvo i trodimenzionalnih krivih linija,
- mjerenje površina proizvoljnog oblika,
- mjerenje bazirano na karakteristikama proizvoda,
- integracija i procesiranje CAD podataka,
- mjerenje zupčanika,
- mjerenje cijevi.

Integriranje CAD podataka

Programiranje CNC mjerenja, ako se izvodi bez modela-objekta, je jako složen posao. Mnogi koraci u programu trebaju se definirati i unijeti. Uvodi se tzv. samoprogramiranje što spada u domen inteligentnih sistema i to je postupak kojim se smanjuje procedura. Za mjerenje radog komada na početku koje se izvodi prvo treba odrediti karakteristike mašine. Sve relevantne informacije smještaju se u bazu podataka u obliku CNC mjernog programa i na medij za pohranjivanje podataka. Ovaj metod ne može se jednostavno prilagoditi proizvodnji, jer se proizvodne mašine ne mogu programirati za vrijeme proizvodnog procesa niti u fazi planiranja.

CAD sistemi su postali integralni dio dizajna proizvoda, pa je logično da sve što se daje u CAD-u može koristiti i u metrologiji. Podaci za proizvod u ranoj fazi dizajniranja ne sadrže dovoljno geometrijskih karakteristika proizvoda kao što su npr. tolerancije. Dakle na početku dizajniranja proizvoda nije moguće razmjenjivati podatke. Zato treba dosta podataka da bi se CAD sistem integrirao u CMM kao posljednja faza u proizvodnom lancu. Dalji razvoj CMM ići će u pravcu integracije podataka tokom cijelog procesa.

To bi se odvijalo na slijedeći način:

- Podaci se šalju sa konvencionalnih CAD sistema kao što su CATIA, UNIGRAPHICS, CADD5, I-DEAS ili PROEngineer i čitaju na koordinatnoj mjernoj mašini ili računaru koji planira posao ili postupak provjere u nekom od formata IGES, VDA ili STEP.
- Računar tada procesira podatke i generira mjerne programe u čemu su uključeni zumiranje, rotacija, selekcija, pomicanje i sl. Proces se lakše odvija ukoliko je obezbijeđena vizualizacija.
- Mjerenje sa vrši na osnovu podataka pohranjenih u CAD bazi. Podaci su uglavnom tolerancije i informacije o proizvodnji. Mnogi radni koraci izvršavaju se samo na osnovu minimalnog broja podataka ulaza.

- Završavanje mjernog programa računarski kontroliranog mjerenja izvršava se na CMM.
- Podaci o mjerenju se nakon toga ponovo vraćaju u proizvodnju ili ukoliko treba u CAD, da bi se nešto korigovalo pa se na taj način greška automatski otklanja. Jedan od načina je kontrola zatvorenom spregom u proizvodnom procesu. Sastoji se od ponovnog podešavanja parametara mašine.

14.3. Mjerenje na koordinatnoj mjernoj mašini

Na početku devedesetih godina prošlog vijeka, korištena su koordinatna mjerna sredstva za verifikaciju dimenzija. Tadašnja konstrukcija mjernog sredstva imala je fiksno pero sa kojim se definirala kritična površina na dijelovima od tankog lima. Takva metrologija se može smatrati konvencionalnom ali je imala i određene prednosti.

- čvrstu konstrukciju za korištenje u radionici,
- jednostavno rukovanje bez posebne obuke,
- fleksibilnost u upotrebi čak i ako se proizvodni sistemi premjeste.

Prednosti su prevladale u odnosu na nedostatke kao što su:

- visoka ulaganja za kupovinu različitih mjerila koja su se morala kupovati kod bilo koje modifikacije proizvoda ili razvoja novog proizvoda,
- kako su mjerila bila strogo namjenska, promjene su se mogle napraviti samo preuređenjem tih mjerila,
- uticaji od strane izvršioca mjerenja su se unosili i uticali na tačnost i reproduktivnost rezultata,
- mašine su mogle u dosta slučajeva samo da daju ocjenu da li je neki dio dobar ili loš, a ne analitičku ocjenu samog mjenog komada,
- veći prostorni zahtjevi.

Danas sva automobilska industrija koristi prednosti CMM-a:

- Direktno mjerenje i poređenje početnih CAD podataka za linijske i površinske modele ali ne duže od onih datih prototip modelima.
- On-line računanje rezultata za statističku analizu i reverse engineering.
- Fleksibilnost po pitanju promjena ogleđa se u izmjenama programa,
- Globalna razmjena podataka i mjernih programa,

- Izvršenje svih funkcija sa osobljem u radionici,
- Smanjenje troškova sa vremenom korištenja,
- Mogućnost dobivanja podataka statističkog karaktera i visokoinformativnog sadržaja.

Poslije dodirivanja radne površine komada centar vrha pera daje izmjerenu vrijednost odnosno prosljeđuje je u računar za dalje operacije. Izmjerena vrijednost aktualne tačke pripada realnom radnom komadu. Površine radnog komada mogu se opisati sa geometrijskom formom elemenata, a to su ravni ili elementi u prostoru. Matematičko poznavanje ovih elemenata je uslov za mjerenje. Npr. mjeri se razmak između rupa ili prečnik osovine.

Postoje tri vrste elemenata u koordinatnoj metrologiji:

- jednodimenzionalni (tačka)
- dvodimenzionalni (prava linija ili krug)
- trodimenzionalni (ravan, sfera, cilindar, konus).

3D elementi predstavljeni su svojim površinama, pa se računanje normale na površine poznatih elemenata može izvesti bez drugih pomoćnih elemenata. Tačka, linija i krug se ne mogu jednostavno odrediti postupkom dodirivanja. Ravne ili krive linije su samo stranice površina pa se zato i koriste površine za određivanje elemenata.

