

Biserka Runje
Gorana Baršić
Vedran Šimunović

**Praktikum za laboratorijske
vježbe iz kolegija
Teorija i tehnika mjerenja**

Zagreb, 2014.

PREDGOVOR

U terminu praktikuma studenti trebaju provesti mjerenja i obraditi rezultate. Tijekom laboratorijskih vježbi laborant i asistent pomažu studentima i razgovaraju o metodama koje se koriste te o rezultatima i mjernoj nesigurnosti rezultata mjerenja. Asistent, na kraju semestra, organizira kolokviranje vježbi, a ocjenjuje ih na temelju rada u praktikumu, pokazanog razumijevanja i izvješća. Student koji iz opravdanog razloga izostane s vježbe treba istu nadoknaditi u posebnom terminu na kraju semestra. Moguće je nadoknaditi najviše dvije vježbe. Ocjena iz laboratorijskih vježbi čini 50 % konačne ocjene iz kolegija.

SADRŽAJ

1. Umjeravanje pomičnog mjerila
2. Umjeravanje mikrometra
3. Mjerenje kuta
4. Utvrđivanje linearne pogreške pupitaste mjerne ure
5. Utvrđivanje pogreške dvokoordinatnog mjernog uređaja
6. Mjerenje odstupanja od kružnosti
7. Mjerenje odstupanja od ravnosti površine
8. Mjerenje hrapavosti tehničkih površina
9. Analiza rezultata mjerenja sukladno normi ISO 5725
10. Analiza mjernog sustava
11. Mjerna nesigurnost

Literatura

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Umjeravanje pomičnog mjerila

Prezime i ime studenta:

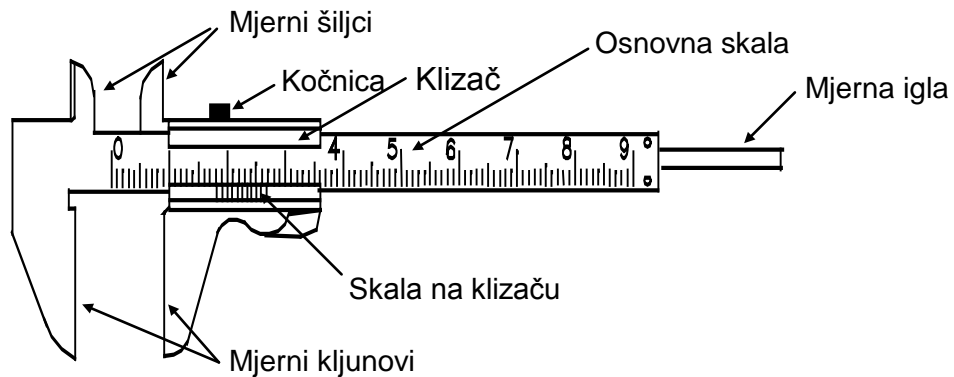
Matični broj:

Datum:

Pregledao:

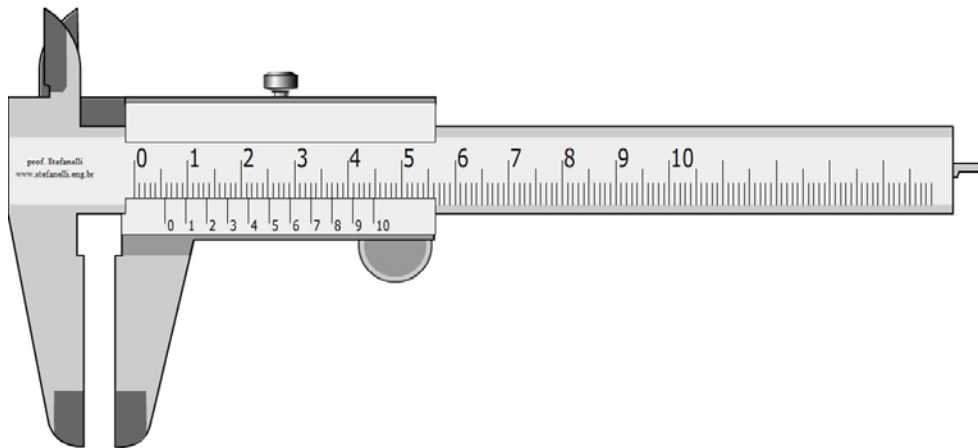
Ocjena vježbe:

Svrha ove vježbe je razrada postupka mjerenja funkcionalnih i dimenzionalnih značajki pomičnih mjerila tipa 1A i 2A prema DIN 862 (slika 1).

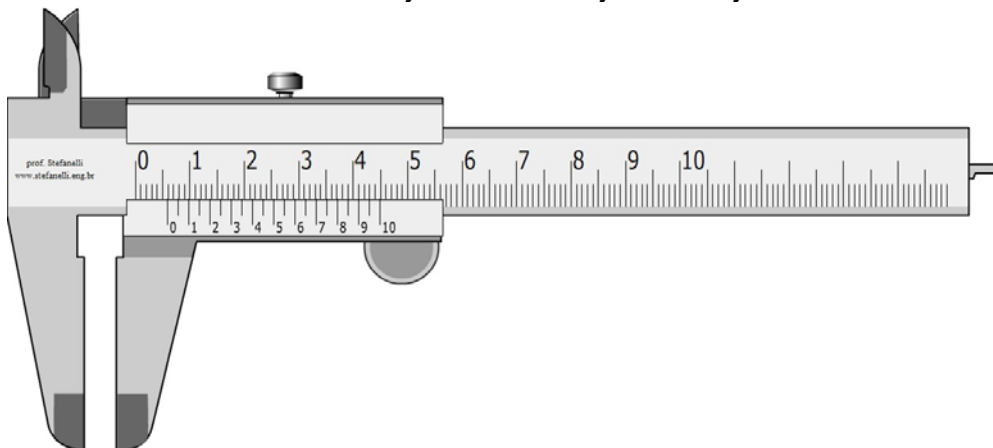


Slika 1. Klasično pomično mjerilo.

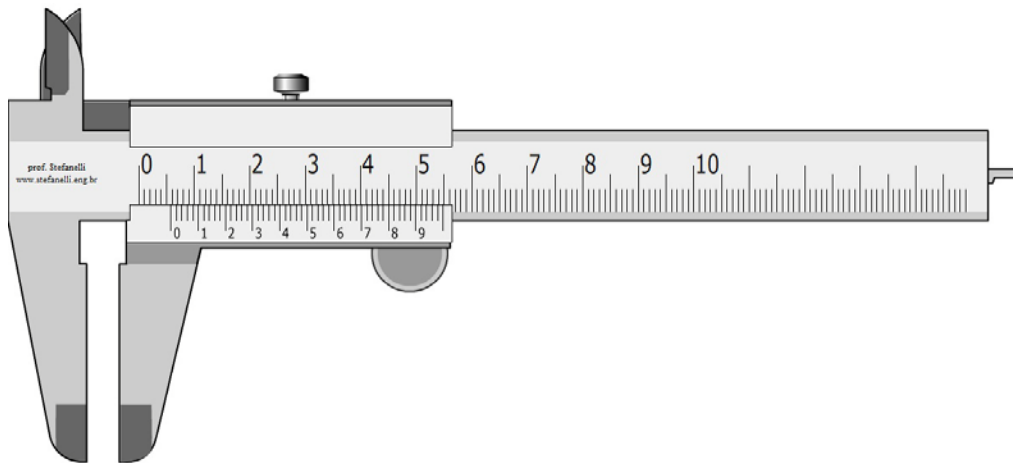
Klasična pomična mjerila mogu imati jednu od tri rezolucije očitavanja (0,1 mm; 0,05 mm ili 0,02 mm), s obzirom na podjelu skale na klizaču mjerila. Digitalna pomična mjerila imaju rezoluciju očitavanja 0,01 mm. Na slikama 2. do 4. prikazana su pomična mjerila s različitim rezolucijama očitavanja.



Slika 2. Pomično mjerilo s rezolucijom očitavanja 0,1 mm

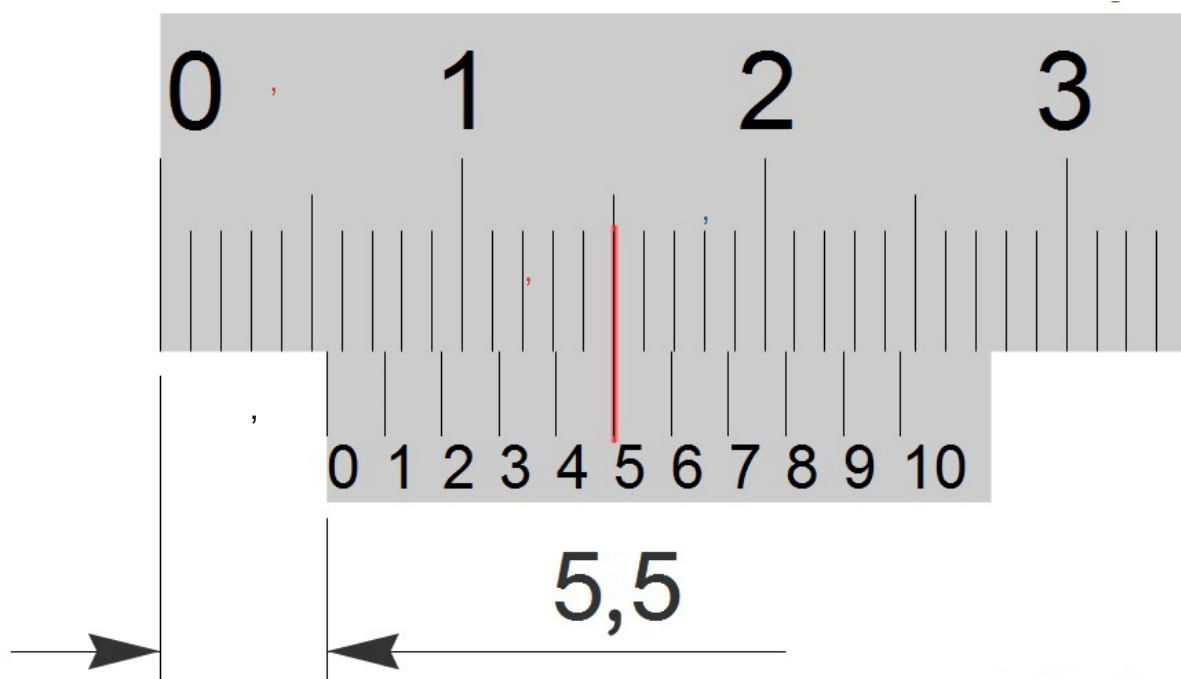


Slika 3. Pomično mjerilo s rezolucijom očitavanja 0,05 mm

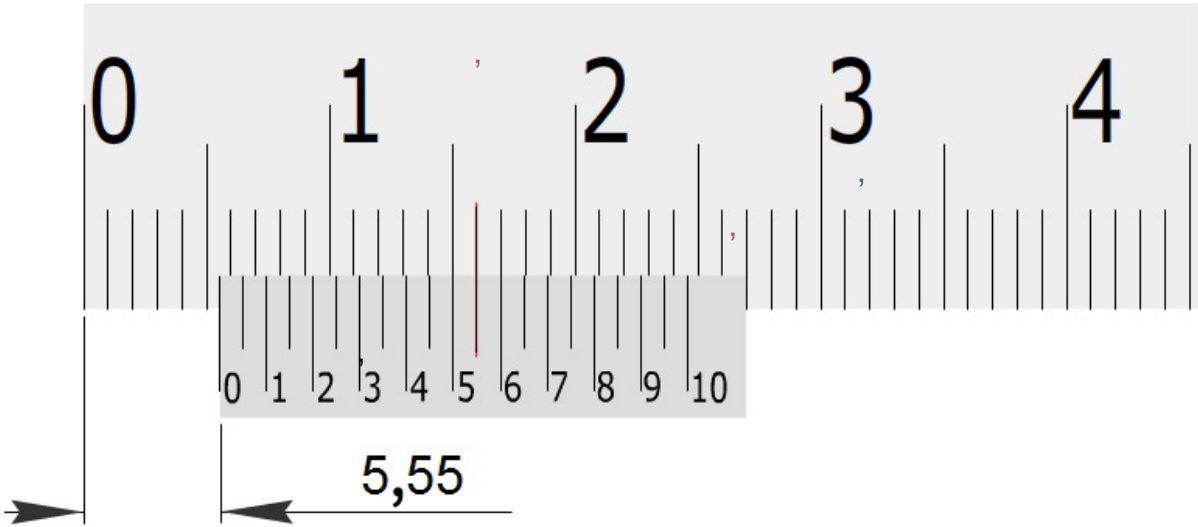


Slika 4. Pomično mjerilo s rezolucijom očitavanja 0,025 mm

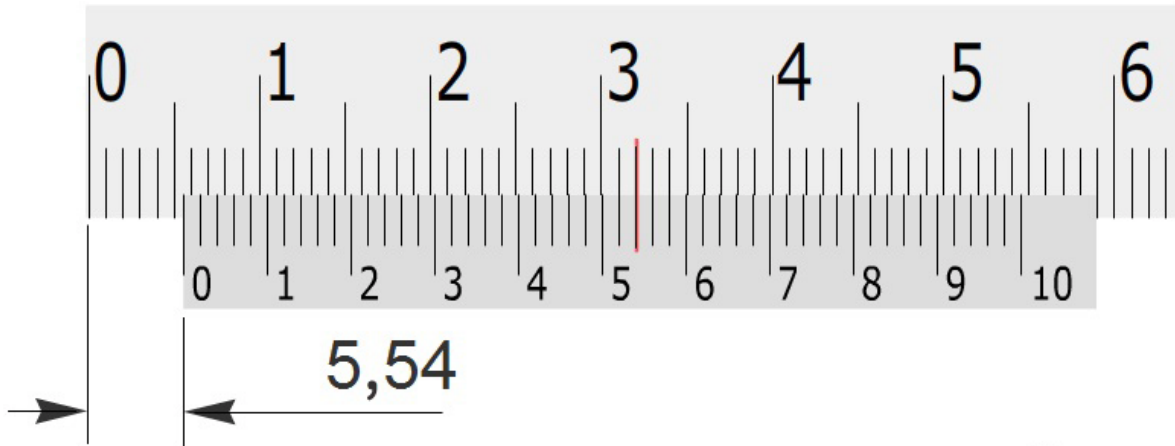
Na slikama 5. do 7. prikazan je način određivanja očitavanja na klasičnim pomičnim mjerilima različitih rezolucija.



Slika 5. Prikaz očitavanja na klasičnom pomičnom mjerilu rezolucije 0,1 mm



Slika 6. Prikaz očitavanja na klasičnom pomičnom mjerilu rezolucije 0,05 mm



Slika 7. Prikaz očitavanja na klasičnom pomičnom mjerilu rezolucije 0,02 mm

1 PRETHODNA ISPITIVANJA

Prethodnim ispitivanjima provjeravaju se funkcionalne značajke pomičnog mjerila.

- 1.1 Provjeriti stanje mjernih površina (korozija, oštećenja, istrošenost i dr.).
- 1.2 Provjeriti stanje mjernih skala (sve linije skala su dobro uočljive).
- 1.3 Provjeriti funkcionalnost kočnice.
- 1.4 Provjeriti ravnomjernost klizanja klizača.

Rezultate ispitivanja prema točkama upisati u Tablicu 1.

Tablica 1. Rezultati prethodnih ispitivanja pomičnog mjerila

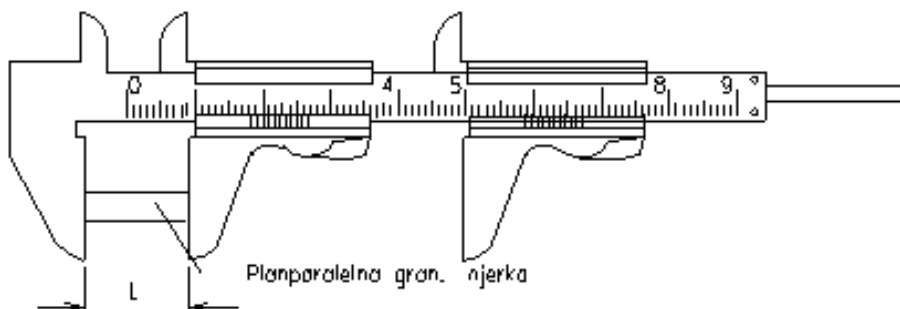
Red. br.	Ispitivani zahtjev	Rezultat	
		da	ne
1.1	Mjerne površine neoštećene	da	ne
1.2	Mjerne skale (linije i brojke) su dobro uočljive	da	ne
1.3	Kočnica ispravno funkcionira	da	ne
1.4	Klizač klizi ravnomjerno	da	ne

Napomena: U slučaju da pomično mjerilo ne zadovoljava zahtjeve iz točke 1, utvrđivanje značajki mjerila opisanih u narednim točkama se ne provodi.

2 UTVRĐIVANJE MJERNE POGREŠKE

2.1 Utvrđivanje mjerne pogreške za vanjska mjerenja

- 2.1.1 Utvrđivanje mjerne pogreške za vanjska mjerenja provesti primjenom planparalelnih graničnih mjerki, (slika 8).



Slika 8. Utvrđivanje mjerne pogreške

- 2.2.2 Mjerna pogreška je razlika izmjerene vrijednosti i nazivne vrijednosti planparalelne granične mjerke.
- 2.2.3 Utvrđivanje mjerne pogreške treba izvoditi na mjernim mjestima danim u Tablici 2.

Tablica 2. Rezultati ispitivanja mjerne pogreške Vrijednosti u mm

Nazivna vrijednost	Odstupanje	Dopušteno odstupanje
0		
30		
70		
100		
150		

Napomena: Mjerna mjesta iz tablice 2 koriste se za utvrđivanje mjerne pogreške pomičnog mjerila mjernog područja (0-150) mm.

2.2 Utvrđivanje mjerne pogreške za unutarnja mjerenja.

2.2.1 Za utvrđivanje mjerne pogreške pri unutarnjim mjerenjima izvršiti mjerenje promjera kontrolnog prstena.

2.2.2 Utvrđena razlika izmjerene i referentne vrijednosti je mjerna pogreška. Rezultat mjerenja upisati u Tablicu 3.

2.3 Utvrđivanje mjerne pogreške pri korištenju mjerne igle.

2.3.1 Utvrđivanje mjerne pogreške pri korištenju mjerne igle provesti primjenom planparalelne granične mjerke.

2.3.2 Mjerenje provesti u jednom položaju klizača (poželjno u području od 100 mm do 150 mm). Rezultat mjerenja upisati u Tablicu 3.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja mjerne pogreške Vrijednosti u mm

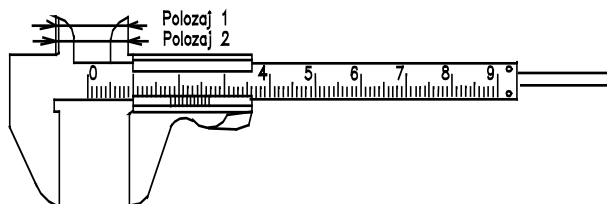
Unutarnja mjerenja			Mjerna igla		
Nazivna vrijednost	Odstupanje	Dopušteno odstupanje	Nazivna vrijednost	Odstupanje	Dopušteno odstupanje

3 MJERENJE NEPARALELNOSTI MJERNIH POVRŠINA

3.1 Neparalelnost mjernih površina za unutarnja mjerenja

3.1.1 Utvrđivanje neparalelnosti mjernih površina za unutarnja mjerenja provesti mjerenjem promjera kontrolnog prstena.

3.1.2 Mjerenje izvršiti na dva mjesta uzduž mjernih površina, a neparalelnost izraziti kao razliku dobivenih rezultata mjerenja, (slika 9). Rezultat mjerenja upisati u Tablicu 4.

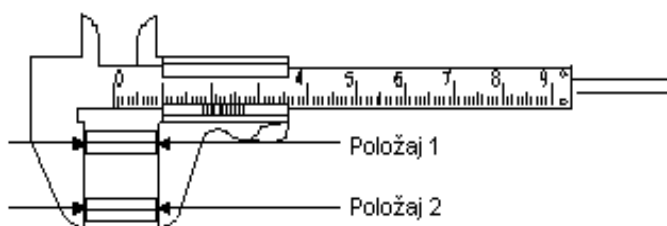


Slika 9. Mjerenje neparalelnosti površina za unutarnja mjerenja

3.2 Neparalelnost mjernih površina za vanjska mjerenja

3.2.1 Utvrđivanje neparalelnosti mjernih površina za vanjska mjerenja utvrditi mjerenjem udaljenosti mjernih površina (vrh, korijen kljunova) primjenom planparalelne granične mjerke.

