

Umjeravanje koincidentnih libela

Srnec, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:833931>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Srnec

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović, dipl. ing.

Student:

Ivan Srnec

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svim djelatnicima Laboratorija za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a najviše svom mentoru Vedranu Šimunoviću na prenesenom znanju, korisnim savjetima i pomoći pri izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci te prijateljima na iznimnoj potpori i pomoći tijekom dosadašnjeg studija.

Ivan Srnec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Ivan Srnec

Mat. br.: 0035208547

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Umjeravanje koincidentnih libela

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Calibration of Precision Spirit Level

Opis zadatka:

Koincidentne libele su mjerni instrumenti sa širokom primjenom pri mjerenju kuta (nagiba).

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina umjeravanje koincidentnih libela provodi se korištenjem sinus lineala i planparalelnih pomičnih mjerki kako bi se osigurali pouzdani rezultati mjerenja. Cilj ovog završnog je ispitati primjenu autokolimatora postupku umjeravanja preciznih libela.

U radu je potrebno:

- Opisati način rada autokolimatora i koincidentnih libela.
- Izvršiti umjeravanje koincidentne libele pomoću autokolimatora.
- Procijeniti mjernu nesigurnost.
- Analizirati i komentirati dobivene rezultate, te navesti prednosti i nedostatke provedenog postupka.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Vedran Šimunović

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | III |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. LIBELE..... | 3 |
| 2.1. Koincidentne libele | 4 |
| 2.1.1. Način mjerenja koincidentnom libelom..... | 5 |
| 3. SINUS LINEAL | 6 |
| 3.1. Konstrukcija | 6 |
| 3.2. Princip mjerenja | 7 |
| 3.3. Primjena | 8 |
| 4. AUTOKOLIMATOR | 9 |
| 4.1. Konstrukcija | 9 |
| 4.2. Princip rada | 10 |
| 4.3. Područja primjene | 12 |
| 4.4. Prednosti i nedostaci | 12 |
| 5. POSTUPAK UMJERAVANJA | 13 |
| 5.1. Mjerni sustav..... | 13 |
| 5.2. Postupak mjerenja..... | 16 |
| 5.3. Tumačenje rezultata | 22 |
| 6. POBOLJŠANJE POSTUPKA UMJERAVANJA..... | 25 |
| 6.1. Mjerni sustav..... | 25 |
| 6.2. Postupak mjerenja..... | 28 |
| 7. MJERNA NESIGURNOST | 37 |
| 7.1. Opis procjena mjerne nesigurnosti GUM metodom | 38 |
| 7.2. Mjerna nesigurnost na temelju dobivenih rezultata mjerenja | 42 |
| 7.2.1. Sastavnica mjerne nesigurnosti zbog spajanja dva seta mjerenja..... | 49 |
| 8. ZAKLJUČAK..... | 51 |
| LITERATURA..... | 53 |
| PRILOZI..... | 54 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Kategorije mjeriteljstva [2] | 1 |
| Slika 2. | Lanac sljedivosti [3] | 2 |
| Slika 3. | Cijevna libela (lijevo) i kružna libela (desno) [14] | 3 |
| Slika 4. | Koincidentna libela..... | 4 |
| Slika 5. | Sastavnice koincidentne libele [3]..... | 5 |
| Slika 6. | Sinus lineal [4]..... | 6 |
| Slika 7. | Konstrukcija sinus lineala | 7 |
| Slika 8. | Sinus lineal s planparalelnim graničnim mjerkama | 7 |
| Slika 9. | Autokolimator | 9 |
| Slika 10. | Konstrukcija autokolimatora [9] | 10 |
| Slika 11. | Reflektiranje zrake unutar autokolimatora [9] | 11 |
| Slika 12. | Mjerni sustav | 14 |
| Slika 13. | Proračun visine | 17 |
| Slika 14. | Određivanje visine H_I | 18 |
| Slika 15. | Set planparalelnih graničnih mjerki | 19 |
| Slika 16. | Početni položaj sklopa sa sinus linealom | 20 |
| Slika 17. | Poboljšani mjerni sustav..... | 25 |
| Slika 18. | Dio mjernog sustava s koincidentnom libelom | 26 |
| Slika 19. | Dio mjernog sustava s autokolimatorom..... | 27 |
| Slika 20. | Prikaz rezultata odstupanja kod prvog mjerenja | 30 |
| Slika 21. | Prikaz rezultata odstupanja kod drugog mjerenja | 32 |
| Slika 22. | Prikaz rezultata odstupanja kod trećeg mjerenja | 33 |
| Slika 23. | Srednje vrijednosti odstupanja | 35 |
| Slika 24. | Korigirane srednje vrijednosti odstupanja..... | 36 |
| Slika 25. | Skalarni odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine [12]..... | 38 |
| Slika 26. | Pravokutna razdioba [3] | 40 |
| Slika 27. | Trokutasta razdioba [3] | 40 |
| Slika 28. | Podaci potrebni za proračun prostornog kuta..... | 45 |
| Slika 29. | Odstupanja libele | 50 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Izračun visina potrebnih za proračun kuta | 18 |
| Tablica 2. Rezultati mjerenja..... | 21 |
| Tablica 3. Vrijednosti odstupanja koincidentne libele | 22 |
| Tablica 4. Vrijednosti odstupanja autokolimatora | 23 |
| Tablica 5. Rezultati za pozitivne vrijednosti kutova prvog mjerenja..... | 29 |
| Tablica 6. Rezultati za negativne vrijednosti kutova prvog mjerenja | 30 |
| Tablica 7. Rezultati za pozitivne vrijednosti kutova drugog mjerenja..... | 31 |
| Tablica 8. Rezultati za negativne vrijednosti kutova drugog mjerenja | 31 |
| Tablica 9. Rezultati za pozitivne vrijednosti kutova trećeg mjerenja | 32 |
| Tablica 10. Rezultati za negativne vrijednosti kutova trećeg mjerenja..... | 33 |
| Tablica 11. Srednje vrijednosti odstupanja | 34 |
| Tablica 12. Ponovljivost očitavanja rezultata | 43 |
| Tablica 13. Izmjerene vrijednosti kuta α_1 | 46 |
| Tablica 14. Izmjerene vrijednosti kuta α_2 | 47 |
| Tablica 15. Izračunate vrijednosti kuta β te pogreška mjerenja | 47 |
| Tablica 16. Mjerna nesigurnost umjeravanja za jedan smjer nagiba | 48 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------------------|----------|---|
| α | rad | Nazivna vrijednost kuta nagiba |
| H | mm | Duljina planparalelnih graničnih mjerki (na 200 mm) |
| L | mm | Konstanta sinus lineala |
| f | mm | Fokalna duljina autokolimatora |
| d | mm | Pomak zrake autokolimatora |
| H_1 | mm | Duljina planparalelnih graničnih mjerki (na 1000 mm) |
| $\alpha_{KOINC.LIBELA}$ | mm/m | Vrijednost kuta očitana na koincidentnoj libeli |
| $\alpha_{AUTOKO.}$ | mm/m | Vrijednost kuta očitana na autokolimatoru |
| $u(X_i)$ | | Standardna mjerna nesigurnost |
| n | - | Broj ponovljenih mjerenja |
| s | | Procijenjeno standardno odstupanje |
| a | mm/m | Granica intervala pojavljivana prilikom izračuna standardne mjerne nesigurnosti |
| $u_c(y)$ | | Sastavljena standardna nesigurnost |
| c_i | - | Koeficijent osjetljivosti |
| U | | Proširena mjerna nesigurnost |
| k | - | Faktor pokrivanja |
| $\Delta KOIN. LIB.$ | mm/m | Odstupanje nagiba koincidentne libele |
| δ_{pon} | mm/m | Sastavnica mjerne nesigurnosti ponovljivosti očitavanja rezultata |
| $\delta_{ods_{AUTOKOL.}}$ | mm/m | Sastavnica mjerne nesigurnosti odstupanja autokolimatora |
| δ_{poz} | mm/m | Sastavnica mjerne nesigurnosti pogreške pozicioniranja |
| α_1 | mm/m | Vrijednost kuta kao rezultat pomaka zrcala po osi z |
| α_2 | mm/m | Vrijednost kuta kao rezultat pomaka zrcala po osi y |
| β | mm/m | Vrijednost kuta prema pomaku zrcala po obje osi |
| UL | mm/m | Gornja granična pogreška |
| LL | mm/m | Donja granična pogreška |
| $u(x)$ | mm/m | Sastavljena standardna nesigurnost na temelju rezultata |
| u_k | mm/m | Sastavnica mjerne nesigurnosti zbog korekcije spajanja |
| N | - | Broj mjerenja |

SAŽETAK

Tema ovog rada je umjeravanje koincidentnih libela. U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje umjeravanje koincidentnih libela se trenutno provodi korištenjem sinus lineala i planparalelnih graničnih mjerki. Kako bi se ispitale mogućnosti primjene autokolimatora u postupku umjeravanja koincidentnih libela osmišljena su dva mjerna sustava. Prvi, primjenom sinus lineala, sustava za podizanje i spuštanje sinus lineala, zrcala i planparalelnih graničnih mjerki, a drugi primjenom zrcala, nagibnog stolića i čeličnih prizmi koje osiguravaju krutost sustava. Analizom rezultata mjerenja utvrđena je nedovoljna stabilnost prvog mjernog sustava, dok su drugim pristupom ostvareni zadovoljavajući rezultati umjeravanja koincidentne libele uz procijenjenu nesigurnosti od 0,002 mm/m.

U prvom dijelu rada dan je opis osnovnih elemenata koji čine mjerni sustav, a to su sinus lineal, koincidentna libela te autokolimator. Uz opis, navedeni su i njihovi opći podaci, područje primjene te potrebni podaci za izračun mjerne nesigurnosti koja je neophodna u prikazu rezultata mjerenja.

U drugom djelu rada opisan je mjereni sustav, poboljšanje mjernog sustava, postupak mjerenja kuta te prikaz dobivenih rezultata mjerenja uz procjenu mjerne nesigurnosti. Na kraju je izvršena analiza dobivenih rezultata koja pokazuje primjenjivost poboljšanog mjernog sustava za umjeravanje koincidentne libele. Uz dobivene rezultate navedene su prednosti i nedostaci pojedinih mjernih sustava.

Ključne riječi: koincidentna libela, autokolimator, sinus lineal, kut, mjerna nesigurnost

SUMMARY

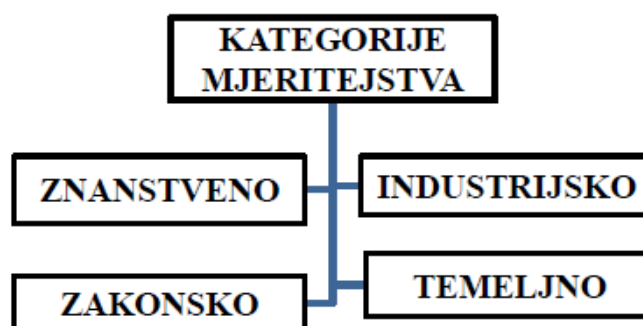
The subject matter of this thesis is the calibration of precision spirit levels. Currently, in the Laboratory for precise measurements at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, the calibration of precision spirit levels is performed using sine bar and gauge blocks in order to ensure reliable measurement results. In order to examine the possibility of an autocollimator to be included in the procedure of the calibration of precision spirit levels, two measuring systems were developed. The first one includes the application of sine bar, the system for lifting and lowering sine bar, mirror and gauge blocks. The second one consists of a mirror, a tilt table and steel prisms for ensuring system rigidity. Results presented in this thesis show that if the second approach is used, it is possible to achieve the calibration of the spirit level with the uncertainty of 0,002 mm/m.

The first part of the paper consists of the description of basic elements of the measuring system. Those are the sine bar, the precision spirit level and the autocollimator. Along with the description, general information and the scope of the usage of the elements is given. Also, the data required for the calculation of measurement uncertainty used for presenting results is listed. The measuring system, the improvement of the measuring system and the procedure of angle measurement are explained in the second part of the paper. As well as that, the results of the measurement with the estimation of measurement uncertainty are given. The analysis of the results indicating the applicability of the improved measuring system for the calibration of precision spirit levels is given at the end of the thesis. Also, both advantages and disadvantages of both measuring systems are noted.

Key words: precision spirit level, autocollimator, sine bar, angle, uncertainty in measurement

1. UVOD

Mjeriteljstvo je znanost o mjerenju. S obzirom na veličinu koja se mjeri, mjeriteljstvo se može podijeliti na više područja od kojih razlikujemo: mjeriteljstvo duljine, mjeriteljstvo kuta, mjeriteljstvo temperature te mnoge druge. Mjeriteljstvo ima različita područja primjene, ali njegova osnovna podjela se vrši u četiri osnovne kategorije: industrijsko mjeriteljstvo, zakonsko mjeriteljstvo, znanstveno mjeriteljstvo i temeljno mjeriteljstvo [1].



Slika 1. Kategorije mjeriteljstva [2]

Mjerenje je postupak kojim se određuje vrijednost veličine mjerenog predmeta koja se namjerava mjeriti. Izmjerenu vrijednost je potrebno usporediti s mjerenim etalom koji predstavlja mjerenu referencu, definiciju jedinice koja se mjeri. Osnovni cilj mjerenja je osigurati potrebnu točnost te kvalitetu proizvoda uz minimalni trošak.

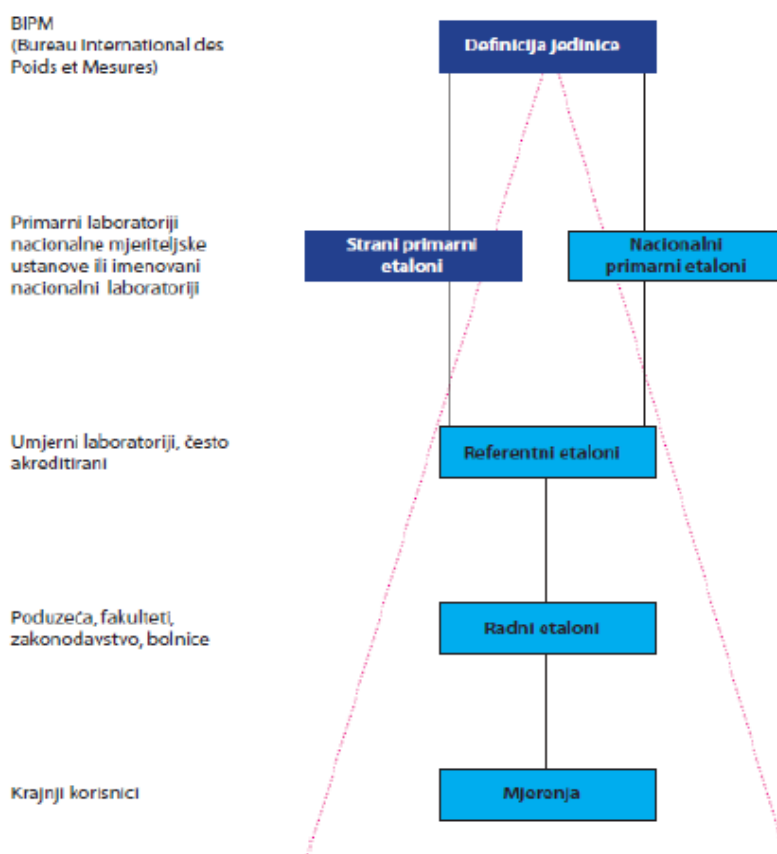
Danas se industrija okreće upravo tome da se što više ujednači kvaliteta i točnost izrade proizvoda u svrhu povećanja prihoda, smanjenja troškova te preraspodjele proizvodnje širom svijeta. Prvi korak u ispunjenju tog cilja je svakako ujednačiti rezultate mjerenja pojedinih mjernih uređaja što se postiže umjeravanjem mjernih uređaja.

Umjeravanje je skup postupaka kojima se u zadanim uvjetima određuje odnos između rezultata mjerenja potrebne veličine i neke referentne veličine, u najvećem broju slučajeva etalona, koji su umjereni i sljedivi [3].

Postupak umjeravanja se vrši iz četiri glavna razloga [3]:

- radi uspostave i prikaza sljedivosti,
- radi usklađivanja rezultata mjerenja s drugim rezultatima,
- radi određivanja točnosti očitavanja mjerila,
- radi utvrđivanja pouzdanosti mjerila.