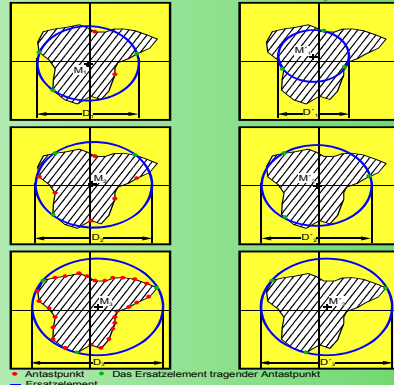
Messstrategie

Festlegen von

- 1 Hilfsmitteln (z.B. Drehtisch, Tasterbaum)
- 2 Auswerteverfahren (z.B. Tangentialelement bei Bezugsbestimmung, Filter)
- 3 Anstaststrategie (Anzahl und Verteilung der Punkte)
- 4 Ausrichtung der Messelemente (z.B. Ausrichtung der Achse einer Präzisionsbohrung zur Achse eines Drehtisches)
- 5 Betriebsmodus des Tasters (z.B. Einzelpunkt, Scanning, Formprüfung)
- 6 Antastkraft, -richtung und -geschwindigkeit
- 7 Reihenfolge der Messelemente
 - 7.1 Steuerkoordinatensystem
 - 7.2 Werkstück-Koordinatensystem
 - 7.3 Sicherheitsebenen und Umfahrwege
 - 7.4 Tasterschwenk und Tasterwechsel
 - 7.5 Haltepunkte für manuelle Eingriffe

Antaststrategie (am Bsp. Hüllkreis)

Anzahl und Verteilung der Punkte



Slika 14.13. Strategija mjerenja na koordinatnoj mjernoj mašini

Strategija mjerenja na koordinatnoj mjernoj mašini obuhvata ispunjenje zahtjeva za minimalnim brojem tačaka za svaki geometrijski element.

Matematički minimum tačaka zavisi od broja stepeni slobode koji ima svaki element. Drugi uslov je vezan za raspored tačaka. Četiri tačke sfere ne smiju biti na istom nivou i ne mogu biti identične.

Metrološki minimalan broj tačaka znači da potreban broj tačaka mora dati objektivni rezultat. Minimalan broj tačaka mora biti veći od matematičkog broja tačaka, tj. mora biti višestruko veći od normalnog matematičkog kako bi bilo obuhvaćeno što više tačaka, koje sa sobom nose informaciju o devijacijama.

Geometrijski ekvivalent na mjerenom elementu ima previše mjerenih tačaka. Na primjeru mjerenja prečnika rupe, slika 14.14. pokazano je kako se vrši selekcija i usrednjavanje da se dobije aproksimativna kružnica odnosno cilindar stvarne geometrije rupe.

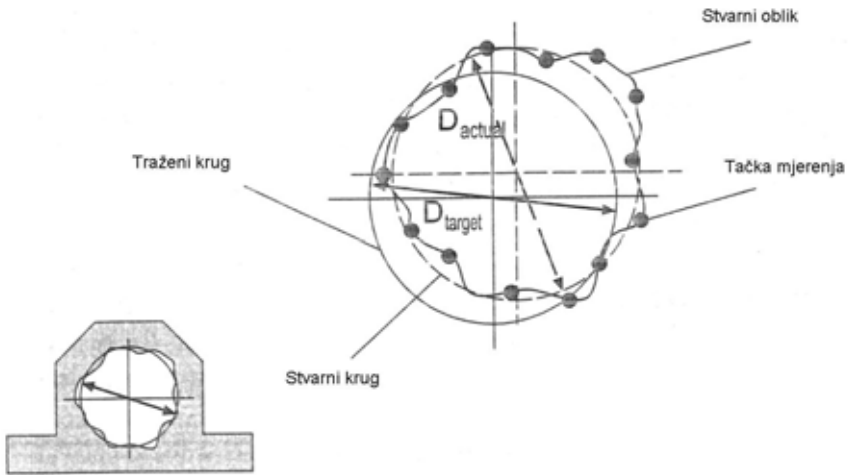
Mjerenje na koordinatnoj mašini može se klasificirati na mjerenje funkcionalno orijentisano i mjerenje karakteristika.

Kada se radi o provjeri dimenzija proizvoda samo na kraju procesa proizvodnje, umjesto slučajne provjere treba nakon svake faze u izradi proizvoda vršiti provjeru. Ovo je važno za postavljene serije ili za uzorkovanje. Kasnije u toku proizvodnje, provjera se vrši samo na nekim važnim karakteristikama proizvoda. Zbog toga se i zove mjerenje usmjereno ka provjeri karakteristika za razliku od funkcionalno orijentiranog mjerenja gdje se mjere sve karakteristike. Prvi pristup mjerenja: štedi vrijeme!

Mjerenje površina proizvoljnog oblika

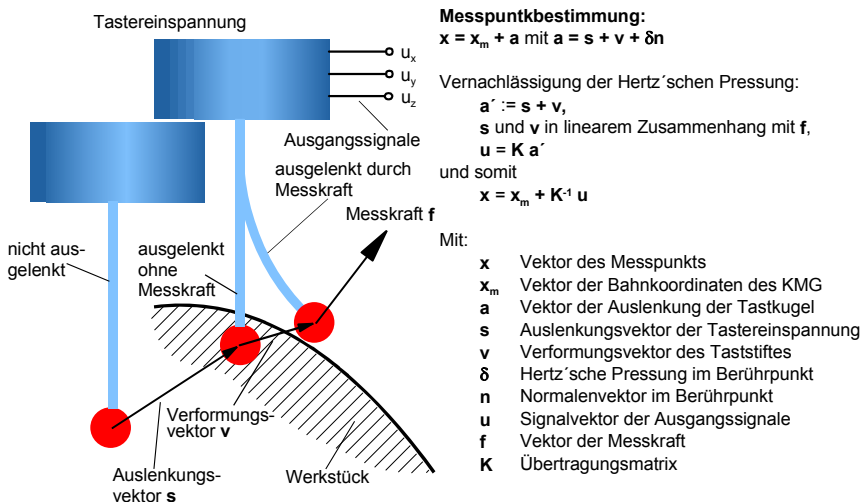
Estetski i aerodinamički aspekti imaju odlučujući uticaj na kreiranje površina proizvoljnog oblika i površine. Ovakve površine ne mogu se opisati standardnim geometrijskim osobinama nego se umjesto trodimenzionalnih tačaka matematički opisuju 3D krive ili 3D matematički opisane površine NURBS. Takve površine se mjere na osnovu CAD podataka. Ako nema CAD podataka onda se površina generira tako što se podaci uzmu sa modela koji je npr. prototip napravljen za potrebe ocjene dizajna. Podaci se uzimaju pomoću softvera HOLOS, DIMENSION namjenski razvijenih za te svrhe. Koordinatna metrologija je važna i u izradi površina proizvoljnog oblika. CAD podaci se pohranjuju u bazu podataka za komad koji se izrađuje, a zatim vraćaju u proizvodni proces kako bi se izvršile korekcije. Primjer ovog je digitizacija linija dobivenih sa AutoScan laser senzorom. Podaci za površinu dobiju se u obliku slučajnih tačaka i na kraju se generiraju u NC programe za izradu prototipova postupkom bilo rezanja ili RP postupcima.

