

# Smanjenje odstupanja od pravocrtnosti precizne linearne vodilice

---

**Filipčić, Martin**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:397332>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-10**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Martin Filipčić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Marko Katić

Student:

Martin Filipčić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Rad je izrađen pod mentorstvom doc. dr. sc. Marka Katića na Katedri za mjerenje i kontrolu Fakulteta Strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem mentoru, voditelju Laboratorija za precizna mjerenja dužina Marku Katiću na bezrezervnoj pomoći pri izradi rada, te asistentu Marku Horvateku na konstantnoj pomoći pri izvođenju pokusa unutar laboratorija.

Zahvale također upućujem obitelji i prijateljima koji su mi bili nezamjenjiva potpora u svim fazama studiranja.

Martin Filipčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

### DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIN FILIPČIĆ** Mat. br.: 0035201892

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Smanjenje odstupanja od pravocrtnosti precizne linearne vodilice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Reduction of straightness deviation of a precision linear guide**

Opis zadatka:

U sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina ugrađena je precizna linearna vodilica, čije odstupanje od pravocrtnosti direktno utječe na mjernu nesigurnost rezultata. U okviru ovog rada potrebno je:


1. opisati mjerni sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala
2. korištenjem odabrane mjerne metode utvrditi početno odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice i njenog postolja
3. ispitati mogućnost smanjenja odstupanja od pravocrtnosti, korištenjem ugrađenih vijaka za pritezanje
4. predstaviti rezultate mjerenja odstupanja od pravocrtnosti.


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

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predvideni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:  
  
 doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
 prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. MJERITELJSTVO .....	3
2.1. Općenito o mjeriteljstvu.....	3
2.2. Mjerni etaloni .....	4
2.3. Mjerna nesigurnost.....	5
2.4. Mjerne greške.....	6
3. LINEARNE VODILICE .....	8
3.1. Linearne vodilice s kotrljajućim ležajevima .....	8
3.2. Predopterećenje linearnih vodilica .....	10
3.3. Točnosti linearnih vodilica.....	11
3.3.1. Značajke koje opisuju točnost.....	11
3.3.2. Montiranje linearne vodilice .....	12
3.4. Materijali vodilica s kotrljajućim ležajevima.....	13
4. PRAVOCRTNOST LINEARNIH VODILICA .....	14
4.1. Tolerancije oblika i položaja.....	14
4.2. Odstupanje kotrljajućih elemenata.....	15
4.3. Odstupanje od pravocrtnosti i usporednosti.....	16
4.4. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti .....	17
4.5. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti .....	18
4.7. Interferometar.....	18
4.7.1. Michelsonov interferometar .....	18
4.7.2. Dinamički interferometri.....	19

---

4.7.3. Statički interferometri .....	20
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	21
5.1. Komponente mjernog sustava za umjeravanje preciznih mjernih skala .....	22
5.1.1. Renishaw ML10 .....	23
5.1.2. Renishaw EC10 .....	25
5.1.3. Mehaničke komponente sustava .....	26
5.1.3.1. Elementi za pozicioniranje .....	26
5.1.3.2. Optičke komponente .....	27
5.2. Analitička obrada dobivenih rezultata .....	29
5.3. Mjerenja .....	30
5.3.1. Opis linearne vodilice .....	30
5.3.2. Plan mjerenja .....	31
5.4. Mjerenje odstupanja optičkog stola .....	33
5.5. Mjerenje početnog odstupanja vodilice po vertikalnoj osi .....	36
5.6. Mjerenje odstupanja vodilice po vertikalnoj osi nakon podešavanja vijaka .....	39
5.6.1. Početni pristup kod smanjenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću vijaka .....	39
5.6.2. Konačni pristup kod smanjenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću vijaka .....	48
5.7. Mjerenje početnog odstupanja vodilice po horizontalnoj osi .....	52
5.8. Mjerenje odstupanja vodilice po horizontalnoj osi nakon podešavanja vijaka .....	56
5.9. Mjerenje odstupanja vodilice po vertikalnoj osi nakon smanjenja odstupanja horizontalne osi .....	60
5.10. Grafički prikaz smanjenja odstupanja za obe osi .....	63
5.11. Konačno stanje horizontalnog odstupanja bez kritičnih točaka .....	64
5.12. Konačno stanje vertikalnog odstupanja bez kritičnih točaka .....	65
6. ZAKLJUČAK .....	67
LITERATURA .....	68

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Lanac sljedivosti [4] .....	4
Slika 2.	Prikaza rasipanja točnosti i preciznosti [4].....	5
Slika 3.	Netočnost mjerenja [4] .....	6
Slika 4.	Linearna vodilica s kugličnim ležajem [5] .....	9
Slika 5.	Linearna vodilica s kugličnim ležajem u izometriji [6] .....	9
Slika 6.	Graf ovisnosti opterećenja i deformacije [7].....	10
Slika 7.	Varijanta montiranja W2 .....	12
Slika 8.	Primjeri nepravilnog montiranja vodilice.....	12
Slika 9.	Karakteristične greške kružnosti [4].....	15
Slika 10.	Prikaz odstupanja od pravocrtosti [4].....	16
Slika 11.	Prikaz odstupanja od pravocrtosti [4].....	16
Slika 12.	Mjerenje pravocrtosti pomoću mjerenja duljine [9].....	17
Slika 13.	Mjerenje pravocrtosti pomoću mjerenja kutova [9].....	17
Slika 14.	Pojednostavljeni prikaz Michelsonovog interferometra [12] .....	19
Slika 15.	Model dinamičkog interferometra [10] .....	19
Slika 16.	Montirana linearne vodilica proizvođača Bosch – Rexroth sa svim pripadajućim elementima .....	21
Slika 17.	Pojednostavljeni shematski prikaz mjernog sustava .....	22
Slika 18.	Renishaw ML10 .....	23
Slika 19.	Renishaw ML10 spojen na prijenosno računalo i kompenzator okolišnih uvjeta. 24	
Slika 20.	Mjerni senzor kompenzacijskog uređaja [13] .....	25
Slika 21.	Thorlabs elementi za pozicioniranje [11].....	26
Slika 22.	Thorlabs postolja za pozicioniranje (MB1015/M, BA1/M) [14] [15].....	26
Slika 23.	Thorlabs postolja za pozicioniranje (BA4/M, MB12) [16] [17] .....	27
Slika 24.	Thorlabs Podesivi nosač zrcala KM200 [18] .....	27