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata po kojem se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima (umjerenih u državnim ili međunarodnim laboratorijima) neprekinutim lancem usporedbi, prikazanim na slici 2, koje imaju svoje mjerne nesigurnosti [3].



Slika 2. Lanac sljedivosti [3]

Mjerna nesigurnost se pokazuje kao vrlo bitan parametar pridružen rezultatu mjerenja kojim se pokazuje rasipanje mjerenih vrijednosti u odnosu na referentne vrijednosti uz određenu vjerojatnost [3].

2. LIBELE

Libele su mjerni instrumenti kojima određuje nagib ispitivane površine u odnosu na horizontalnu ili vertikalnu ravninu. Razlikuju se razne vrste libela koje imaju primjene u različitim granama industrije kao što su strojarstvo, građevina, geodezija te mogu biti u još puno grana kao dio nekog instrumenta ili naprave, a ne samo kao zaseban uređaj.

Prema obliku libele se mogu podijeliti na:

- cijevne libele
- kružne libele.

Osnovna razlika između njih leži u njihovoj izvedbi te osjetljivosti. Cijevna libela se sastoji od staklene cijevi koja je djelomično ispunjena najčešće alkoholom ili eterom (tekućinom niskog ledišta) tako da bi se u ostatku prostora stvorio zračni mjehur, čijim bi se pomicanjem preko ugravirane skale s vanjske strane odredio nagib ispitivane površine. Najpreciznije cijevne libele mogu postići osjetljivost od 1" do 2". Kružna libela se sastoji od kuglične gornje plohe te jednog ili više koncentričnih kružića s vanjske strane stakla preko kojih se određuje nagib ispitivane površine. One se primjenjuje za grubo određivanje nagiba ispitivane površine u odnosu na horizontalnu ravninu te se njezina osjetljivost kreće od 2' do 30' [7].



Slika 3. Cijevna libela (lijevo) i kružna libela (desno) [14]

Prema konstrukcijskoj izvedbi libele se dijele na:

- tehničke libele
- kružne libele
- koincidentne libele
- elektroničke libele.

U okviru ovog završnog zadatka će se provesti postupak umjeravanja koincidentnih libela pa će iz tog razloga one biti detaljnije opisane u nastavku.

2.1. Koincidentne libele

Koincidentne libele su precizne libele sa širokom primjenom u mjerenju kuta nagiba koje mogu sa velikom točnošću odrediti nagib ravnih i cilindričnih površina u odnosu na horizontalnu ravninu. Koincidentne libele imaju mogućnost očitavanja nagiba u vrijednosti od 0,01 mm/m što odgovara kutu od približno 2".

Koriste se za ispitivanje točnosti radioničkih libela, postavljanje radnih stolova, postolja te drugih nužnih dijelova stroja u horizontalnu ravninu. Koincidentnom libelom je moguće mjerenje kuta nagiba do najviše ± 10 mm/m.

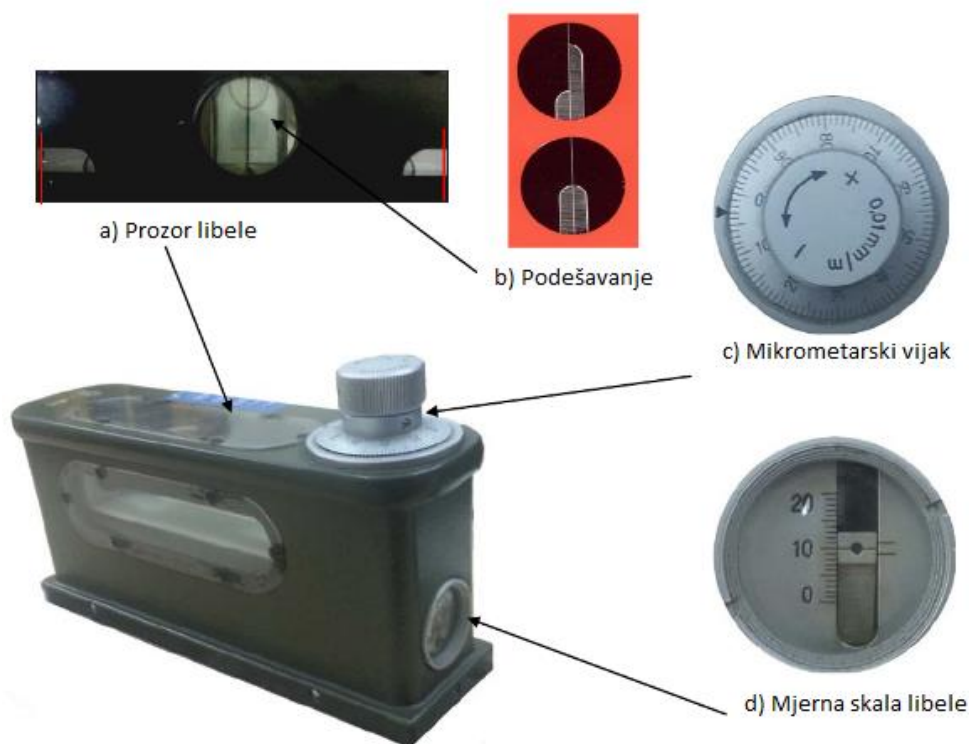


Slika 4. Koincidentna libela

2.1.1. Način mjerenja koincidentnom libelom

Mjerenje koincidentnom libelom se vrši metodom koincidencije i optičkog povećanja. Koincidentna libela se postavlja na ispitivanu površinu kojoj želimo odrediti kut nagiba u odnosu na horizontalnu ravninu. Okretanjem mjernog vijka mjehur treba dovesti u sredinu između dvije linije označene u prozoru libele. Zatim se finim okretanjem mjernog vijka lijevi i desni dio mjehura dovode u simetričnu poziciju. Sastavnice koincidentne libele prikazani su na slici 5.

Očitavanje koincidentne libele se vrši na način da se cijeli broj očita prema gruboj skali koja se nalazi na njezinoj prednjoj strani, dok se decimalne vrijednosti, odnosno nagib na horizontalnu površinu, mm/m, očitava na finoj skali mikrometarskog vijka na libeli [7].



Slika 5. Sastavnice koincidentne libele [3]

Koincidentna libela koja se umjerava u okviru ovog zadatka je libela tvrtke „Zeiss“ koja ima mjerno područje od ± 10 mm/m, sa rezolucijom očitavanja od 0,01 mm/m.

3. SINUS LINEAL

Jedna od često korištenih metoda za mjerenje kuta je „sinus metoda“. Metoda se zasniva na principu postavljanja sinus lineala u horizontalnu ravninu te podmetanjem planparelnih graničnih mjerki kako bi se korištenjem odgovarajućih trigonometrijskih funkcija ostvario traženi kut. Na ovaj način omogućeno je mjerenje kuta nagiba sa visokom točnošću [10].



Slika 6. Sinus lineal [4]

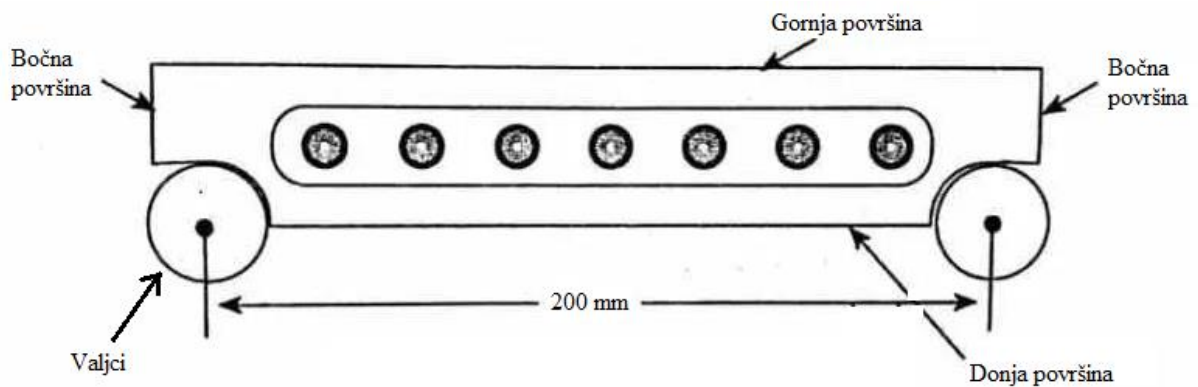
3.1. Konstrukcija

Sinus lineal je dio koji se sastoji od tijela koji povezuje dva valjka potpuno jednakih promjera. Napravljen je od očvrnutog, stabiliziranog, kromiranog čelika.

Valjci na krajevima sinus lineala su jednakih promjera. Nalaze se u međusobno paralelnim ravninama koje su ujedno i paralelne s gornjom površinom sinus lineala. Gornja površina mora zadovoljavati uvjet malog odstupanja od ravnosti te bi trebala biti paralelna s donjom površinom koja je u dodiru s valjcima.

Mjerenjem kuta pomoću sinus lineala se može dobiti preciznost i do 0,01 mm/m u odnosu na duljinu sinus lineala, odnosno udaljenost između osi sinus lineala [10].

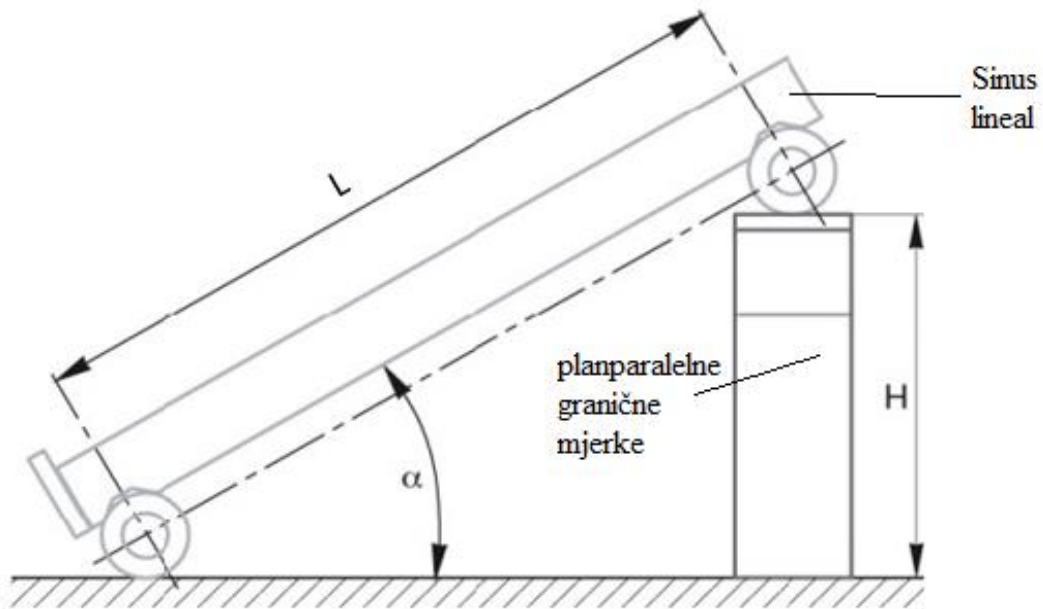
Udaljenost između osi sinus lineala se naziva konstantom sinus lineala. Postoje različita izvedbe, ali neke od najčešćih su izvedbe s konstantom od 100 mm, 200 mm, 250 mm te 300 mm. U okviru ovog zadatka korišten je sinus lineal konstante 200 mm.



Slika 7. Konstrukcija sinus lineala

3.2. Princip mjerenja

Uz sinus lineal, prilikom mjerenja kuta, uglavnom se koriste i planparalelne granične mjerke. Mjerenje se vrši na način da se formira pravokutni trokut kod kojega je hipotenuza konstanta sinus lineala, a jedna od kateta je visina postavljenih planparalelnih graničnih mjerki koja se korigira ovisno o kutu koji se želi ostvariti.



Slika 8. Sinus lineal s planparalelnim graničnim mjerkama

Kut se dobije primjenom trigonometrije na formirani trokut prema slici 8:

$$\sin \alpha = \frac{H}{L}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{H}{L}\right) \quad (1)$$

gdje je: α – kut nagiba, rad

H – duljina postavljenih planparalelnih graničnih mjerki, mm

L – udaljenost između dva valjka, odnosno konstanta sinus lineala, mm.

3.3. Primjena

Sinus lineal se danas primjenjuje za:

- namještanje i pozicioniranje dijelova pod zadanim kutom
- provjeru mjerenja iznosa nepoznatih kutova različitih dijelova
- provjeru iznosa nepoznatih kutova kompliciranijih dijelova.

Neke posebne izvedbe sinus lineala se mogu koristiti i za postavljanje dijelova na stroj [11].

U okviru ovog zadatka korišten je sinus lineal tvrtke „Mahr“, konstante 200 mm.

4. AUTOKOLIMATOR

Autokolimator je beskontaktni optički instrument koji se koristi za mjerenje malih kutova s vrlo visokom osjetljivošću. U suštini se može prikazati kao kombinacija kolimatora i beskonačnog teleskopa u jednom uređaju. Kolimator je optički uređaj koji pomoću leće objektiva s osvijetljenim nitnim križem u fokalnoj ravnini leće daje paralelan snop zraka na osnovu kojih se slika nitnog križa projicira u beskonačnost.

Autokolimatori se mogu podijeliti u tri skupine:

- vizualni ili konvencionalni autokolimator
- digitalni autokolimator
- laserski autokolimator.

U okviru ovog zadatka korišten je vizualni ili konvencionalni autokolimator.



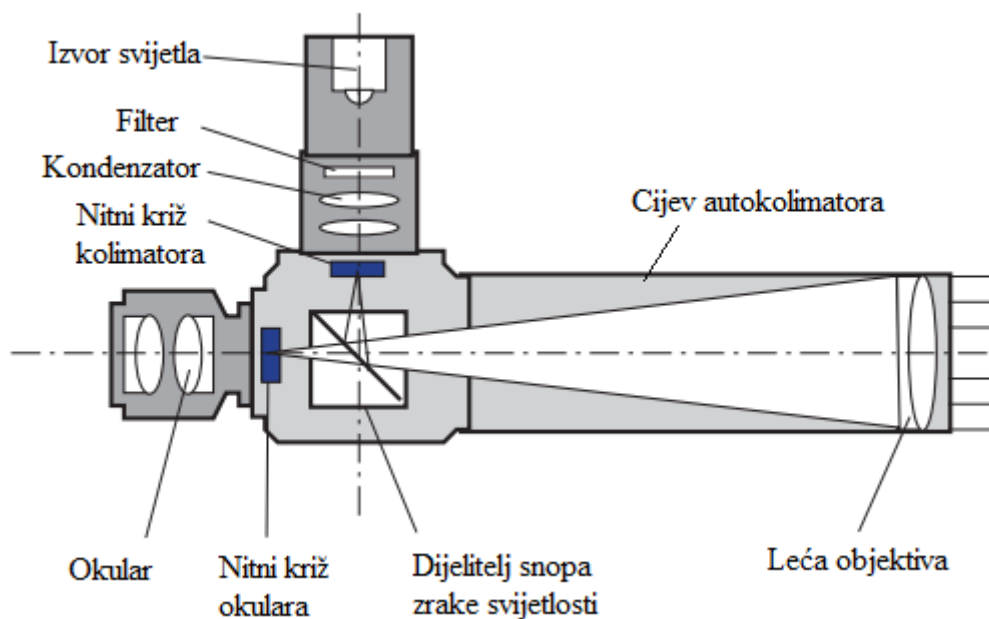
Slika 9. Autokolimator

4.1. Konstrukcija

Autokolimator se sastoji od četiri glavna dijela:

- leće objektiva montirane na cijev
- djelitelja snopa zraka svijetlosti koji sadrži dva nitna križa
- okulara
- uređaja za osvjetljenje.

Slika prvog nitnog križa nastaje na način da se osvijetljeni nitni križ projicira preko djelitelja snopa zraka svijetlosti na leću objektiva te se on naziva nitni križ kolimatora. Drugi nitni križ je smješten u fokusu okulara i naziva se nitni križ okulara. Glavu autokolimatora čine djelitelj snopa zraka svijetlosti, okular te uređaj za osvjjetljenje koji su povezani u zasebnu jedinicu.