14.3.1. Postupak mjerenja

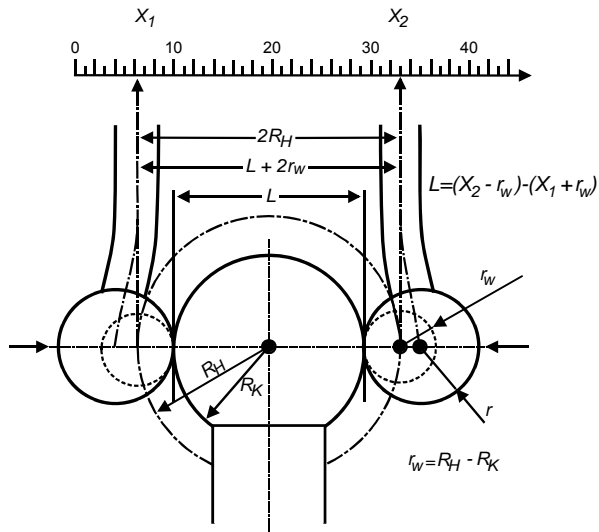


Slika 14.14. Mjerenje prečnika rupe

Mjerenje je određivanje položaja mjerene tačke. To se vrši kako je prikazano na slici 14.15. Na računanje vektora mjerne tačke utiču vektor položaja vrha pera, tj. kuglice kojim se dodiruju tačke na površini mjenog komada, zatim vektor signala i prenosna matrica. Položaj mjerne tačke direktno je zavisan od vektora položaja vrha pera, deformacije pera i Hertzovog pritiska pri kontaktu. Na uvećanim kontaktnim dodirnim površinama vide se dimenzije prečnika pera i prikazana je kompenzacija radijusa pera.

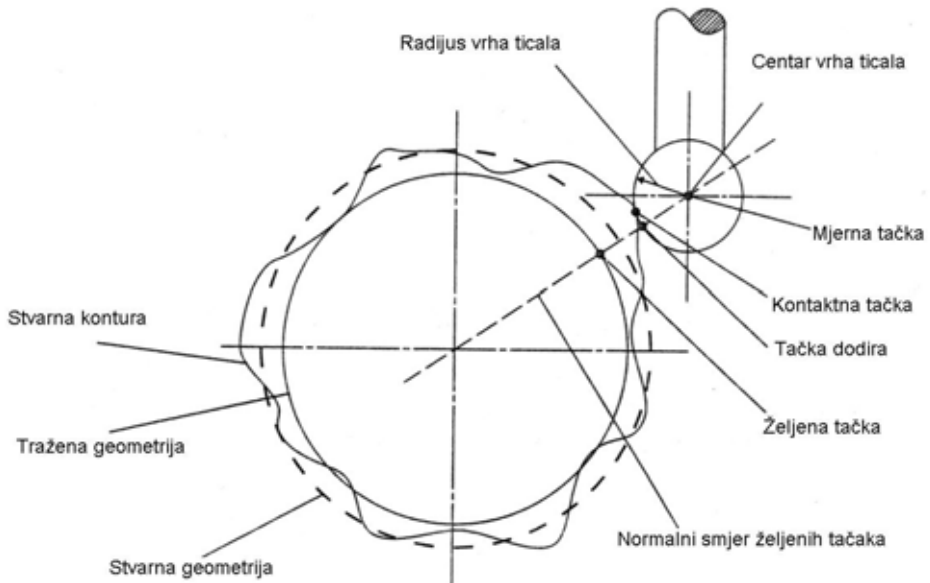


Slika 14.15. Mjerenje pomoću koordinatne mjerne mašine

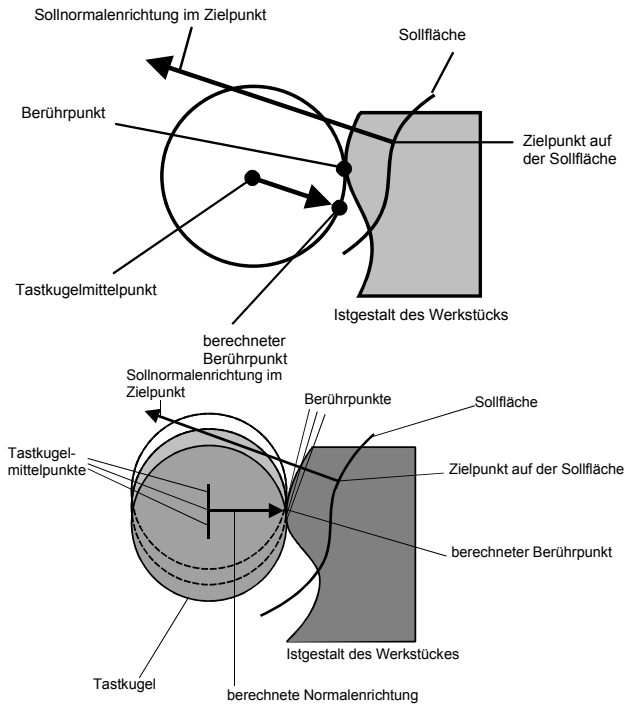


- Ermittlung bzw. Kompensation der Taststiftbiegung durch den wirksamen Taskugelradius.
- R_H , Ausgleichsradius
 - R_K , Radius Kugelnormal
 - r , Tastkugelradius
 - r_w , wirksamer Tastkugelradius
 - L , Werkstücklänge
 - X_1, X_2 ausgegebene Koordinaten der Antastpositionen