---

Slika 25.	Zrcalo BB2-E02 montirano na nosač .....	28
Slika 26.	Reflektor proizvođača Renishaw.....	28
Slika 27.	Interferometar montiran na klizač vodilice .....	28
Slika 28.	Prikaz dijagrama rasipanja i pravca regresije.....	29
Slika 29.	Linearna vodilica Bosch – Rextroth.....	30
Slika 30.	Set vijaka za pritezanje sa donje strane optičkog stola i vodilice .....	31
Slika 31.	Pojednostavljeni shematski prikaz gornjih i donjih vijaka te njihovih utjecaja ....	32
Slika 32.	Interferometar postavljen na pločicu pomoću kojeg se mjeri odstupanje stola ....	33
Slika 33.	Reflektor postavljen za vertikalno mjerenje [19].....	33
Slika 34.	Graf vertikalnog odstupanja od pravocrtности optičkog stola .....	36
Slika 35.	Graf početnog stanja vodilice po vertikalnoj osi.....	39
Slika 36.	Grafički prikaz stanja vodilice nakon prve iteracije.....	42
Slika 37.	Grafički prikaz stanja vodilice nakon druge iteracije.....	45
Slika 38.	Grafički prikaz stanja vodilice nakon prve iteracije.....	48
Slika 39.	Graf idealnog stanja vodilice po vertikalnoj osi.....	51
Slika 40.	Aparatura postavljena za mjerene horizontalne osi.....	52
Slika 41.	Graf početnog stanja vodilice po horizontalnoj osi.....	55
Slika 42.	Aparatura postavljena za mjerene horizontalne osi.....	56
Slika 43.	Graf konačnog stanja vodilice po horizontalnoj osi .....	59
Slika 44.	Graf konačnog stanja vodilice po vertikalnoj osi nakon poboljšanje horizontalne osi .....	62
Slika 45.	Grafovi početnog i konačnog stanja odstupanja od pravocrtности vodilice po vertikalnoj osi.....	63
Slika 46.	Grafovi početnog i konačnog stanja odstupanja od pravocrtности vodilice po vertikalnoj osi .....	64
Slika 47.	Konačno stanje horizontalnog odstupanja od pravocrtности sa izbačenim kritičnim točkama .....	65
Slika 48.	Konačno stanje vertikalnog odstupanja od pravocrtности sa izbačenim kritičnim točkama .....	66

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz značajki koje opisuju točnost vodilice .....	11
Tablica 2. Tolerancije oblika i položaja [4] .....	14
Tablica 3. Tehnički podaci uređaja Renishaw ML10 [13].....	24
Tablica 4. Tehnički podaci kompenzacijskog uređaja [13].....	25
Tablica 5. Rezultati vertikalnih mjerenja optičkog stola.....	33
Tablica 6. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje optičkog stola .....	34
Tablica 7. Rezultati vertikalnih mjerenja početnog stanja vodilice .....	36
Tablica 8. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja početnog stanja vodilice .....	37
Tablica 9. Rezultati vertikalnih mjerenja stanja vodilice kod prvog pristupa.....	39
Tablica 10. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja stanja vodilice kod prvog pristupa.....	41
Tablica 11. Rezultati mjerenja nakon druge iteracije .....	42
Tablica 12. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja stanja vodilice nakon druge iteracije .....	43
Tablica 13. Rezultati mjerenja nakon treće iteracije .....	45
Tablica 14. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja stanja vodilice nakon treće iteracija.....	46
Tablica 15. Rezultati vertikalnih mjerenja idealnog stanja vodilice .....	49
Tablica 16. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja idealnog stanja vodilice .....	50
Tablica 17. Rezultati horizontalnih mjerenja početnog stanja vodilice .....	52
Tablica 18. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje horizontalnog odstupanja početnog stanja vodilice .....	54
Tablica 19. Rezultati horizontalnih mjerenja konačnog stanja vodilice .....	56
Tablica 20. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje horizontalnog odstupanja konačnog stanja vodilice .....	57

---

Tablica 21. Rezultati vertikalnih mjerenja stanja vodilice nakon poboljšanje horizontalne osi .....	60
Tablica 22. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenje horizontalnog odstupanja konačnog stanja vodilice .....	61

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$H$	mm	Visina montiranja vodilice
$W_{2,3}$	mm	Širina montiranja vodilice
$T_p$	$\mu\text{m}$	Tolerancija pravocrtnosti
$T_{ra}$	$\mu\text{m}$	Tolerancija ravnosti
$e_{1,2}$	$\mu\text{m}$	Odstupanja prilikom montaže vodilica
$d$	$\mu\text{m}$	Parametar odstupanja kod mjerenja kutova
$\alpha$	$^\circ$	Kutovi odstupanja
$F_{g,1,2,3}$	kN	Sile kojima gornji vijci utječu na vodilicu
$F_{d,1,2,3}$	kN	Sile kojima donji vijci utječu na vodilicu

## **SAŽETAK**

Svrha ovog diplomskog rada je ispitati mogućnost smanjenja odstupanja od pravocrtnosti precizne linearne vodilice pomoću ugrađenih vijaka za pritezanje.

U uvodnom dijelu rada ukratko su opisani neki važniji elementi mjeriteljstva, linearnih vodilica, te je opisan pojam pravocrtnosti. Pomoću njega je stvorena podloga za drugi dio rada, onaj eksperimentalni.

U početku eksperimentalnog dijela je prikazan i opisan mjerni sustav koji će se koristiti prilikom mjerenja, a nakon toga su izneseni rezultati mjerenja i mogućnosti smanjenja odstupanja od pravocrtnosti linearne vodilice po horizontalnoj i vertikalnoj osi.

Nakon analize mjerenja i njihovih grafova, utvrđeno je da se odstupanje od pravocrtnosti može smanjiti pomoću vijaka za pritezanje.

Ključne riječi: odstupanje od pravocrtnosti, linearna vodilica, interferometar, vijci za pritezanje

## **SUMMARY**

The purpose of this master thesis is to examine the possibility of reducing the straightness deviation of a precision linear guide using built-in tightening screws.

In the introductory part of the paper, some important elements of metrology and linear guides, are briefly described, as well as concept of straightness. Purpose of the first part of this master thesis is to create the basis for the second part of the paper, the experimental one.

At the beginning of the experimental part, the measuring system that will be used during the measurement is shown and described. After that, the measurement results and the possibilities of reducing the straightness deviation of the linear guide along the horizontal and vertical axis are presented.

After analyzing the measurements and their respective graphs, it was determined that the straightness deviation can be reduced with the usage of tightening screws.

Key words: straightness deviation, linear guide, interferometer, tightening screws

## 1. UVOD

Klišej bi bilo započeti rad za naglašavanjem važnosti mjeriteljstva za društvo, za razmjenu dobara i u sličnim sferama života. Ono što je važnije reći za mjerenje je da je ona jedna od iskonskih ljudskih potreba. To se može jednostavno primijetiti u svakodnevnom životu, koliko puta se osoba nađe u društvu gdje se nešto želi procijeniti „od oka“ te naravno najbliži pokušaj procjene uživa komplimente. Naravno, to bi bio primjer primitivnog mjerenja koje postoji od davnina, no ono čime se današnje mjeriteljstvo bavi je puno kompleksnije i konkretnije što odgovara današnjem načinu života i sustavnom uređenju kapitalizma gdje nema mjesta za površnost već se traži preciznost i konkretnost.

Osnove samog mjeriteljstva su dakako postavljene još u drevnim civilizacijama gdje se pojavljuje razmjena dobara kao način da se pojedina dobra mogu dovesti u odnos pomoću dimenzija koje ih određuju. To su najčešće bile mjere za duljinu i masu, čije su mjerne jedinice bile slične bez obzira gdje se civilizacija razvijala – a te mjerne jedinice su dijelovi ljudskog tijela! Od tuda i dolaze nazivi danas standardiziranih mjera koje se koriste u nekim dijelovima svijeta poput lakta, pedlja ili stope.

Sa razvojem društva, globalizacijom i pojavom industrijalizacije, pojavio se problem neujednačenosti mjera u različitim dijelovima svijeta. Francuska kao jedna od trgovačkih velesila tog doba je doskočila problemu 20. svibnja 1875. godine te predstavila „Dogovor o metru“ čime se jasno definirala vrijednost metra koji su potpisale 17. država uključujući i Austro-Ugarsku što je jasno tada uključivalo i Hrvatsku.