Slika 10. Konstrukcija autokolimatora [9]

4.2. Princip rada

Autokolimator radi na principu autokolimacije. Autokolimacija je optička tehnika koja se zasniva na projiciranju osvijetljenog nitnog križa u beskonačnost i primanju slike nitnog križa nakon njegove refleksije od ravnog zrcala. Reflektirana slika se dovodi u fokus leće objektiva u kojoj se nalazi nitni križ okulara. Reflektirane slike nitnog križa kolimatora i nitnog križa okulara se mogu promatrati istovremeno. Kada nastala zraka padne na zrcalo koje je okomito na ravninu zrake, svjetlost se reflektira istim putem kojim je i došla do zrcala. Na taj način dolazi do preklapanja reflektirane slike sa nitnim križem okulara.

Ako je zrcalo odnosno reflektor nagnuto u odnosu na vertikalnu ravninu pod određenim kutom, tada će se reflektirana zraka od njega odbijati dvostruko većim kutom. U tom slučaju je reflektirana slika pomaknuta bočno u odnosu na nitni križ okulara.

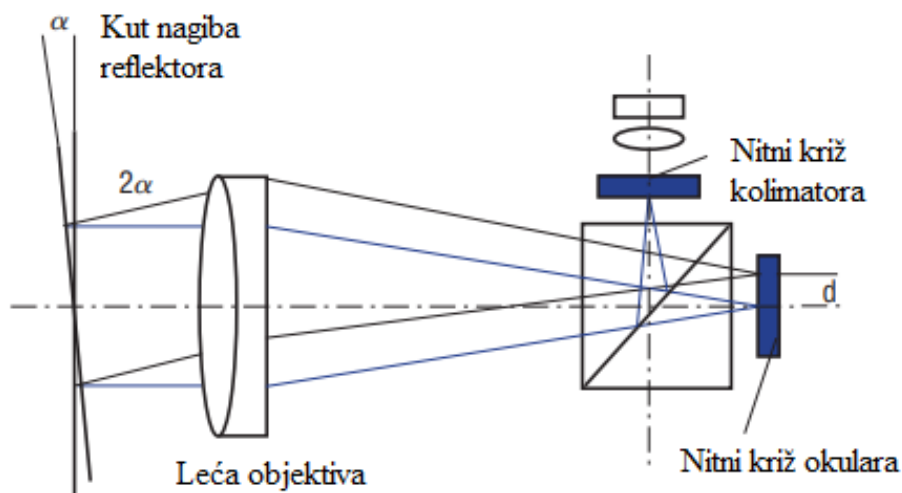
Kada bi se s α označio kut pod kojim je nagnuto zrcalo u odnosu na vertikalnu ravninu, tada bi, iz prethodno navedenog, kut pod kojim se odbija reflektirana zraka bio 2α . Iznos pomaka bi se u tom slučaju mogao prikazati kao funkcija fokalne duljine autokolimatora (f) i kuta nagiba reflektora:

$$d = 2\alpha \cdot f \quad (2)$$

Iznos kuta nagiba se tada može prikazati kao:

$$\alpha = \frac{d}{2 \cdot f} \quad (3)$$

Dokle god je fokalna duljina autokolimatora (f) konstantna, iznos kuta nagiba se može direktno iščitati iz jednadžbe (3) iz razloga što u tom slučaju nitni križ okulara može biti prikazan u jedinicama kuta.



Slika 11. Reflektiranje zrake unutar autokolimatora [9]

Kut nagiba kojeg je moguće očitati na autokolimatoru iznosi od $0'$ do $10'$.

4.3. Područja primjene

Autokolimator se uglavnom koristi za otkrivanje i mjerenje malih kutnih pomaka, ali se također može koristiti i u druge svrhe kao što su:

- provjera pravocrtnosti
- provjera pravokutnosti
- provjera paralelnosti
- provjera ravnosti
- kalibracija rotacijskih stolova
- mjerenje optičkih parametara (radijus zakrivljenosti, pogreške centriranja, centriranosti prirubnica, itd.).

4.4. Prednosti i nedostaci

Već je navedeno u prethodnom odlomku da autokolimator ima široku područje primjene te mu je to svakako jedna od prednosti, uz to kao neke od prednosti mogu se istaknuti:

- mjerenja visoke točnosti (kut nagiba u minutama i sekundama)
- lagano rukovanje uređajem
- lagano očitavanje rezultata mjerenja
- beskontaktno mjerenje
- mogućnost dobivanja setova rezultata za daljnju analizu.

Uz navedene prednosti, nedostaci ovog uređaja su:

- potrebno redovno održavanje uređaja
- vrlo osjetljiv sustav koji zahtijeva vrlo pažljivo rukovanje
- otežano podešavanje i pozicioniranje prije početka mjerenja
- malo područje očitavanja (od 0' do 10').

U okviru ovog zadatka je korišten autokolimator tvrtke „Taylor Hobson“ s područjem očitavanja od 0' do 10' te rezolucijom od 0,2".

5. POSTUPAK UMJERAVANJA

Cilj ovoga zadatka je izvršiti umjeravanje koincidentne libele. Umjeravanje koincidentnih libela se do sada vršilo pomoću sinus lineala. Na njega je postavljena koincidentna libela čije se očitavanje kuta uspoređivalo s dobivenim kutom iz trigonometrije trokuta koje je formiran pomoću različitih planparalelnih graničnih mjerki postavljenih pod jedan od valjaka sinus lineala.

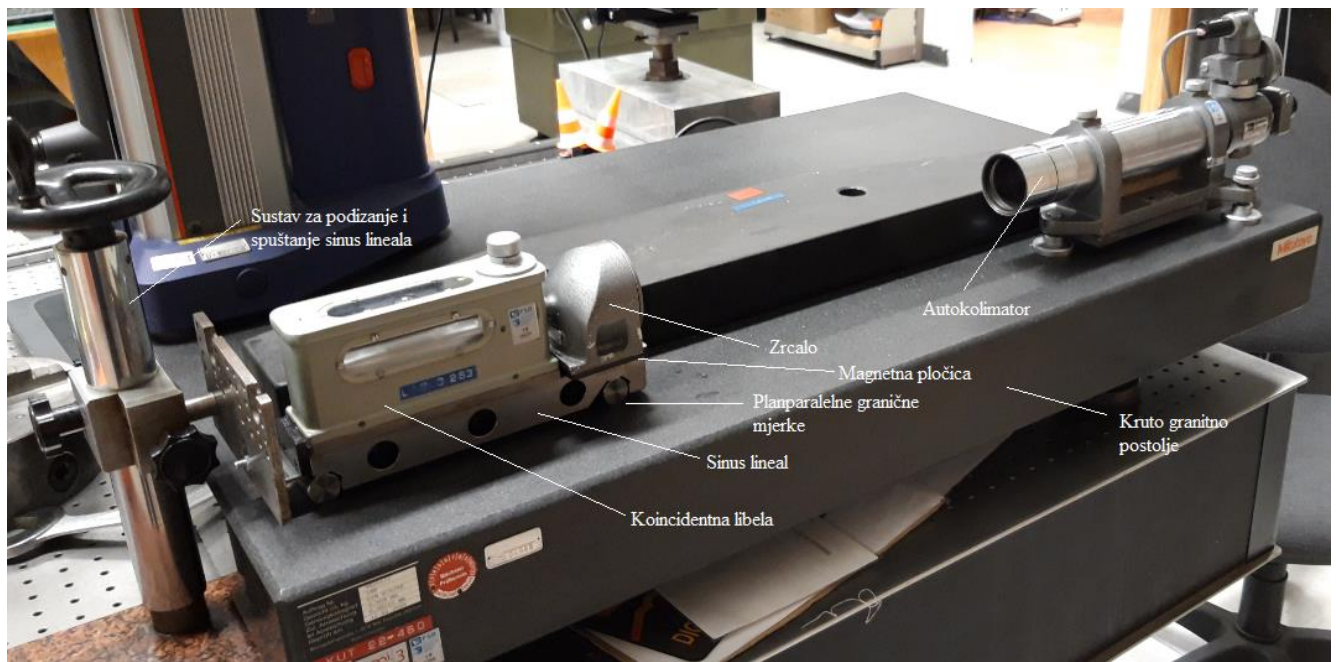
U svrhu pojednostavljenja mjernog postupka, osmišljen je mjerni sustav s autokolimatorom bolje rezolucije od koincidentne libele te se njegovom primjenom može značajno olakšati postupak umjeravanja.

Umjeravanje je izvršeno u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje te se koristila sva raspoloživa oprema Laboratorija.

5.1. Mjerni sustav

Mjerni sustav se sastoji od:

- sustava za kontrolirano podizanje i spuštanje sinus lineala
- sinus lineala
- koincidentne libele
- zrcala
- magnetne pločice
- seta planparalelnih graničnih mjerki
- autokolimatora.



Slika 12. Mjerni sustav

Postavljanje mjernog sustava se odvija na način:

1) Čišćenje i odmašćivanje površine sinus lineala

Prije početka mjerenja sa sinus linealom potrebno je dobro očistiti i odmastiti površine iz razloga što svaka nečistoća, čak i zrnca prašine može prouzročiti pogrešku mjerenja. Čišćenje se radi pamučnom krpicom koja je natopljena benzinom.

2) Postavljanje sinus lineala

Očišćeni i odmašćeni sinus lineal se postavlja na kruto postolje na način da se ispod svakog valjka stavi po jedna planparalelna granična mjerka nazivne duljine od 1 mm. Mjerke se postavljaju ispod valjaka iz razloga što set planparalelnih graničnih mjerki ne sadrži vrijednosti manje od 0,05 mm te se bez toga ne bi mogle dobiti vrijednosti kutova koji bi pokrivali mjerna područja autokolimatora i koincidentne libele. Prije postavljanja, planparalelne granične mjerke također treba očistiti benzinom.

3) Postavljanje koincidentne libele

Koincidentna libela se postavlja na gornju površinu sinus lineala da bi se njegovim podizanjem istovremeno podizala i libela na kojoj bi se očitavala vrijednost odgovarajućeg kuta.

4) Postavljanje zrcala

Zrcalo se pomoću vijka pričvrsti na magnetnu pločicu te postavlja također na sinus lineal, ispred koincidentne libele. Magnetna pločica se koristi da bi se onemogućio pomak zrcala prilikom podizanja i spuštanja sinus lineala. Zrcalo u postavljenom sustavu služi da bi se zraka snopa svjetlosti dobivena od strane autokolimatora reflektirala nazad u isti te na taj način omogućila očitavanje iznosa postavljenog kuta pomoću sinus lineala.

5) Postavljanje autokolimatora

Autokolimator se postavlja na kruto postolje nasuprot postavljenog sinus lineala sa zrcalom i koincidentnom libelom. Postavlja se na način da njegova cijev bude što moguće bolje u ravnini sa već postavljenim zrcalom, da bi se dobila reflektirana slika. On je postavljen na vlastite nožice pomoću kojih ga je moguće pozicionirati u traženu poziciju.

6) Postavljanje sustava za kontrolirano podizanje i spuštanje sinus lineala

Sustav za kontrolirano dizanje i spuštanje se sastoji od ručnog kola čijim se okretanjem preko navojnog vretena podiže i spušta sinus lineal zajedno sa zrcalom i koincidentnom libelom.

Uz sinus lineal je postavljena još jedna granitna ploča koja služi kao dodatni osigurač od pomicanja pojedinih dijelova mjernog sustava.

5.2. Postupak mjerenja

Prije početka mjerenja potrebno je podesiti mjerni sustav.

Najprije se odredi set nazivnih vrijednosti, odnosno veličina planparalelnih graničnih mjerki koje će se koristiti prilikom mjerenja. Duljina planparalelnih graničnih mjerki određuju se temeljem mjernih područja instrumenata. Već je ranije rečeno da mjerno područje koincidentne libele iznosi ± 10 mm/m, dok mjerno područje autokolimatora iznosi od $0'$ do $10'$.

Da bi se mogla usporediti mjerna područja oba instrumenata potrebno je mjerno područje autokolimatora, koje je u minutama, pretvoriti u mm/m.

Pretvaranje se vrši na način:

- 1) pretvaranje iznosa kuta u minutama, u iznos kuta u stupnjevima

Ako sa α označimo iznos kuta tada je:

$$\alpha^{\circ} = \frac{\alpha'}{60} \quad (4)$$

- 2) pretvaranje iznosa kuta u stupnjevima, u iznos kuta u radijanima

$$\alpha, \text{ rad} = \frac{\alpha^{\circ} \cdot \pi}{180}, \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad (5)$$

- 3) pretvaranje kuta u stupnjevima, u iznos kuta u mm/m

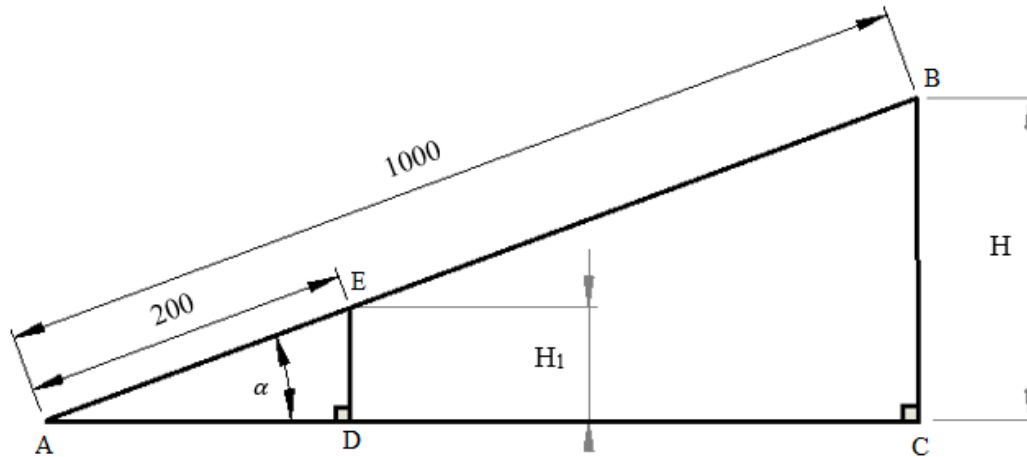
$$\alpha, \frac{\text{mm}}{\text{m}} = \alpha, \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot 1000 \quad (6)$$

Na temelju navedenih formula za proračun se dobije da $0'$ zapravo odgovara 0 mm/m, dok $10'$ odgovara približno $2,9$ mm/m. Iz dobivenih vrijednosti se vidi da se autokolimatorom ne može pokriti cijelo mjerno područje koincidentne libele nego samo područje od 0 do $2,9$ mm/m.

Vođeni tom činjenicom, kao referentne vrijednosti kuta odabrane su vrijednosti od:

$0,25$ mm/m, $0,5$ mm/m, $0,75$ mm/m, 1 mm/m, $1,25$ mm/m, $1,5$ mm/m, $1,75$ mm/m, 2 mm/m, $2,25$ mm/m, $2,5$ mm/m, $2,75$ mm/m.

Korišten sinus lineal je konstante 200 mm što govori o tome koliko je zapravo visina H u odnosu na 200 mm. Iz tog razloga se treba proračunati visina na 1000 mm odnosno 1 m, da bi se dobila odgovarajuća vrijednost visine. Proračun visine se vrši iz sličnosti trokuta prikazanog na slici 13.