Slika 14.16. Kompenzacija savijanja pera preko radijusa kugle završetka pera



Slika 14.17. Definicije tačaka mjerenja



Slika 14.18. Položaj kugle mjerne probe na mjerenoj površini u jednoj i više tačaka

Prilikom mjerenja kugla pera mjerne probe dodiruje radni komad u svakoj tački. Na slici 14.18. prikazan je dodir kugle i stvarne površine radnog komada u jednoj i u više tačaka.

14.3.2. Mjerni rezultati

Samo prije par godina smatralo se da je dovoljno mjeriti geometrijske karakteristike sa samo nekoliko tačaka na površini radnog komada. Normala se određivala sa četiri do osam tačaka. Velike praznine u rezultatima su se prihvale. Koordinatna metrologija u to vrijeme nije bila spremna da pruži pouzdanu informaciju za proizvodni proces u razumnom vremenskom intervalu. Mjerenja dobivena sa malim brojem mjernih tačaka imaju značajne nedostatke.

Rezultati se mogu smatrati:

- pogrešnim, jer ne predstavljaju stvarnu geometriju radnog komada koja se ispituje na komadima u industriji,

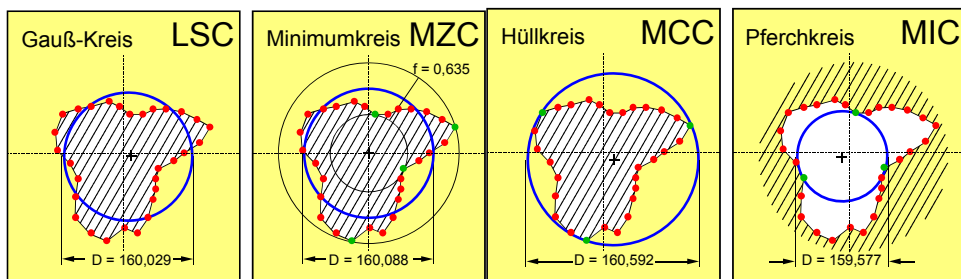
- za računanje pridruženih karakteristika koristi se Gausov metod (suma najmanjih kvadrata okomitih rastojanja svih mjerenih tačaka na površinama karakteristika) nije čak funkcionalno relevantna maksimalna upisana i minimalno opisana kružnica.

Danas se koriste tri metode:

Gauss-ova metoda koja najbolje smješta kružnicu u kriterij najmanja suma kvadrata grešaka. Primjenjuje se kao klasični metod. Može se koristiti i za samo nekoliko tačaka. Odgovara i za referentne sisteme i geometrijske karakteristike bez velikih grešaka oblika, (slika 14.19.a)

Minimalni opisani i maksimalni upisani krugovi je metoda koja računa minimalni prečnik tj. da nema tačaka unutar kruga i maksimalnog prečnika tako da nema tačaka izvan kruga. Dakle sve tačke leže u prostoru između minimalnog i maksimalnog prečnika. Ovaj postupak primjenjuje se za pridruživanje–uparivanje dimenzija. Funkcionalno orijentirano mjerenje odgovara specifikaciji datoj u crtežu ili uopšte u dokumentaciji. Ovo se može postići samo sa jako velikim brojem tačaka, (slika 14.19.b)

Chebisev-ljev metod računanja podataka određuje srednji prečnik prema kriteriju da bude najmanja radijalna razlika između koncentričnih krugova sa minimalnim i maksimalnim prečnikom. Odgovara standardima za određivanje devijacije oblika prema minimalnim uslovima. Zahtijeva veliki broj tačaka, (slika 14.19.c)



Slika 14.19. Grafički prikaz standardnih metoda za računanje podataka mjerenja

Rezultati mjerenja variraju ako tačke koje se dodiruju probom se izmještaju na površinu radnog komada sa prisutnim greškama. Tehnologije skeniranja danas dozvoljavaju da se "uhvati" više od 1000 tačaka u isto vrijeme, koje su se obično koristile za četiri mjerne tačke kako se to radilo u prošlosti.

Procedura skeniranja, za razliku od dodirivanja jedne tačke, provodi se duž cijele površine radnog komada. Sistem sonde koji se koristi prilikom skeniranja vodi se pomoću motora, a sonda je uvijek savijana i dodiruje određeno mjesto. Put koji opisuje sonda je definiran geometrijom i u slučaju velikih devijacija prilagođen ciljanom normalnom pravcu dok se dovoljno