Daljnijim razvojem industrije, dimenzijska točnost postaje sve važnija, ne samo pri trgovini već pri izradi raznih strojnih dijelova koji traže visoku preciznost. Samim time mjeriteljstvo postaje nezaobilazan dio strojarstva.

Počevši od korištenja dijelova tijela za mjera danas smo došli do toga da se metar službeno definira kao: duljina puta koji u vakuumu prijeđe svjetlost za vrijeme od  $1/299\,792\,458$  sekunde. Ta činjenica dovoljno govori o razvoju mjeriteljstva u modernom dobu! [1]

Svi elementi strojeva podliježu visokoj dimenzijskoj točnosti jer prilikom automatiziranja proizvodnje, gubici mogu biti veliki, ukoliko stroj, ili bilo koji element stroja izgubi na dimenzijskoj točnosti prilikom procesa izrade proizvoda. U ovom radu će biti opisan proces smanjenja odstupanja od pravocrtnosti precizne linearne vodilice. Proces je potreban iz razloga što odstupanje od pravocrtnosti navedene linearne vodilice direktno utječe na mjernu nesigurnost rezultata uređaja koji bi eventualno bio montiran na njoj.

Prijenos tereta u ravnini u postrojenjima najčešće je realiziran linearnim vodilicama raznih izvedbi. U postrojenjima glavne karakteristike koje ih opisuju su maksimalna nosivost te mogućnost odnosno potreba podmazivanja. Unatoč najčešćoj primjeni vodilica u industriji, one i u drugim sferama služe svrsi pa tako i u mjeriteljstvu se može pojaviti potreba za translacijom uređaja ili elementa. Jasno je da kada govorimo o mjeriteljstvu, da će glavna karakteristika koju linearna vodilica mora zadovoljiti je da ona uistinu bude linearna, tj. da prilikom mjerenja, ne uzrokuje odstupanja koja će utjecati na rezultate mjerenja.



## 2. MJERITELJSTVO

### 2.1. Općenito o mjeriteljstvu

Kako je spomenuto u uvodu, jasno je da je mjeriteljstvo napredovalo sa razvojem civilizacije te je konkretno definirano kao znanstveno područje. Mjeriteljstvo je definirano kao znanost o mjerenju, a obuhvaća mjerne jedinice i njihove etalone, mjerila i njihovo područje primjene te sve teoretske i praktične probleme vezane s mjerenjem. Može se podijeliti na tri različita područja :

1. Zakonsko mjeriteljstvo je dio mjeriteljstva uređen zakonom i drugim propisima u cilju uspostave povjerenja u rezultate mjerenja u području primjene zakonitih mjerenja. Odnosi na djelatnosti koje su rezultat zahtjeva iz propisa, a odnose se na mjerenja, mjerne jedinice, mjerila i mjerne metode koje provode mjerodavna tijela.
2. Znanstveno mjeriteljstvo je dio mjeriteljstva koji se bavi problemima koji su zajednički za sva mjeriteljska pitanja bez obzira na mjerenu veličinu. Ono obuhvaća opće teoretske i praktične probleme koji se tiču mjernih jedinica, uključujući njihova ostvarenja i njihovo prenošenje znanstvenim metodama, probleme mjernih pogrešaka i nesigurnosti te probleme mjeriteljskih svojstava mjerila.
3. Industrijsko mjeriteljstvo bavi se mjerenjima u proizvodnji i upravljanju kakvoćom. Ono obuhvaća postupke umjeravanja, razdoblja umjeravanja, upravljanje mjernim procesima i upravljanje mjerilima i industriji kako bi se osiguralo da ona budu u skladu sa zahtjevima za njihovu predviđenu uporabu. [2]

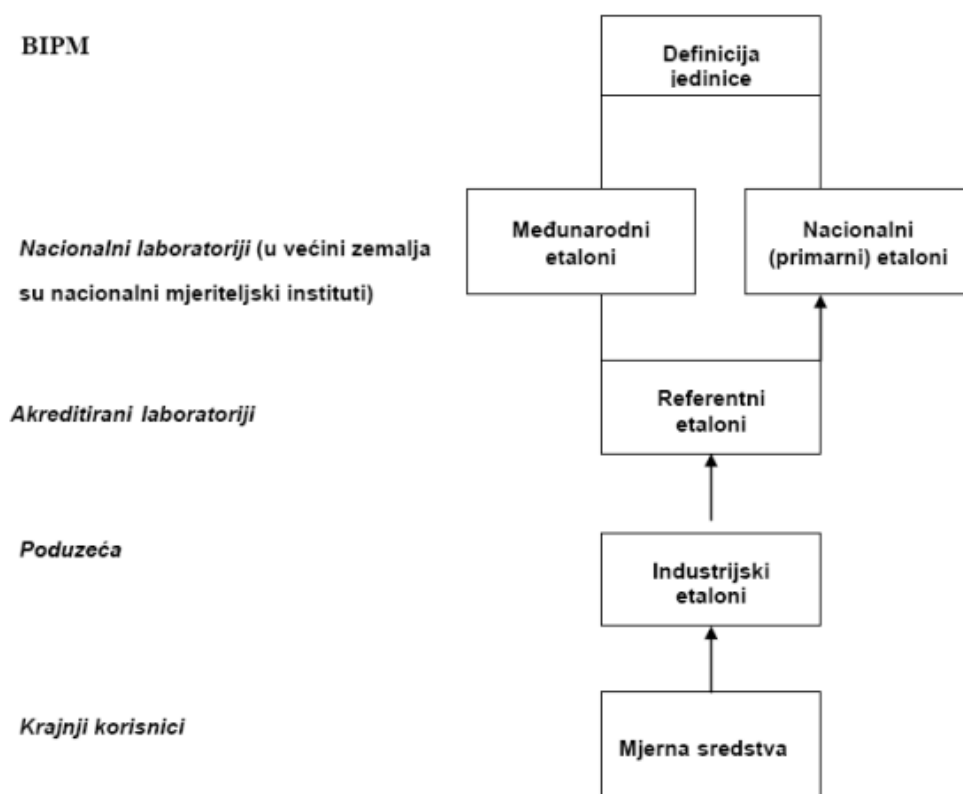
Nacionalni zakoni o mjeriteljstvu obično uređuju mnoga gospodarska područja no najznačajnija područja su:

- Zakonite mjerne jedinice
- Fizička ostvarenja zakonitih mjernih jedinica
- Hijerarhija mjernih etalona
- Tehnički propisi o mjerilima
- Mjeriteljski nadzor nad mjerilima [2]

## 2.2. Mjerni etaloni

Mjerni etalon stvarna je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice ili jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca.