3.2.2 Mjerenje izvršiti na dva mjesta uzduž mjernih površina, a neparalelnost izraziti kao razliku dobivenih rezultata mjerenja, (slika 10). Rezultat mjerenja upisati u Tablicu 4.



Slika 10. Mjerenje neparalelnosti površina za unutarnja mjerenja

Tablica 4. Rezultati ispitivanja neparalelnosti mjernih površina

Vrijednosti u mm

Neparalelnost unutarnjih površina				Neparalelnost vanjskih površina			
Položaj	Rezultat mjerenja	Razlika	Dopušteno odstupanje	Položaj	Rezultat mjerenja	Razlika	Dopušteno odstupanje
1				1			
2				2			

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Umjeravanje mikrometra

Prezime i ime studenta:

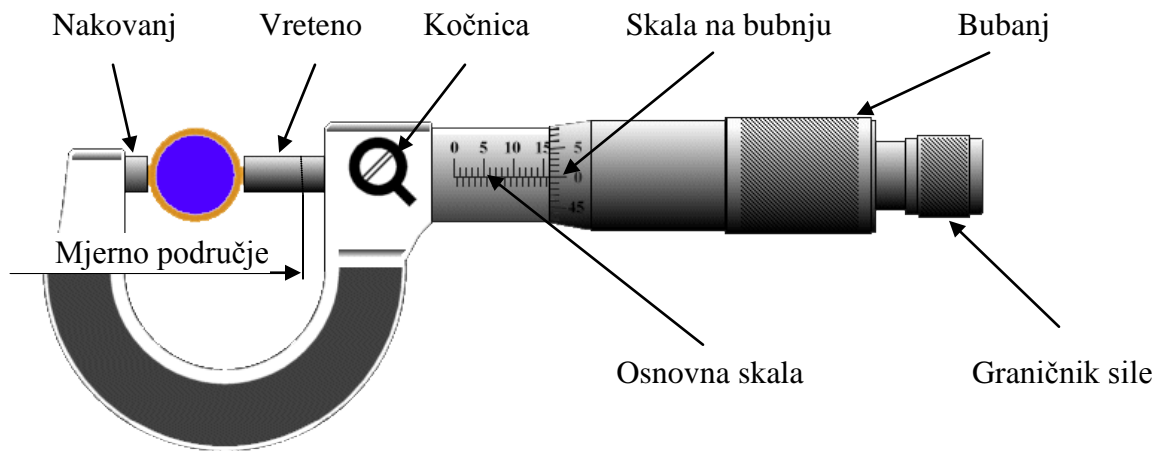
Matični broj:

Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

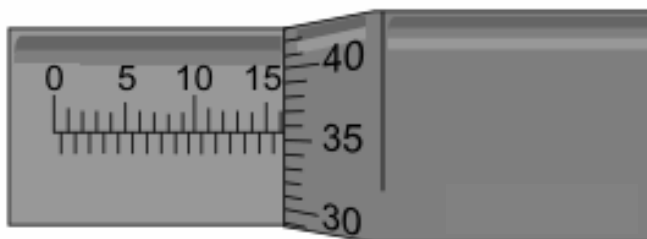
Svrha ove vježbe je razrada postupka mjerenja funkcionalnih i dimenzionalnih značajki mikrometara za vanjska mjerenja sa ravnim mjernim površinama prema DIN 863 (slika 1).



Slika 1. Mikrometar za vanjska mjerenja sa ravnim mjernim površinama

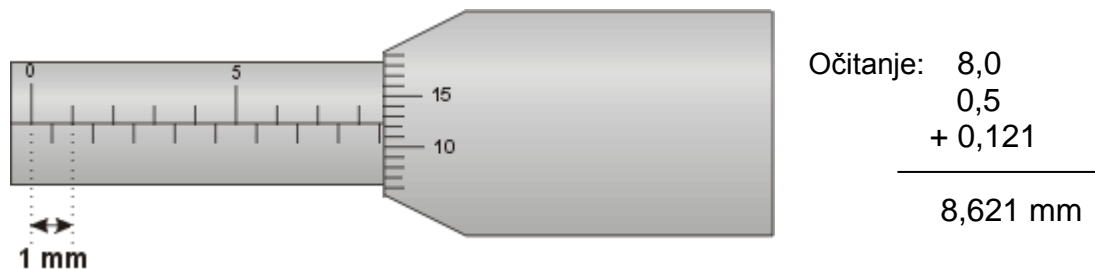
Klasični mikrometar ima rezoluciju očitavanja 0,01 mm, a treće decimalno mjesto se procjenjuje. Digitalni mikrometri imaju rezoluciju očitavanja 0,001 mm.

Na slikama 2. i 3. prikazan je način određivanja očitavanja na klasičnom mikrometru.



$$\begin{array}{r} \text{Očitanje: } 16,0 \\ + 0,355 \\ \hline 16,355 \text{ mm} \end{array}$$

Slika 2. Prikaz očitavanja na klasičnom mikrometru



Slika 3. Prikaz očitavanja na klasičnom mikrometru

1 PRETHODNA ISPITIVANJA

- 1.1 Provjeriti stanje mjernih površina (korozija, oštećenja, istrošenost i dr.).
- 1.2 Provjeriti stanje mjernih skala (sve linije skala su dobro uočljive).
- 1.3 Provjeriti funkcionalnost kočnice.
- 1.4 Provjeriti ravnomjernost okretanja vretena duž cijelog mjernog područja.
- 1.5 Podesiti mikrometar na 0.

Rezultate ispitivanja prema točkama upisati u Tablicu 1.

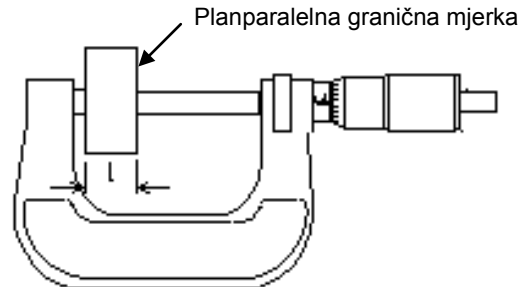
Tablica 1. Rezultati prethodnih ispitivanja mikrometra

Br.	ISPITIVANI ZAHITJEV	REZULTAT	
		da	ne
1.1	Mjerne površine neoštećene	da	ne
1.2	Mjerne skale (linije i brojke) su dobro uočljive	da	ne
1.3	Kočnica ispravno funkcionira	da	ne
1.4	Vreteno se ravnomjerno okreće duž cijelog mjernog područja	da	ne

Napomena: U slučaju da mikrometar ne zadovoljava zahtjeve iz točke 1, utvrđivanje značajki mjerila opisanih u narednim točkama se ne provodi.

2 UTVRĐIVANJE MJERNE POGREŠKE

- 2.1 Utvrđivanje mjerne pogreške mikrometra provesti primjenom planparalelnih graničnih mjerki, (slika 4).



Slika 4. Utvrđivanje mjerne pogreške

- 2.2 Razlika izmjerene vrijednosti planparalelne granične mjerke i nazivne vrijednosti je mjerna pogreška mikrometra u određenoj točki.
- 2.3 Utvrđivanje mjerne pogreške provesti u raznim točkama (najmanje 9) mjernog područja mikrometra. Preporučuje se primjena graničnih mjerki (kombinacija graničnih mjerki) slijedećih dužina:
- (A; A+2,5; A+5,1; A+7,7; A+10,3; A+12,9; A+15,0; A+17,6; A+20,2; A+22,8 i A+25) mm
- (A - donja granica mjernog područja mikrometra).
- 2.4 Mjerenje u svakoj točki ponoviti po dva puta, te izračunati pripadne aritmetičke sredine.
- 2.5 Utvrđene iznose mjernih pogrešaka, upisati u Tablicu 2.
- 2.6 Vrijednost f_{maks} računati kao raspon vrijednosti mjernih pogrešaka, te izračunat iznos upisati u Tablicu 2.

Tablica 2. Rezultati ispitivanja mjerne pogreške

MJERNA POGREŠKA					
Referentna vrijednost mm	Odstupanje μm			f_{maks} μm	
	1	2	Sr.vr.	Izmjer.	Dop.odst.
A =					
A + 2,5					
A + 5,1					
A + 7,7					
A + 10,3					
A + 12,9					
A + 15,0					
A + 17,6					
A + 20,2					
A + 22,8					
A + 25,0					

3 MJERENJE Odstupanja od ravnosti mjernih površina

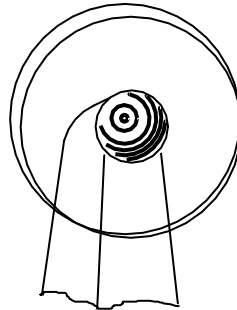
3.1 Mjerenje odstupanja od ravnosti mjernih površina provesti primjenom kontrolnog stakla, (slika 5).

Primjer na slici:

-Broj interferencijskih kolobara (pruga)

$$k = 5$$

-Neravnost = $k \times 0,3 = 1,5 \mu\text{m}$



Slika 5. Mjerenje neravnosti mjernih površina

3.2 Očitati broj interferencijskih pruga na mjernoj površini nakovnja, odnosno mjernoj površini vretena .

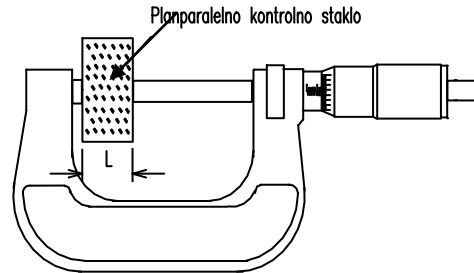
3.3 Utvrđeni broj interferencijskih pruga za mjernu površinu nakovnja, odnosno mjernu površinu vretena pomnožiti sa $0,3 \mu\text{m}$, te iznos upisati u tablicu 3 i usporediti s dopuštenim odstupanjem od ravnoće.

Tablica 3. Rezultati mjerenja odstupanja od ravnosti mjernih površina

Mjerna površina	Odstupanje od ravnosti, μm	
	Izmjereno	Dop. odstup.
Nakovanj		
Vreteno		

4 MJERENJE OdstUPANJA OD PARALELNOSTI MJERNIH POVRŠINA

4.1 Mjerenje odstupanja od paralelnosti mjernih površina provesti primjenom seta planparalelnih kontrolnih stakala, (slika 6).



Slika 6. Mjerenje odstupanja od paralelnosti mjernih površina

4.2 Brojanje interferencijskih pruga na mjestnoj površini nakovnja i mjestnoj površini vretena provesti u položaju stakla koji na jednoj od površina mikrometra rezultira najmanjim brojem pruga (postići laganim kružnim pomicanjem stakla).

4.3 Dobiveni zbroj pruga (na vretenu i na nakovnju) množiti sa $0,3 \mu\text{m}$ kako bi se dobio iznos odstupanja od paralelnosti. Utvrđene vrijednosti upisati u tablicu 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja odstupanja od paralelnosti mjernih površina

Debljina stakla, mm	Odstupanje od paralelnosti, μm	
	Izmjereno	Dop. odstup.
$L_1 =$		
$L_2 =$		
$L_3 =$		
$L_4 =$		

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Mjerenje kuta

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

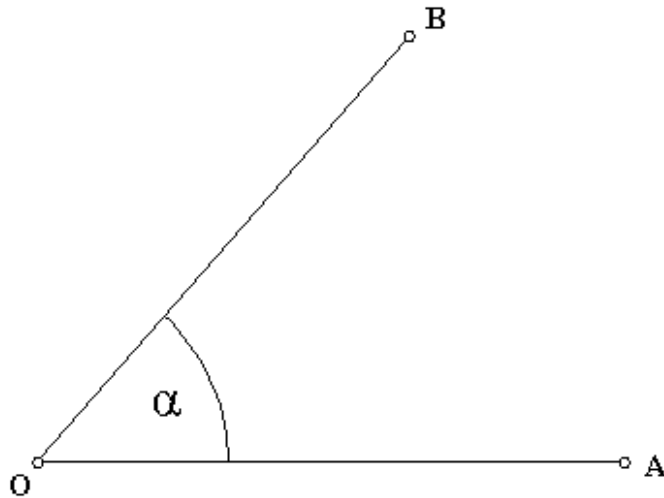
Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

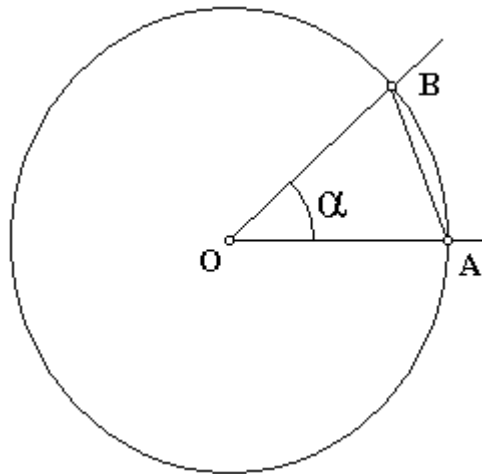
Ravninski kut

Ravninski kut dio je ravnine kojega omeđuju dvije zrake (ili dužine) koje se sastaju u zajedničkoj točki koju tada nazivamo vrhom kuta. Na slici 1 je prikazan kut kojeg čine dvije dužine \overline{OA} i \overline{OB} . Te dvije dužine tada nazivamo kracima kuta. Ovako definiran kut zapisujemo sa $\sphericalangle AOB$ ili $\sphericalangle BOA$ (slovo koje označava vrh kuta je uvijek u sredini) ili malim grčkim slovima α , β , γ , δ , a u općem slučaju najčešće slovom grčkim slovom φ . Na crtežima se krakovi kuta spajaju malim kružnim lukom pri vrhu kuta.



Slika 1. Prikaz ravninskog kuta

Odredimo li točku O (vrh kuta) za središte neke kružnice određenog promjera, a na kružnici naznačimo dvije točke (A i B), te spojimo središte kružnice s točkom A, odnosno točkom B, tada taj kut nazivamo središnjim kutom i primjećujemo da on iz te kružnice „izrezuje“ jedan njen dio koji nazivamo luk AB, te tetivu \overline{AB} (spojnica točaka A i B, slika 2).



Slika 2. Središnji kut, luk i tetiva

Definicija i jedinice ravninskog kuta

Pojam (ravninskog) kuta u fizikalnom smislu definiramo jednažbom:

$$\text{kut} = \frac{\text{duljina kružnog luka}}{\text{duljina polumjera kružnice}}$$

odnosno:

$$\varphi = \frac{s}{r}$$

Radijan je prema međunarodnom SI sustavu jedinica izvedena jedinica ravninskog kuta s posebnim nazivom i znakom (rad). Mjerna jedinica ravninskog kuta od jednog radijana može se ovako definirati riječima :

Jedan radijan (1 rad) je kut u ravnini između dva polumjera kružnice koji na toj kružnici zahvaćaju luk čija je duljina jednaka polumjeru te kružnice.

Izražena s pomoću osnovnih SI jedinica mjerna jedinica ravninskog kuta jest: m/m.

Jedan od vrlo raširenih načina izražavanja mjere kuta je u stupnjevima, te u dijelovima jednog stupnja (minute i sekunde). **Stupanj, minuta i sekunda** su jedinice izvan SI sustava, a koje se upotrebljavaju s Međunarodnim sustavom jedinica. Kod ovoga načina izražavanja veličine kuta, pun krug je podijeljen na 360 jednakih dijelova – stupnjeva. Jedan stupanj se dalje dijeli na 60 minuta, a jedna minuta na 60 sekundi.

Odnos stupnja, minute i sekunde sa radijanom je kako slijedi:

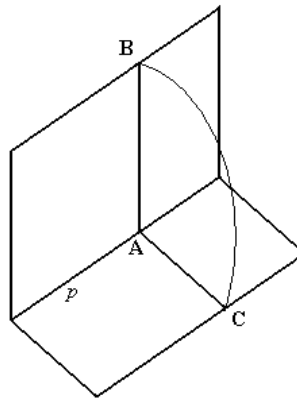
Naziv jedinice	Znak	Vrijednost u SI jedinicama
stupanj	°	1° = (π/180) rad
minuta	'	1' = (1/60)° = (π /10 800) rad
sekunda	"	1" = (1/60)' = (π /648 000) rad

Prostorni kut

Pored kuteva koji leže u jednoj ravnini, u geometriji su definirani i kutevi u prostoru. Razlikujemo tri slučaja:

Dvostrani ravninski kut u prostoru, kut diedra

Kut diedra je prostorni kut kojega čine dvije nepodudarne i neparalelne prostorne ravnine. Sjecište tih ravnina je pravac p , kojeg u tom slučaju nazivamo bridom (slika 3). Prostorni kut diedra $\sphericalangle BAC$ je zapravo ravninski kut kojeg čine dužine \overline{AB} i \overline{AC} okomite na brid p , te su definicije tog kuta i mjerne jedinice iste kao i već navedene za ravninske kuteve.

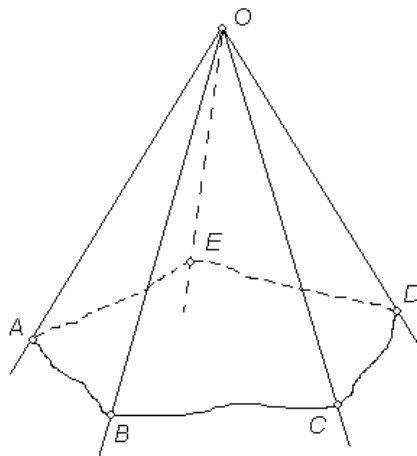


Slika 3. Kut diedra

Višestрани prostorni kut

Višestрани prostorni kut nastaje kada se nekoliko ravnina u prostoru sijeku na takav način da se svi njihovi bridovi (sjecišta između dvije susjedne ravnine) sijeku u zajedničkoj točki O koja tad predstavlja vrh takvog prostornog kuta.

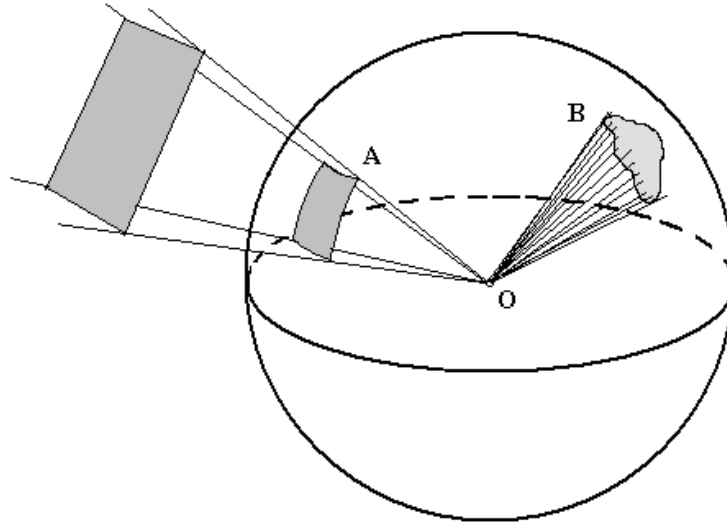
Višestranе prostorne kuteve označavamo tako da se vrh kuta navodi prvi. Tako bi kut na slici 4 imao oznaku $\sphericalangle OABCDE$.



Slika 4. Višestрани prostorni kut

Prostorni kut

Prostorni kut je dvodimenzionalni kut u trodimenzionalnom prostoru koji zatvaraju izvodnice stožca koji opisuje promatranje objekta iz jedne točke, slika 5. Predstavlja mjeru koliko se objekt povećava ili smanjuje gledano iz točke promatrača.



Slika 5. Prostorni kut

Definicija i jedinica prostornog kuta

Mjerna jedinica prostornog kuta naziva se **steradian**. Steradian je prema međunarodnom SI sustavu jedinica izvedena jedinica prostornog kuta s posebnim nazivom i znakom (sr).

Možemo reći da je prostorni kut od jednog steradiana onaj kut čiji se vrh nalazi u središtu kugle, a na plohi kugle omeđuje površinu jednaku kvadratu polumjera kugle.

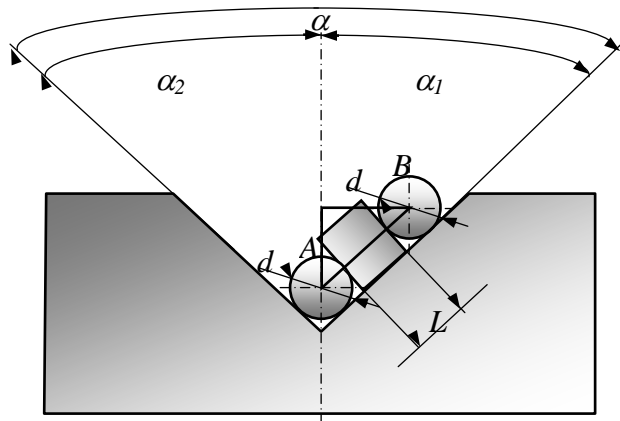
Izražena s pomoću osnovnih SI jedinica mjerna jedinica prostornog kuta jest: m^2/m^2 .