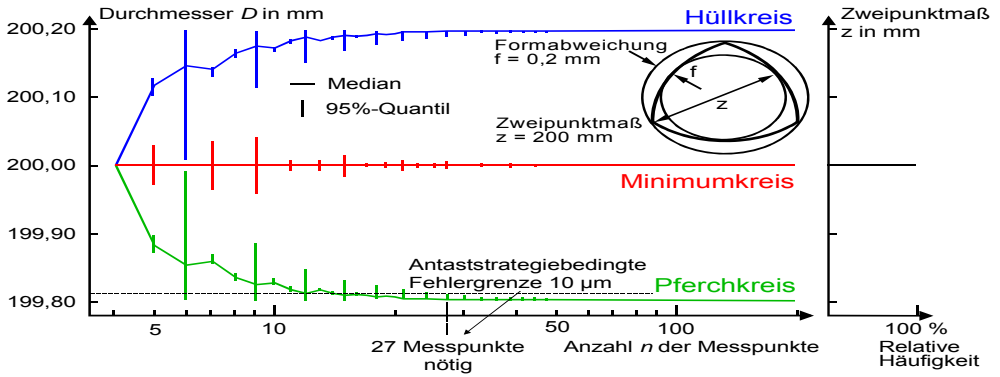
savijanje probe zadaje. Mjerne tačke se uzimaju ili zavisno od puta ili zavisno od vermena ako je procedura mjerenja dinamička. Skeniranjem geometrije elementa može se brzo i sa velikim brojem tačaka (nekoliko hiljada po elementu) vršiti skeniranje. Rezultati mjerenja su predmet dinamičkih uticaja koji dolaze od rezultata i drugih uticaja kao što je dinamička mašina ili frikcionni efekti. Za optimalnu primjenu skenirajuće tehnologije u postupku mjerenja moraju se ostvariti tri bitne stvari; obezbijediti pogon pokretanja vođica i objekat mjerenja, programiranje i kontrolu mjernih procedura i prikupljanje podataka i evaluaciju rezultata.

Zavisno od toga šta je sve obezbijeđeno kod mjerenja od ova tri uslova govori se o tri različita nivoa automatizacije koordinatnih mjernih mašina koje danas postoje. Za prvi slučaj mašine su ručno vođene, sa pokazivanjem pozicije individualnih osa. Za drugi slučaj su ručno vođene sa kompjuterskom podrškom prilikom dobivanja rezultata mjerenja. Treći slučaj su CNC koordinatne mjerne mašine.

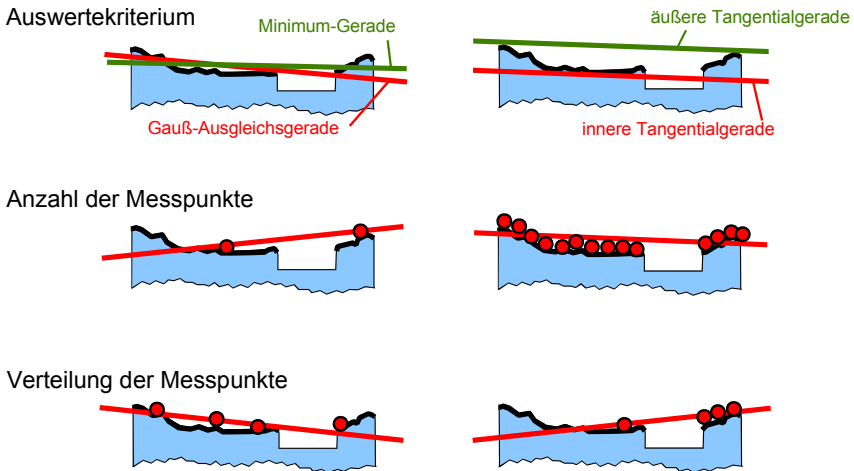
Zavisno od stečene fleksibilnosti koji je opći cilj u konkurentnoj proizvodnji i visokoj automatizaciji, sa mjernim i ispitnim sredstvima CNC kontrolira CMM što je slučaj kod potpune automatizacije procesa.

Softver koji se koristi u koordinatnoj metrologiji dijeli se na onaj za ocjenu i dobivanje podataka mjerenja koji se koriste u kontroli i planiranju i softver za komunikaciju sa eksternim sredstvima za prikupljanje podataka. Za ove namjene postoji niz programa, ali oni nisu univerzalni nego svaki sistem ima svoje software. Korištenjem programa za vršenje ispitivanja na koordinatnoj mjerneoj mašini reduciraju se operaciono složena ispitivanja geometrijskih osobina. Ručno programiranje softvera za CMM vrši se uz pomoć odgovarajućih programskih jezika kojima se kreiraju kontrolne procedure. Ovo je čest slučaj koji se koristi pri modifikaciji CNC programa mjerena i može se direktno primijeniti na kontrolni računar CMM. Automatsko programiranje omogućava kreiranje mjernog programa kroz automatsko pokretanje svih dijelova kretanja.

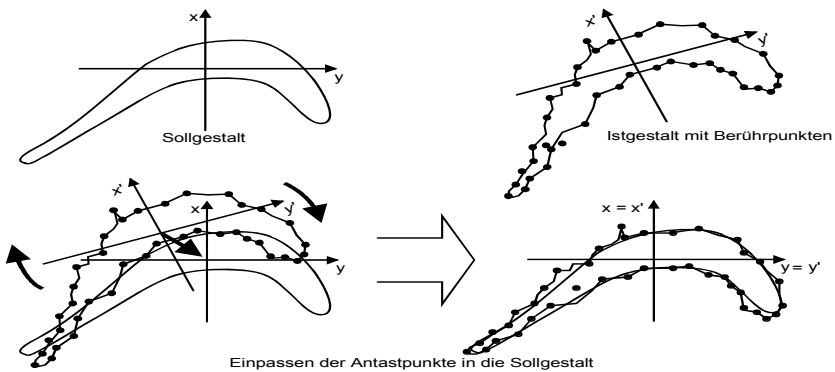
Programiranje izvan linije primjenjuje se na mašinama na odgovarajućim radnim stanicama bez mjernog sredstva.