1. Međunarodni etalon – najviši stupanj etalona koji je propisan međunarodnim sporazumom kao osnova za utvrđivanje valjanosti svih drugih etalona.
2. Primarni etalon – vrsta etalona čije se mjerne osobine provjeravaju međunarodnim etalom.
3. Nacionalni etalon -najviša razina etalona unutar jedne zemlje koji je priznat službenom nacionalnom odlukom. Poistovjećuje se sa primarnim etalom.
4. Sekundarni etalon – razina etalona čije se osobine provjeravaju u odnosu na primarne (nacionalne) etalone, a služe za utvrđivanje mjernih osobina niže klase etalona – radnih.
5. Radni etalon – najniža razina etalona koja služi umjeravanju mjerila i mjernih sredstava. [3]



Slika 1. Lanac sljedivosti [4]

### 2.3. Mjerna nesigurnost

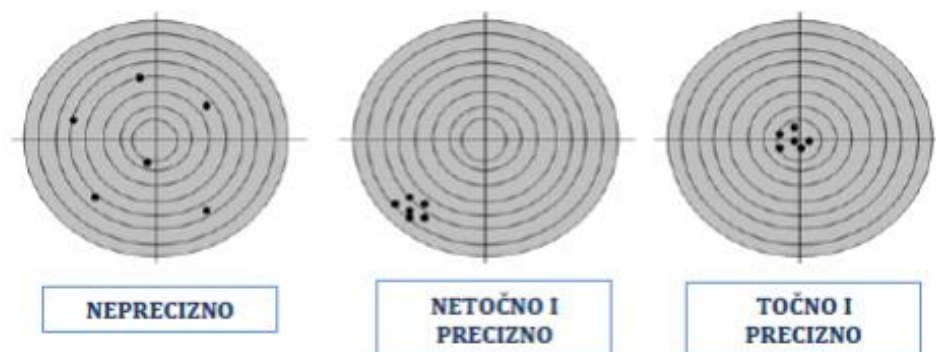
U teoriji je nemoguće dobiti rezultat mjerenja u potpunosti točan tj. bez grešaka jer uređaji kojima raspolažemo imaju određenu razlučivost te se uvijek nađe greška manjeg reda veličine od razlučivosti uređaja. Na takve greške ne možemo utjecati no ukoliko imamo rasipanje vrijednosti mjerenja kod mjerenja iste veličine, tada se ono naziva mjerna nesigurnost. Mjerna nesigurnost se pridružuje rezultatu kao parametar mjerenja te opisuje rasipanje vrijednosti. [4] Niz parametara može utjecati na rezultate mjerenja tako da je ponekad dovođenje mjerne sigurnosti na zadovoljavajuće vrijednosti zahtjevan proces.

Pojmovi koji su usko vezani uz mjernu nesigurnost i same greške pri mjerenjima su točnost i preciznost. Kolokvijalno često bivaju izjednačavani no zapravo su definirani na drugačije načine.

Točnost pokazuje blizinu mjerenih veličina sa usvojenim referentnim vrijednostima.

Preciznost pokazuje sličnost rezultata prilikom ponovljenih mjerenja na identičnim ili veoma sličnim predmetima. [4]

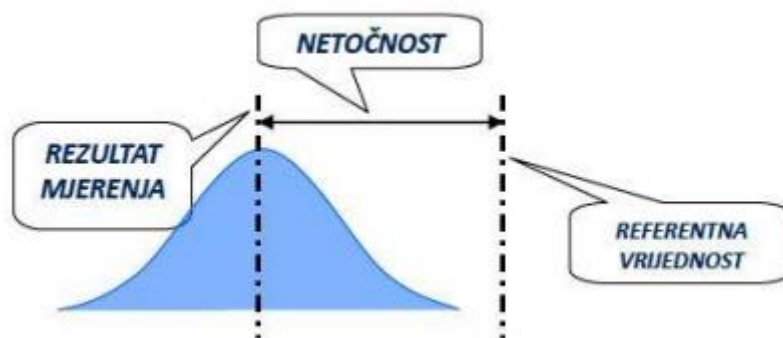
Na slici niže se jasno može uočiti razlika između dva pojma:



Slika 2. Prikaz rasipanja točnosti i preciznosti [4]

Pojam ponovljivosti je također usko vezan uz mjernu nesigurnost te je definiran kao usko slaganje rezultata uzastopnih mjerenja neke veličine u istim uvjetima mjerenje kao što su isti mjeritelj, isti mjerni postupak te isto mjerilo koje se upotrebljava u istim uvjetima.

Netočnost mjerenja se može definirati kao odstupanje rezultata mjerenja od referentne vrijednosti, a koja je pak temeljena na srednjoj vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih u istim uvjetima s istom opremom.



Slika 3. Netočnost mjerenja [4]

#### 2.4. Mjerne greške

Kako je i spomenuto prije, sva mjerenja podliježu nekoj razini greško koliko god ona bila točna ili izvedena sa preciznim uređajima. Prilikom mjerenja postoji prevelik broj faktora koji se mogu mijenjati između svakog pojedinog mjerenja te je u svako mjerenje i uključen sveprisutni ljudski faktor.

Pogreška prilikom mjerenja je definirana kao odstupanje dobivene vrijednosti mjerene veličine od one stvarne vrijednosti.

Postoji mnoštvo uzroka grešaka kod mjerenja te je cilj svesti ih na minimum, neki od najčešćih uzroka su:

- Nepravilno rukovanjem uređajem kojim se provodi mjerenje ili nekim pomoćnim uređajem
- Neispravnost uređaja koja može bit uzrokovana dotrajalošću ili oštećenjima
- Uvjeti u kojima se provodi mjerenje nije uvijek identično te i najmanja odstupanja u uvjetima mogu prouzročiti vidljive greške prilikom mjerenja. [4]

Navedeni su najčešći uzroci što bi značilo da ukoliko je poznat uzrok, da bi se trebale moći smanjiti greške utjecajem na uzroke. Najveći problem prilikom mjerenja predstavljaju greške kojima ne možemo utvrditi uzrok, a to sa sobom povlači činjenicu da su takve greške nepredvidive i da ih ne možemo jednostavno otkloniti.

S obzirom na karakter, greške u mjerenju se mogu podijeliti na:

- Sustavne – nastaju zbog neispravnih mjernih instrumenata, pogrešnog izbora metoda ili nepravilnog izvođenja mjerenja. Karakteristika im je da ostaju konstantne ili prate trend prilikom ponovljenih mjerenja. Posljedica im je netočnost rezultata.
- Slučajne – nepredvidive te im je uzrok nastajanja nepoznat. Pri ponovljenim mjerenjima se mijenjaju nepredvidivo te shodno tome, posljedica im je nepreciznost rezultata.
- Grube – mogu nastati iz mnoštva razloga, neki od njih su nepravilno korištenje mjernih uređaja ili opreme, pogreška prilikom očitavanja i slično. Rezultat mjerenja s grubom greškom znatno odskaače te ga je potrebno izbaciti prilikom analize mjernih rezultata. [4]

### 3. LINEARNE VODILICE

Linearne vodilice su strojni elementi koji omogućavaju pravocrtno gibanje (translaciju) elementima koji su na njih montirani. Glavni cilj vodilice je prenijeti neki teret pravocrtno u ravnini pritom smanjujući trenje između kontaktnih površina vodilice.