ZADATAK 1.**Mjerenje kuta prizme**

- **Predmet mjerenja:** Prizma nazivnog kuta 90°
- **Element mjerenja:** Stvarni kut prizme
- **Sredstvo mjerenja:** Mjerna ura sa stalkom, mjerni valjčići $\phi 5,050$ mm, planparalelne granične mjerke: 2,5 mm; 4,5 mm; 7,5 mm

Postupak mjerenja:

- Korak 1.** Postaviti valjčić 1 u prizmu te dovesti vrh valjčića ispod ticala mjerne ure. Očitati vrijednost s mjerne ure. Očitano vrijednost upisati u tablicu 1, (očitanje A-1).
- Korak 2.** Na valjčić 1 postaviti mjerku 2,5 mm, a zatim na mjerku valjčić 2 prema slici –desna strana prizme. Izvršiti očitavanje kada se vrh valjčića 2 postavi ispod ticala mjerne ure. Očitano vrijednost upisati u tablicu 1, (očitanje B-1).
- Korak 3.** Ponoviti korak 1, (očitanje A-2).
Ponoviti korak 2 s graničnom mjerkom 4,5 mm – desna strana prizme, (očitanje B-2).
- Korak 4.** Ponoviti korak 1, (očitanje A-3).
Ponoviti korak 2 s graničnom mjerkom 7,5 mm – desna strana prizme, (očitanje B-3).
- Korak 5.** Ponoviti korake 1-4 na lijevoj strani prizme.



Slika 6. Mjerenje kuta prizme

Tablica 1. Rezultati mjerenja kuta prizme

Mjerno mjesto	L mm	d mm	Očitanje A mm	Očitanje B mm	$B - A$ mm	$\cos \alpha_i = \frac{B - A}{d + L}$	α_i	$\alpha_{i \text{ sred.}}$
α_1	1	2,5	5,050					
	2	4,5						
	3	7,5						
α_2	1	2,5	5,050					
	2	4,5						
	3	7,5						
$\alpha = \alpha_{1 \text{ sred.}} + \alpha_{2 \text{ sred.}}$								

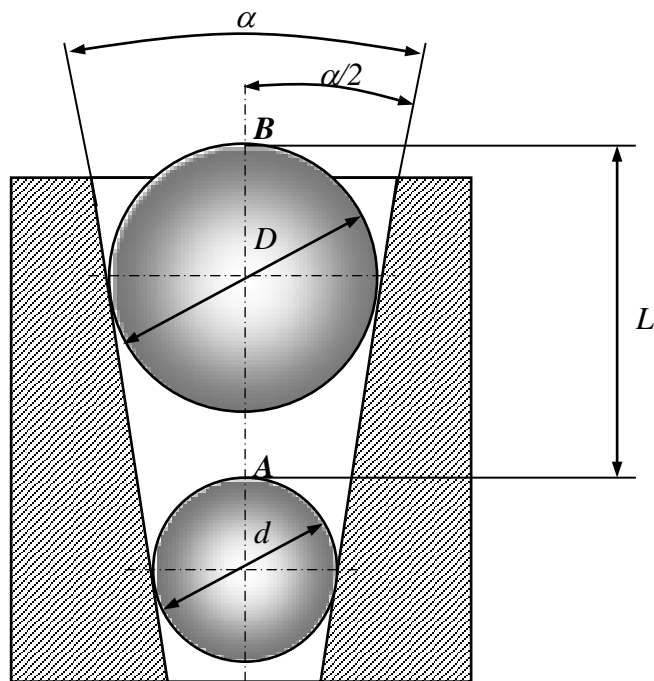
ZADATAK 2.

Mjerenje kuta unutarnjeg konusa

- **Predmet mjerenja:** Granično mjerilo za vanjski konus $k = 1 : 2,5$
- **Element mjerenja:** Konicitet unutarnjeg konusa
- **Sredstvo mjerenja:** Mjerna ura sa stalkom, mjerne kuglice $\phi 20,000$ mm i $\phi 16,700$ mm

Postupak mjerenja:

- Korak 1.** Postaviti malu kuglicu d u konus i dovesti je ispod ticala mjerne ure. Očitati vrijednost s mjerne ure. Očitano vrijednost upisati u tablicu 2, (očitanje A-1).
- Korak 2.** Izvaditi kuglicu d iz konusa i postaviti kuglicu D u konus. Dovedi je ispod ticala mjerne ure, te izvršiti očitavanje. Očitano vrijednost upisati u tablicu 2, (očitanje B-1).
- Korak 3.** Ponoviti korake 1. i 2. još dva puta.
- Korak 4.** Popuniti tablicu 2.



D – promjer veće kuglice
 d – promjer manje kuglice
 k – konicitet konusa
 α – kut konusa

Slika 7. Mjerenje kuta unutarnjeg konusa

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{(D-d)}{2L-(D-d)} \quad k = \frac{1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Tablica 2. Rezultati mjerenja kuta unutarnjeg konusa

Očitanje A mm	A_{sr} mm	Očitanje B mm	B_{sr} mm	$L=B_{sr}-A_{sr}$ mm	D mm	d mm	$D-d$ mm
$\sin \frac{\alpha}{2} =$	$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} =$	$\frac{\alpha}{2} =$	$\alpha =$	$1 : k$			

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Utvrđivanje linearne pogreške pupitaste mjerne ure

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

MJERNA POGREŠKA

Razlika između izmjerene vrijednosti veličine i referentne vrijednosti veličine naziva se **mjerna pogreška**.

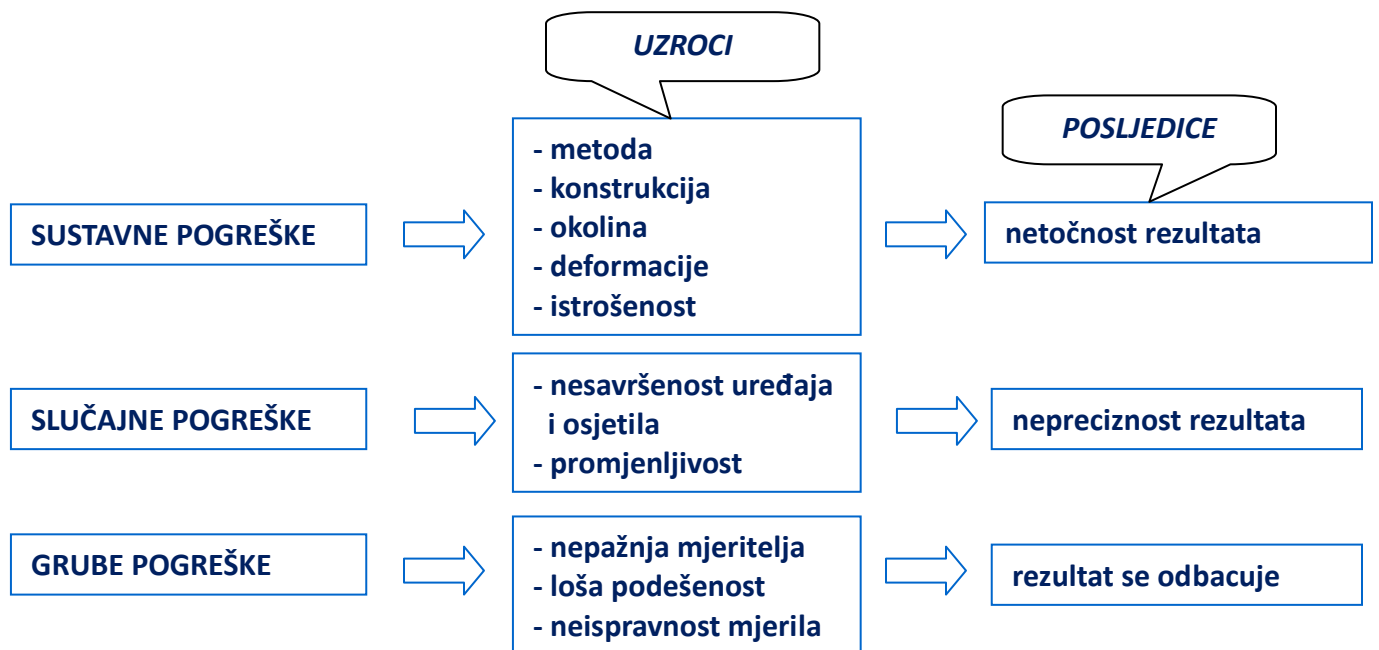
Razlikujemo tri vrste mjernih pogrešaka:

- sustavne pogreške
- slučajne pogreške
- grube pogreške

Sustavne pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine ostaju stabilne ili se mijenjaju na predvidiv način.

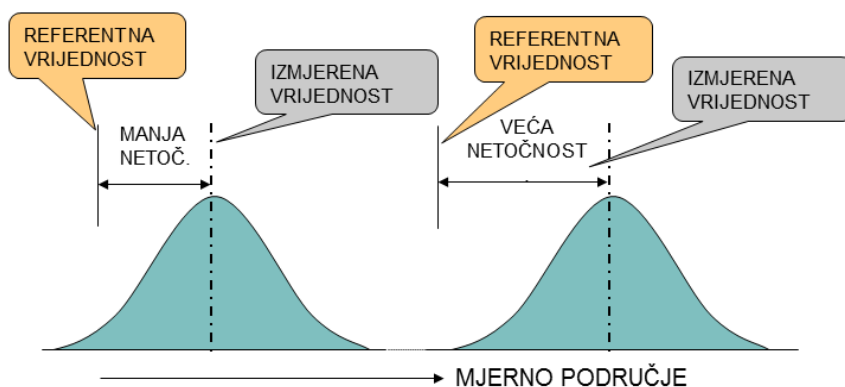
Slučajne pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine mijenjaju se na nepredvidiv način.

Grube pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine značajno odstupaju u odnosu na ostale rezultate.

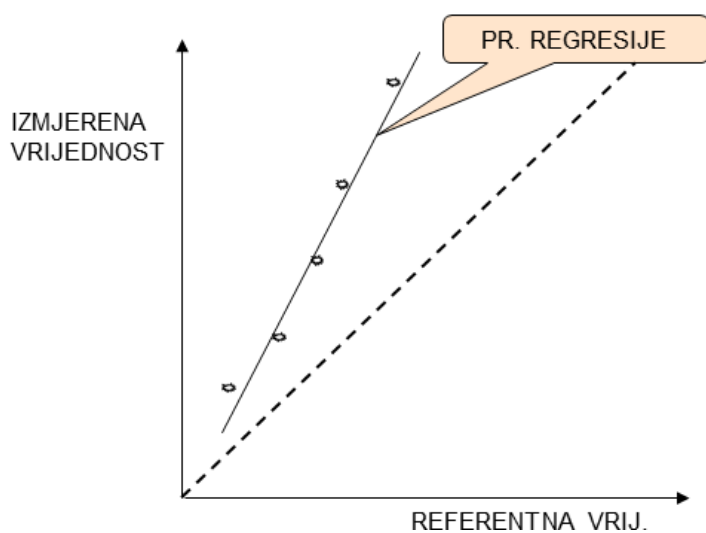


LINEARNA POGREŠKA

Linearna pogreška je stalan (linearni) rast ili pad vrijednosti pogreške rezultata mjerenja (netočnosti) unutar određenog dijela mjernog područja instrumenta, (slike 1 i 2).



Slika 1. Linearna pogreška



Pravac regresije: $y = a \cdot x + b$

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

Primjer: $(y = 1,022 \cdot x - 0,0001) \text{ mm}$

RELATIVNA LINEARNA POGREŠKA:
0,022 mm/mm ili 22 $\mu\text{m/mm}$

Slika 2. Linearna regresijska veza

Utvrđivanje linearne pogreške pupitaste mjerne ure

Svrha ove vježbe je utvrđivanje linearne pogreške pupitaste mjerne ure, (slika 3).



Slika 3. Utvrđivanje linearne pogreške.

Mjernu skalu na elektronskom komparatoru postaviti na područje $(5/300) \mu\text{m}$. Kazaljku elektronskog komparatora postaviti u položaj $-300 \mu\text{m}$, a skalu na uređaju za ispitivanje mjernih ura na $0 \mu\text{m}$.

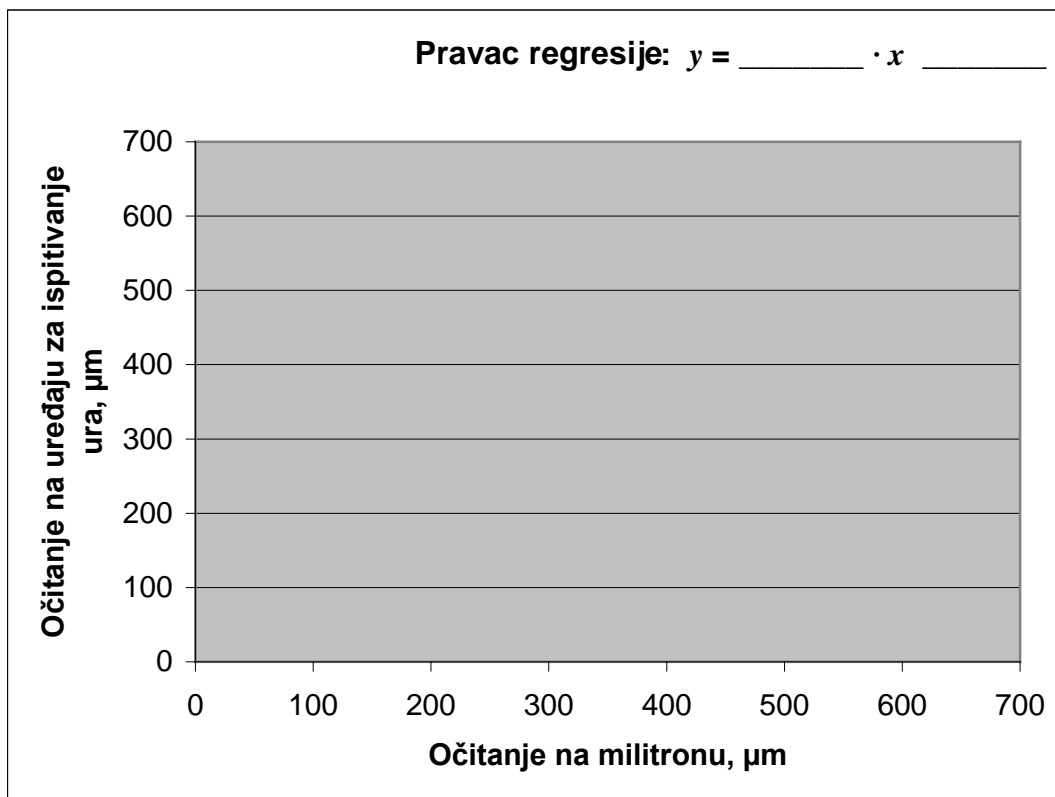
Provesti ispitivanje linearne pogreške pupitaste mjerne ure na način da se kao referentne vrijednosti uzimaju očitavanja s elektronskog komparatora uz korak $20 \mu\text{m}$. Rezultate upisati u tablicu 1.

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Očitanje na elektronskom komparatoru, μm	Očitana vrijednost na uređaju za ispitivanje mjernih ura, μm
0	
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	
180	
200	
220	
240	
260	
280	
300	
320	
340	
360	
380	
400	
420	
440	
460	
480	
500	
520	
540	
560	
580	
600	

Korištenjem odgovarajućeg programskog paketa kroz točke iz tablice 1 povući pravac linearne regresije. Referentne vrijednosti (očitanja na elektronskom komparatoru) iz tablice 1 predstavljaju točke na apscisi, a izmjerene vrijednosti na uređaju za ispitivanje mjernih ura njima pridružene točke na ordinati.

Na grafu ucrtati rezultate mjerenja, te pravac regresije $y = a \cdot x + b$ s pripadajućom jednađbom.



Vrijednost linearne pogreške jednaka je apsolutnom iznosu koeficijenta smjera pravca regresije umanjenog za 1.

Linearna pogreška = $|1 - a| = ______$

Koliki je iznos linearne pogreške mjerne ure na 400 μm? $______$

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Utvrđivanje pogreške dvokoordinatnog mjernog uređaja

Prezime i ime studenta:

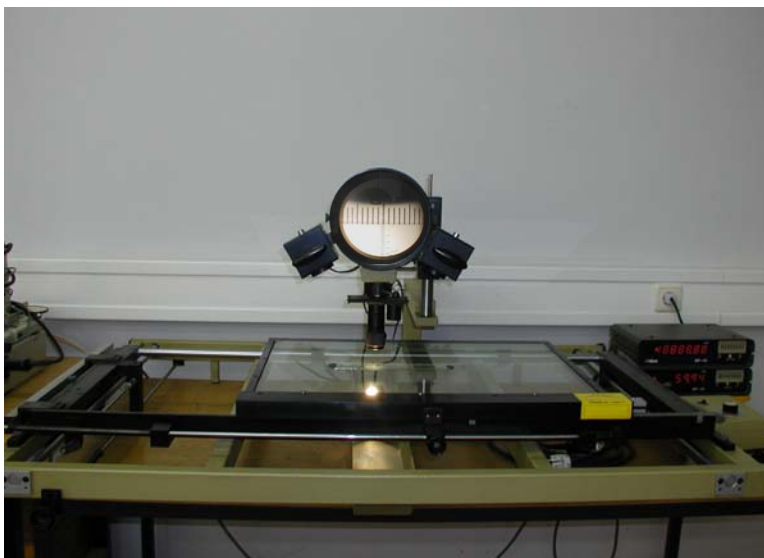
Matični broj:

Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

Svrha ove vježbe je utvrđivanje pogreške dvokoordinatnog mjernog uređaja u smjeru osi x, (slika 1).



Slika 1. Ispitivanje pogreške dvokoordinatnog mjernog uređaja

Utvrđivanje pogreške uređaja izvršiti mjerenjem staklene mjerne skale mjernog područja (0-150) mm, s korakom od 5 mm.

Mjerenja provoditi u dva smjera kretanja osi x mjernog uređaja (od 0 do 150 mm, te od 150 mm do 0). Na početku svakog mjerenja postaviti nulu na ispitivanom uređaju, uz postavljanje nitnog križa uređaja na početak mjernog područja skale (mjerna linija skale na 0 mm), odnosno na kraj mjernog područja skale (mjerna linija skale na 150 mm).

Rezultate mjerenja upisati u Tablice 1 i 2. Rezultate oba mjerna niza prikazati i grafički.