Slika 13. Proračun visine

Trokuti ADE i ACB su slični te vrijedi:

$$\frac{H_1}{200} = \frac{H}{1000}$$

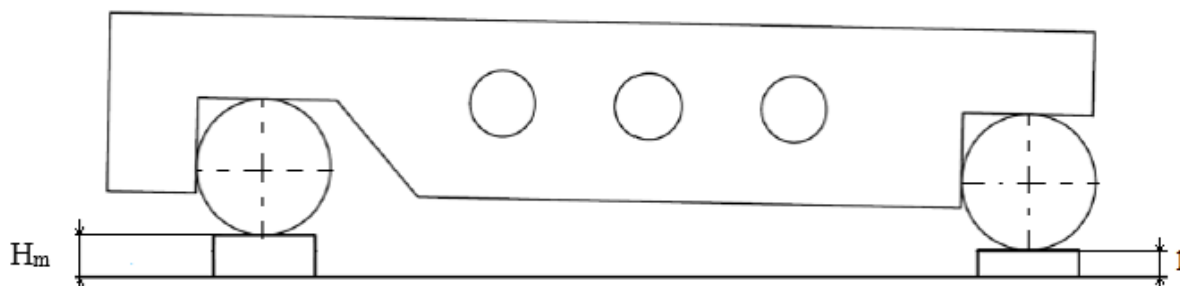
$$H = 5 \cdot H_1 \quad (7)$$

H_1 , mm – visina postavljena pomoću planparalelnih graničnih mjerki (na 200 mm)

H , mm – referentna visina pomoću koje se vrši proračun (na 1000 mm odnosno 1 m)

Ranije je navedeno da je sinus lineal postavljen na planparalelne granične mjerke od 1 mm sa svake strane ispod valjaka da bi se mogle dobiti vrijednosti kutova koje ulaze u mjerno područje autokolimatora. Postavljanjem sinus lineala na planparalelne granične mjerke se visina H_1 dobije oduzimanjem duljine postavljene mjerke (H_m) od nazivne duljine od 1 mm prema slici 14.

$$H_1 = H_m - 1 \quad (8)$$

Slika 14. Određivanje visine H_1

| H_m , mm | H_1 , mm | H , mm |
|------------|------------|----------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1,05 | 0,05 | 0,25 |
| 1,10 | 0,10 | 0,50 |
| 1,15 | 0,15 | 0,75 |
| 1,20 | 0,20 | 1,00 |
| 1,25 | 0,25 | 1,25 |
| 1,30 | 0,30 | 1,50 |
| 1,35 | 0,35 | 1,75 |
| 1,40 | 0,40 | 2,00 |
| 1,45 | 0,45 | 2,25 |
| 1,50 | 0,50 | 2,50 |
| 1,55 | 0,55 | 2,75 |

Tablica 1. Izračun visina potrebnih za proračun kuta

Referentna vrijednost kuta na osnovu koje vršimo mjerenja dobiva se iz trigonometrije trokuta koja je opisana u poglavlju 3.

Dobivena visina H je visina u odnosu na 1000 mm odnosno 1 m pa iz toga slijedi da je zapravo referentna vrijednost kuta koju želimo dobiti ekvivalentna njezinoj vrijednosti samo u jedinici mm/m.

Prilikom mjerenja korišten je set planparalelnih graničnih mjerki proizvođača IKI prikazan na slici 15.



Slika 15. Set planparalelnih graničnih mjerki

Nakon odabira planparalelnih graničnih mjerki koje će se koristiti, potrebno je podesiti autokolimator.

Podešavanje autokolimatora se izvodi na način da se najprije cijev autokolimatora postavi u ravninu sa zrcalom kako bi se dobila reflektirana slika. Nakon toga, odabire se ona planparalelna granična mjerka koja se nalazi otprilike na sredini mjernog područja. Njezinim postavljanjem potrebno je provjeriti da li se može izmjeriti kut u cijelom mjernom području od $0'$ do $10'$.

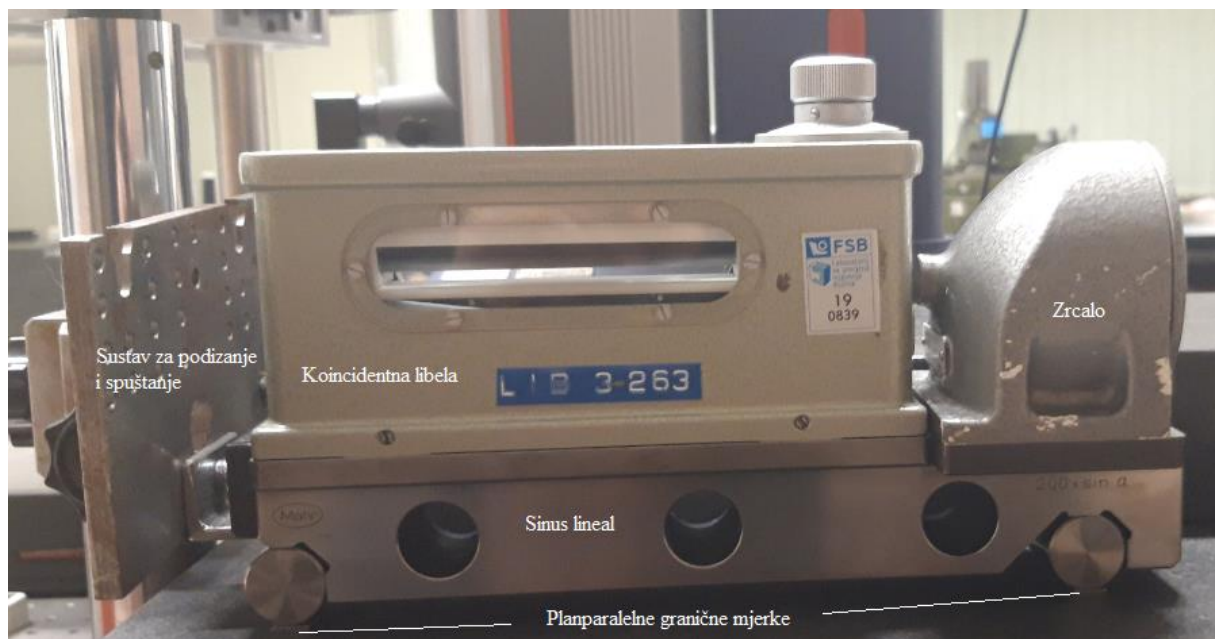
Zatim se ispod sinus lineala postavi planparalelna granična mjerka od 1 mm odnosno slučaj gdje su visine H_1 i H jednake nuli što ukazuje na to da je vrijednost kuta jednaka nuli te se provjeri očitavanje na autokolimatoru. Isti postupak se ponovi i sa planparalelnom graničnom mjerkom od 1,55 mm odnosno da je visina H_1 jednaka 0,55 mm te H jednako 2,75 mm i vrijednost kuta iznosi 2,75 mm/m.

Odabrane vrijednosti prikazuju rubne vrijednosti mjernog područja autokolimatora.

Ukoliko su sve prethodno navedene stavke zadovoljene, tada se može početi sa postupkom mjerenja.

Postupak mjerenja se odvija na način:

- postavljanje mjernog sustava u početni položaj (sinus lineal u horizontalnoj ravnini podmetanjem planparalelnih graničnih mjerki od 1 mm ispod oba valjka)
- postavljanje različitih planparelelnih graničnih mjerki ispod valjka sinus lineala
- određivanje iznosa kuta prema postavljenim planparalelnim graničnim mjerkama
- očitavanje rezultata na koincidentnoj libeli i autokolimatoru
- zapis rezultata u odgovarajuću tablicu.



Slika 16. Početni položaj sklopa sa sinus linealom

Nakon postavljanja mjernog sustava podmeću se planparalelne granične mjerke ispod valjka sinus lineala. Prije njihovog postavljanje, potrebno ih je dobro očistiti i odmastiti od nečistoća i zrnaca prašine jer bilo kakva i mala nepravilnost na površini može uzrokovati pogrešku mjerenja. Podmetanje se vrši na način da se pomoću sustava za kontrolirano dizanje i spuštanje podiže jedan kraj sinus lineala te se ispod valjka postavlja planparalelna granična mjerka.

Navedenim sustavom se spusti sinus lineal. Okretanjem milimetarskog vijka na koincidentnoj libeli se mjehurići libele dovode u povoljan, ravnotežan položaj te se očita rezultat koji prikazuje koincidentna libela. Rezultat se zapisuje u tablicu. Na autokolimatoru se također očita pokazani rezultat koji se preračuna prema jednadžbama (4), (5) i (6) te zapisuje u tablicu.

Na temelju dobivenih rezultata se izračuna odstupanje pokazivanja rezultata. Oduzimanjem vrijednosti koju pokazuje koincidentna libela, $\alpha_{KOINC.LIBELA}$ od vrijednosti koju pokazuje autokolimator, $\alpha_{AUTOKO.}$ dobije se pogreška mjerenja, odnosno odstupanje rezultata mjerenja.

$$\text{"pogreška"} = \text{"pogrešno"} - \text{"točno"} \quad (9)$$

$$\text{odstupanje} = \alpha_{KOINCIDENTNA LIBELA} - \alpha_{AUTOKOLIMATOR}$$

Dobiveni rezultati mjerenja prema nazivnoj vrijednosti kuta dobivenoj postavljanjem planparalelnih graničnih mjerki izračunatoj prema jednadžbi (1) te njihova odstupanja dani su u tablici 2.

| α , mm/m | $\alpha_{KOINC. LIBELA}$, mm/m | $\alpha_{AUTOKO.}$, mm/m | odstupanje, mm/m |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,250 | 0,215 | 0,035 |
| 0,50 | 0,492 | 0,458 | 0,034 |
| 0,75 | 0,748 | 0,707 | 0,041 |
| 1,00 | 1,002 | 0,961 | 0,041 |
| 1,25 | 1,250 | 1,201 | 0,049 |
| 1,50 | 1,498 | 1,374 | 0,124 |
| 1,75 | 1,748 | 1,680 | 0,068 |
| 2,00 | 1,996 | 1,925 | 0,071 |
| 2,25 | 2,246 | 2,160 | 0,086 |
| 2,50 | 2,498 | 2,401 | 0,097 |
| 2,75 | 2,752 | 2,654 | 0,098 |

Tablica 2. Rezultati mjerenja

Prilikom mjerenja je potrebno izmjeriti i pozitivne i negativne vrijednosti kutova. Negativne vrijednosti kutova se dobe na način da se koincidentna libela na sinus linealu okrene za 180° , dok ostatak postupka ostaje isti. Potrebno je odraditi barem tri seta mjerenja.

5.3. Tumačenje rezultata

Na temelju dobivenih rezultata, već prilikom prvog seta mjerenja uočene su vrijednosti odstupanja koja su veća od očekivanih. Odstupanja se kreću u razmjerima od 0,035 mm/m, pa do čak 0,124 mm/m što odgovara vrijednostima kuta od $35 \mu\text{m/m}$ do $124 \mu\text{m/m}$. Tako velike vrijednosti odstupanja ukazuju na nestabilnost postavljenog mjernog sustava.

Analiza mjernog sustava:

- 1) Odstupanja očitavanja vrijednosti kuta na koincidentnoj libeli u odnosu na referentne vrijednosti dobivene računom preko mjerki u poglavlju 5.2.

Vrijednosti očitavanja kuta na koincidentnoj libeli te vrijednosti odstupanja prikazane su u tablici 3.

| α , mm/m | $\alpha_{KOINC.}$, LIBELA mm/m | odstupanje, mm/m |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,250 | 0,000 |
| 0,50 | 0,492 | -0,008 |
| 0,75 | 0,748 | -0,002 |
| 1,00 | 1,002 | 0,002 |
| 1,25 | 1,250 | 0,000 |
| 1,50 | 1,498 | -0,002 |
| 1,75 | 1,748 | -0,002 |
| 2,00 | 1,996 | -0,004 |
| 2,25 | 2,246 | -0,004 |
| 2,50 | 2,498 | -0,002 |
| 2,75 | 2,752 | 0,002 |

Tablica 3. Vrijednosti odstupanja koincidentne libele

Temeljem dobivenih rezultata može se uočiti vrlo dobro slaganje očitanih vrijednosti s generiranim kutom gdje odstupanja ne prelaze 0,01 mm/m.

- 2) Odstupanja očitavanja vrijednosti kuta na autokolimatoru u odnosu na referentne vrijednosti

Vrijednosti očitavanja kuta na autokolimatoru te vrijednosti odstupanja prikazane su u tablici 4 gdje se mogu uočiti značajne vrijednosti odstupanja.

| α , mm/m | $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$ mm/m | odstupanje, mm/m |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------|
| 0 | 0,000 | 0,000 |
| 0,25 | 0,215 | -0,035 |
| 0,50 | 0,458 | -0,042 |
| 0,75 | 0,707 | -0,043 |
| 1,00 | 0,961 | -0,039 |
| 1,25 | 1,201 | -0,049 |
| 1,50 | 1,374 | -0,126 |
| 1,75 | 1,680 | -0,070 |
| 2,00 | 1,925 | -0,075 |
| 2,25 | 2,160 | -0,090 |
| 2,50 | 2,401 | -0,099 |
| 2,75 | 2,654 | -0,096 |

Tablica 4. Vrijednosti odstupanja autokolimatora

Na temelju dobivenih vrijednosti odstupanja zaključuje se da je problem zbog kojeg dolazi do značajne pogreške mjerenja u dijelu sustava koji je vezan uz autokolimator.

Provjerom tog dijela sustava, dolazi se do zaključka da je problem u zrcalu. Naime, prilikom podizanja i spuštanja dijela sustava sa sinus linealom, da bi se ispod njegovog valjka postavila odgovarajuća planparalelna granična mjerka, dolazi do pomaka zrcala u jednu odnosno drugu stranu. Do takvog pomaka dolazi zbog udara valjka sinus lineala u planparalelnu graničnu mjerku prilikom njegovog spuštanja te pretjeranim podizanjem sinus lineala. U tom slučaju zrcalo sklizne niz sinus lineal. Pomak utječe na točnost očitavanja autokolimatora iz razloga što se pomakom zrcala snop zraka svjetlosti koji dolazi iz cijevi autokolimatora ne reflektira uvijek pod jednakim kutom za sva mjerenja te se gubi reflektirana slika prilikom više ponovljenih mjerenja.

Na temelju dobivenih podataka dolazi se do zaključka da postavljeni mjerni sustav nije adekvatan za provođenje umjeravanja koincidentne libele pomoću autokolimatora.

U svrhu dobivanja točnijih rezultata potrebno je osmisliti poboljšani mjerni sustav u kojem će se eliminirati greške prethodnog te poboljšati rezultati mjerenja.

Opis poboljšanog mjernog sustava i postupka umjeravanja dan je u nastavku.

6. POBOLJŠANJE POSTUPKA UMJERAVANJA

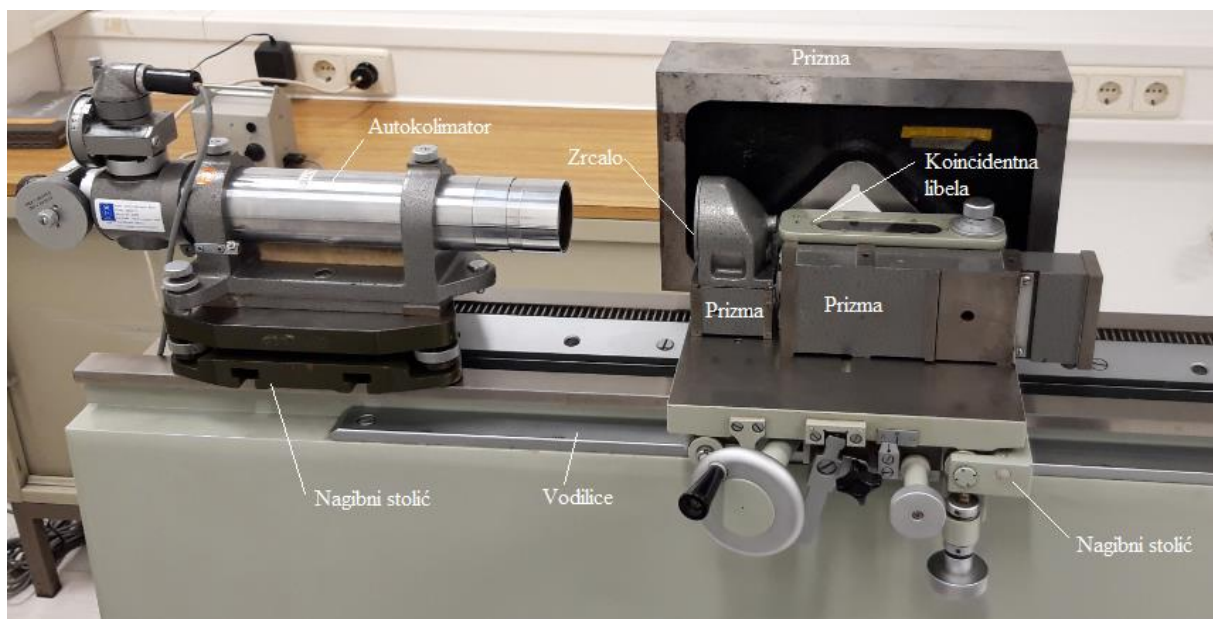
Prema velikim vrijednostima odstupanja osmišljen je novi mjerni sustav kojim se povećava točnost mjerenja te smanjuje mogućnost pogreške. Razlika u odnosu na prethodno osmišljeni mjerni sustav je u tome što se ne koriste planparalelne granične mjerke i sinus lineal te je određen novi postupak mjerenja.