S obzirom na izvedbu, postoji više načina realizacije vodilica:

- Klizne vodilice
- Vodilice s kotrljajućim ležajevima
- Hidrostatske vodilice
- Magnetske vodilice

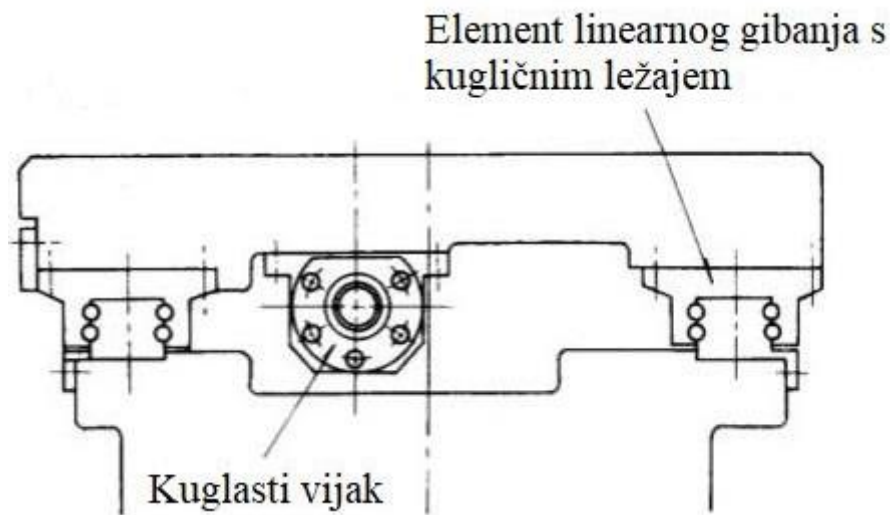
U ovom radu, fokus je postavljen na vodilice s kotrljajućim ležajevima s obzirom da je na njoj provedeno umjeravanje, ali i takav tip vodilica je najčešće u primjeni.

#### 3.1. Linearne vodilice s kotrljajućim ležajevima

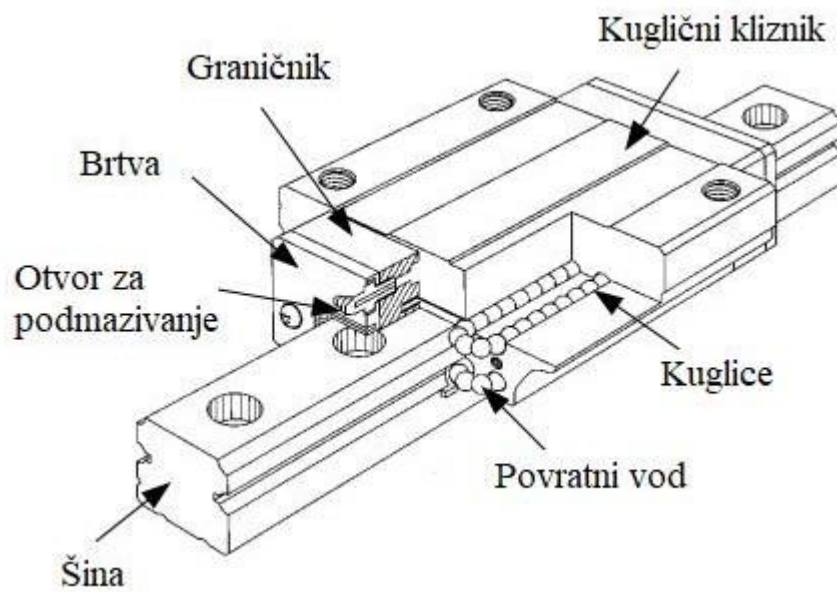
Ovaj tip vodilice svladava trenje pomoću kotrljajućih elemenata ( kuglica, valjčića i sl.) koji su umetnuti između elemenata koji se gibaju. S obzirom da je kotrljajuće trenje u pravilu manje od kliznog, ovakav tip vodilice je najčešće u primjeni. Spomenuti tip vodilice također ima manju zračnost između elemenata i samim time točnost mu je bolja u odnosu na klizne vodilice. Iako hidrostatske vodilice mogu imati bolji točnost od kotrljajućih, dostupnost i cijena kotrljajućih osigurava njihovu najčešću primjenu.

Dvije su glavne podjele vodilica s kotrljajućim ležajevima i one se odnose na kotrljajuće elemente: kuglice i valjčići. Također neke od podjela su na mogućnost recirkulacije, odnosno neograničenog gibanja u oba smjera translacije te na vrstu utora u kojem se vodilice nalaze. Najčešća vrsta linearne vodilice s kotrljajućim ležajevima se odnosi na vrstu s kugličnim ležajevima i kvadratnim utorima.

Na sljedećoj stranici su prikazani shematski prikazi linearnih vodilica sa kugličnim ležajevima u presjeku i u izometriji.



Slika 4. Linearna vodilica s kugličnim ležajem [5]

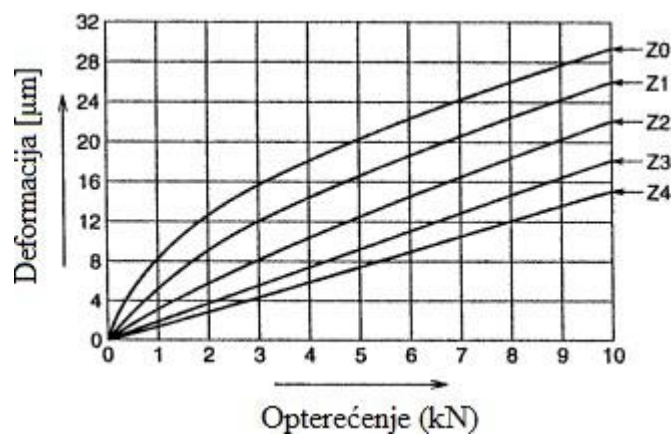


Slika 5. Linearna vodilica s kugličnim ležajem u izometriji [6]

### 3.2. Predopterećenje linearnih vodilica

Da bi se povećala krutost vodilica, prije korištenja nužno je predopteretiti vodilicu. Na taj način kuglični ležajevi zajedno sa utorima se elastično deformiraju te smanjuju zračnosti između elemenata. Sa manjom zračnosti, točnost vodilice se povećava te se utjecaj elastične deformacije koje će opterećenje prilikom korištenja ostvariti se smanjuje.

Predopterećenje se može podijeliti u 5 kategorija u kojima Z0 predstavlja izostanak predopterećenja pa do Z4 koje predstavlja maksimalno predopterećenje. Na sljedećoj tablici je prikazana elastične deformacija kugličnog kliznika na konkretnom primjeru za svih 5 kategorija predopterećenja za slučaj stvarnog opterećenja u primjeni.



Slika 6. Graf ovisnosti opterećenja i deformacije [7]

Za slučajeve predopterećenja Z4 i Z3 vidi se da je deformacija raste linearno u odnosu na opterećenje što je poželjno prilikom korištenja.



### 3.3. Točnosti linearnih vodilica

Točnost linearnih vodilica se odnosi na točnost gibanja linearnih vodilica u upotrebi. Ona se može podijeliti u pet kategorija:

- PN – normalna preciznost
- P6 – precizna
- P5 – visoke preciznosti
- P4 – super precizna
- P3 – ultra precizna

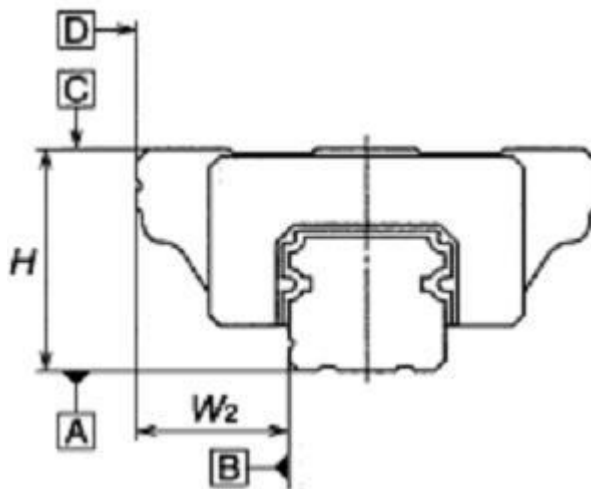
#### 3.3.1. Značajke koje opisuju točnost