Tablica 1. Rezultati mjerenja duljine (↔)

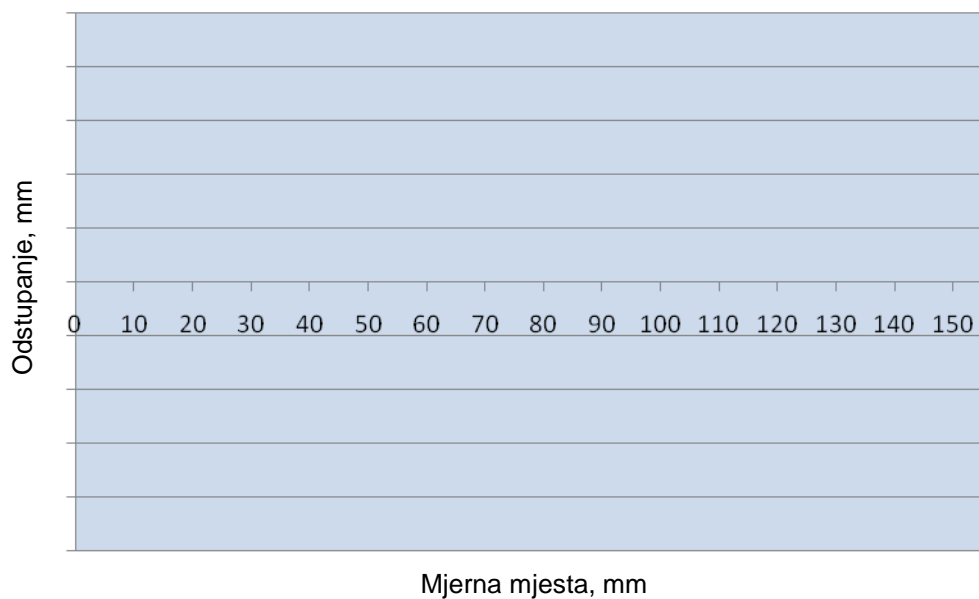
Vrijednost u mm

<i>Mjerno mjesto (skala)</i>	<i>Očitana vrijednost (umjeravani uređaj)</i>	<i>Pogreška</i>
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		
90		
95		
100		
105		
110		
115		
120		
125		
130		
135		
140		
145		
150		

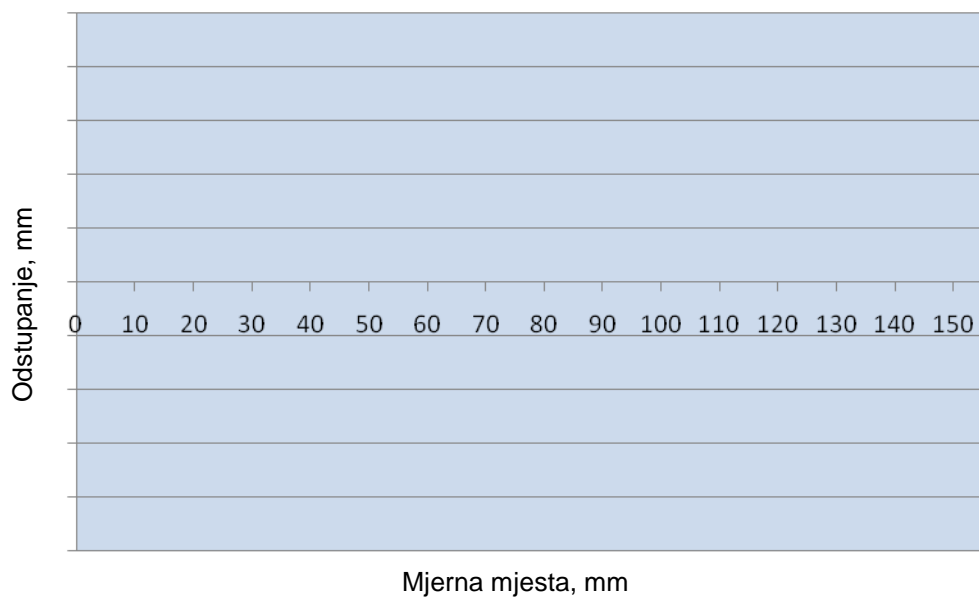
Tablica 2. Rezultati mjerenja duljine (←)

Vrijednost u mm

<i>Mjerno mjesto (skala)</i>	<i>Očitana vrijednost (umjeravani uređaj)</i>	<i>Pogreška</i>
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		
65		
70		
75		
80		
85		
90		
95		
100		
105		
110		
115		
120		
125		
130		
135		
140		
145		
150		



Slika 1. Pogreška uređaja (tablica 1)



Slika 2. Pogreška uređaja (tablica 2)

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Mjerenje odstupanja od kružnosti

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

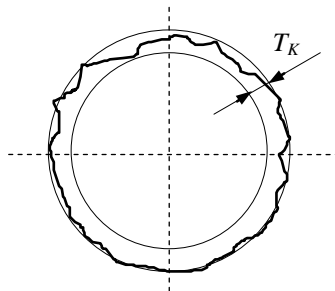
Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

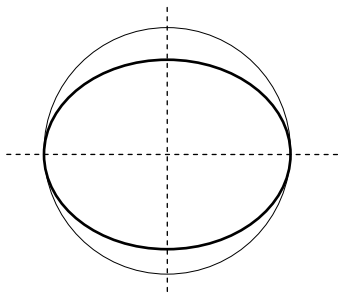
Definicija: Kružnost se odnosi na stanje kružne linije ili površine kružnog dijela, kod kojeg su sve točke na liniji ili na obodu poprečnog presjeka dijela, jednako udaljene od središnje točke .

Odstupanje od kružnosti T_K je radijalna širina prstenaste površine između dvije koplanarne, međusobno koncentrične kružnice. Niti jedna točka profila ne smije izlaziti van prstenaste površine (slika 1).

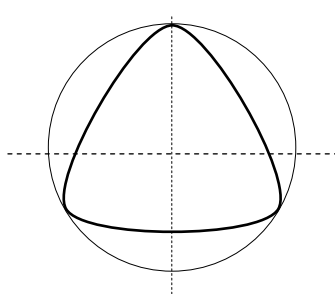


Slika 1. Odstupanje od kružnosti

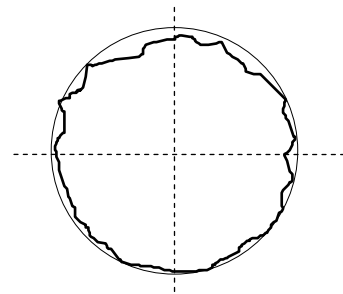
Karakteristične greške kružnosti posljedica su proizvodnog procesa kružnih komada koji se izrađuju uglavnom tokarenjem. Osnovna veličina prema kojoj se karakteriziraju greške kružnosti je broj izbočina/valova po krugu – *UPR (Undulations per revolution)*.



a) ovalnost ($UPR = 2$)



b) izbočenost ($2 < UPR < 50$)



c) valovitost ($50 < UPR < 500$)

Slika 2. Karakteristične greške kružnosti

a) Ovalnost

- karakteristična pogreška prvog reda i posljedica je nepodešenosti osi tokarskog stroja. Također se može pojaviti kao posljedica lošeg centriranja ili niveliranja komada prilikom mjerenja kružnosti.

b) Izbočenost

- posljedica prejakog stezanja i broj izbočina je u korelaciji s brojem steznih čeljusti. Najveći broj izbočina je $UPR = 50$ jer se pretpostavlja da su stezne naprave s preko 50 čeljusti iznimno rijetke.

c) Valovitost

- uglavnom posljedica vibracija na tokarskom stroju i karakterizira ju broj izbočina između 50 i 500 UPR -a.

Kod mjerenja kružnosti, uz odstupanje od oblika, bit će prisutna i hrapavost površine u obliku broja izbočina/valova iznad 500 UPR -a, stoga se primjenjuje nisko propusna filtracija s graničnom frekvencijom, tj. graničnim brojem izbočina od $UPR = 500$.

Metode ispitivanja kružnosti

1. **Metode ispitivanja kružnosti s unutrašnjom mjernom referencom** (kao mjerna referenca uzima se jedna ili više točaka s površine kontroliranog izratka).
 - ispitivanje kružnosti mjerenjem promjera
 - ispitivanje kružnosti primjenom mjernih šiljaka
 - ispitivanje kružnosti primjenom V-prizmi
2. **Metode ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom** (kao mjerna referenca uzima se vanjski element, npr. os vrtne okretnog stola mjernog uređaja).
 - tip rotirajućeg stola
 - tip rotirajućeg ticala

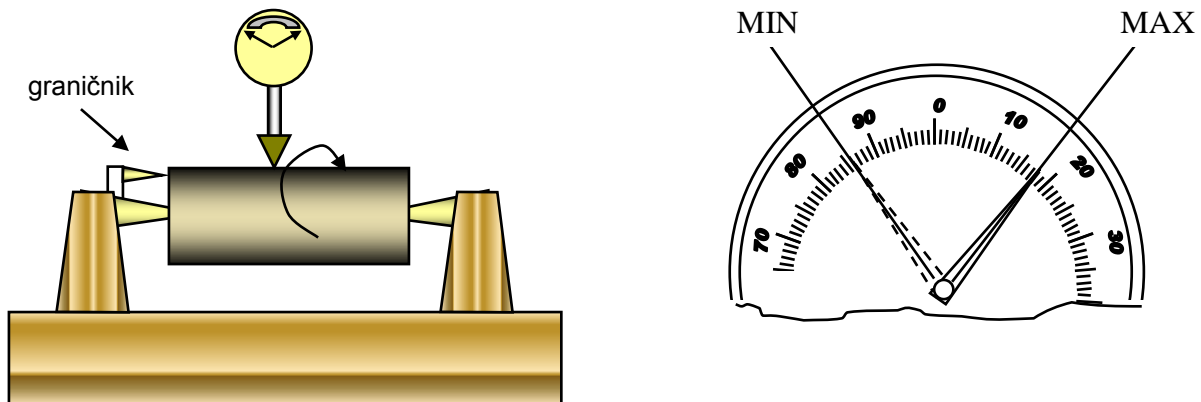
Unutrašnja mjerna referenca – Referenca mjerenja se **nalazi** na predmetu mjerenja
Vanjska mjerna referenca – Referenca mjerenja **ne nalazi** se na predmetu mjerenja

1. Ispitivanje kružnosti primjenom mjernih šiljaka i primjenom V-prizmi

Odstupanje od kružnosti cilindričnih dijelova primjenom mjernih šiljaka mjeri se na način prikazan na slici 3. Kružnost se odnosi na jedan presjek cilindričnog komada, što se kod ove metode osigurava graničnikom. Pri tome se uzimaju u obzir varijacije očitavanja (maksimalna vrijednost – minimalna vrijednost) mjernog instrumenta za jedan okretaj komada. Na primjer, odstupanje od kružnosti na mjernoj uri sa slike 3. iznosi $|-0,140| + 0,180 = 0,320$ mm.

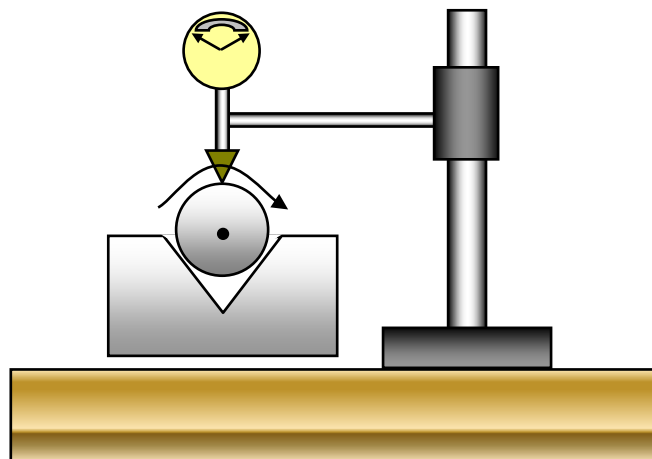
Bitno je naglasiti da se primjenom metode mjernih šiljaka ispituje radijalni udar ovog sustava, te se rezultat mjerenja odnosi na zbir utjecaja: odstupanje od kružnosti, grešku suosnosti mjernih šiljaka i grešku suosnosti provrta za pozicioniranje mjernog predmeta.

Ukoliko su pogreške suosnosti zanemarive u odnosu na odstupanje od kružnosti mjernog predmeta, drugim riječima, ako karakteristična pogreška ovalnosti nije dominantna, rezultat mjerenja će odgovarati mjerenju kružnosti primjenom vanjske mjerne reference.



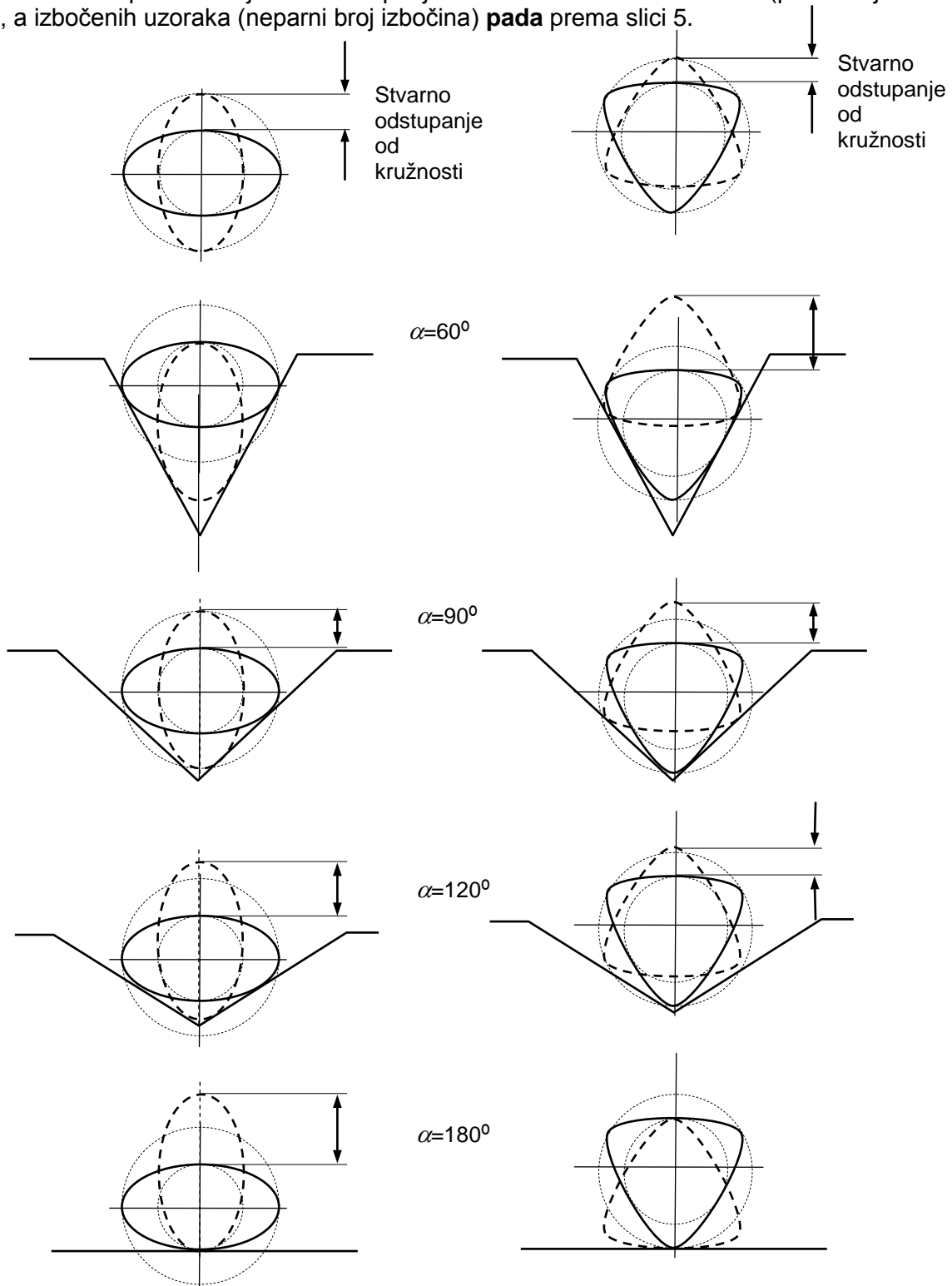
Slika 3. Mjerenje kružnosti primjenom mjernih šiljaka

Princip mjerenja kružnosti primjenom V- prizmi prikazan je na slici 4.



Slika 4. Ispitivanje kružnosti primjenom V-prizmi

Princip očitavanja odstupanja isti je kao što je opisano kod mjerenja kružnosti primjenom mjernih šiljaka (slika 3.). Mjerenje se provodi u V-prizmama nazivnih kuteva 60° , 90° i 120° . S porastom kuta prizme izmjereno odstupanje od kružnosti ovalnih uzoraka (parni broj izbočina) **raste**, a izbočenih uzoraka (neparni broj izbočina) **pada** prema slici 5.



Slika 5. Ovisnost promjene izmjerene odstupanja od kružnosti s kutem V-prizme

Ispitivanjem kružnosti primjenom V-prizmi **moguće je** detektirati i odrediti karakterističnu pogrešku kružnosti, ali **nije moguće** utvrditi iznos odstupanja od kružnosti ukoliko postoji karakteristična greška ovalnosti ili izbočenosti. Ove metode nalaze primjenu u brzim provjerama u proizvodnji i odgovaraju na pitanje postoji li određena karakteristična pogreška kružnosti.

Ukoliko mjerni komad ima karakterističnu pogrešku valovitosti rezultati dobivenim primjenom različitih V-prizmi približno su jednaki, te će odgovarati rezultatima mjerenja kružnosti primjenom vanjske mjerne reference.

ZADATAK 1.

Mjerenje kružnosti primjenom mjernih šiljaka i V-prizmi

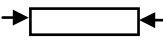
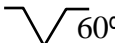


- **Predmet mjerenja:** Uzorci valjaka br. 1, 2 i 3
- **Sredstvo mjerenja:** Stalak s mjernom urom, šiljci s mjernom urom, V-prizme 60°, 90° i 120°

Postupak mjerenja:

Staviti valjak označen brojem 1 u V-prizmu 60°. Prizmu s valjkom zatim postaviti ispod ticala mjerne ure (vidi sliku 4). Rotirati valjak u prizmi i pratiti kretanje kazaljke mjerne ure. Ukupni hod kazaljke za puni okret valjka upisati u tablicu 1 (stupac: uzorak broj 1 i redak: 60°). Ponoviti postupak u prizmi 60° sa ostala dva valjka. Ponoviti postupak za sve uzorke sa ostale dvije prizme i u mjernim šiljcima.

Tablica 1.

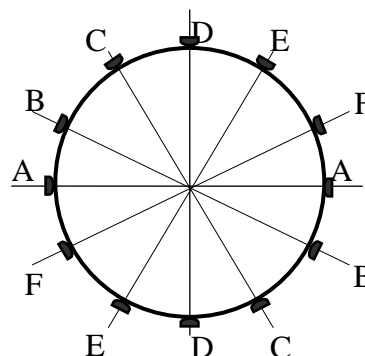
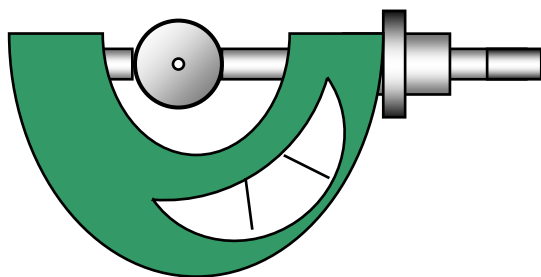
Vrijednosti u mm

Uzorak broj	1	2	3
Očitavanja			
			
			
			
			
Skica odstupanja			

Da li se na temelju rezultata iz tablice 1. može reći koliko je odstupanje od kružnosti uzoraka 1, 2 i 3?	
Da li su ove metode pogodne za utvrđivanje vrijednosti odstupanja od kružnosti?	
S obzirom na vaše rezultate mjerenja (ne uzimajući u obzir mjerne šiljke) zaključite o kakvom odstupanju od kružnosti se radi kod uzoraka 1, 2 i 3 te ih skicirajte u zadnji redak tablice.	

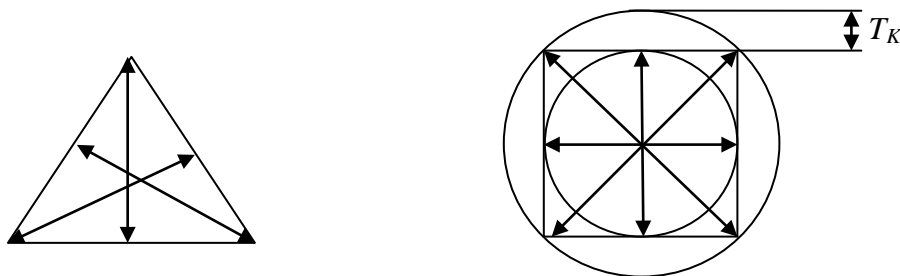
2. Ispitivanje kružnosti mjerenjem promjera

Ispitivanje kružnosti može se izvoditi se primjenom standardnih mjernih instrumenata za mjerenje promjera, npr. pasametrom (slika 6.) Pri tome se promjer mjeri u većem broju radijalnih presjeka (A-A,...,F-F).



Slika 6. Ispitivanje kružnosti pasametrom

Ova metoda pogodna je za mjerenja, ovalnosti i izbočenosti s parnim brojem izbočina, razlika najvećeg i najmanjeg izmjereneog promjera predstavlja odstupanje od kružnosti. Kod izbočenosti s neparnim brojem izbočina rezultati mjerenja promjera bit će približno isti i nije moguće donijeti zaključaj o karakterističnoj pogrešci (isti rezultati mogu odgovarati i valovitosti i izbočenosti), kao niti o vrijednosti odstupanja od kružnosti.



Slika 7. Ispitivanje kružnosti mjerenjem promjera – karakteristična greška izbočenosti

ZADATAK 2.**Ispitivanje kružnosti mjerenjem promjera**

Potrebno je izmjeriti odstupanje od kružnosti i promjer valjka nazivnog promjera 50 mm u šest različitih dijametralnih presjeka (A-A, ..., F-F) pasametrom. Pasametar prethodno podesiti graničnom mjerkom nazivne dužine 50 mm. Rezultate mjerenja odstupanja od 50 mm upisati u tablicu 2. Izračunati stvarni promjer valjka za svih pet ponovljenih mjerenja te izračunati srednju vrijednost promjera. Izračunati odstupanje od kružnosti kao razliku najvećeg i najmanjeg izmjereneog promjera.