6.1. Mjerni sustav

Mjerni sustav se sastoji od:

- koincidentne libele
- autokolimatora
- zrcala
- nagibnog stolića postavljenog na vodilice jednoosnog mjernog uređaja
- nagibnog stolića za autokolimator
- čeličnih prizmi.

Svi korišteni elementi poboljšanog mjernog sustava su istog proizvođača kao i kod prethodno navedenog mjernog sustava.



Slika 17. Poboljšani mjerni sustav

Postavljanje mjernog sustava se odvija na način:

1) Postavljanje zrcala

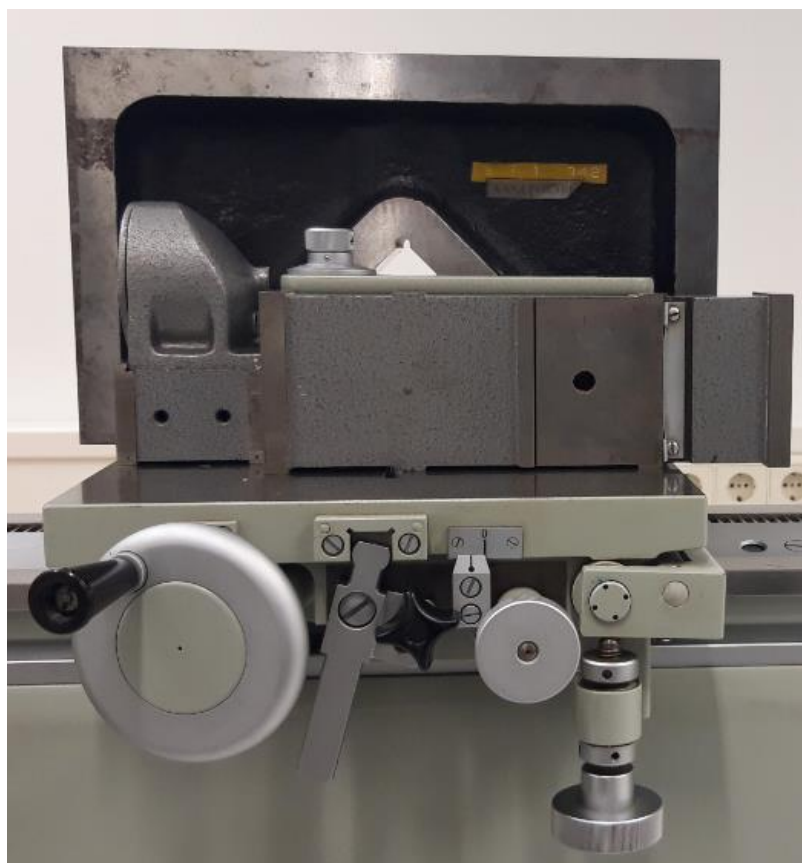
Na nagibni stolić koji se nalazi na vodilicama temeljenog jednoosnog mjernog uređaja postavi se zrcalo. Zrcalo se postavi na čeličnu prizmu da bi se prilagodila visina te da bi se zrcalo osiguralo od pomicanja.

2) Postavljanje koincidentne libele

Koincidentna libela se postavlja iz zrcala kako je prikazano na slici 17.

3) Osiguranje krutosti sustava

Krutost sustava osigurana je na način da se postavljeni elementi (zrcalo i koincidentna libela) sa svih strana okruže čeličnim prizmama da ne bi došlo do nepoželjnih pomaka koji su bili problem prethodno postavljenog mjernog sustava.



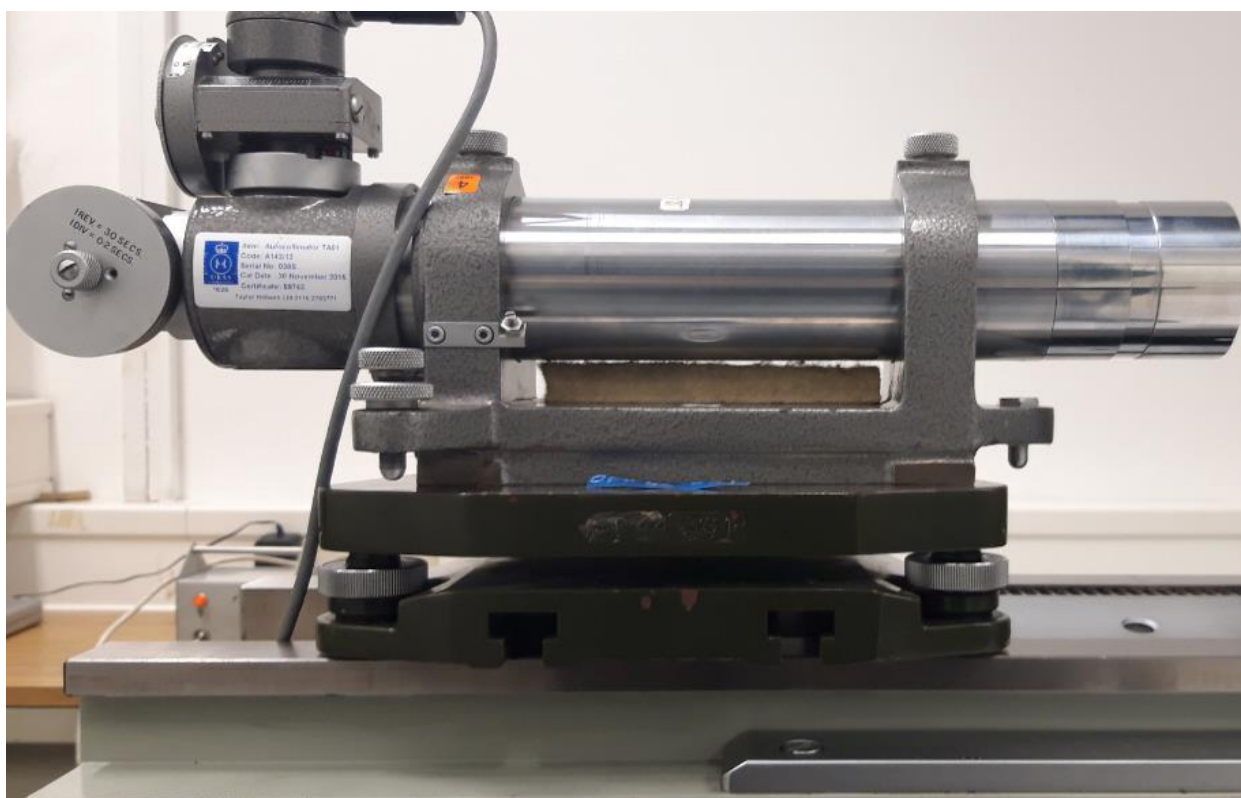
Slika 18. Dio mjernog sustava s koincidentnom libelom

4) Postavljanje nagibnog stolića za autokolimator

Nagibni stolić za autokolimator se također postavlja na vodilice nasuprot dijela mjernog sustava s koincidentnom libelom. Postavlja se iz razloga da bi autokolimator nesmetano mogao stajati te da bi bio u ravnini s već postavljenim zrcalom. Na stoliću se nalaze vijci pomoći kojih se autokolimator može podešavati po visini.

5) Postavljanje autokolimatora

Autokolimator se postavlja na nagibni stolić.



Slika 19. Dio mjernog sustava s autokolimatorom

6.2. Postupak mjerenja

Prije početka mjerenja potrebno je podesiti mjerni sustav. Mjerni sustav se podešava na isti način kao i u poglavlju 5.2.

Kao nazivne vrijednosti kutova korištene su jednake vrijednosti kao i u prethodnom postupku. To su vrijednosti kutova od 0,25 mm/m, 0,5 mm/m, 0,75 mm/m, 1 mm/m, 1,25 mm/m, 1,5 mm/m, 1,75 mm/m, 2 mm/m, 2,25 mm/m, 2,5 mm/m, 2,75 mm/m.

Podešavanje se odvija na način da se cijev autokolimatora najprije dovede u ravninu sa zrcalom da bi se zraka snopa svjetlosti koja dolazi od izvora autokolimatora reflektirala i na taj način dobila reflektirana slika. Kada se dobije reflektirana slika, tada je moguće i očitavanje vrijednosti kuta na autokolimatoru. Zatim se na koincidentnoj libeli postavi vrijednost kuta koja se nalazi približno na sredini mjernog područja autokolimatora. Prema određenim nazivnim vrijednostima, to je vrijednost od 1,5 mm/m. Nakon postavljene vrijednosti, okretanjem finog vijka na nagibnom stoliću se mjehurići koincidentne libele dovedu u ravnotežni položaj. Provede se provjera da li se očitavanje autokolimatorom može odvijati cijelim mjernim područjem.

Nakon toga se na koincidentnoj libeli postave vrijednosti najmanje i najveće nazivne vrijednosti kuta nagiba te se provjeri očitavanje vrijednosti na autokolimatoru. Najmanjoj vrijednosti kuta odgovara vrijednost od 0 mm/m odnosno horizontalna ravnina, dok najvećoj vrijednosti odgovara vrijednost kuta od 2,75 mm/m.

Ukoliko su sve prethodno navedene stavke zadovoljene, tada se može početi sa postupkom mjerenja.

Postupak mjerenja se odvija na način:

- postavljanje nazivne vrijednosti kuta na koincidentnoj libeli
- očitavanje vrijednosti kuta na autokolimatoru prema postavljenoj nazivnoj vrijednosti
- zapis dobivenih vrijednosti u odgovarajuću tablicu.

Na koincidentnoj libeli se postavi nazivna vrijednost kuta te se okretanjem finog vijka na nagibnom stoliću mjehurići koincidentne libele dovedu u ravnotežni položaj. Nakon postavljene nazivne vrijednosti se očitaju vrijednosti kuta na autokolimatoru.

Prilikom mjerenja je potrebno izmjeriti i pozitivne i negativne vrijednosti kutova. Negativne vrijednosti kutova se dobe na način da se konicidentna libela na sinus linealu okrene za 180° , dok ostatak postupka ostaje isti. Potrebno je odraditi barem tri seta mjerenja.

Na temelju dobivenih rezultata potrebno je izračunati vrijednosti odstupanja očitavanja libele u odnosu na očitavanje autokolimatora, oduzimanjem vrijednosti kuta očitano na konicidentnoj libeli od očitane vrijednosti kuta na autokolimatoru prema jednadžbi (9). Važno je naglasiti vrijednosti očitavanja autokolimatora predstavljaju referentne vrijednosti.

Dobiveni rezultati mjerenja su prikazani u sljedećim tablicama:

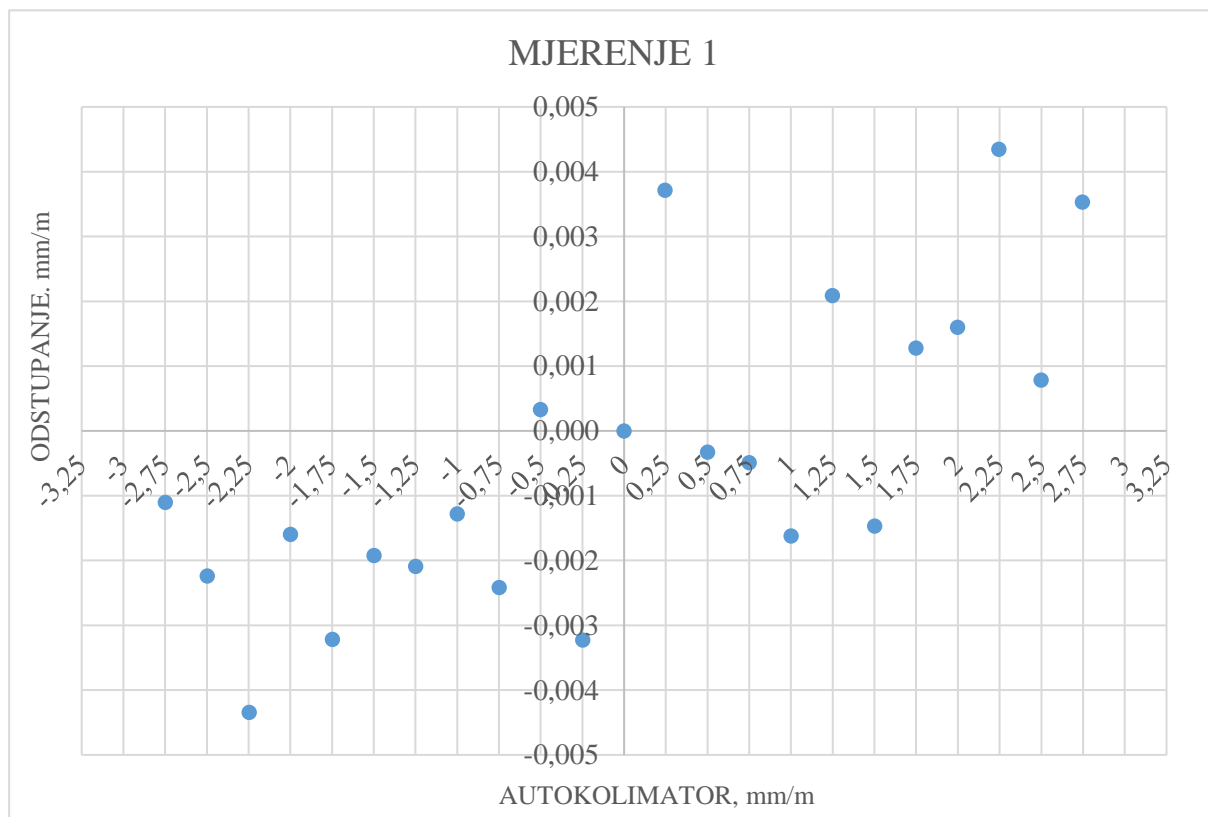
1) Rezultati prvog mjerenja

| $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$ mm/m | $\alpha_{\text{KOINC. LIBELA}}$ mm/m | odstupanje, mm/m |
|-----------------------------------|---|---------------------|
| 0 | 0 | 0,000 |
| 0,246 | 0,25 | 0,004 |
| 0,500 | 0,50 | 0,000 |
| 0,750 | 0,75 | 0,000 |
| 1,002 | 1,00 | -0,002 |
| 1,248 | 1,25 | 0,002 |
| 1,501 | 1,50 | -0,001 |
| 1,749 | 1,75 | 0,001 |
| 1,998 | 2,00 | 0,002 |
| 2,246 | 2,25 | 0,004 |
| 2,499 | 2,50 | 0,001 |
| 2,746 | 2,75 | 0,004 |

Tablica 5. Rezultati za pozitivne vrijednosti kutova prvog mjerenja

| $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$, mm/m | $\alpha_{\text{KOINC. LIBELA}}$, mm/m | odstupanje, mm/m |
|-------------------------------------|---|---------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| -0,247 | -0,25 | -0,003 |
| -0,500 | -0,5 | 0,000 |
| -0,748 | -0,75 | -0,002 |
| -0,999 | -1,00 | -0,001 |
| -1,248 | -1,25 | -0,002 |
| -1,498 | -1,50 | -0,002 |
| -1,747 | -1,75 | -0,003 |
| -1,998 | -2,00 | -0,002 |
| -2,246 | -2,25 | -0,004 |
| -2,498 | -2,50 | -0,002 |
| -2,749 | -2,75 | -0,001 |