Slika 14.20. Mjerenje i rezultati



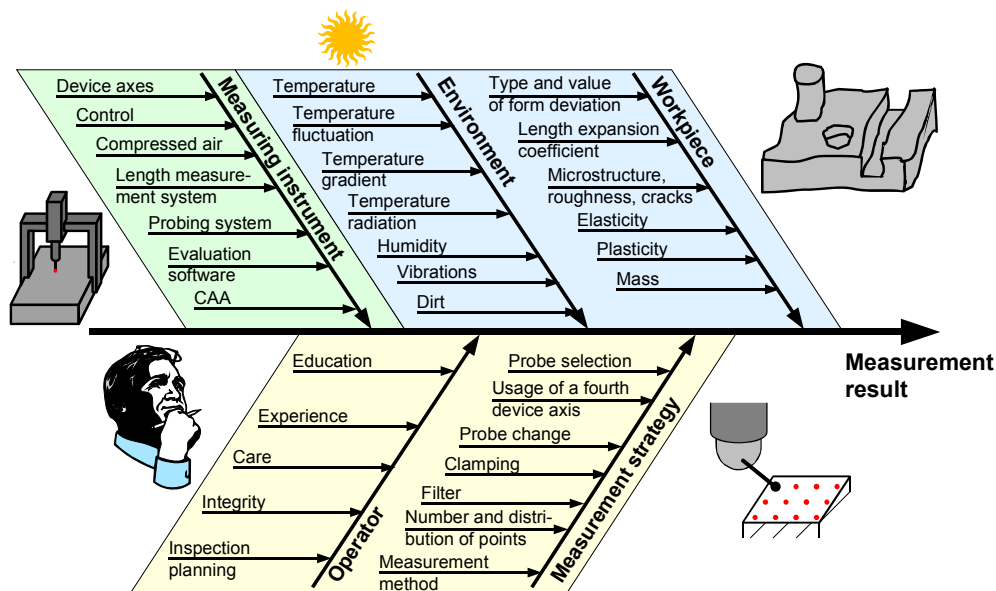
Slika 14.21.



Slika 14.22.

14.4. Mjerna nesigurnost

Na mjerenje pomoću koordinatne mjerne mašine uticaj imaju faktori koji su rezultat vanjskih promjenljivih ili konstantnih uslova i uticaji koji dolaze od same mjerne mašine. Vanjski uticaji su vrlo različiti i po uticaju i po veličini i zavise od toga gdje je CMM postavljena. Ukoliko su to pogonski uslovi sigurno je da će i uticaji biti značajniji u odnosu na one koji utiču na mjerenja koja se vrše u mjernoj sobi. Na slici 14.23 je dat prikaz uticaja za opći slučaj mjerenja.



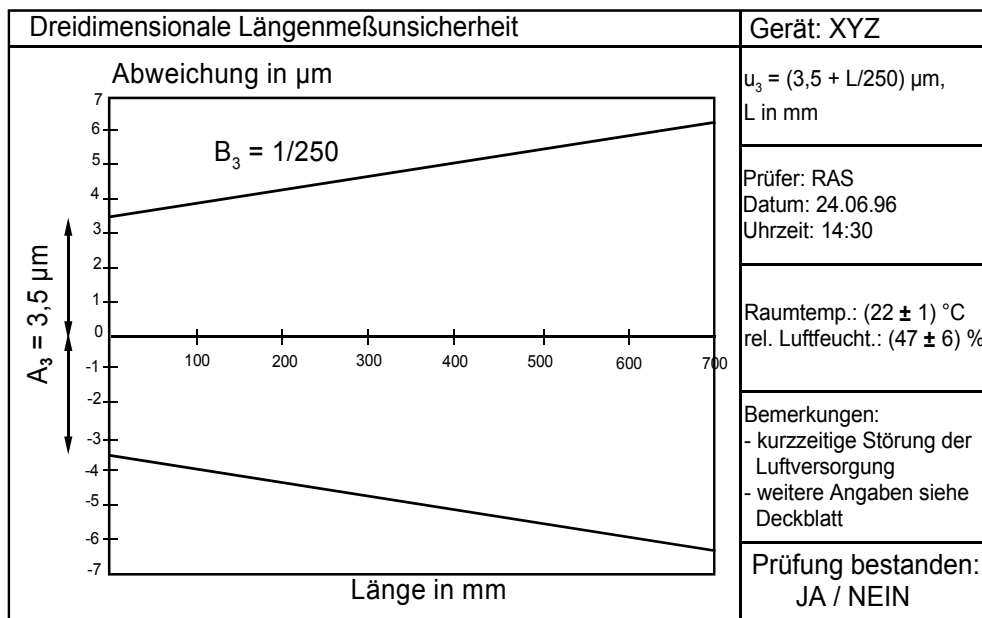
Slika 14.23. Uticaj različitih faktora na mjernu nesigurnost koordinatne mjerne mašine

Isto kao i kod klasičnih postupaka mjerenja, i kod mjerenja pomoću koordinatne mjerne mašine svaki rezultat mjerenja u sebi sadrži i mjernu nesigurnost. U koordinatnoj metrologiji nije moguće zbog određenih razloga specificirati sve uticaje na mjernu nesigurnost za svaku vrstu mjerenja. To je nemoguće zbog sljedećih razloga:

- za razliku od mjernih sredstava koja se koriste svako za određenu namjenu, koordinatne mjerne mašine mogu da mjere sve geometrijske karakteristike radnog komada,
- rezultati koji se dobiju korištenjem mjerne mašine su određeni ocjenom mnogih mjernih tačaka na površini radnog komada,

- radni komad se može mjeriti primjenom različitih strategija mjerenja i na različitim mjestima u radnom opsegu mjerne mašine,
- na skupljanje podataka utiče i referentni koordinatni sistem.

Zbog navedenih razloga nije standardizirana mjerna nesigurnost koordinatnih mjernih mašina. Standardima ISO 10360 je određena maksimalna dozvoljena greška za jasno definiran mjerni zadatak. Ove vrijednosti se zovu MPE (maximal permissible error). Ovo, naravno, ne treba shvatiti kao klasičnu grešku nego devijaciju koja je sasvim prihvatljiva. Na slici 14.24. je dat primjer dozvoljene greške dužine prema standardu ISO 10360-2, koja se tumači kao:



Slika 14.24. Primjer dozvoljene greške MPE_E

Maksimalna dozvoljena greška je:

$$MPE_E = \pm(A + L/K),$$

gdje su:

K – konstanta koju daje proizvođač,

L – dužina (mm).

Za podatke da je $K=350$, a $L=800$ mm, imamo: $MPE_E = \pm 3,7 \mu\text{m}$.