- **Predmet mjerenja:** uzorak valjka označen brojem 3.
- **Sredstvo mjerenja:** Pasametar (50 - 75)/0,002 mm, kontrolni prsten $\phi 50, \dots$,

Tablica 2. Rezultati mjerenja

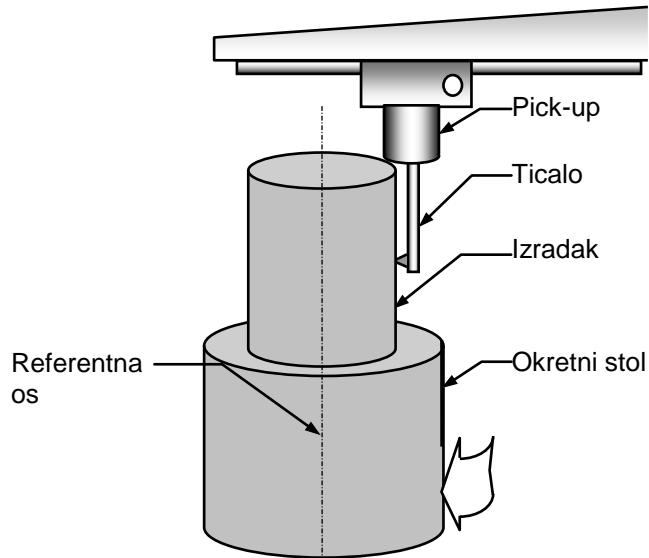
Mjerenje broj	Izmjereno odstupanje promjera valjka od 50 mm μm	Stvarni promjer valjka D mm	Srednja vrijednost D_{sr} mm	Odstupanje od kružnosti $D_{maks} - D_{min}$ μm
A-A				
B-B				
C-C				
D-D				
E-E				
F-F				

Uzeti kontrolni prsten $\phi 50, \dots$ mm. Provjeriti da li označena strana valjka prolazi kroz prsten a zatim odgovorite na pitanja u sljedećoj tabeli.

1. Da li bi valjak na temelju dobivenih rezultata mjerenja trebao proći kroz kontrolni prsten?	
2. Da li prolazi?	
3. Zašto?	
4. Da li je dijametralna metoda mjerenja pogodna za mjerenje odstupanja od kružnosti? Koji karakterističnu grešku kružnosti je moguće, a koju nije moguće otkriti i kvantificirati ovom metodom mjerenja kružnosti?	

3. Metode ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom

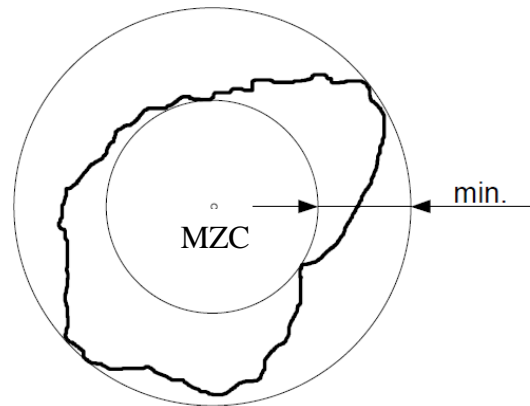
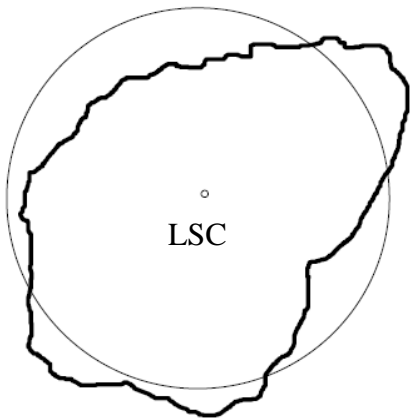
Metoda ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom primijeniti će se na uređaju za ispitivanje kružnosti - tip rotirajućeg stola (Slika 7.)

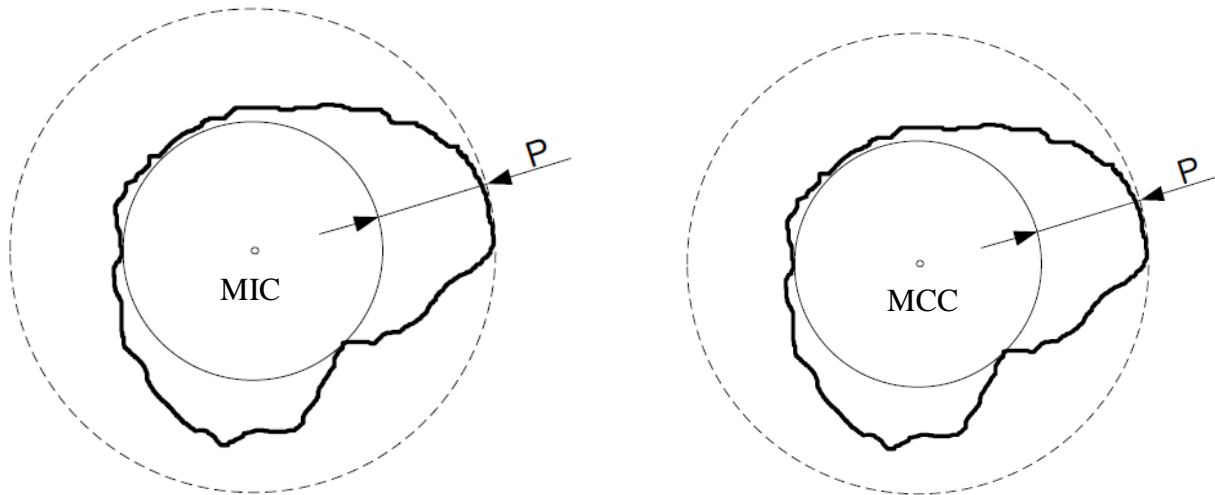


Slika 8. Princip uređaja za mjerenje kružnosti s vanjskom mjernom referencom – tip okretnog stola

Metode za procjenu odstupanja od kružnosti:

- Metoda najmanjih kružnih kvadrata - LSC
- Metoda najmanje opisane kružnice - MCC
- Metoda najveće upisane kružnice - MIC
- Metoda najmanje kružne zone - MZC





Slika 9. Metode za procjenu odstupanja od kružnosti:

ZADATAK3.

Mjerenje kružnosti metodom s vanjskom mjernom referencom

- **Predmet mjerenja:** Valjak
- **Sredstvo mjerenja:** Uređaj za mjerenje kružnosti s okretnim stolom

Ispitivanje mjernog predmeta izvršeno je na okretnom stolu proizvođača "Mahr MMQ3". Potrebno je odrediti odstupanje od kružnosti prema metodi najmanjih kružnih kvadrata, metodi najmanje opisane kružnice i metodi najveće upisane kružnice služeći se softverom "UltraMeasurement". Temeljem izvršenog mjerenja upišite:

Metoda:	Metoda najmanjih kružnih kvadrata LSC	Metoda najmanje opisane kružnice MCC	Metoda najveće upisane kružnice MIC	Metoda najmanje kružne zone MZC
Odstupanje, μm				
Broj izbočina				

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Mjerenje odstupanja od ravnosti površine

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

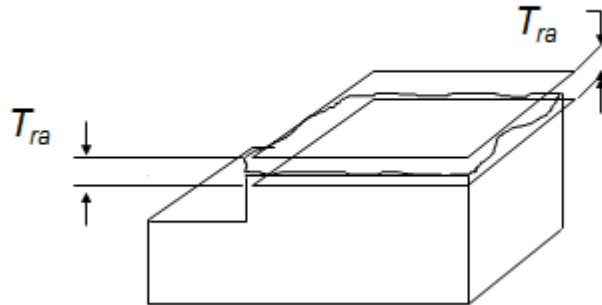
Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

Definicija: Ravnost je stanje površine kod kojeg su sve točke u jednoj ravnini.

Dopušteno odstupanje od ravnosti određeno je prostorom između dviju ravnina koje su međusobno udaljene za iznos dopuštenog odstupanja T_{ra} . (slika 1.)



Slika 1. Odstupanja od ravnosti

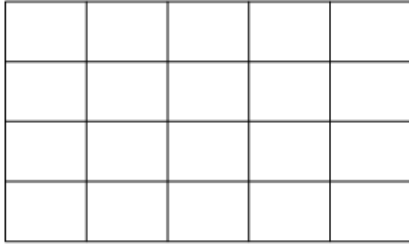
Odstupanje od ravnosti određeno je zbrojem udaljenosti dviju najviše udaljenih točaka (jedna s donje a druga s gornje strane ravnine) od ravnine dobivene metodom najmanjih kvadrata.

METODE ISPITIVANJA RAVNOSTI TEHNIČKIH POVRŠINA

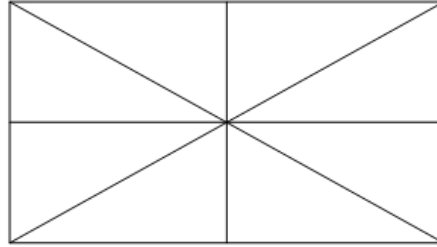
Mjerenje ravnosti temelji se na mjerenju pravocrtnosti. Mreža pravaca na mjernoj površini omogućuje pronalazak traženih geometrijskih značajki površine. Zbog toga je nužno, prije početka mjerenja, razraditi plan mjerenja prema kojem se utvrđuje slijedeće:

- Metoda mjerenje
- Izbor tipa i duljina mjerne baze
- Raspored i redoslijed mjerenja mjernih pravaca

Najčešće se u primjeni susreću dva tipa rasporeda mjernih pravaca i to pravokutni ili "Grid" i dijagonalni tip ili "Union Jack".



Slika 2. Pravokutni ili "Grid" raspored



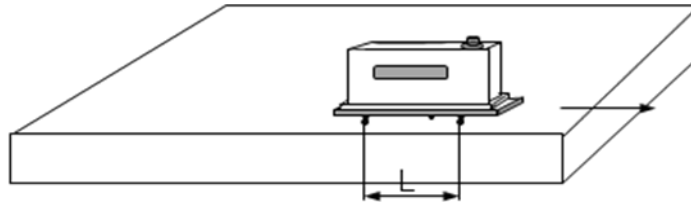
Slika 3. Dijagonalni ili "Union Jack" raspored

Na raspolaganju postoji velik broj metoda mjerenja ravnosti površine , a prvenstveno se dijele s obzirom na korištenu mjernu opremu:

- lineal s komparatorom
- 3D dužinski mjerni uređaji
- autokolimator
- laserski mjerni sustav
- koincidentna libela

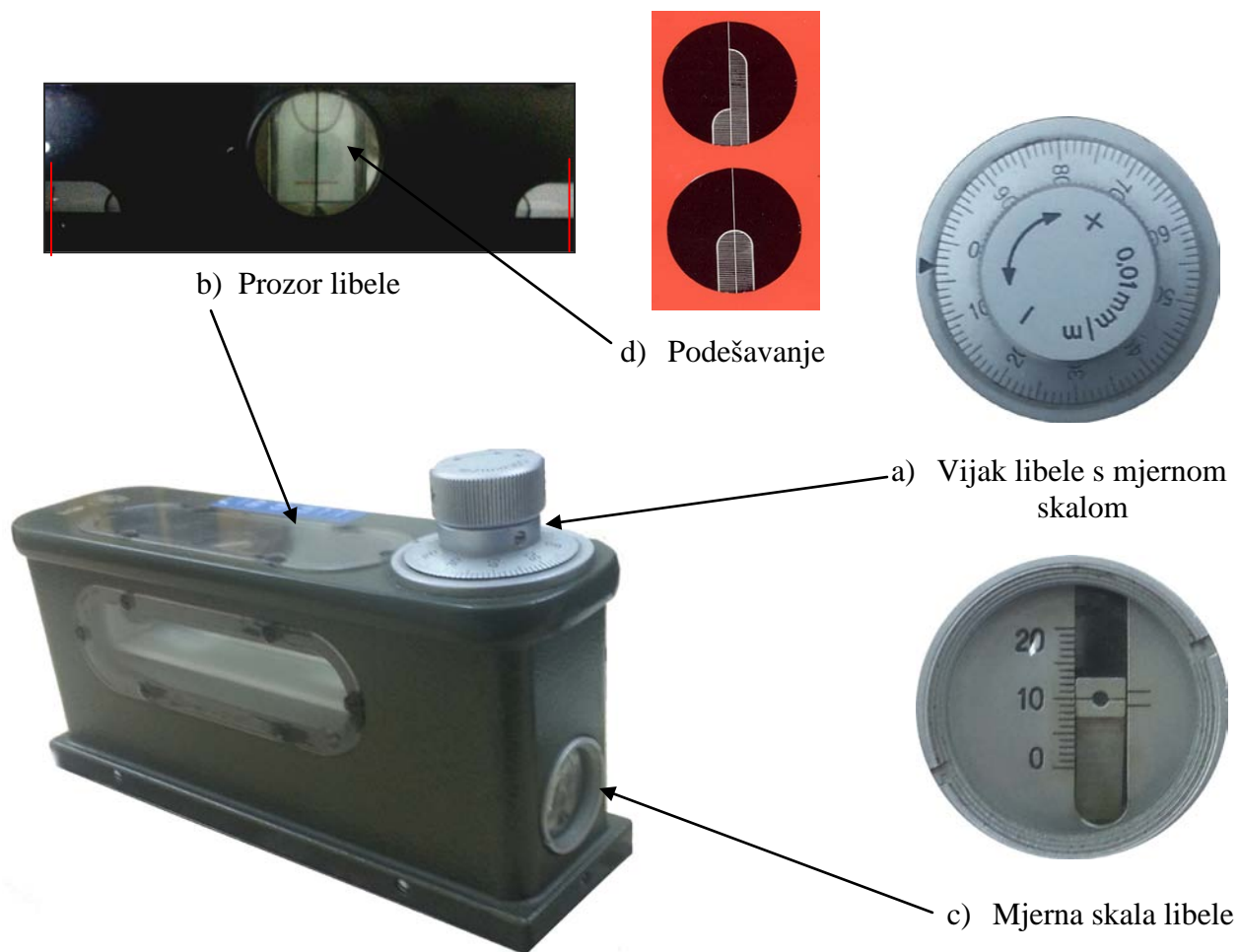
KOINCIDENTNA LIBELA

Libela je uređaj za mjerenje nagiba, te pokazuje koliko neka površina odstupa od horizontalne površine.



Slika 4. Koincidentna libela na mjernoj ploči

Libela je postavljena na izmjenjivom postolju koje osigurava dodir s površinom u tri točke.



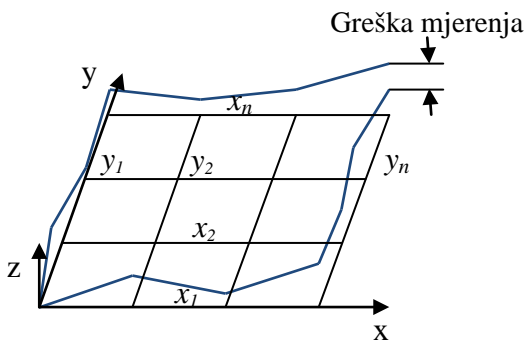
Slika 5. Koincidentna libela

Okretanjem mjernog vijka (slika 5a) potrebno je dovesti mjehur libele u sredinu područja, tj između dvije crvene linije naznačene u prozoru (slika 5b). Zatim, finim zakretom vijka dovesti lijevi i desni dio mjehura u simetričnu poziciju (slika 5d). Očitavanje cijelog broja vrši se na mjernoj skali (slika 5c), a decimalne vrijednosti na mjernom vijku (slika 5a). Potrebno je procijeniti treću decimalu. Na libeli se očitava nagib u odnosu na horizontalnu površinu u mm/m.

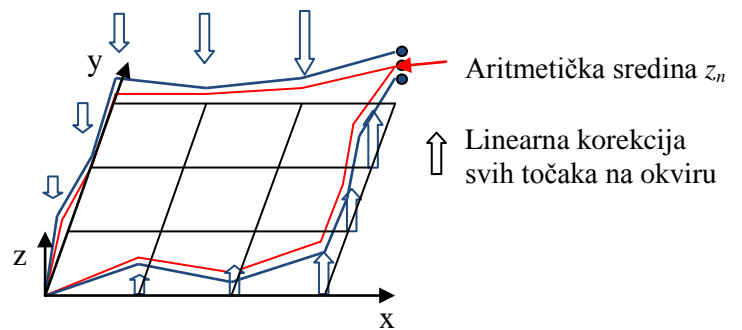
OPIS ALGORITMA ZA RAVNOST – GRID METODA

Algoritam za ravnost sastoji se od sljedećih koraka:

1. Iz mjernih podataka izračunavaju se visine z u smjerovima x i y .
2. Kumulativnim zbrojem visina z kreiraju se pravci $x_1... x_n$ i $y_1... y_n$.
3. Stvaranje okvira - vrijednost visine z svake točke zadnjeg pravca x_n zbroji s vrijednosti visine z zadnje točke početnog pravca x_1 prema slici 6. Isti postupak provodi se u smjeru y .
4. Zadnje točke pravaca x_n i y_n morale bi biti iste, međutim zbog nesavršenosti mjerenja uvijek postoji razlika u izračunatoj visini z (slika 7). Provodi se linearna korekcija svake točke okvira kako bi se isit „zatvorio“ u točki koordinata $T(x_n, y_n, z_n)$ gdje je z_n aritmetička sredina visina zadnjih točaka u x i y smjeru.

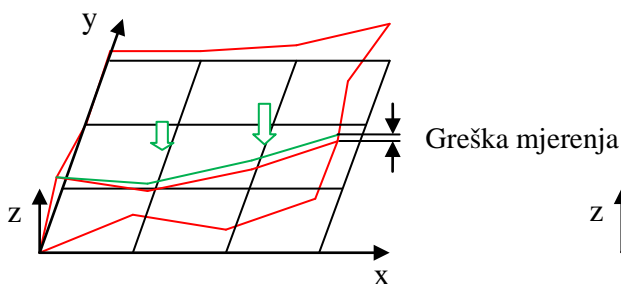


Slika 6. Stvaranje okvira

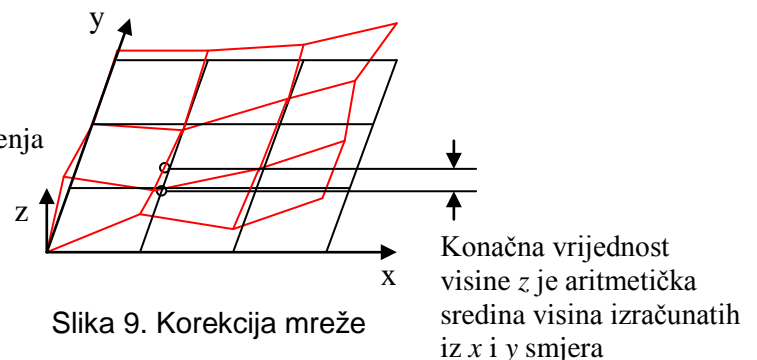


Slika 7. Korekcija okvira

5. Stvaranje mreže – svaki pravac u sredini okvira potrebno je linearno korigirati na način da njegova prva i zadnja točka pripadaju okviru (slika 8).

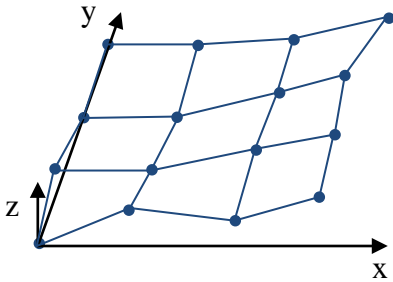


Slika 8. Stvaranje mreže

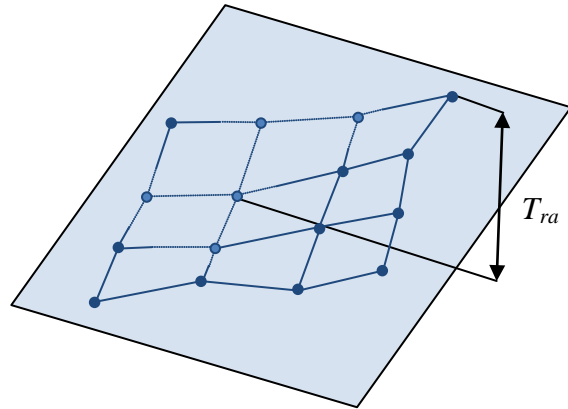


Slika 9. Korekcija mreže

6. S obzirom da svaki čvor ima dvije različite koordinate z, jednu iz x smjera i jednu iz y smjera, aritmetička sredina ovih visina bit će konačni rezultat. Slika 10. prikazuje konačne vrijednosti svake točke prema „Grid“ shemi mjerenja.