Tablica 6. Rezultati za negativne vrijednosti kutova prvog mjerenja



Slika 20. Prikaz rezultata odstupanja kod prvog mjerenja

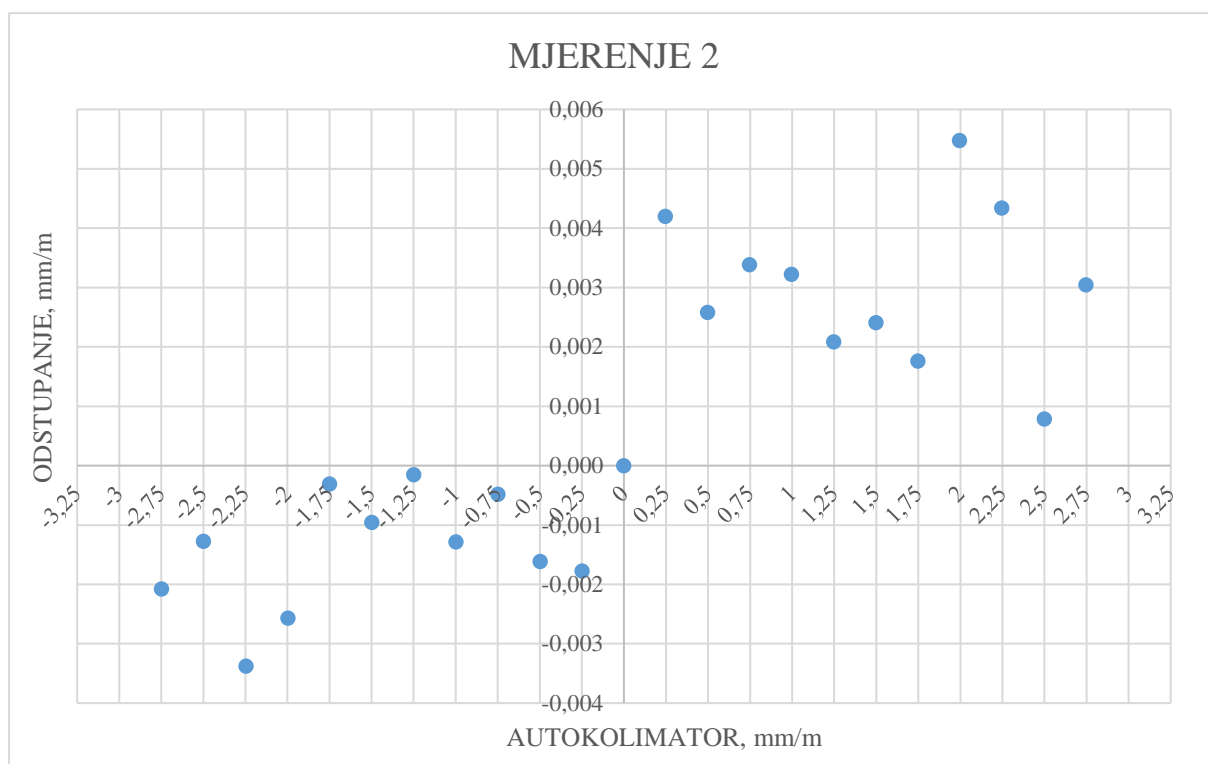
2) Rezultati drugog mjerenja

| $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$ mm/m | $\alpha_{\text{KOINC. LIBELA}}$ mm/m | odstupanje, mm/m |
|-----------------------------------|---|---------------------|
| 0 | 0 | 0,000 |
| 0,246 | 0,25 | 0,004 |
| 0,497 | 0,50 | 0,003 |
| 0,747 | 0,75 | 0,003 |
| 0,997 | 1,00 | 0,003 |
| 1,248 | 1,25 | 0,002 |
| 1,498 | 1,50 | 0,002 |
| 1,748 | 1,75 | 0,002 |
| 1,995 | 2,00 | 0,005 |
| 2,246 | 2,25 | 0,004 |
| 2,499 | 2,50 | 0,001 |
| 2,747 | 2,75 | 0,003 |

Tablica 7. Rezultati za pozitivne vrijednosti kutova drugog mjerenja

| $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$ mm/m | $\alpha_{\text{KOINC. LIBELA}}$ mm/m | odstupanje, mm/m |
|-----------------------------------|---|---------------------|
| 0 | 0 | 0,000 |
| -0,248 | -0,25 | -0,002 |
| -0,498 | -0,50 | -0,002 |
| -0,750 | -0,75 | 0,000 |
| -0,999 | -1,00 | -0,001 |
| -1,250 | -1,25 | 0,000 |
| -1,499 | -1,50 | -0,001 |
| -1,750 | -1,75 | 0,000 |
| -1,997 | -2,00 | -0,003 |
| -2,247 | -2,25 | -0,003 |
| -2,499 | -2,50 | -0,001 |
| -2,748 | -2,75 | -0,002 |

Tablica 8. Rezultati za negativne vrijednosti kutova drugog mjerenja



Slika 21. Prikaz rezultata odstupanja kod drugog mjerenja

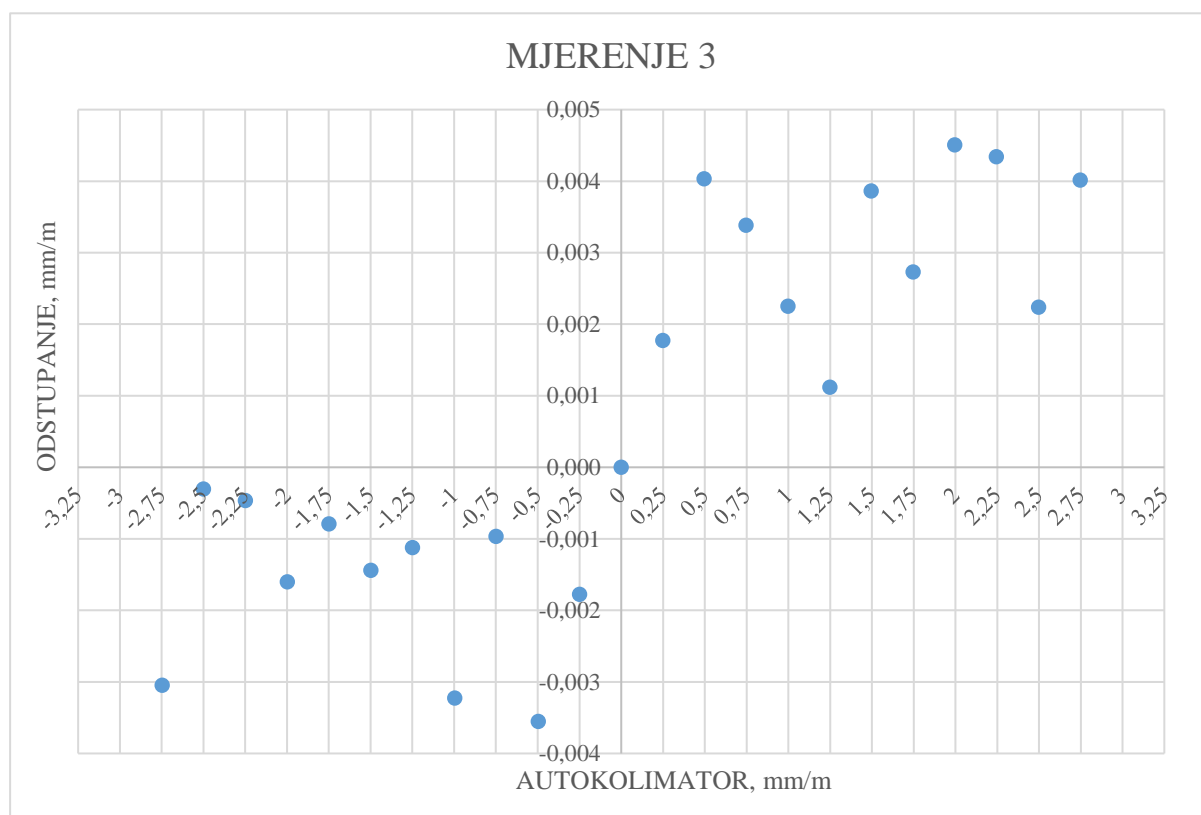
3) Rezultati trećeg mjerenja

| $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$, mm/m | $\alpha_{\text{KOINC. LIBELA}}$ mm/m | odstupanje, mm/m |
|-------------------------------------|---|---------------------|
| 0 | 0 | 0,000 |
| 0,248 | 0,25 | 0,002 |
| 0,496 | 0,50 | 0,004 |
| 0,747 | 0,75 | 0,003 |
| 0,998 | 1,00 | 0,002 |
| 1,249 | 1,25 | 0,001 |
| 1,496 | 1,50 | 0,004 |
| 1,747 | 1,75 | 0,003 |
| 1,995 | 2,00 | 0,005 |
| 2,246 | 2,25 | 0,004 |
| 2,498 | 2,50 | 0,002 |
| 2,746 | 2,75 | 0,004 |

Tablica 9. Rezultati za pozitivne vrijednosti kutova trećeg mjerenja

| $\alpha_{\text{AUTOKO.}}$, mm/m | $\alpha_{\text{KOINC. LIBELA}}$, mm/m | odstupanje, mm/m |
|-------------------------------------|---|---------------------|
| 0 | 0 | 0,000 |
| -0,248 | -0,25 | -0,002 |
| -0,496 | -0,50 | -0,004 |
| -0,749 | -0,75 | -0,001 |
| -0,997 | -1,00 | -0,003 |
| -1,249 | -1,25 | -0,001 |
| -1,499 | -1,50 | -0,001 |
| -1,749 | -1,75 | -0,001 |
| -1,998 | -2,00 | -0,002 |
| -2,250 | -2,25 | 0,000 |
| -2,500 | -2,50 | 0,000 |
| -2,747 | -2,75 | -0,003 |

Tablica 10. Rezultati za negativne vrijednosti kutova trećeg mjerenja

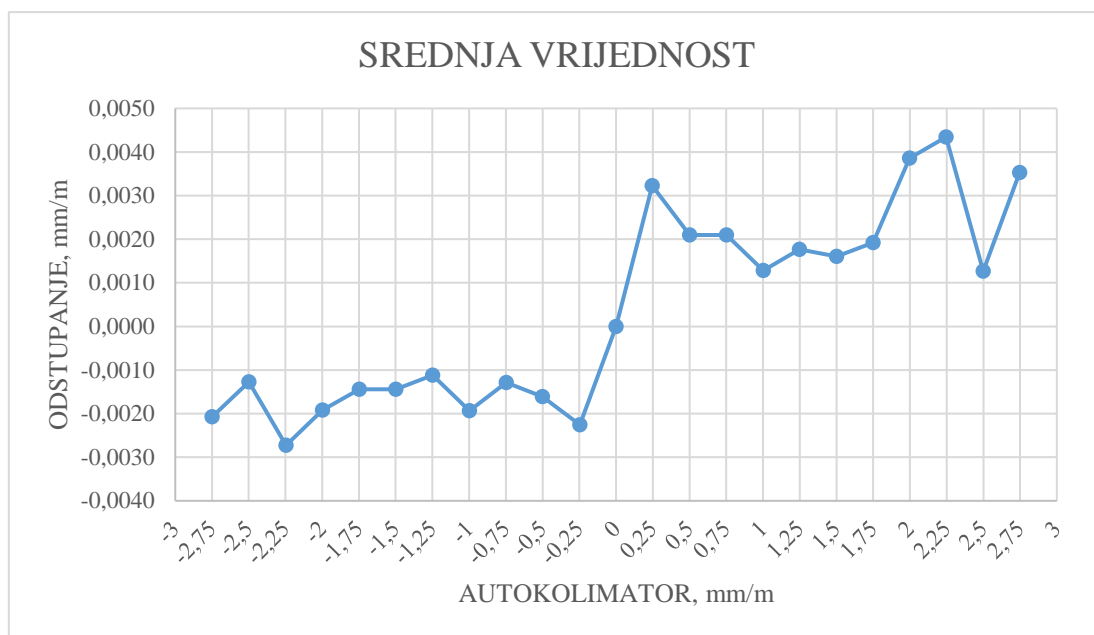


Slika 22. Prikaz rezultata odstupanja kod trećeg mjerenja

U tablici 11 prikazane su vrijednosti odstupanja očitavanja koincidentne libele od očitavanja autokolimatora na temelju srednje vrijednosti odstupanja za tri ponovljena mjerenja.

| | MJERENJE 1 | MJERENJE 2 | MJERENJE 3 | | |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|---------------------|
| α_{AUTOKO} , mm/m | odstupanje, mm/m | odstupanje, mm/m | odstupanje, mm/m | srednja vrijednost odstupanja, $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ | korigirano, mm/m |
| -2,749 | -0,001 | -0,002 | -0,003 | -0,002 | 0,000 |
| -2,498 | -0,002 | -0,001 | 0,000 | -0,001 | 0,000 |
| -2,246 | -0,004 | -0,003 | 0,000 | -0,003 | -0,001 |
| -1,998 | -0,002 | -0,003 | -0,002 | -0,002 | 0,000 |
| -1,747 | -0,003 | 0,000 | -0,001 | -0,001 | 0,000 |
| -1,498 | -0,002 | -0,001 | -0,001 | -0,001 | 0,000 |
| -1,248 | -0,002 | 0,000 | -0,001 | -0,001 | 0,000 |
| -0,999 | -0,001 | -0,001 | -0,003 | -0,002 | 0,000 |
| -0,746 | -0,002 | 0,000 | -0,001 | -0,001 | 0,000 |
| -0,500 | 0,000 | -0,002 | -0,004 | -0,002 | 0,000 |
| -0,247 | -0,003 | -0,002 | -0,002 | -0,002 | -0,001 |
| 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 0,246 | 0,004 | 0,004 | 0,002 | 0,003 | 0,001 |
| 0,500 | 0,000 | 0,003 | 0,004 | 0,002 | 0,000 |
| 0,750 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,000 |
| 1,002 | -0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | -0,001 |
| 1,248 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,000 |
| 1,501 | -0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | -0,001 |
| 1,749 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,000 |
| 1,998 | 0,002 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,002 |
| 2,246 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,002 |
| 2,499 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | -0,001 |
| 2,746 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,001 |

Tablica 11. Srednje vrijednosti odstupanja



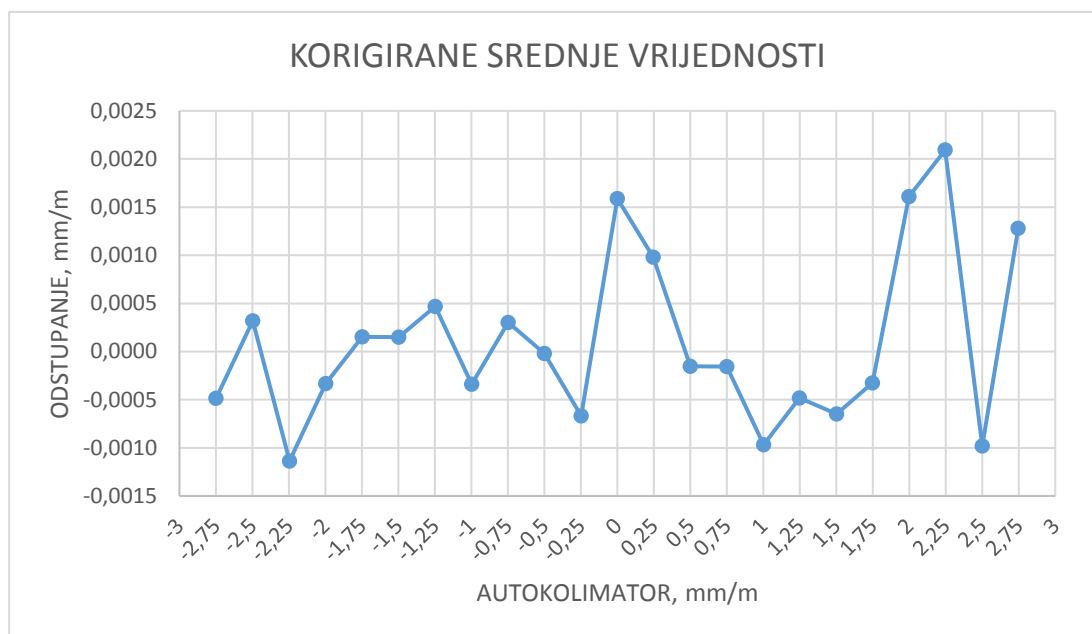
Slika 23. Srednje vrijednosti odstupanja

Prema slici 23 vidljivo je da se dobivaju dvije razine rezultata. One se dobivaju zbog spajanja pozitivnog i negativnog smjera mjerenja kuta samo preko početne točke mjerenja tj. nulte pozicije.