Ovo se može primijeniti na sva 3D mjerenja u okviru mjernog područja. Sve vrijednosti greške moraju ležati unutar dozvoljene granice. Internacionalni standardi su jasniji nego VDI/VDE priručnik 2617. Dio 2.1 kaže da 95% svih

vrijednosti dobivenih pod sličnim uslovima moraju biti unutar maksimalne dozvoljene greške.

Drugi parametar koji se razmatra kod mjerne nesigurnosti je greška probe. Greška koja je rezultat probe je predmet različitih definicija prema DIN EN ISO 10360–2 ili prema VDI/VDE 2617–3. Može se uticaj greške probe prikazati na pojednostavljen način. U tom cilju treba dodirnuti 25 mjernih tačaka ravnomjerno raspoređenih po polulopti referentne sfere. MPE_P predstavlja rang svih radijalnih razdaljina za računatu sferu prema Gausovom metodu najboljeg poklapanja.

Drugi međunarodni standardi uključuju i uticaje kao što su pokretne vođice i rotirajući stolovi, višestruki sistem proba, izmjene pera i proba i druge uticaje.

14.4.1. Kako ocijeniti mjernu nesigurnost?

Prethodno specificirane greške dužine i greške probe uključene su u proizvođačku specifikaciju i dozvoljavaju dovoljno pouzdanu ocjenu mjernih nesigurnosti koje se očekuju. To se može primijeniti kako na djelimična tj. pojedinačna mjerenja tako i na kontinuirana skenirajuća mjerenja. Postoji nekoliko načina za ocjenu mjerne nesigurnosti koordinatnih mjernih mašina kao što je:

- poređenje sa kalibrom,
- metod superpozicije i
- matematička simulacija.

Poređenje sa kalibriranim radnim standardom po karakteristikama jednakim ili sličnim sa objektom koji se ispituje. Za računanje mjerne nesigurnosti koriste se statističke metode na bazi ponovljenih mjerenja pod postojećim uslovima okoline.

U proceduri mjerenja srednje vrijednosti rezultata dobivene su ponavljanjem mjerenja na radnim standardima i poređenja sa kalibriranim dimenzijama. Razlika se koristi za korekciju podataka dobivenih za mjereni objekat. Ovaj postupak se zove **metod supstitucije** ili metod poređenja. On pomaže da se jasno reduciraju mjerne nesigurnosti i prihvaćen je za privremeno provjeravanje mjerila. Često se na ovaj način može mjeriti automatski u toku. Za CMM u proizvodnji i nadzoru koriste se kalibri ili mjerna sredstva sa istim dizajnom kao što je radni komad.

Za ocjenu mjerne nesigurnosti može se napraviti **matematička simulacija** mjernih grešaka nastalih zbog koordinatne mjerne mašine ili uslova okoliša. Ova procedura vodi ka porastu važnosti univerzalnog korištenja mjernih

mašina bez obzira na primjenu. Neki proizvođači mjernih mašina rade na primjeni ovog metoda. U kritičnim uslovima očekuje se da mjerna nesigurnost bude određena u obliku matematičke ocjene uticaja greške u skladu sa GUM-om.

14.4.2. Temperatura i mjerna nesigurnost

Sa porastom trenda korištenja CMM-a mnogo je važnija uloga uticaja temperature: postoje razlike između stvarne i standardne referentne temperature. Referentna temperatura od 20°C je internacionalni standard pri mjerenju dužine. Rezultati dobiveni na drugim temperaturama se koriguju spram onih dobivenih na referentnoj. Ova operacija izvršava se softverski na osnovu temperature radnog komada. U nekim CMM temperaturni senzor umjesto pera je u kontaktu automatski sa radnim komadom prije svakog mjerenja.

Uticaj temperature može biti visoko složen, ali omogućava temperature dovoljno stabilne koje zadovoljavaju u praksi za slijedeće efekte:

- Linearna ekspanzija skala CMM,
- Linearna ekspanzija radnog komada.

Obje ekspanzije se mogu suprotstavljati jedna drugoj u radnim komadima. Iz tog razloga čelične skale su idealne za mjerenje čeličnih radnih komada. Ako je radni komad od plastike ili aluminijuma, a mjerenje se vrši čeličnim skalama mjerenje će biti netačno ukoliko se ne izvrši kompenzacija različitih ekspanzija. Neke CMM imaju takve inherentne osobine da je nemoguće izvršiti kompenzaciju.

14.4.3. Termički stabilne CMM

Različite i tačne metode mjerenja različitih materijala i na visokim temperaturama eliminiraju sve uticaje na radni komad. To znači da uprkos temperaturi mjerne mašine uvijek daju manje ili više iste rezultate ako je uključen uticaj mjernog objekta. Na osnovu mjerenja u klimatiziranim prostorima došlo se do ovog zaključka. Mjerne devijacije odnose se samo na termički nestabilne CMM. termička stabilnost može se postići na slijedeći način:

- Uvođenjem skala sa ekstremno niskim temperaturnim koeficijentima širenja od npr. $0,05 \times 10^{-6}$
- Vođice izrađene od keramike sa dobrim termičkim karakteristikama
- Reduciranje savijanja uvođenjem osnove od granita

- Tijela vođica od aluminijuma koji ograničava savijanje zbog visoke termičke provodljivosti tzv. CARAT tehnologija
- Termička izolacija
- Korekcije skala i ulazne konstrukcije vođica.

Kombinacijom različitih nabrojanih mjera dobije se dozvoljena devijacija dužine. Važno je istaknuti da se uvijek vrši termalna kompenzacija širenja radnog komada.

14.5. Primjena koordinatne metrologije

Integracijom CMM u proizvodno okruženje može se ostvariti optimiranje veze koordinatne metrologije sa preliminarnim područjima razvoja proizvoda i planiranja rada.

Koordinatna mjerna mašina ima hardverski i softverski dio. Hardver obuhvata sistem proba, rotaciono pomični sto i razne dodatke. Softverski dio ima osnovni sistem, specijalni sistem i vezu sa CAD/CAM sistemima.