Slika 10. Koordinate čvorova



Slika 11. Ravnina najmanjih kvadrata

7. S obzirom da se koincidentnom libelom mjeri odstupanje od horizontalne površine, mjerni rezultat, uz odstupanje odstupanja od oblika (ravnost), sadržava i odstupanje od položaja. Kako bi se prikazalo i izračunalo odstupanje od ravnosti, potrebno je definirati ravninu koja najbolje opisuje mjerne točke. Iako postoji više metoda za pronalazak ove ravnine u praksi se najčešće koristi metoda najmanjih kvadrata. Odstupanje od ravnosti T_{ra} je udaljenost između dvije najudaljenije točke u odnosu na referentnu ravninu (Slika 11).

ZADATAK 1. Mjerenje odstupanja od ravnosti površine primjenom koincidentne libele i programa za izračun odstupanja od ravnosti

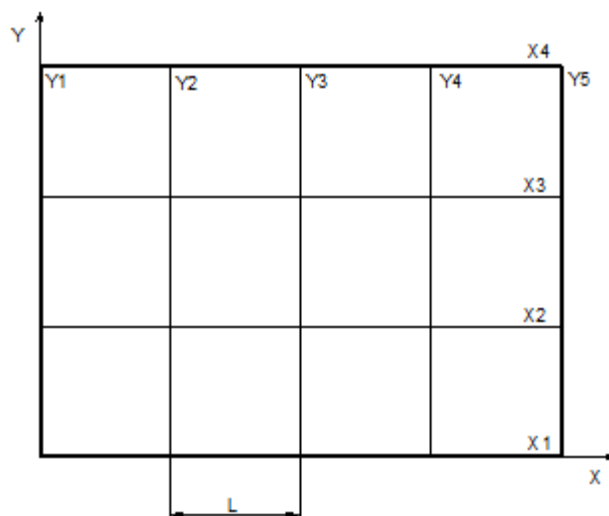
Predmet mjerenja: mjerna ploča klase 1

Sredstvo mjerenja: koincidentna libela

Obrada podataka: softver ravnost.exe

Postupak mjerenja:

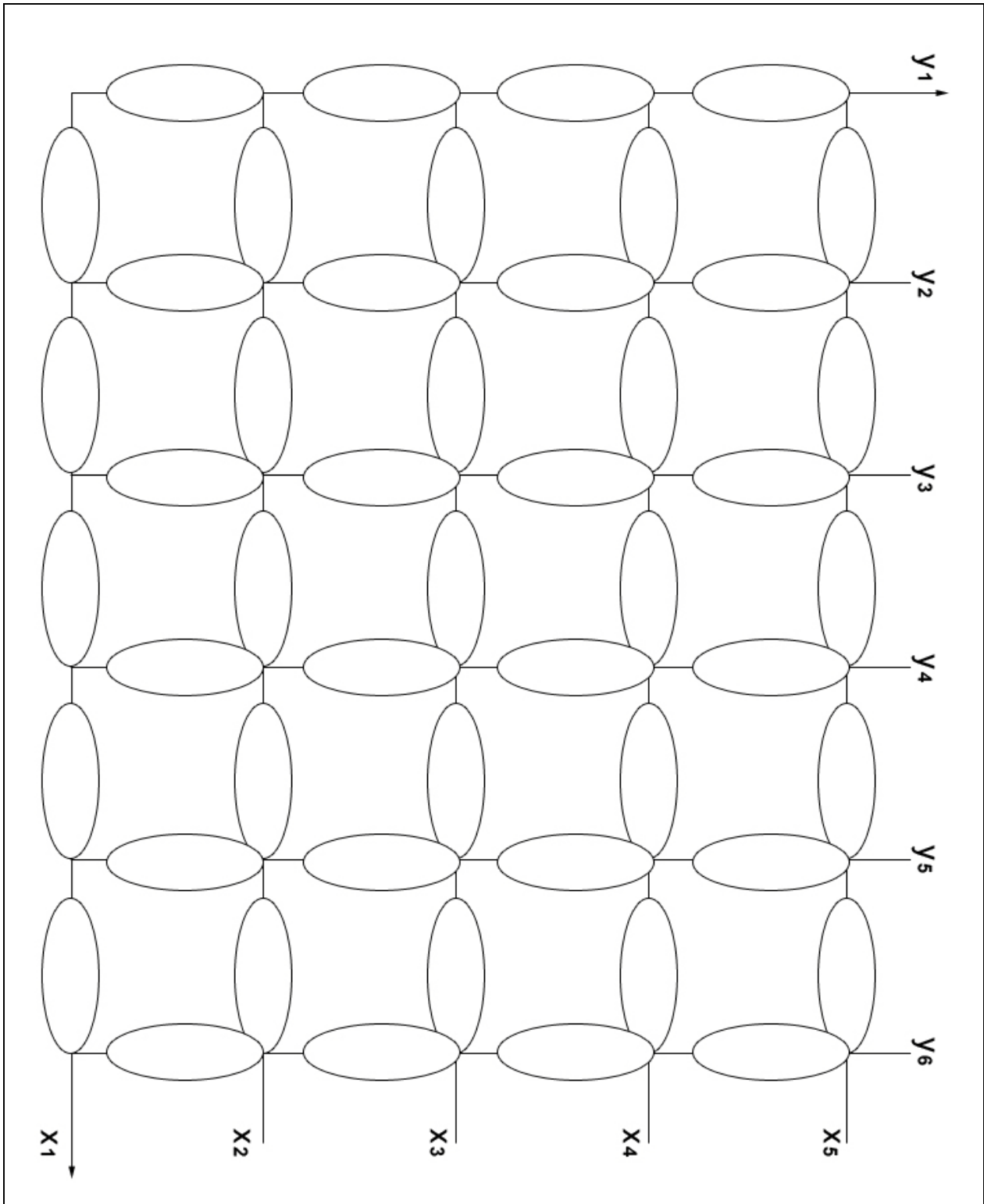
Mjerenje se vrši koincidentnom libelom po mjernim pravcima prikazanim na slici 12.



Slika 12. Podjela mjerne ploče na pravce

Korak mjerenja iznosi $L = \underline{\hspace{2cm}}$.

Rezultate mjerenja potrebno je upisati u podlogu 1

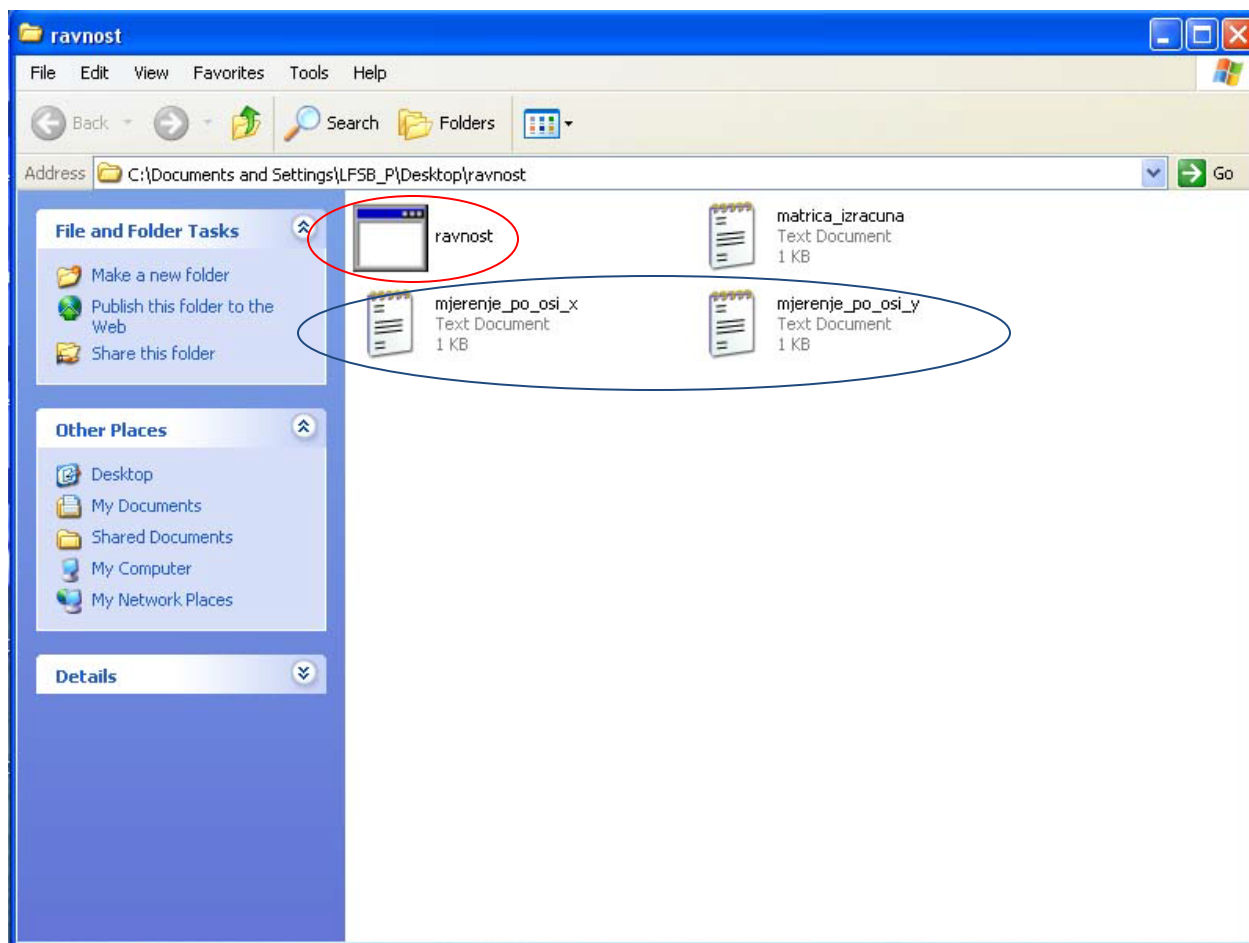


Podloga 1: Izmjerene vrijednosti točaka, mm/m

Obrada podataka:

Program za račun odstupanja od ravnosti nalazi se u datoteci ravnost čiji je sadržaj prikazan na slici 13.

Unos podataka provodi se na način da se otvore datoteke *mjerjenje_po_osi_x* za vrijednosti točaka po x osi i *mjerjenje_po_osi_y* za vrijednosti točaka po y osi u koje je potrebno upisati rezultate mjerenja (iz podloge 1).



Slika 13. Program za račun odstupanja od ravnosti

Kad su rezultati upisani potrebno je pokrenuti datoteku *ravnost.exe*.

Odstupanje od ravnosti:

Izmjereno odstupanje - <i>Tra</i> (μm)	Dopušteno odstupanje (μm)

Dobivene podatke i rezultate komentirati.

Komentar:

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Mjerenje hrapavosti tehničkih površina

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

Datum:

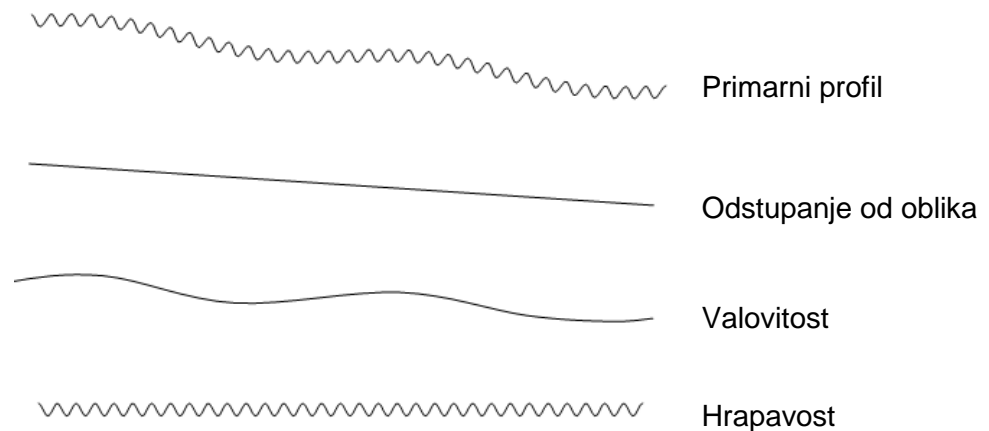
Pregledao:

Ocjena vježbe:

2D SUSTAV ISPITIVANJA HRAPAVOSTI POVRŠINA

2D sustav ispitivanja hrapavosti površine temelji se na mjerenju dvodimenzionalnog profila na kojem se računaju 2D parametri hrapavosti.

Mjernim uređajem (elektroničko-mehanički uređaj s ticalom) snima se primarni profil koji uključuje tri komponente profila: **odstupanje od oblika, valovitost i hrapavost** (slika 1).



Slika 1. Komponente profila

Filtriranje

Postupkom filtriranja izdvajaju se određene komponente profila. Ovisno koju komponentu profila želimo, postupak filtriranja može biti:

- propuštanje komponenti kratkih valnih duljina (visoke frekvencije), pa se izdvaja hrapavost;
- propuštanje komponenti dugih valnih duljina (niske frekvencije), pa se izdvaja ili valovitosti ili oblik;
- izdvajanje komponenti specificirane širine upotrebom oba filtra.

Granična vrijednost filtra (*Cut-off*)

Granična vrijednost filtra (λ_c) numerički određuje graničnu frekvenciju ispod ili iznad koje su komponente izdvojene ili eliminirane. U tablici 1 nalaze se preporučene granične vrijednosti filtra (λ_c) prema normi *ISO 4288:1996 Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*.

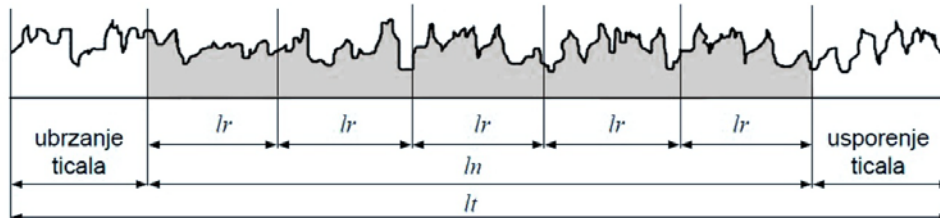
Tablica 1. Preporučene granične vrijednosti filtra (λ_c)

Periodični profil	Neperiodični profil		Granična vrijednost filtra
RSm u mm	Rz u μm	Ra u μm	λ_c u mm
> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08
> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1	0,25
> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2	0,8
> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10	2,5
> 1,3 do 4	> 50	> 10	8

2D sustav ispitivanja stanja hrapavosti površine prepoznaje tri **karakteristične duljine**:

- duljina ispitivanja l_t
- duljina vrednovanja l_n
- referentna duljina l_r

Referentna duljina (l_r) je iznosom jednaka graničnoj vrijednosti filtra (λ_c). Na slici 2 prikazan je odnos karakterističnih duljina:



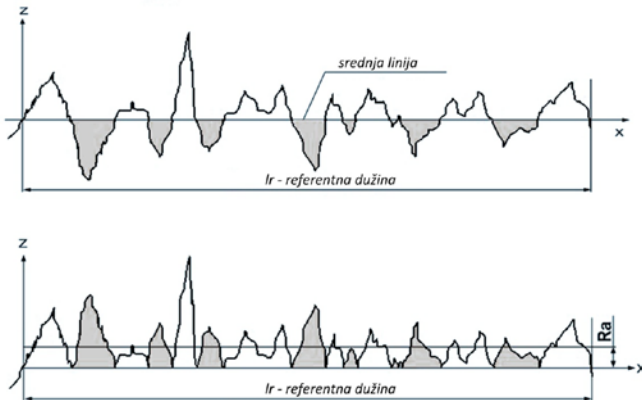
Slika 2. Karakteristične duljine 2D profila hrapavosti

Parametri hrapavosti profila dijele se u četiri kategorije:

- amplitudni parametri (opisuju varijacije po visini profila)
- uzdužni parametri (opisuju varijacije uzduž profila)
- hibridni parametri (opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila)
- krivuljni i srodni (opisuju varijacije na krivuljama dobivenih iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila)

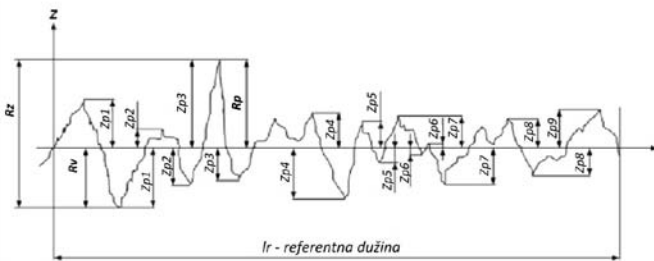
Za izvođenje ove vježbe potrebno je poznavati slijedeće parametre hrapavosti:

- Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra (amplitudni parametar)

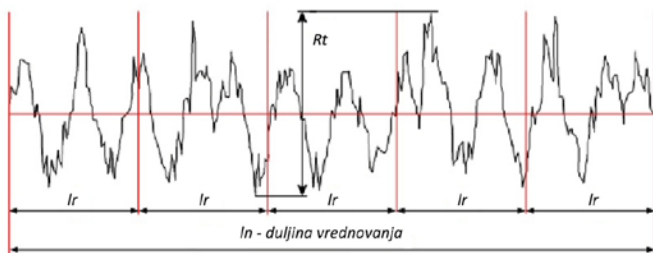


$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx$$

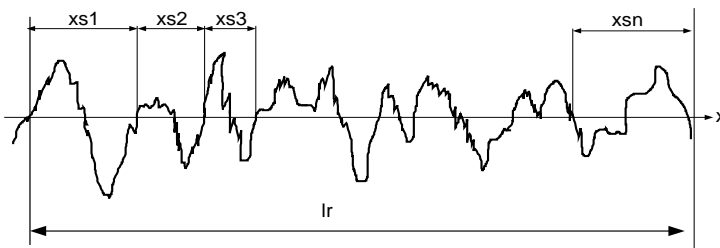
- Najveća visina profila Rz (amplitudni parametar)



- Ukupna visina profila Rt (amplitudni parametar)

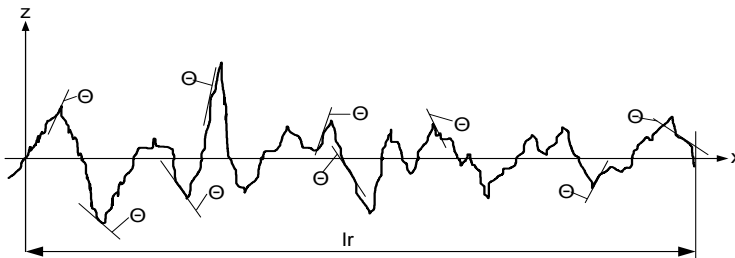


- Srednji korak elemenata profila RSm (uzdužni parametar)



$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{S_i}$$

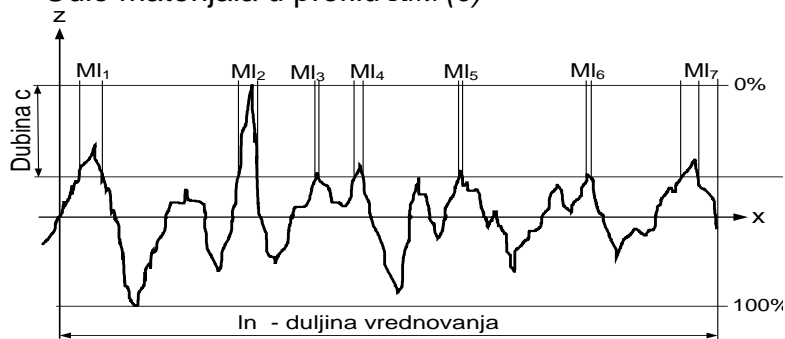
- Srednji kvadratni nagib profila $R\Delta q$ (hibridni parametar)



$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} (\Theta(x) - \bar{\Theta})^2 dx}$$

$$\bar{\Theta} = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} \Theta(x) dx$$

- Udio materijala u profilu $Rmr(c)$



$$Rmr(c) = MI(c) / l_n$$

Zadatak 1. UVJETI MJERENJA

U software-u TalyProfile Silver nalaze se četiri snimljena profila hrapavosti površina pod nazivima *Profil 1, ..., Profil 4*. Potrebno je otvoriti file-ove s učitanim profilima i popuniti Tablicu 2.