Kako bi se što bolje „spojila“ dva seta mjerenja i uzimajući u obzir da nije vidljiv trend rezultata niti u jednom setu mjerenja, rezultati su „spojeni“ s obzirom na aritmetičke sredine svih mjerenja u setu kako bi se umanjila pogreška spajanja. Aritmetička sredina mjerenja pozitivnih vrijednosti kutova iznosi 0,002 mm/m, dok aritmetička sredina mjerenja negativnih vrijednosti kutova -0,002 mm/m.

Korigirane vrijednosti dobivene spajanjem rezultata mjerenja izračunavaju se oduzimanjem srednje vrijednosti odstupanja rezultata mjerenje od aritmetičke sredine svih rezultata mjerenja u setu te su prikazane u tablici 11.

Dobivene vrijednosti srednjih vrijednosti odstupanja sa uključenom korekcijom spajanja prikazane su na slici 24.



Slika 24. Korigirane srednje vrijednosti odstupanja

Prema rezultatima mjerenja vidljivo je da ne postoji trend i da pogreška ne prelazi vrijednost $\pm 0,002$ mm/m.

7. MJERNA NESIGURNOST

Mjerna nesigurnost procjenjuje se zbog [12]:

- nepotpune definicije mjerne veličine
- nesavršenog ostvarenja definicije mjerne veličine
- pretpostavki ugrađenih u mjernu metodu i postupak
- djelovanja slučajnih utjecaja (trenutne promjerne temperature, tlaka i vlage ili neiskustvo mjeritelja, nesavršenosti uređaja i osjetila)
- ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenata između dva umjeravanja, utjecaja mjeritelja pri očitavanju rezultata s analogne skale, nesigurnost vrijednosti referentnog etalona, itd.)
- nedvosmislenog iskazivanja i usporedbe mjernih rezultata dobivenih u različitim umjernim i ispitnim laboratorijima
- usporedbe mjernih rezultata sa specifikacijama proizvođača ili zadanom tolerancijom.

Razlikuju se tri načina na koja se može procjenjivati mjerna nesigurnost rezultata mjerenja [12]:

- GUM metoda
- MCS metoda
- procjena ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja.

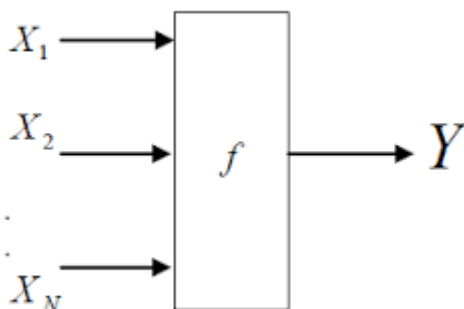
U okviru ovog zadatka za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja koristiti će se GUM metoda.

7.1. Opis procjena mjerne nesigurnosti GUM metodom

Procjena mjerne nesigurnosti GUM metodom vrši se u četiri osnovna koraka [12]:

1) Postavljanje mjernog modela

U većini slučajeva mjerenja veličina Y se ne mjeri izravno nego se određuje iz N drugih veličina $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ na temelju funkcijskog odnosa koji predstavlja osnovni matematički model za potpuno određenje mjerene veličine [12].



Slika 25. Skalarni odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine [12]

Matematički model se može izraziti na temelju funkcijskog odnosa f :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (10)$$

Funkcija f prikazuje mjerni postupak kojim se određuje izlazna veličina Y iz vrijednosti izlaznih veličina X_i . Ulazne veličine X_i mogu se promatrati same kao mjerene veličine ili ovisiti o drugim veličinama, uključujući ispravke i faktore ispravka zbog sustavnih djelovanja. Kada se uz ulazne veličine X_i nalazi i faktor ispravka tada se dolazi do složenog funkcijskog odnosa f . Do traženog oblika funkcije f može se doći eksperimentalno ili ona može postojati kao odnos koji se mora brojčano proračunati [12].

2) Određivanje standardne nesigurnosti procjenom ulaznih veličina

Određivanje standardne nesigurnosti $u(X_i)$ procjenom ulaznih veličina X_i može se vršiti na dva načina:

- Standardna nesigurnost A vrste

Standardna nesigurnost A vrste se određuje na temelju niza ponovljenih mjerenja uz primjenu bilo koje prihvatljive statističke metode. Neke od metoda su računanje standardnosti odstupanja srednje vrijednosti mjernog niza, primjena metode najmanjih kvadrata, metoda ANOVA (analiza varijanci). Najčešće su rezultati analizirani normalnom i studentovom razdiobom.

Formula prema kojoj se izračunava glasi [12]:

$$u(\bar{X}_i) = s(\bar{X}_i) \quad (11)$$

$$s(\bar{X}_i) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Gdje je: $u(X_i)$ – standardna mjerna nesigurnost
 n – broj ponovljenih mjerenja

- Standardna nesigurnost B vrste

Standardna nesigurnost B vrste se određuje na temelju znanstvenih prosudbi svih raspoloživih podataka o mogućoj promjenjivosti veličine X_i . Pod znanstvenim prosudbama se misli na podatke prijašnjih mjerenja, iskustvo ili poznavanje ponašanja i svojstava instrumenata, tehničke podatke proizvođača instrumenata, podatke iz priručnika, itd.

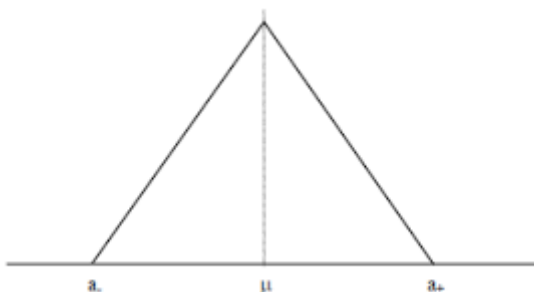
Procjena se zasniva na apriornim razdiobama vjerojatnosti: normalnoj razdiobi, pravokutnoj razdiobi, trokutastoj razdiobi [12].

Pravokutna razdioba

$$u(X_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

**Slika 26. Pravokutna razdioba [3]***Trokutasta razdioba*

$$u(X_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (14)$$

**Slika 27. Trokutasta razdioba [3]**

Gdje su: $u(X_i)$ – standardna mjerna nesigurnost
 a – granica intervala pojavljivanja

3) Određivanje sastavljene standardne nesigurnosti

Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(y)$ određuje se odgovarajućim sastavljanjem standardnih nesigurnosti procjena ulaznih veličina. Može se određivati na dva različita načina ovisno o odnosu između ulaznih veličina.

Ukoliko ulazne veličine nisu međusobno povezane [12]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(X_i)} \quad (15)$$

Ukoliko su ulazne veličine međusobno povezane [12]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 u^2(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{\partial f}{\partial X_j} u(X_i, X_j)} \quad (16)$$

Gdje su: $c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i}$ – koeficijenti osjetljivosti

4) Određivanje proširene nesigurnosti

Proširena mjerna nesigurnost (U) je veličina koja se dobiva množenjem složene standardne nesigurnosti $u_c(y)$ s faktorom pokrivanja k , a određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća velik dio razdiobe koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini [12].

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (17)$$

7.2. Mjerna nesigurnost na temelju dobivenih rezultata mjerenja

Izračun mjerne nesigurnosti provedenog postupka vrši se prema prethodno navedenoj GUM metodi za procjenjivanje mjerne nesigurnosti.

Matematički model za jedan smjer mjerenja:

$$\Delta KOIN.LIB = AUTOKOL. - \delta_{pon} - \delta_{ods_{AUTOKOL.}} - \delta_{poz} \quad (18)$$

Gdje je: $\Delta KOIN.LIB$ - odstupanje nagiba koincidentne libele, mm/m
 $AUTOKOL.$ – očitavanje vrijednosti kuta na autokolimatoru, mm/m
 δ_{pon} – ponovljivost očitavanja rezultata, mm/m
 $\delta_{ods_{AUTOKOL.}}$ – odstupanje autokolimatora, mm/m
 δ_{poz} – pogreška pozicioniranja, mm/m.

Izračun mjerne nesigurnosti sastoji se od 3 sastavnice:

1) Ponovljivost očitavanja rezultata, δ_{pon}

Ponovljivost očitavanja je utvrđena na temelju 20 ponovljenih mjerenja za nazivnu vrijednost kuta od 0,25 mm/m. Određivanje ponovljivosti očitavanja se vrši na način da se koincidentna libela postavi na vrijednost kuta od 0,25 mm/m, mjehurići libele se dovedu u ravnotežni položaj te se očita vrijednost koju pokazuje autokolimator u tom slučaju. Isti postupak se ponovi 20 puta. Na temelju dobivenih rezultata izračuna se aritmetička sredina dobivenih rezultata te procijenjeno standardno odstupanje.

Rezultati ponovljenih mjerenja su prikazani u tablici 12. Provedena su tri ponovljena mjerenja kod umjeravanja koincidentne libele pa ova sastavnica iznosi:

$$u(pon) = \frac{0,0007}{\sqrt{3}} = 0,0004 \text{ mm/m}$$

| Br. mjerenja | α mm/m | $\alpha_{AUTOKO.}$ mm/m |
|--|------------------|----------------------------|
| 1. | 0,25 | 0,246 |
| 2. | 0,25 | 0,246 |
| 3. | 0,25 | 0,247 |
| 4. | 0,25 | 0,245 |
| 5. | 0,25 | 0,246 |
| 6. | 0,25 | 0,246 |
| 7. | 0,25 | 0,244 |
| 8. | 0,25 | 0,245 |
| 9. | 0,25 | 0,245 |
| 10. | 0,25 | 0,246 |
| 11. | 0,25 | 0,245 |
| 12. | 0,25 | 0,245 |
| 13. | 0,25 | 0,246 |
| 14. | 0,25 | 0,246 |
| 15. | 0,25 | 0,245 |
| 16. | 0,25 | 0,245 |
| 17. | 0,25 | 0,245 |
| 18. | 0,25 | 0,246 |
| 19. | 0,25 | 0,245 |
| 20. | 0,25 | 0,246 |
| aritmetička sredina | | 0,246 |
| procijenjeno standardno odstupanje | | 0,0007 |

Tablica 12. Ponovljivost očitavanja rezultata

2) odstupanje autokolimatora, $\delta_{ods_{AUTOKOL.}}$

Prema certifikatu o umjeravanju autokolimatora za mjerno područje od 0' do 10' utvrđena je maksimalna pogreška od 0,3" te minimalna pogreška od 0".

$UL = 0,3'' = 0,0014 \text{ mm/m}$ – maksimalna pogreška očitavanja autokolimatora

$LL = 0'' = 0 \text{ mm/m}$ – minimalna pogreška očitavanja autokolimatora

Izračun standardnog odstupanja vrši se na temelju raspona odnosno razlike između maksimalne i minimalne pogreške očitavanja autokolimatora. Prema pretpostavki pravokutne razdiobe, ono iznosi:

$$u(odS_{AUTOKOL.}) = \frac{UL - LL}{\sqrt{3}} = \frac{0,0014 - 0}{\sqrt{3}} = 0,0008 \text{ mm/m}$$

3) Pogreška pozicioniranja, δ_{poz}

Prilikom postupka mjerenja vrijednost kuta se očitavala samo vrijednost u odnosu na pomak u smjeru z osi dok se pomak u smjerovima preostalih osi (x, y) nije uzimao u obzir. Unatoč tome, pri proračunu mjerne nesigurnost potrebno je provjeriti hoće li pomak po nekoj drugoj osi utjecati na točnost rezultata.

Postavljenjem nazivnog kuta na koincidentnoj libeli te dovođenjem mjehurića libele u ravnotežni položaj pomoću nagibnog stolića dolazi do pomaka zrcala kako po z osi, tako i po y osi. Vodeći se tom činjenicom, potrebno je odrediti iznos prostornog kuta koji zapravo pokazuje na „stvarnu“ vrijednost kuta. Pretpostavlja se da je iznos toga kuta vrlo mali te nam neće značajno utjecati na točnost rezultata, ali je ipak ga je potrebno provjeriti.

Postupak podataka potrebnih određuje se način da se postave odgovarajuće određene nazivne vrijednosti iznosa kuta na koincidentnoj libeli te se očita vrijednost kuta na autokolimatoru koji je rezultat pomaka zrcala u smjeru z osi i u smjeru y osi. Postupak je proveden za nazivne vrijednosti kuta od 0 mm/m do 2,75 mm/m.

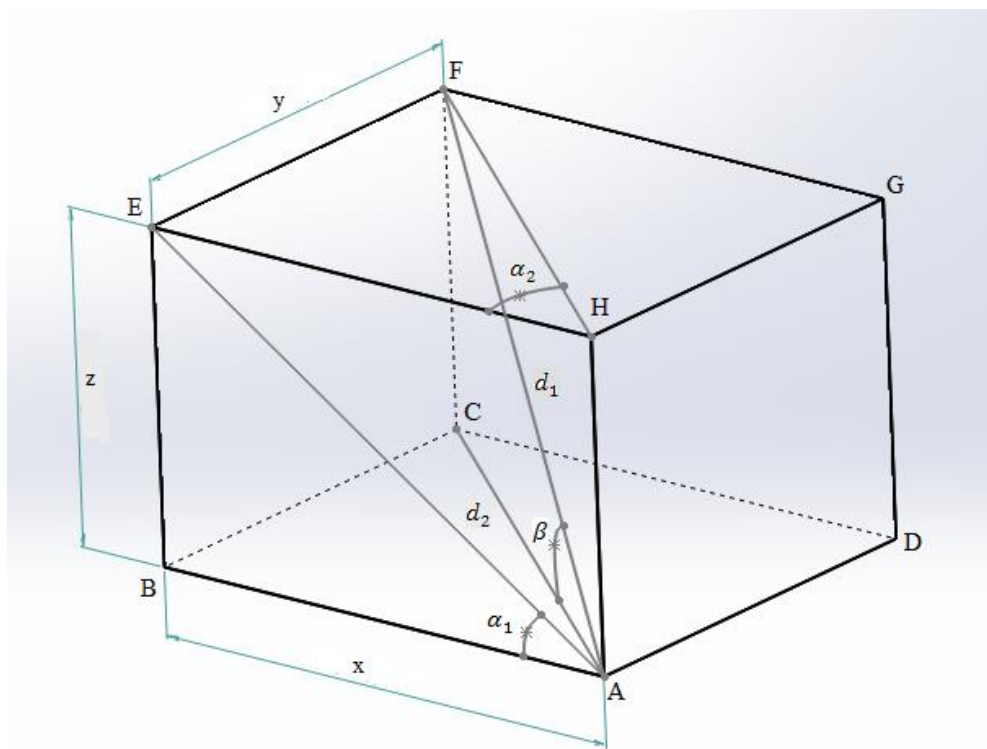
Pogreška mjerenja se izračunava oduzimanjem vrijednosti dobivenog kuta na temelju pomaka zrcala u smjeru osi z od vrijednosti prostornog kuta koji je rezultat pomaka zrcala po u smjeru z osi i y osi.