Mjerenja se mogu podijeliti na ona koja se vrše u ispitnoj laboratoriji za precizna mjerenja u kojoj se smješta precizna koordinatna mjerna mašina. Druga vrsta mjerenja se obavlja u radionici i sva mjerna sredstva su u radionici.

Koordinatna metrologija može biti: proizvodna mjerna ćelija, fleksibilni mjerni sistem ili mjerni sistem unutar proizvodne linije. U prva dva nabrojana slučaja radi se o zatvorenim mjernim sredstvima dok mjerna sredstva na mjernoj liniji uključuju i robote.

Prvobitno su mjerne mašine bile namijenjene za korištenje u mjernim sobama. Primjena CMM-a se kasnije proširila i na modernu računarski kontrolisanu proizvodnu opremu. Zbog fleksibilnosti i univerzalnosti principa koordinatne metrologije mogu se izvršavati različiti zadaci uz proširenje sa dodatnom opremom.

Precizna mjerenja se izvode u mjernim sobama zbog čega su to mjerenja sa najmanjom mjernom nesigurnošću. Mjerne sobe su posebno opremljene prostorije koje su građene tako da imaju što manje vibracija, imaju klimatiziran i izuzetno čist ambijent. Ukoliko se mašine koriste za raznovrsna mjerenja tada imaju dodatne mahanizme za izmjenu proba, i druga sredstava, što sve onemogućava potpunu automatizaciju. Ukoliko se pak kontrola vodi kroz CNC proces proizvodnje postiže se visoka fleksibilnost.

Za primjenu u radionicama koriste se brze i ekonomične CMM. Obično su to mehaničke koordinatne mašine, izdržljive i neosjetljive na uslove okoline.

U visokoautomatiziranoj proizvodnji kao što su proizvodne ćelije i proizvodni sistemi, CMM su direktno integrirane u sistem. Sa takvim sistemima funkcija CMM povezana je sa tokom materijala i informacija tako da omogućava automatsko pokretanje CMM kao i mjerenja za proizvodne namjene. Softver koordinatnih mjernih mašina čine programi univerzalne namjene, pri čemu se isti mogu dograditi specijalnim za standardne elemente kao što su zupčanici, bregaste osovine, rezni alati itd.

14.5.1. Ekonomska isplativost CMM

Koordinatna metrologija koja uključuje CMM ne predstavlja samo sistem za rješavanje zadataka mjerenja. Ona se uvijek koristi kada se mjeri ili provjerava 3D geometrija radnog komada. Korištenje koordinatnih mjernih mašina je značajno i kada broj karakteristika komada raste i kada treba postići malu mjernu nesigurnost mjernih rezultata. Ekonomska primjena rezultata koordinatne metrologije ne koristi samo za provjeru kvaliteta nego služi za kontinuiranu proizvodnju i izvođenje procesa u zatvorenoj sprezi.

U poređenju sa klasičnim postupcima prednost CMM je u činjenici da se mjerenja praktično mogu izvesti gotovo automatizirano. U klasičnim postupcima koristi se niz različitih mjernih sredstava za gotovo svaku funkciju mjerenja. To opet povlači i dobro planiranje i iskustvo izvršioca u izboru mjernih sredstava.

Sva konvencionalna mjerenja zahtijevaju vrijeme, različita mjerna sredstva iskusne izvršioce. To na kraju rezultira i troškovima, koji postaju sastavni dio cijene proizvoda. Zbog toga koordinatna metrologija ima prednosti u odnosu na klasični pristup mjerenju i kontroli.

14.5.2. Standardi u koordinatnoj metrologiji

Internacionalni standardi su već zastupljeni u koordinatnoj metrologiji bez obzira što je to relativno novo područje.

ISO (International Standard Organization) ima već standarde za različita područja u koordinatnoj metrologiji.

- Mašine i njihove karakteristike date su standardom ISO 10360 dio 1-6.
- ISO 14253, dio 1-4 definira pravila za dokazivanje potvrđivanja ili ne potvrđivanja sa specifikacijama i omogućava informacije u vezi procjene mjerne nesigurnosti i ocjene njenog integriteta.


- Serija ISO 15530 standarda namjerava da podrži korisnika u određivanju nesigurnosti koordinatnih mjernih mašina. To propisuje raznim tehnikama kao što su metod supstitucije i metod simulacije.
- ISO 5459 odnosi se na referentne sisteme za geometrijske tolerancije i on će se doraditi
- ISO 12181 (okruglost)

15. LITERATURA

- [1] N. Zaimović-Uzunović, Mjerna tehnika, Mašinski fakultet u Zenici 1997, ISBN 9958-617-00-5
- [2] D. Ješić, Merna tehnika, Mašinski fakultet Banja Luka, 2004, ISBN 99938-39-06-X
- [3] T. Pfeifer, Production Metrology, RWTH Aachen, 2002, ISBN 3-486-25885-0
- [4] N. Zaimović-Uzunović, Mjeriteljska infrastruktura, Mašinski fakultet u Zenici 2003, ISBN 9958-617-16-1
- [5] T. Beckwith, R.D. Marangoni: Mechanical Measurements, Adison-Wesley, ISBN 0-201-56947-7
- [6] J.A. Bosch: Coordinate Measuring Machines, Marcel Dekker, ISBN 0824795814
- [7] Dunn, Patrick F.: Measurement and Data Analysis for Engineering and Science, ISBN: 0072825383
- [8] Francis T., Farago, M.A. Curtis: Handbook of Dimensional Measurement, ISBN 0831130539
- [9] C.W. Kennedy, E.G. Hoffman, S.D. Bond: Inspection and Gaging, ISBN: 0831111496
- [10] R.H. Harlow, Jr.; C. Dotson; R. Thompson: Fundamentals of Dimensional Metrology, ISBN: 0766820718

w u s a u s t r i a
right to education
COURSE DEVELOPMENT PROGRAM +

financed by

Austrian
 Development Cooperation