Tablica 2. Uvjeti mjerenja

Naziv profila	Nazivna vrijednost	Vrsta profila	Cut-off λ_c , mm	Referentna duljina l_r , mm	Duljina ocjenjivanja l_n , mm
<i>Profil 1</i>	$Ra = 1 \mu\text{m}$				
<i>Profil 2</i>	$Ra = 1 \mu\text{m}$				
<i>Profil 3</i>	$Rz = 20 \mu\text{m}$				
<i>Profil 4</i>	$RSm = 25 \mu\text{m}$				

Za profile hrapavosti pod nazivima *Profil 1* i *Profil 2* potrebno je odrediti simbole i vrijednosti šest parametara hrapavosti iz Tablice 3 (*Parametar br. 1, ... Parametar br. 6*) kao i kategoriju (amplitudni, uzdužni ili hibridni) u koju se pojedini parametar ubraja. U nastavku su dani nazivi traženih parametra hrapavosti.

Tablica 3. Rezultati mjerenja

Vrijednosti u μm

Parametar br.	Simbol	Kategorija	Profil 1	Profil 2
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				

Parametar br. 1 - Srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti

Parametar br. 2 - Najveća visina profila

Parametar br. 3 - Ukupna visina profila

Parametar br. 4 - Srednji korak elemenata profila

Parametar br. 5 - Srednji kvadratni nagib profila

Parametar br. 6 - Udio materijala u profilu

Zadatak 2. ISPITNA POVRŠINA / OTISAK

U software-u TalyProfile Silver nalaze se četiri snimljena profila hrapavosti površina pod nazivima *Profil 5*,...,*Profil 8*.

Profil 5 predstavlja profil snimljen za ispitnoj površini, a *Profil 6* jest profil hrapavosti snimljen na otisku (replici) iste ispitne površine. Isto tako, *Profil 7* predstavlja profil snimljen za drugoj ispitnoj površini, a *Profil 8* je profil hrapavosti s otiska druge ispitne površine. Potrebno je otvoriti file-ove s učitanim profilima i u Tablicu 4 upisati vrijednosti parametra *Ra*.

Tablica 4. Vrijednost parametra *Ra*

Vrijednosti u μm

<i>Parametar,</i> <i>μm</i>	<i>Profil 5</i> <i>Ispitna površina I</i>	<i>Profil 6</i> <i>Replika površine I</i>	<i>Profil 7</i> <i>Ispitna površina II</i>	<i>Profil 8</i> <i>Replika površine II</i>
<i>Ra</i>				

Odgovorite na slijedeća pitanja:

1. Ovisno u kojem parametru hrapavosti se vrši odabir referentnih duljina kod regularnih i iregularnih profila?
2. Kako tumačite da su vrijednosti parametra *Ra* kod Profila 1 i Profila 2 bliske dok vizualni pregled površina na kojima su ti profili snimljeni ne upućuje na tu činjenicu?
3. Koje ste jedinice koristili pri definiranju izračunatih parametara hrapavosti?
4. Kako tumačite rezultate iz tablice 4?

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Analiza rezultata mjerenja sukladno normi ISO 5725:1994

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

Analiza rezultata mjerenja u laboratorijskim uvjetima sukladno normi ISO 5725:1994

Analiza uključuje statistički postupak procjenjivanja ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja provedenih u laboratorijskim uvjetima. Opisanim statističkim postupkom je moguće analizirati rezultate mjerenja unutar laboratorija i između različitih laboratorija.

Osnovni pojmovi

Mjerna ponovljivost – bliskost slaganja međusobno neovisnih rezultata uzastopnih mjerenja iste veličine dobivenih u uvjetima ponovljivosti mjerenja. Uvjeti ponovljivosti su uvjeti pri kojima su međusobno neovisni rezultati ispitivanja dobiveni uz:

- primjenu iste mjerne metode;
- istog mjeritelja;
- isti mjerni uređaj ili instrument;
- isto mjesto;
- isti mjerni objekt;
- iste okolišne uvjete;
- ponavljanje u kratkom vremenskom razdoblju;
- nepromjenjivost objekta mjerenja tijekom ispitivanja.

Mjerna vrijednost ponovljivosti r je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika između dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja dobivena u uvjetima ponovljivosti, uz vjerojatnost P .

Kritična razlika ponovljivosti $C_r D_r$ je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata ispitivanja dobivena u uvjetima ponovljivosti sa specificiranom vjerojatnosti.

Mjerna obnovljivost je bliskost slaganja rezultata mjerenja iste veličine dobivenih u uvjetima obnovljivosti. Uvjeti obnovljivosti su uvjeti pri kojima su rezultati ispitivanja

dobiveni istom metodom na istom objektu, ali uz različite okolnosti ispitivanja, kao što su:

- različiti mjeritelji;
- različiti mjerni instrumenti i oprema;
- različiti, ali za vrijeme mjerenja stalni okolišni uvjeti i mjesta mjerenja.

Mjerna vrijednost obnovljivosti R , je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dvaju rezultata mjerenja, dobivena u uvjetima obnovljivosti, uz vjerojatnost P .

Kritična razlika obnovljivosti $C_r D_R$ je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dvaju rezultata ispitivanja, dobivena u uvjetima obnovljivosti sa specificiranom vjerojatnosti.

Matrični model

br. niza. i br. mjerenja. j	1	2	... i ...	$m-1$	m
1	X_{11}	X_{21}	X_{i1}	$X_{(m-1)1}$	X_{m1}
2	X_{21}	X_{22}	X_{i2}	$X_{(m-1)2}$	X_{m2}
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
j	X_{1j}	X_{2j}	X_{ij}	$X_{(m-1)j}$	X_{mj}
·	·	·	·	·	·
$n-1$	$X_{1(n-1)}$	$X_{2(n-1)}$... $X_{i(n-1)}$...	$X_{(m-1)(n-1)}$	$X_{m(n-1)}$
n	X_{1n}	X_{2n}	... X_{in} ...	$X_{(m-1)n}$	X_{mn}
\bar{x}					
S_i					

Oznaka	Naziv	Značenje	Izraz
\bar{x}_i	aritmetička sredina i -tog mjernog niza (n_i rezultata mjerenja)		$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n_i}$
$\bar{\bar{x}}$	aritmetička sredina od N rezultata mjerenja		$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_i \cdot n_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}}{N}$
s_i	eksperimentalno (procijenjeno) standardno odstupanje pojedinačnih opažanja (mjerenja) unutar i -tog mjernog niza	opisuje rasipanje pojedinačnih opažanja (mjerenja) (unutar jednog niza) oko njihove aritmetičke sredine	$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n_i - 1}}$
s_r	skupno eksperimentalno (procijenjeno) standardno odstupanje pojedinačnih opažanja (mjerenja) unutar mjernih nizova	opisuje rasipanje pojedinačnih opažanja (mjerenja) (unutar mjernih nizova) oko njihove aritmetičke sredine	$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}}$
s	eksperimentalno (procijenjeno) standardno odstupanje pojedinačnih opažanja (mjerenja)		<p>uz uvjet da su mjerenja provedena u jednom mjernom nizu ($m = 1$) $s = s_r = s_i$</p> $s = s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n_i - 1}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p>uz uvjet da su mjerenja provode u m mjernih nizova</p> $s = s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}}$ <p>za $n_1 = n_2 = n_3 = n$</p> $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m s_i^2}{m}}$ <p>za $m = 2$ i $n_1 = n_2 = n$</p> $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 s_i^2}{2}} = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{2}}$

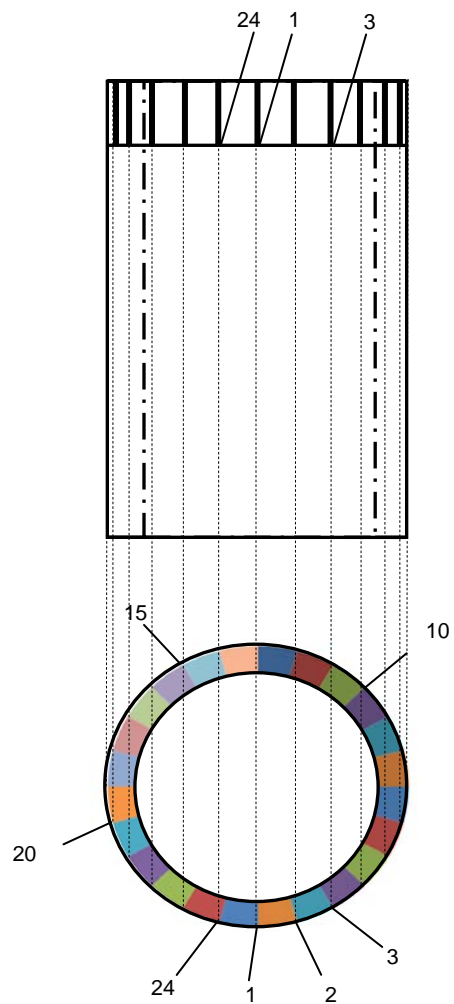
$s_{\bar{x}}$	eksperimentalno (procijenjeno) standardno odstupanje aritmetičkih sredina uzoraka kod mjerne nesigurnosti se koristi termin standardna nesigurnost A vrste	mjerna nesigurnost aritmetičke sredine	$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$
s_L	međulaboratorijsko eksperimentalno (procijenjeno) standardno odstupanje		$s_L = \sqrt{\frac{s_d^2 - s_r^2}{\bar{n}}}$ $\bar{n} = \frac{1}{m-1} \left(\sum_{i=1}^m n_i - \frac{\sum_{i=1}^m n_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i} \right)$
s_d		rasipanje aritmetičkih sredina (\bar{x}_i) mjernih nizova oko aritmetičke sredine svih opažanja (mjerenja) (\bar{x})	$s_d = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2}$
s_R	eksperimentalno (procijenjeno) standardno odstupanje obnovljivosti		$s_R = \sqrt{s_r^2 + s_L^2}$
r	mjerna vrijednost ponovljivosti	vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja, uz vjerojatnost P .	$r = t\sqrt{2}s_r$ t – studentov faktor
R	mjerna vrijednost obnovljivosti	vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dva rezultata mjerenja, uz vjerojatnost P .	$R = t\sqrt{2}s_R$ t – studentov faktor
$C_r D_r$	kritična razlika ponovljivosti	vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja, uz definiranu vjerojatnost	$C_r D_r(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = r \sqrt{\frac{1}{2n_1} + \frac{1}{2n_2}}$ uz $n_1 = n_2 = n$ $C_r D_r(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \frac{r}{\sqrt{n}}$ za m mjernih nizova $C_r D_r(\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min}) = \frac{r}{\sqrt{n}}$

$C_r D_R$	kritična razlika obnovljivosti	vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dva rezultata mjerenja, uz definiranu vjerojatnost	$C_r D_R(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \sqrt{R^2 - r^2 \left(1 - \frac{1}{2n_1} - \frac{1}{2n_2}\right)}$ <p>uz $n_1 = n_2 = n = 2$</p> $C_r D_R(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \sqrt{R^2 - \frac{r^2}{2}}$ <p>za m mjernih nizova</p> $C_r D_R(\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min}) = \sqrt{R^2 - r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)}$
-----------	--------------------------------	--	--

Studentov parametar t (za broj stupnjeva slobode $\nu = n - 1$ i prag signifikantnosti α) potrebno je očitati iz tablice ili izračunati korištenjem programa excel sa naredbom TINV.

Analiza rezultata mjerenja debljine stjenke cijevi sukladno normi ISO 5725:1994

Vanjski promjer cijevi podijeljen je na 24 dijela s korakom od 15° , kako je prikazano na slici 1. Na označenim mjernim mjestima predmeta mjerenja potrebno je izmjeriti vanjski, te unutarnji promjer koristeći pomično mjerio. Mjerenja ponoviti tri puta, te rezultate mjerenja upisati u tablice 1 i 2.



Slika 1. Prikaz mjernih mjesta

Tablica 1. Rezultati mjerenja vanjskog promjera cijevi

<i>Mjerno mjesto</i>	<i>Očitana vrijednost, mm</i>		
	<i>Mjerni niz I</i>	<i>Mjerni niz II</i>	<i>Mjerni niz III</i>
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
\bar{x}			
s			

Tablica 2. Rezultati mjerenja unutarnjeg promjera cijevi

Mjerno mjesto	Očitana vrijednost, mm		
	Mjerni niz I	Mjerni niz II	Mjerni niz III
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
\bar{x}			
s			

Provesti analizu ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja sukladno zahtjevima norme ISO 5725-2:1994 "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method".

Potrebno je utvrditi da li su rezultati ponovljivi, odnosno obnovljivi.

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Analiza mjernog sustava R&R

Prezime i ime studenta:

Matični broj:

Datum:

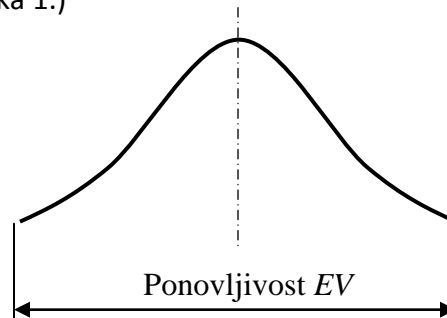
Pregledao:

Ocjena vježbe:

ANALIZA MJERNOG SUSTAVA R&R

EV – Ponovljivost (Equipment variation)

Ponovljivost je rasipanje rezultata mjerenja dobiveno od strane jednog mjeritelja pri višestrukom mjerenju identične karakteristike na istim predmetima mjerenja (uzorcima) uz korištenje istog instrumenta (slika 1.)



Slika 1. Ponovljivost mjernih rezultata

Ponovljivost je vrijednost koja u najvećoj mjeri određuje utjecaj mjerila u varijaciji mjernog sustava. Ponovljivost se računa temeljem sljedećeg izraza:

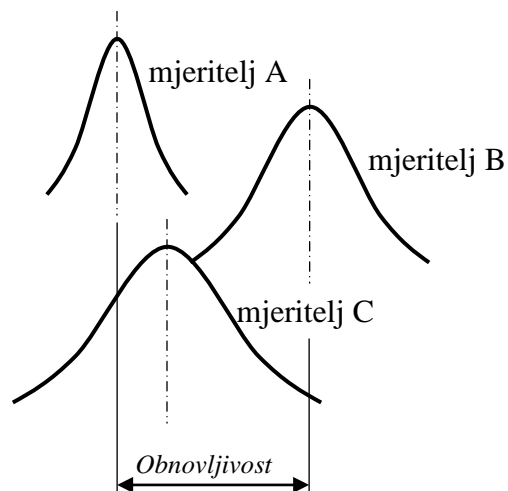
$$EV = 5,15 \frac{\bar{R}}{d_2}$$
$$\bar{R} = \frac{\sum R}{g}$$

gdje je: \bar{R} - srednji raspon rezultata mjerenja.

d_2 - empirijski faktor koji povezuje procijenjeno standardno odstupanje i raspon rezultata mjerenja. Faktor d_2 u funkciji je broja ponovljenih mjerenja m i broja raspona g (tablica 4). Broj raspona g jednak je umnošku broja predmeta mjerenja (uzoraka) i broja mjeritelja.

AV – Obnovljivost (Appraiser variation)

Obnovljivost je rasipanje rezultata mjerenja dobiveno od strane većeg broja mjeritelja pri višestrukom mjerenju identične karakteristike na istim predmetima mjerenja uz korištenje istog ili različitog mjernog instrumenta (slika 2.). U slučaju da u mjernom sustavu sudjeluje samo jedan mjeritelj, obnovljivost je definirana kao rasipanje rezultata mjerenja dobiveno pri višestrukom mjerenju identične karakteristike na istim predmetima mjerenja uz korištenje istog ili različitog mjernog instrumenta kroz duži vremenski period.



Slika 2. Obnovljivost mjernih rezultata

Obnovljivost je vrijednost koja u najvećoj mjeri određuje utjecaj mjeritelja u varijaciji mjernog sustava. Obnovljivost se računa temeljem sljedećeg izraza:

$$AV = 5,15 \frac{R_0}{d_2^*}$$

$$R_0 = \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min}$$

gdje je: R_0 - raspon aritmetičkih sredina svih rezultata svih mjeritelja.

d_2^* - empirijski faktor koji povezuje procijenjeno standardno odstupanje i raspon rezultata mjerenja. U funkciji je broja mjeritelja m i broja raspona g . Broj raspona g u ovom slučaju jednak je 1.

Budući je u vrijednosti obnovljivosti izračunatoj na ovaj način uključena i varijacija rezultata uzrokovana mjerilom (ponovljivost), potrebno je napraviti korekciju, odnosno isključiti vrijednost ponovljivosti.

$$AV = \sqrt{\left[5,15 \frac{R_0}{d_2^*}\right]^2 - \left[5,15 \frac{\bar{R}}{d_2^*}\right]^2 \left[\frac{1}{n \cdot r}\right]}$$

gdje je n broj predmeta mjerenja, a r broj ponovljenih mjerenja.

R&R – Ponovljivost i obnovljivost (Repeatability and reproducibility)

Rasipanje rezultata mjerenja uslijed zajedničkog učinka ponovljivosti i obnovljivosti:

$$R \& R = \sqrt{EV^2 + AV^2}$$

PV – Varijacija predmeta mjerenja (Part variation)

Varijacija predmeta mjerenja je vrijednost koja u najvećoj mjeri određuje utjecaj predmeta mjerenja u varijaciji mjernog sustava. Varijacija predmeta mjerenja se računa temeljem sljedećeg izraza:

$$PV = 5,15 \frac{R_p}{d_2^{\otimes}}$$

gdje je: R_p - raspon aritmetičkih sredina rezultata predmeta mjerenja.

d_2^{\otimes} - empirijski faktor koji povezuje procijenjeno standardno odstupanje i raspon rezultata mjerenja. U funkciji je broja predmeta mjerenja m i broja raspona g . Broj raspona g u ovom slučaju jednak je 1.