Dimenzije preko kojih se može definirati točnost vodilice mogu varirati s obzirom na njenu izvedbu, no u sljedećoj tablici su date općenite značajke koje se koriste prilikom definiranja točnosti linearne vodilice s kotrljajućim ležajevima:

**Tablica 1. Prikaz značajki koje opisuju točnost vodilice**

Visina montiranja, H	Udaljenost od A do C
Varijacija visine H	Varijacija visine montiranja kliznika u odnosu na šine
Širina montiranja, W2 ili W3	Udaljenost od B do D
Varijanta definiranja širine montiranja (W2, W3)	Način definiranja ravnine B u odnosu na ravninu D
Usporednost vodilice od ravnine C do ravnine A	Varijacija ravnine C u odnosu na ravninu A prilikom gibanja vodilice
Usporednost vodilice od ravnine D do ravnine B	Varijacija ravnine D u odnosu na ravninu B prilikom gibanja vodilice

Na sljedećoj skici je prikazana varijanta montiranja W2 zajedno sa svim značajkama navedenim u tablici:

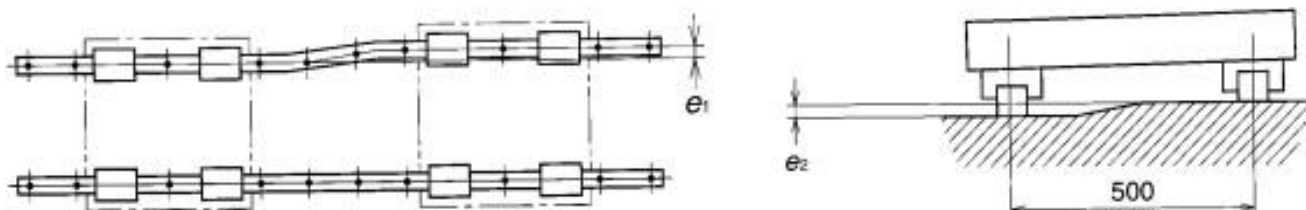


Slika 7. Varijanta montiranja W2

Za točnosti vodilice prilikom mjerenja koja zahtijevaju iznimno visoku preciznost, usporednost vodilice je značajka koja može utjecati na mjerne rezultate na način da ju je teško kalibrirati ili otpisati prilikom mjerenja

### 3.3.2. Montiranje linearne vodilice

Prilikom montiranja linearne vodilice, nužno je voditi računa od podlozi na koju se montira. Ukoliko je površina neravna ili je vodilica nepravilno instalirana, prilikom dinamičkog opterećenja, umor materijala se može pojaviti prije od očekivanog te sama vodilica može izgubiti na preciznosti. Slovicima  $e_1$  i  $e_2$  su označena odstupanja koja se mogu javiti prilikom nepravilnog montiranja:



Slika 8. Primjeri nepravilnog montiranja vodilice

### **3.4. Materijali vodilica s kotrljajućim ležajevima**

Linearne vodilice se sastoje od više komponenti od kojih svaka komponenta može biti različitog materijala, no onaj materijal koji utječe na kvalitetu vodilice je onaj od kojeg su izrađeni ležajevi. Maksimalna opteretivost i točnost vodilice ovisi od duljini pri kojoj se koristi odnosno s povećanjem duljine, opteretivost i točnost se smanjuju. Najčešći materijali koji se koriste za izradu vodilica su nehrđajući čelici no kod vodilica sa posebnim zahtjevima duljine, koriste se i visokouglični čelici. Da bi vodilice dosegle puni kapacitet, tvrdoća im mora biti u rasponu od 58 do 62 HRC (tvrdoća po Rockwellu)

Kako su vodilice pokretni elementi, te prilikom uporabe savladavaju trenje tako se i na njima pojavljuje dinamično opterećenje. Uslijed trenja prilikom dinamičkog opterećenja, pojavljuje se niz mehanizama koje uzrokuju trošenje materijala u vodilicama poput: abrazije, adhezije, umora površine te u nekim uvjetima i tribokorozije. [8]

## 4. PRAVOCRTNOST LINEARNIH VODILICA

Prilikom opterećenja vodilice sa kotrljajućim ležajevima, deformacija se pojavljuje najčešće u tri moguća elementa vodilice: šinama vodilice, kotrljajućim elementima ili kliznom bloku vodilice. Uz nepravilnosti nastale prilikom trošenja, deformacija je također uzrok dimenzijskih odstupanja prilikom korištenja vodilice.

### 4.1. Tolerancije oblika i položaja

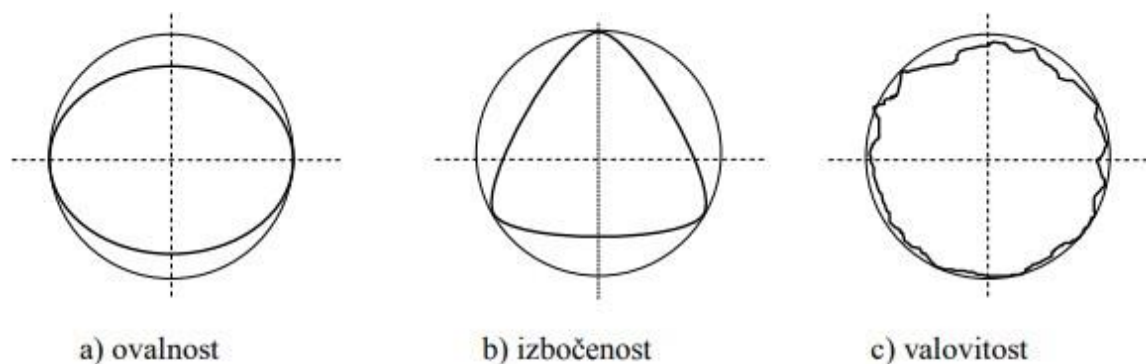
S obzirom da nijedno mjerenje ne daje apsolutnu točnost, tako i prilikom procesa izrade pojedinih elemenata strojeva pojavljuje se potreba za sustavom tolerancije, odnosno koliko je dopušteno odstupanje oblika i dimenzija elemenata od tražene vrijednosti. Na slici niže se može vidjeti njihova podjela u tri skupine te simbol u tehničkom crtežu:

Tablica 2. Tolerancije oblika i položaja [4]

TOLERANCIJE OBLIKA		TOLERANCIJE POLOŽAJA		SLOŽENE TOLERANCIJE	
Karakteristika koja se tolerira	Simbol	Karakteristika koja se tolerira	Simbol	Karakteristika koja se tolerira	Simbol
1.1 pravocrtnost		2.1 paralelnost		3.1 netočnost okretanja	
1.2 ravnoća		2.2 okomitost		3.2 radijalna netočnost okretanja	
1.3 kružnost		2.3 kut nagiba		3.3 aksijalna netočnost okretanja	
1.4 cilindričnost		2.4 lokacija			
1.5 oblik linije		2.5 koncentričnost			
1.6 oblik površine		2.6 simetričnost			

## 4.2. Odstupanje kotrljajućih elemenata

S obzirom da su kotrljajući elementi kugličnog ili valjkastog oblika, njihov glavni zahtjev je kružnost. 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. Karakteristične greške kružnosti su date niže:



Slika 9. Karakteristične greške kružnosti [4]

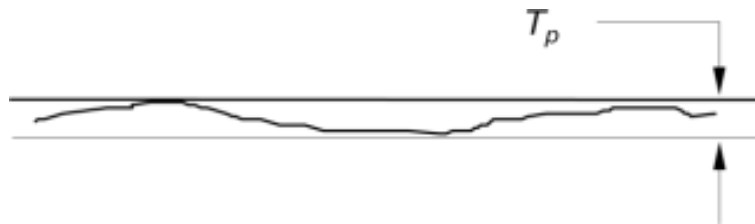
Metode ispitivanja kružnosti s unutrašnjom mjernom referencom koje se mogu koristiti u ovom slučaju su:

- dijametralno ispitivanje kružnosti
- ispitivanje kružnosti primjenom mjernih šiljaka
- ispitivanje kružnosti primjenom V-prizmi [4]

S obzirom da su kotrljajući elementi najčešće manjih dimenzija te se koriste u velikom broju, njihove individualne nepravilnosti nemaju puno utjecaja na moguća odstupanja kompletnih vodilica. Greška se pojavljuje ukoliko je cijeli set izrađenih ležajnih elemenata izrađen sa odstupanjem od kružnosti.

### 4.3. Odstupanje od pravocrtnosti i usporednosti

Za šine vodilice je također važno da zadovoljavaju uvjete pravocrtnosti i međusobne usporednosti. Pravocrtnost je stanje kod kojeg su sve točke na jednom pravcu. Dopušteno odstupanje od pravocrtnosti određeno je udaljenošću između dva paralelna pravca koji obuhvaćaju realnu tvorevinu.

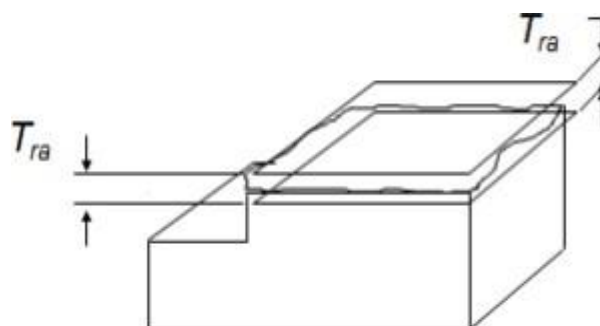


Slika 10. Prikaz odstupanja od pravocrtnosti [4]

Mjerenje pravocrtnosti slična je mjerenju ravnosti te metode koje se mogu koristiti njeno mjerenje su:

- lineal s komparatorom
- 3D dužinski mjerni uređaji
- autokolimator
- laserski mjerni sustav
- koincidentna libela [4]

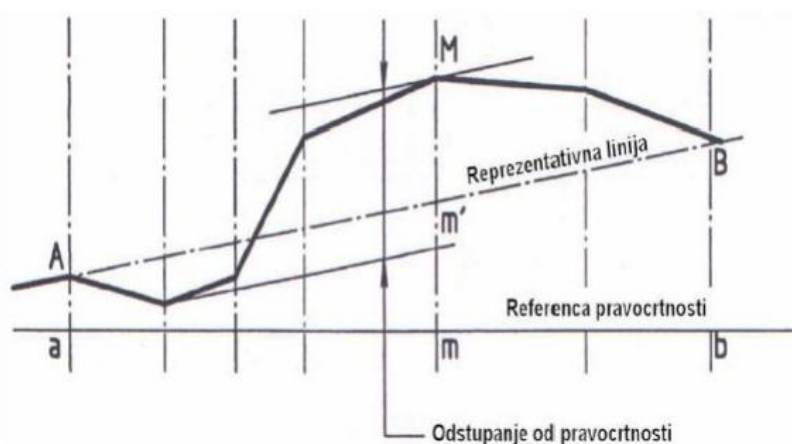
Mjerenje usporednosti je slično mjerenju ravnosti samo što kod usporednosti postoji referentna ravnina.



Slika 11. Prikaz odstupanja od pravocrtnosti [4]

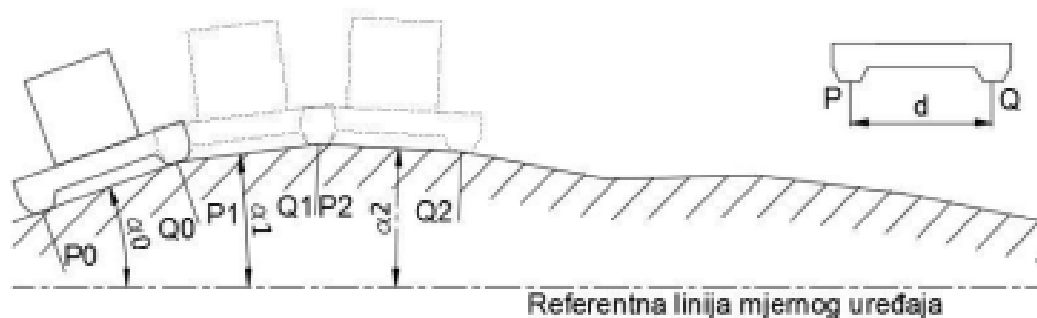
#### 4.4. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti

Dvije su različite metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti: mjerenje duljine i mjerenje kutova. Mjerenje odstupanja pravocrtnosti koje je bazirano na mjerenju duljine se izvodi tako da se uređaj postavi u nastavku linije prema kojem je mjerni uređaj postavljen. Shodno tome uređaj prikazuje odstupanja linije koja se provjerava u odnosu na referentnu liniju samog uređaja. Na taj način se može provjeriti odstupanje u bilo kojoj točki linije.



Slika 12. Mjerenje pravocrtnosti pomoću mjerenja duljine [9]

Druga metoda odstupanja od pravocrtnosti se bazira na mjerenju kutnih odstupanja te je gibajući element u dodiru s linijom koja se provjerava na pravocrtnost u dvije točke P i Q koje su udaljene za  $d$ . Element koji se giba se pomiče na način tako da se svaka buduća pozicija P preklapa sa prethodnom pozicijom Q.



Slika 13. Mjerenje pravocrtnosti pomoću mjerenja kutova [9]

#### **4.5. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti**

Sa pojavom sve kompleksnijih zahtjeva tržišta prilikom mjerenja odstupanja oblika, pozicija te njihovih kombinacija pojavila se potreba za implementacijom novih tehnologija u mjeriteljstvu. Neka odstupanja pozicija oblika i pozicija su već sami po sebi zahtjevna za mjerenje konvencionalnim metodama, a kad se na to sve nadodaju zahtjevi u kojem se rezultat očekuje u mikrometrima i nanometrima jedino rješenje preostaje u novijim tehnologijama.

#### **4.7. Interferometar**

Interferometar je mjerni uređaj koji koristi interferenciju svjetlosnih (moguće i radio ili zvučnih) valova kako bi dao veoma precizna mjerenja. Mjerenje pomoću interferometra je neizostavna metoda u svim područjima znanosti te je već više od stoljeća zaslužna za brojne napretke u znanosti.