Izračun prostornog kuta vrši se prema jednadžbi (28) primjermom trigonometrije na odgovarajuće pravokutne trokute unutar kvadra prikazanog na slici 28, gdje je:

α_1 – vrijednosti kuta kao rezultat pomaka zrcala po z osi

α_2 – vrijednost kuta kao rezultata pomaka zrcala po y osi

β – vrijednost kuta prema pomaku zrcala po obje osi



Slika 28. Podaci potrebni za proračun prostornog kuta

Iz pravokutnog trokuta ABE slijedi:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{z}{x} \rightarrow z = \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot x \quad (19)$$

Iz pravokutnog trokuta HEF slijedi:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{y}{x} \rightarrow y = \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot x \quad (20)$$

Iz pravokutnog trokuta ACF slijedi:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{z}{d_2} \quad (21)$$

- duljina prostorne dijagonale d_2 iznosi:

$$d_2 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (22)$$

- vrijednosti kuta β :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{z_2}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (23)$$

Kombinacijom navedenih jednadžbi dobije se konačan izraz za izračun prostornog kuta β :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\sqrt{(\operatorname{tg} \alpha_2)^2 + 1}}$$

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\sqrt{(\operatorname{tg} \alpha_2)^2 + 1}} \quad (24)$$

Izmjerene vrijednosti kutova α_1 i α_2 dane su u sljedećim tablicama:

| α , mm/m | α_1 , rad | α_1 , mm/m |
|-----------------|------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,000245 | 0,245316 |
| 0,50 | 0,000489 | 0,488692 |
| 0,75 | 0,000738 | 0,737886 |
| 1,00 | 0,000983 | 0,983202 |
| 1,25 | 0,001232 | 1,231912 |
| 1,50 | 0,001486 | 1,486439 |
| 1,75 | 0,001746 | 1,746299 |
| 2,00 | 0,001989 | 1,988706 |
| 2,25 | 0,002237 | 2,236930 |
| 2,50 | 0,002486 | 2,486125 |
| 2,75 | 0,002734 | 2,734349 |

Tablica 13. Izmjerene vrijednosti kuta α_1

| α , mm/m | α_2 , rad | α_2 , mm/m |
|-----------------|----------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | $8,73 \cdot 10^{-6}$ | 0,008727 |
| 0,50 | $2,81 \cdot 10^{-5}$ | 0,028119 |
| 0,75 | $3,59 \cdot 10^{-5}$ | 0,035876 |
| 1,00 | $4,12 \cdot 10^{-5}$ | 0,041209 |
| 1,25 | $4,65 \cdot 10^{-5}$ | 0,046542 |
| 1,50 | $5,53 \cdot 10^{-5}$ | 0,055269 |
| 1,75 | $6,45 \cdot 10^{-5}$ | 0,064480 |
| 2,00 | $6,98 \cdot 10^{-5}$ | 0,069813 |
| 2,25 | $7,66 \cdot 10^{-5}$ | 0,076601 |
| 2,50 | $8,14 \cdot 10^{-5}$ | 0,081449 |
| 2,75 | $9,11 \cdot 10^{-5}$ | 0,091145 |

Tablica 14. Izmjerene vrijednosti kuta α_2

Prema dobivenim podacima izračunava se prostorni kut β te pogreška mjerenja čiji su rezultati prikazani u tablici 15:

| α mm/m | α_1 , rad | α_2 , rad | β , rad | pogreška, rad | pogreška, mm/m |
|------------------|------------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,000245 | $8,73 \cdot 10^{-6}$ | 0,000245 | $-4,91 \cdot 10^{-12}$ | $-4,91 \cdot 10^{-9}$ |
| 0,50 | 0,000489 | $2,81 \cdot 10^{-5}$ | 0,000489 | $-3,87 \cdot 10^{-11}$ | $-3,87 \cdot 10^{-8}$ |
| 0,75 | 0,000738 | $3,59 \cdot 10^{-5}$ | 0,000738 | $-1,33 \cdot 10^{-10}$ | $-1,33 \cdot 10^{-7}$ |
| 1,00 | 0,000983 | $4,12 \cdot 10^{-5}$ | 0,000983 | $-3,16 \cdot 10^{-10}$ | $-3,16 \cdot 10^{-7}$ |
| 1,25 | 0,001232 | $4,65 \cdot 10^{-5}$ | 0,001232 | $-6,22 \cdot 10^{-10}$ | $-6,22 \cdot 10^{-7}$ |
| 1,50 | 0,001486 | $5,53 \cdot 10^{-5}$ | 0,001486 | $-1,09 \cdot 10^{-9}$ | $-1,09 \cdot 10^{-6}$ |
| 1,75 | 0,001746 | $6,45 \cdot 10^{-5}$ | 0,001746 | $-1,77 \cdot 10^{-9}$ | $-1,77 \cdot 10^{-6}$ |
| 2,00 | 0,001989 | $6,98 \cdot 10^{-5}$ | 0,001989 | $-2,62 \cdot 10^{-9}$ | $-2,62 \cdot 10^{-6}$ |
| 2,25 | 0,002237 | $7,66 \cdot 10^{-5}$ | 0,002237 | $-3,72 \cdot 10^{-9}$ | $-3,72 \cdot 10^{-6}$ |
| 2,50 | 0,002486 | $8,14 \cdot 10^{-5}$ | 0,002486 | $-5,11 \cdot 10^{-9}$ | $-5,11 \cdot 10^{-6}$ |
| 2,75 | 0,002734 | $9,11 \cdot 10^{-5}$ | 0,002734 | $-6,80 \cdot 10^{-9}$ | $-6,80 \cdot 10^{-6}$ |

Tablica 15. Izračunate vrijednosti kuta β te pogreška mjerenja

Na temelju dobivenih rezultata, granične vrijednosti pogreške očitavanja iznose:

$$UL = 6,80 \cdot 10^{-6} \text{ mm/m}$$

$$LL = 0 \text{ mm/m}$$

Izračun standardnog odstupanja vrši se na temelju raspona odnosno razlike između maksimalne i minimalne pogreške dobivene razlikom izmjerenog i izračunatog kuta.

Prema pretpostavki pravokutne razdiobe, ono iznosi:

$$u(\text{poz}) = \frac{UL - LL}{\sqrt{3}} = \frac{6,80 \cdot 10^{-6} - 0}{\sqrt{3}} = 3,93 \cdot 10^{-6} \text{ mm/m} \approx 0 \text{ mm/m}$$

Iz izračuna standardnog odstupanja je vidljivo da je ono vrlo malo te se njen iznos može zanemariti u proračunu mjerne nesigurnosti.

U tablici 16 prikazane su vrijednosti sastavnica mjerne nesigurnosti te sastavljena standardna nesigurnost.

| Promatrana veličina X_i | Standardna nesigurnost $u(X_i)$ | Koeficijent osjetljivosti c_i | Doprinos standardnoj nesigurnosti $u_i(y)$ |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| δ_{pon} | 0,0004 mm/m | 1 | 0,0004 mm/m |
| $\delta_{ods_{AUTOKOL}}$ | 0,0008 mm/m | 1 | 0,0008 mm/m |
| δ_{poz} | ≈ 0 mm/m | 1 | ≈ 0 mm/m |
| Sastavljena standardna nesigurnosti, $u(x)$ | | | 0,0009 mm/m |

Tablica 16. Mjerna nesigurnost umjeravanja za jedan smjer nagiba

7.2.1. Sastavnica mjerne nesigurnosti zbog spajanja dva seta mjerenja

Prilikom izračuna mjerne nesigurnosti u obzir se mora i uzeti korekcija spajanja dva rezultata mjerenja opisana u poglavlju 6.2.

Nesigurnost korekcije spajanja prema aritmetičkoj sredini:

$$u_k = \frac{u(x)}{\sqrt{N}} \quad (25)$$

Gdje je: N - broj mjerenja

$$u_k = \frac{0,0009}{\sqrt{11}} = 0,0003 \text{ mm/m}$$

Ukupna mjerna nesigurnost tada iznosi:

$$u = \sqrt{u(x)^2 + u_k^2} \quad (26)$$

$$u = \sqrt{0,0009^2 + 0,0003^2} = 0,0009 \text{ mm/m}$$

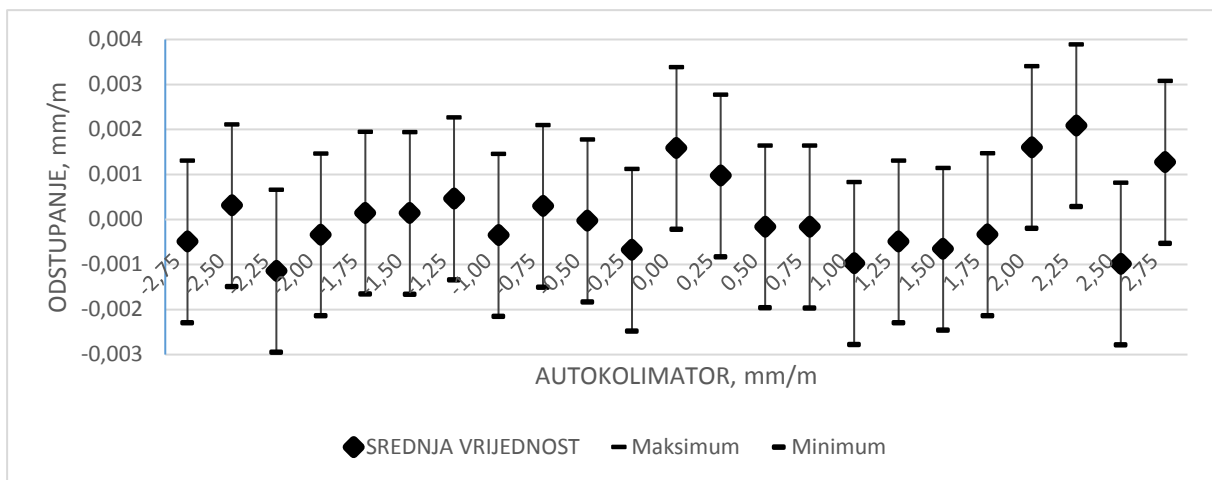
Proširena nesigurnost iznosi:

$$U = 2 \cdot u$$

$$U = 0,0018 \text{ mm/m} \approx 0,002 \text{ mm/m}$$

Proširena mjerna nesigurnost se dobije množenjem sastavljene standardne nesigurnosti sa faktorom pokrivanja $k = 2$, koja za normalnu razdiobu odgovara vjerojatnosti pokrivanja od približno 95 %.

Rezultati umjeravanja uz odgovarajuću mjernu nesigurnost dani su na slici 28.



Slika 29. Odstupanja libele

Rezultati ispitivanja pokazuju da je sustav primjenjiv za postupak umjeravanja koincidentnih libela mjernog područja ± 10 mm/m rezolucije od 0,01 mm/m uz mjernu nesigurnost od 0,002 mm/m.

8. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada je bila osmisliti mjernu metodu i postupak za umjeravanje koincidentne libele pomoću autokolimatora. U dimenzionalnom mjeriteljstvu postoji mnogo uređaja kojima je moguće mjeriti kut, ali je u ovom radu razvijen upravo postupak za umjeravanje koincidentnih libela koje su pogodne za određivanje nagiba radnih stolova, vodilica, postolja i sličnih dijelova strojeva u kojima se zahtijeva velika točnost izrade dijelova.

U radu je opisana GUM metoda za procjenu mjerne nesigurnosti.

Korištenjem raspoložive mjerne opreme Laboratorija za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje osmišljena su dva mjerna postupka.

Prvi mjerni postupak temeljio se na sinus metodi. Sinus metoda je metoda prema kojoj se korištenjem sinus lineala i planparalelnih graničnih mjerki postavlja nazivna vrijednost kuta te se određuje odstupanje očitavanja vrijednosti kuta na koincidentnoj libeli i očitavanja vrijednosti kuta na autokolimatoru. U eksperimentalnom dijelu rada odabrane su nazivne vrijednosti kuta od 0 mm/m do 2,75 mm/m. Odabrane su upravo te vrijednosti radi razlike u mjernim područjima koincidentne libele i autokolimatora. Već prilikom odvijanja prvog seta mjerenja dolazi do problema koji se javljaju u obliku velikih vrijednosti odstupanja, odnosno problem s nestabilnim mjerim sustavom.

Na točnost mjernog sustava može utjecati više faktora. Jedan od njih je neoprezno rukovanje planparalelnim graničnim mjerkama koje uvijek moraju biti kvalitetno očišćene, bez nečistoća poput prašine jer svaka nečistoća može imati značajni utjecaj na rezultat mjerenja. Također se i prijenos topline od samog mjeritelja na planparalelne granične mjerke treba svesti na minimum. S druge strane, na točnost mjernog sustava može utjecati i nekontrolirano dizanje i spuštanje sinus lineala prilikom zamijene planparalelnih graničnih mjerki.

Detaljnijom analizom mjernog sustava pokazalo se da je upravo taj drugi navedeni problem imao najviše utjecaja dobiveni mjerni rezultat. Naime, prilikom podizanja i spuštanja sinus lineala dolazio je do nekontroliranog pomaka zrcala u odnosu na sinus lineal. Također je utvrđen i značajan pomak sustava (sinus lineal i zrcalo) okomito na os mjerenja (mjerna os autokolimatora u xy ravnini).

Zbog prethodno navedenih problema mjernog sustava osmišljen je drugi mjerni sustav.

Elementi ovog sustava postavljeni su na nagibni stolić kojima se mogao ostvariti kutni pomak te provesti kvalitetno podešavanje mjernog sustava. Takvim postavom su isključene pogreške zbog eventualnih mehaničkih i toplinskih utjecaja i sam postupak je bitno ubrzan. Pomak zrcala, koji se bilo glavni problem prethodnog sustava, riješen je na način da se čeličnim prizmama osigurala potrebna krutost.

U eksperimentalnom dijelu korištene su nazivne vrijednosti kuta od 0 mm/m do 2,75 mm/m koje su određene na temelju mjernih područja autokolimatora i koincidentne libele. Mjerenja su se vršila na način da su se na koincidentnoj libeli postavljale nazivne vrijednosti kuta te se određivalo očitavanje autokolimatora.

Rezultati mjerenja su pokazali da je postavljeni mjerni sustav primjenjiv za umjeravanje koincidentnih libela mjernog područja ± 10 mm/m rezolucije od 0,01 mm/m uz mjernu nesigurnost od 0,002 mm/m uz pretpostavku normalne razdiobe koja odgovara vjerojatnosti pokrivanja od približno 95 %.

Prilikom procesa mjerenja i analize mjernog sustava zaključuje se da su najveće prednosti postavljenog mjernog sustava, jednostavnost i brzina postupka mjerenja te izuzetna točnost dobivenih rezultata. S druge strane, najveći nedostatak je malo mjerno područje autokolimatora. Zbog razlike između mjernog područja autokolimatora i koincidentne libele potrebno je dijeliti mjerno područje na pozitivne i negativne vrijednosti kutova kako bi se obuhvatilo čim više mjernog područja koincidentne libele i na taj način umjeravanje izvršilo na pouzdan način.

LITERATURA

- [1] *Mechanical Measurement & Metrology*, Darshan Institute of Engineering & Technology, http://www.darshan.ac.in/Upload/DIET/Documents/ME/2141901_MMM_E-Note_22032016_031012AM.pdf, 15.12.2019.
- [2] Runje, B.: *Predavanja iz kolegija MJERITELJSTVO*, Zagreb, 2013., http://repositorij.fsb.hr/6115/1/764202.Predavanja1_MJERITELJSTVO.pdf, 15.12.2019.
- [3] Runje, B.: *Autorizirana predavanja iz kolegija teorija i tehnika mjerenja*, FSB, Zagreb, 2014., https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja_TTM.pdf, 15.12.2019.
- [4] <https://quality-tools-shop.de/shopmedia/agruppen/g/30-246.jpg>, 16.12.2019.
- [5] <https://www.sartorius.hr/proizvodi/usluge/umjeravanje/>, 16.12.2019.
- [6] Šimunović, V.: *Mjerno jedinstvo*, Zagreb, 2017. - Predavanja iz kolegija Mjerenja u proizvodnji
- [7] Runje, B.; Baršić, G.; Šimunović, V.: *TTM praktikum*, FSB, Zagreb, 2014., <https://pdfslide.net/documents/praktikum-za-laboratorijske-vjezbe.html>, 22.1.2020.
- [8] http://www2.geof.unizg.hr/~zlastic/Geodetski%20instrumenti_predavanja.pdf, 22.1.2020.
- [9] Trioptics: *OptiTest, a complete range of Optical Instruments*, Wedel/Njemačka, 2013., http://trioptics-usa.com/wp-content/uploads/Optitest_en.pdf, 25.1.2020.
- [10] <https://openoregon.pressbooks.pub/manufacturingprocesses45/chapter/unit-3-sine-bar/>, 27.1.2020.
- [11] <https://extrudesign.com/sine-bar-construction-working-principle/>, 27.1.2020.
- [12] Mahović, S.: *Teorija i tehnika mjerenja*, FSB, Zagreb, 2009. https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/01_04_2010_10686_TTM2009.pdf, 10.2.2020.
- [13] EA-4/02: *Izražavanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju*, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, 2008.
- [14] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/DetalleNivelDeBurbuja.jpg>, 10.2.2020.

PRILOZI

I. CD-R disc