TV - Ukupna varijacija (Total variation)

Ukupna varijacija uključuje rasipanje rezultata mjerenja uslijed utjecaja ponovljivosti, obnovljivosti i varijacije predmeta mjerenja. Ukupna varijacija računa se temeljem sljedećeg izraza:

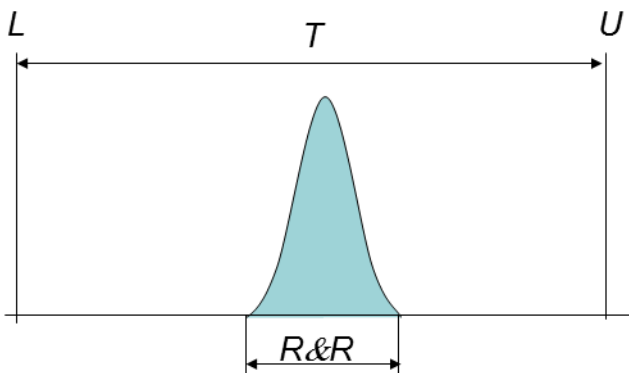
$$TV = \sqrt{(R \& R)^2 + PV^2}$$

Sposobnost mjernog sustava predstavlja udio varijabilnosti mjernog sustava ($R\&R$) iskazanog postotkom područja dopuštenog tolerancijskog polja (T) ili ukupne varijacije (TV), slika 3.

$$\text{Sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{TV} \cdot 100\%$$

ili

$$\text{Sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{T} \cdot 100\%$$



$$\text{sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{T} \cdot 100\%$$

Slika 3. Sposobnost mjernog sustava

Tablica 3. Skupna tablica, mm

Predmet mjerenja											
Mjerna značajka											
Mjerno sredstvo											
Gornja granica tolerancije U											
Donja granica tolerancije L											
		Uzorak broj									
Mjeritelj	Mjerenje br.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	1										
	2										
	3										
	\bar{X}										$\bar{X}_A =$
	R										$\bar{R}_A =$
	1										
	2										
	3										
	\bar{X}										$\bar{X}_B =$
	R										$\bar{R}_B =$
	1										
	2										
	3										
	\bar{X}										$\bar{X}_C =$
	R										$\bar{R}_C =$
\bar{X}_p											$R_p =$
$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_A + \bar{X}_B + \bar{X}_C}{3} =$											
$\bar{\bar{R}} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{3} =$											
$R_0 = \bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min} =$											

Pomično mjerilo:

$$EV = 5,15 \frac{\overline{\overline{R}}}{d_2} =$$

$$AV = \sqrt{\left[5,15 \frac{R_0}{d_2^\bullet}\right]^2 - \left[5,15 \frac{\overline{R}}{d_2}\right]^2 \left[\frac{1}{n \cdot r}\right]} =$$

$$PV = 5,15 \frac{R_p}{d_2^\otimes} =$$

$$R \& R = \sqrt{EV^2 + AV^2} =$$

$$TV = \sqrt{(R \& R)^2 + PV^2} =$$

$$\text{Sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{TV} \cdot 100\% =$$

ili

$$\text{Sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{T} \cdot 100\% =$$

Mikrometar:

$$EV = 5,15 \frac{\overline{\overline{R}}}{d_2} =$$

$$AV = \sqrt{\left[5,15 \frac{R_0}{d_2^\bullet}\right]^2 - \left[5,15 \frac{\overline{R}}{d_2}\right]^2 \left[\frac{1}{n \cdot r}\right]} =$$

$$PV = 5,15 \frac{R_p}{d_2^\otimes} =$$

$$R \& R = \sqrt{EV^2 + AV^2} =$$

$$TV = \sqrt{(R \& R)^2 + PV^2} =$$

$$\text{Sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{TV} \cdot 100\% =$$

ili

$$\text{Sposobnost mjernog sustava} = \frac{R \& R}{T} \cdot 100\% =$$

Tablica 4. Vrijednosti faktora d_2

	m													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,41	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83	2,96	3,08	3,18	3,27	3,35	3,42	3,49	3,55
2	1,28	1,81	2,15	2,40	2,60	2,77	2,91	3,02	3,13	3,22	3,30	3,38	3,45	3,51
3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75	2,89	3,01	3,11	3,21	3,29	3,37	3,43	3,50
4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74	2,88	3,00	3,10	3,20	3,28	3,36	3,43	3,49
5	1,19	1,74	2,10	2,36	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	3,19	3,28	3,35	3,42	3,49
6	1,18	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	3,19	3,27	3,35	3,42	3,49
7	1,17	1,73	2,09	2,35	2,55	2,72	2,87	2,99	3,10	3,19	3,27	3,35	3,42	3,48
8	1,17	1,72	2,08	2,35	2,55	2,72	2,87	2,98	3,09	3,19	3,27	3,35	3,42	3,48
9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,35	3,42	3,48
10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,42	3,48
11	1,16	1,71	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
12	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,72	2,85	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
13	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,71	2,85	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
14	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
15	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	3,18	3,26	3,34	3,41	3,48
>15	1,128		2,059		2,534		2,847		3,078		3,258		3,407	
		1,693		2,326		2,704		2,970		3,173		3,336		3,472

Tablica 5. Ocjena sposobnosti mjernog sustava pri korištenju pomičnog mjerila

Udio u tolerancijskom polju T , %	EV	AV	$R\&R$	PV

Udio u ukupnoj varijaciji TV , %	EV	AV	$R\&R$	PV

Tablica 6. Ocjena sposobnosti mjernog sustava pri korištenju mikrometra

Udio u tolerancijskom polju T , %	EV	AV	$R\&R$	PV

Udio u ukupnoj varijaciji TV , %	EV	AV	$R\&R$	PV

Zaključak:

Laboratorijske vježbe iz kolegija

TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA

Mjerna nesigurnost

Prezime i ime studenta:

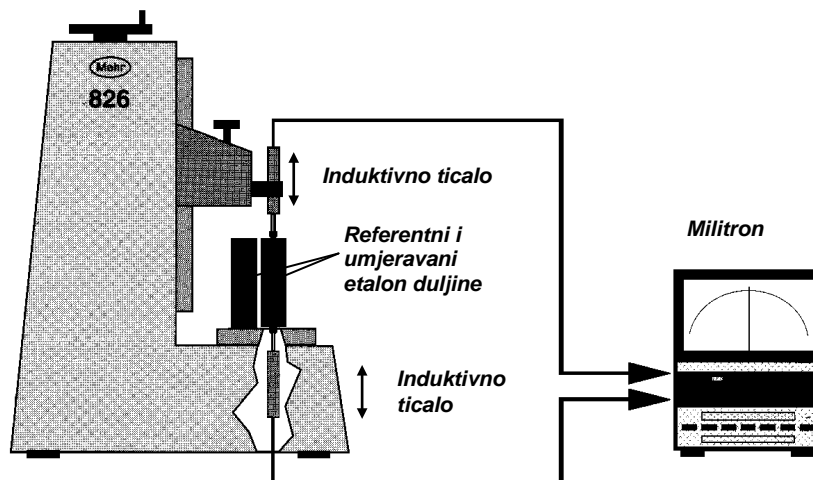
Matični broj:

Datum:

Pregledao:

Ocjena vježbe:

Usporedbena metoda mjerenja duljine etalona do 100 mm



Slika 1. Shematski prikaz elektronskog komparatora

Utjecajne veličine u postupku umjeravanja etalona duljine, usporedbenom metodom

Referentni etaloni duljine:

- izmjerena duljina referentnog etalona;
- vremensko starenje materijala etalona duljine.

Izmjerena razlika duljine referentnog i umjeravanog etalona:

- ponovljivost pozicioniranja komparatora;
- nelinearnost komparatora;
- geometrija površine etalona.

Utjecaj temperature:

- razlika temperatura referentnog i umjeravanog etalona;
- varijacija temperature okoline;
- linearni koeficijent temperaturnog rastezanja.

1. Matematički model:

$$L_e = L_{ref} + \delta L_D + \delta L + \delta L_C - L_{ref} (\theta_e \delta \alpha + \alpha_{ref} \delta \theta) - \delta L_V \quad (1)$$

pri čemu je:

$$\delta \theta = \theta_e - \theta_{ref}$$

$$\delta \alpha = \alpha_e - \alpha_{ref}$$

L_e	- duljina umjeravanog etalona pri temperaturi od 20 °C
L_{ref}	- duljina referentnog etalona pri temperaturi od 20 °C
δL_D	- utjecaj vremenskog starenja materijala etalona
δL	- izmjerena razlika duljine umjeravanog i referentnog etalona
δL_C	- utjecaj nelinearnosti komparatora
θ_e	- odstupanje temperature umjeravanog etalona od 20 °C
α_e	- linearni koeficijent temperaturnog rastezanja umjeravanog etalona
α_{ref}	- linearni koeficijent temperaturnog rastezanja referentnog etalona
θ_{ref}	- odstupanje temperature referentnog etalona od 20 °C
δL_V	- utjecaj središnje točke na mjernoj površini etalona

Duljina umjeravanog etalona L_e , odnosno nesigurnost dobivenog rezultata, u funkciji je sljedećih veličina:

$$L_e = f(L_{ref}, \delta L_D, \delta L, \delta L_C, \alpha_{ref}, \theta_e, \delta \alpha, \delta \theta, \delta L_V) \quad (2)$$

2. Procjena utjecajnih veličina

Nesigurnost umjeravanja duljine referentnog etalona $u(L_{ref})$

Nesigurnost korekcije duljine referentnog etalona $u(L_{ref})$ proizlazi iz potvrde o umjeravanju etalona duljine interferometrijskom metodom. To je sastavnica mjerne nesigurnosti B vrste.

Za LFSB postupak iz potvrde o umjeravanju broj 4317/2003 izdane od PTB, slijedi proširena nesigurnost umjeravanja duljine referentnog etalona.

$$U(L_{ref}) = (20 + 0,30L) \text{ nm}, L \text{ u mm, uz faktor pokrivanja } k = 2 \text{ i } P = 95\% .$$

Stoga je standardna nesigurnost:

Nesigurnost uslijed vremenskog starenja materijala $u(\delta L_D)$

Ovisno o načinu proizvodnje materijala pojedini etaloni mogu bubriti ili smanjivati duljinu kroz vremenski interval. U nedostatku statističkih analiza i studija, procjena nesigurnosti zbog vremenskog starenja materijala može se bazirati na iskustvu i istraživanju drugih. Prema normi ISO 3650:1998(E) najveća dopuštena promjena duljine kroz godinu dana iznosi $\pm(20 + 0,25L) \text{ nm}$, L u mm . Uz pretpostavku trokutaste raspodjele standardna nesigurnost iznosi :

Nesigurnost mjerenja razlike duljina $u(\delta L)$

Nesigurnost mjerenja razlike duljina između referentnih i umjeranih etalona procijenjena je na osnovu mjerenja pet etalona nazivnih duljina 0,5 mm; 1,005 mm; 1,010 mm; 4 mm i 100 mm. Mjerenja su provedena u uvjetima ponovljivosti koji uključuju: iste etalone, istog mjeritelja, konstantne uvjete okoline, isti instrument i višestruko mjerenje u kratkom vremenskom intervalu. Rezultati mjerenja razlike duljina između referentnih i umjeranih etalona prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati mjerenja razlike duljina između referentnih i umjeranih etalona

Mjerenje broj	Nazivna duljina etalona, mm				
	0,5	1,005	1,01	4	100
	Izmjerena razlika, μm				
1	0,09	0,03	0,03	0,08	0,32
2	0,08	0,06	0,04	0,07	0,31
3	0,08	0,05	0,05	0,07	0,31
4	0,07	0,06	0,05	0,09	0,32
5	0,08	0,06	0,05	0,08	0,32
s_i	0,007	0,013	0,009	0,008	0,005
s_p	0,009				

Za svaki etalon izvršeno je pet ponovljenih mjerenja. Zbirna procjena standardnog odstupanja s_p [GUM H.3.6] iznosi:

$$s_p = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2 + s_5^2}{5}}$$

Standardna nesigurnost izmjerenih razlika za pet ponovljenih mjerenja koliko se izvodi u postupku umjeravanja iznosi:

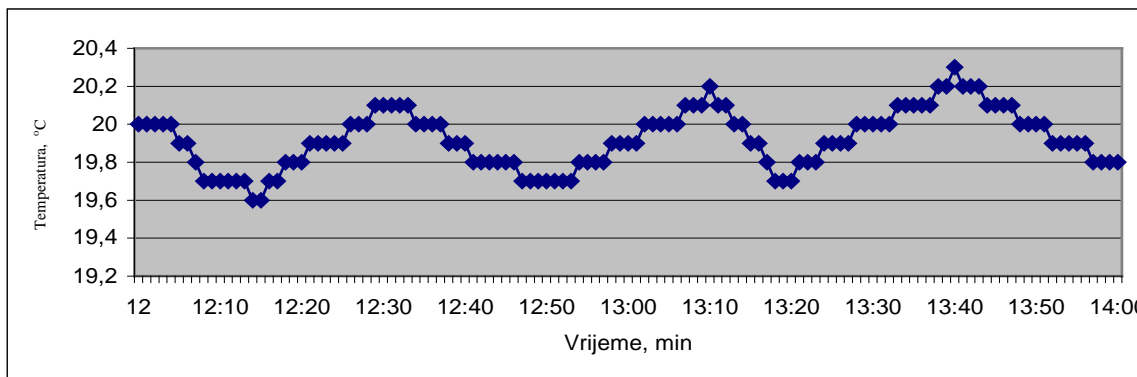
Nesigurnost uslijed nelinearnosti komparatora $u(\delta L_c)$

Ispitivanjem je utvrđena nelinearnost komparatora u iznosu od ± 32 nm. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe standardna nesigurnost iznosi:

Nesigurnost temperature etalona $u(\theta_e)$

U LFSB-u je komparator za mjerenje duljine etalona smješten u klimatiziranoj prostoriji. Komparator i prostor gdje se smještaju etaloni duljine, prije i za vrijeme umjeravanja, dodatno su termalno zaštićeni pleksiglasom. Termalna zaštita je otvorena s prednje strane, što omogućuje jednostavno rukovanja etalonima.

Da bi se utvrdile varijacije temperature, na mjestu gdje se provodi umjeravanje etalona, izvršeno je praćenje kretanja temperature unutar termalne zaštite u vremenskom intervalu od dva sata. Cikličke promjene temperature u tijeku 2 sata prikazane su dijagramom na slici 2.



Slika 2. Promjena temperature okoliša, u toku 2 sata, na mjestu gdje se nalazi komparator

Praćenjem temperature unutar dva sata utvrđena je srednja vrijednost temperature u iznosu od 19,9 °C. Maksimalno odstupanje temperature od srednje vrijednosti u periodu od 2 sata iznosi 0,4 °C . Radi se o sastavnici B mjerne nesigurnosti. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe unutar $\pm 0,4$ °C slijedi standardna nesigurnost:

Nesigurnost razlike temperatura etalona $u(\delta\theta)$

Može se pretpostaviti da su referentni i umjeravani etalon duljine na istoj temperaturi, ali bi razlika temperatura mogla ležati s istom vjerojatnošću bilo gdje u procijenjenom intervalu od - 0,1 °C do +0,1 °C. Standardna nesigurnost te razlike sastavnica je B vrste koja se može procijeniti pravokutnom razdiobom u granicama $\pm 0,1$ °C.

Nesigurnost razlika temperatura etalona $u(\delta\theta)$ iznosi:

Nesigurnost koeficijenta temperaturnog rastezanja $u(\alpha_{ref})$

Prihvaćena praksa je da iznos mjerne nesigurnosti koeficijenta temperaturnog rastezanja iznosi oko 10 % nazivne vrijednosti. Stoga se, za slučaj etalona izrađenih iz čelika, procjenjuje da koeficijent temperaturnog rastezanja leži s istom vjerojatnošću u intervalu $\alpha = (11,5 \pm 1) \cdot 10^{-6}$, K⁻¹. Standardna nesigurnost koeficijenta rastezanja referentnog etalona $u(\alpha_{ref})$ jednaka je standardnoj nesigurnosti koeficijenta rastezanja umjeravanog etalona $u(\alpha_e)$ i iznosi:

Nesigurnost razlike koeficijenata temperaturnog rastezanja $u(\delta\alpha)$

Nesigurnost razlike koeficijenata temperaturnog rastezanja $u(\delta\alpha)$ uz pretpostavku trokutaste razdiobe unutar intervala $\delta\alpha = \pm 2 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ iznosi:

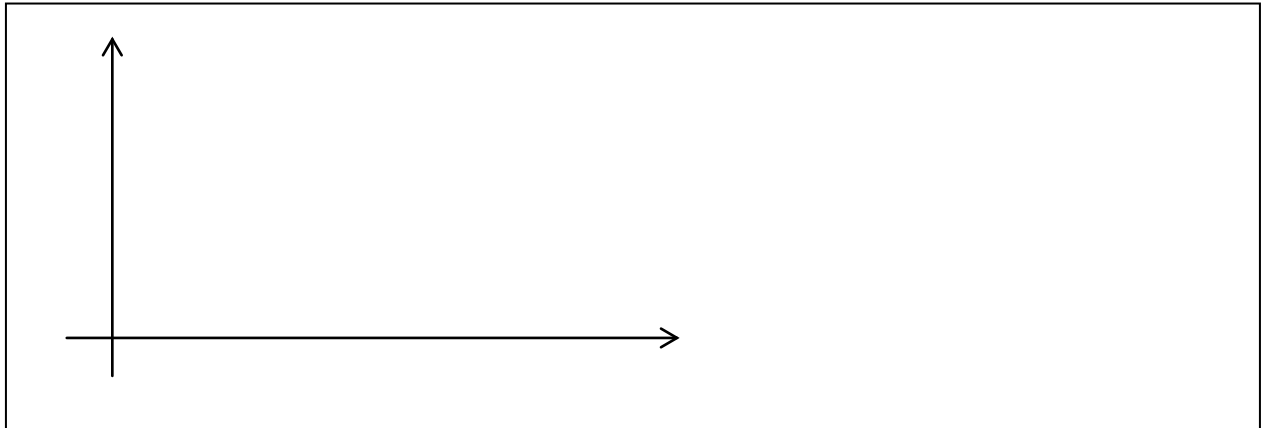
Nesigurnost uslijed mjerenja duljine u okolišu središnje točke $u(\delta L_V)$

Utvrđeno je da standardna nesigurnost promjenjivosti duljine etalona u okolišu središnje točke iznosi:

$$\text{za etalone do 50 mm:} \quad u(\delta L_V) = 3,2 \text{ nm}$$

$$\text{za etalone od 50 mm do 100 mm:} \quad u(\delta L_V) = 3,9 \text{ nm}$$

tako da se procjena $u(\delta L_V)$ može aproksimirati binomnim izrazom:



3. Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(L_e)$

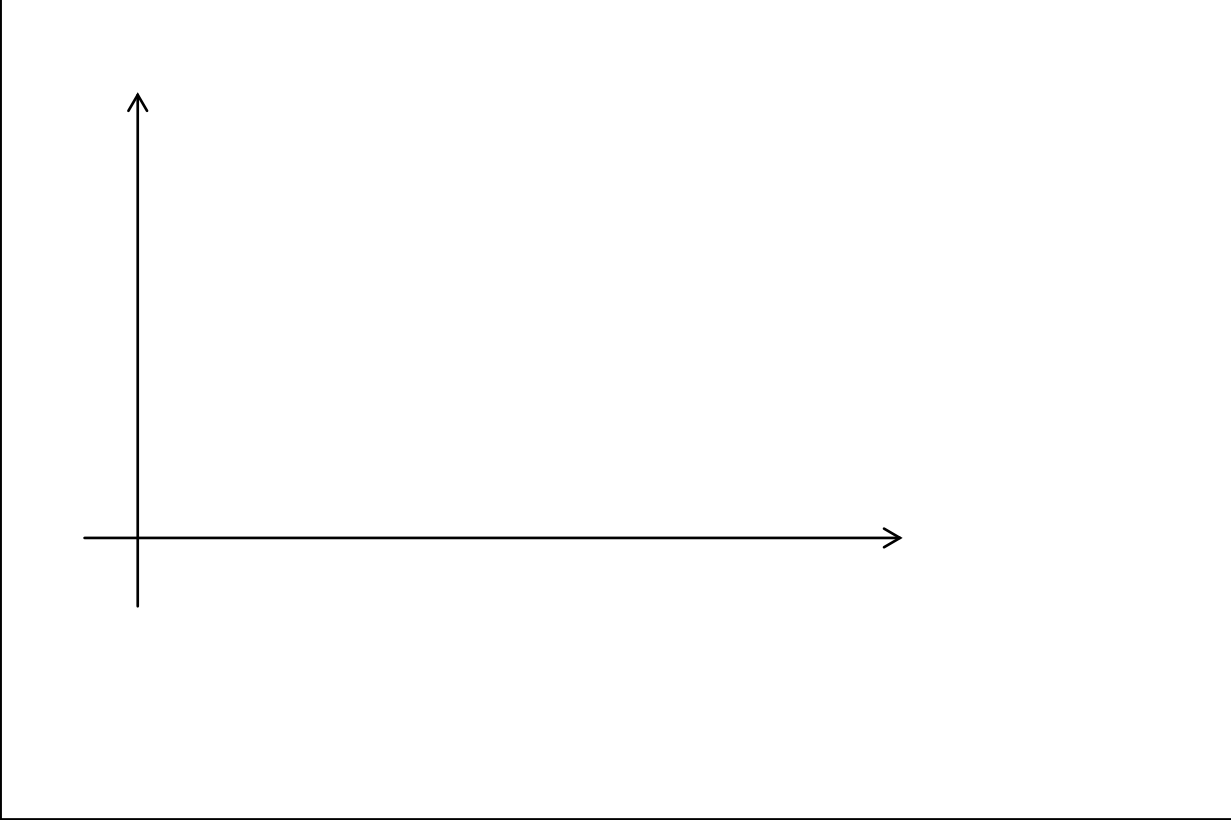
$$u_c^2(L_e) = c_{L_{ref}}^2 u^2(L_{ref}) + c_{\delta L_D}^2 u^2(\delta L_D) + c_{\delta L}^2 u^2(\delta L) + c_{\delta L_C}^2 u^2(\delta L_C) + c_{\alpha_{ref}}^2 u^2(\alpha_{ref}) + c_{\theta_e}^2 u^2(\theta_e) + c_{\delta \alpha_e}^2 u^2(\delta \alpha_e) + c_{\delta \theta}^2 u^2(\delta \theta) + c_{\delta L_V}^2 u^2(\delta L_V)$$

gdje su koeficijenti osjetljivosti c_i dani u tablici 2.

Tablica 2. Koeficijenti osjetljivosti c_i

x_i	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$
L_{ref}	$1 - (\delta \alpha \theta_e + \alpha_{ref} \delta \theta) \approx 1$
δL_D	1
δL	1
δL_C	1
θ_e	$-\delta \alpha \cdot L \approx 0$
$\delta \alpha$	$-L_{ref} \theta$
α_{ref}	$-L_{ref} \delta \theta \approx 0$
$\delta \theta$	$-L_{ref} \cdot \alpha_{ref}$
δL_V	-1

Linearizirana sastavljena nesigurnost



4. Proširena mjerna nesigurnost

LITERATURA

- [1] Francis T. Farago, Handbook of dimensional measurement, Industrial Press, 1982
- [2] JCGM 200:2008: Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, 2009.
- [3] International Standard: ISO 5725-2, Accuracy (trueness and precision) of measurement results, ISO, 1994.
- [4] JCGM 100:2008 Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti
- [5] Runje, B.: Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2002.