Osnovna je uloga interferometra, kao tehničkog sustava, omogućiti postizanje uvjeta nužnih da bi do interferencije uopće došlo. Primarni uvjeti prethodno spomenuti su:

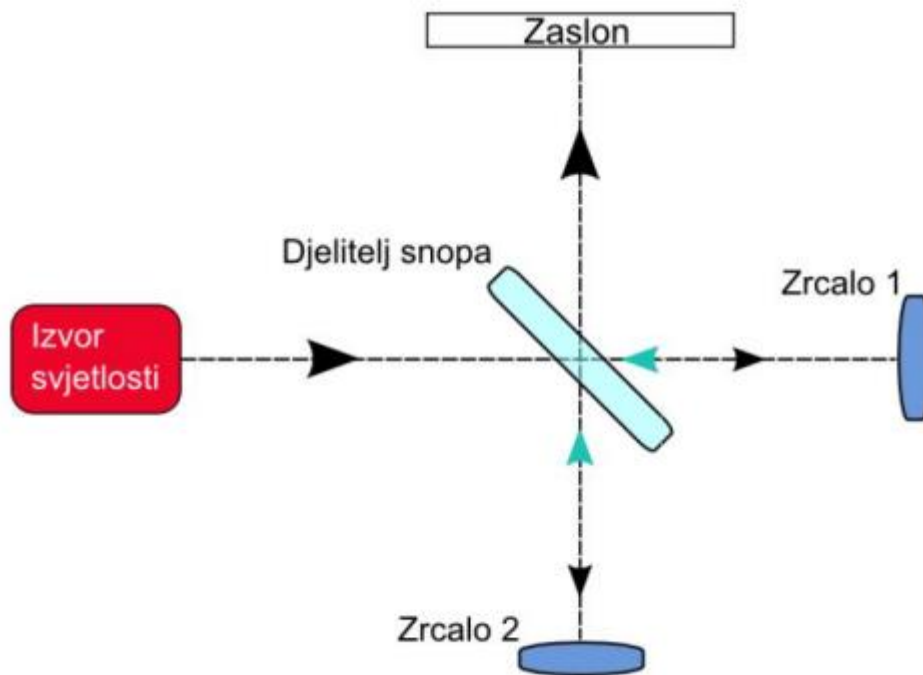
- Ulazni valovi moraju imati jednaku frekvenciju,
- Ulazni valovi moraju biti koherentni,
- Ulazni valovi moraju biti paralelno polarizirani. [10]

##### **4.7.1. Michelsonov interferometar**

Poljsko – američki fizičar Albert Abraham Michelson je 1892. godine, Međunarodnom uredu za utege i mjere predstavio prototip interferometra. To je bio jednostavan mjerni uređaj koji se sastojao od izvora svjetlosti, djelitelja snopa, dva zrcala i zaslona za detekciju. [11]

Na sljedećoj stranici prikazan je shematski prikaz prototipa interferometra sa naznačenim dijelovima

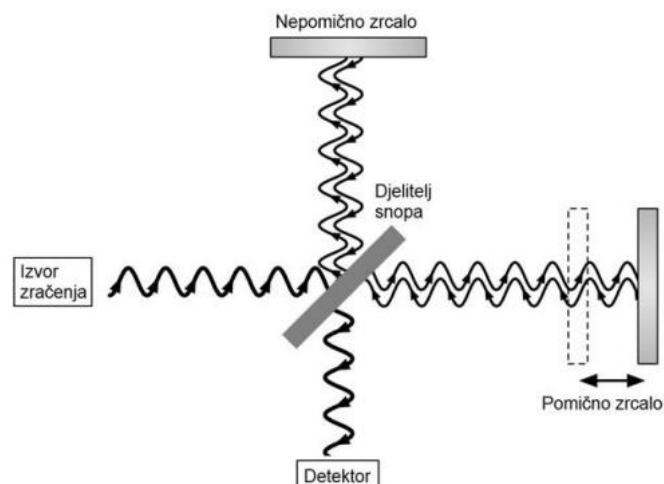




Slika 14. Pojednostavljeni prikaz Michelsonovog interferometra [12]

#### 4.7.2. Dinamički interferometri

Dinamički interferometri mjere pomak, odnosno promjenu duljine, korištenjem činjenice da srednji intenzitet interferencije kontinuirano varira s promjenom optičkog (u ovom slučaju i mehaničkog) puta. Tipična realizacija ovakvih interferometara bazira se na podjeli amplitude zračenja na dva kraka, referentni i ispitni, korištenjem zrcala i djelitelja snopa (eng. beamsplitter)



Slika 15. Model dinamičkog interferometra [10]

### **4.7.3. Statički interferometri**

Za razliku od dinamičkih, statički interferometri pružaju informaciju od faznoj razlici za fiksni optički put. Prije je spomenuta podjela na interferometre s podjelom valne fronte i interferometre s podjelom amplitude. Iako su interferometri s podjelom valne fronte bili od iznimne važnosti za shvaćanje principa interferencije i same prirode svjetla, njihova je tehnička primjena ograničena. [10]

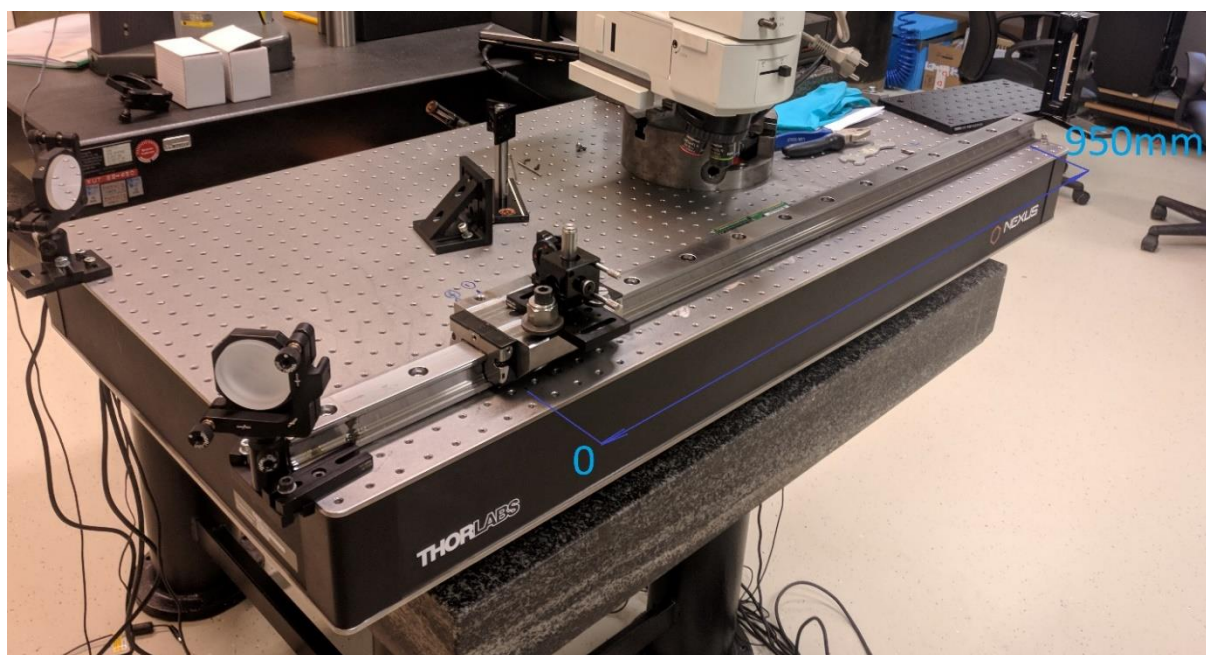
Prethodno navedeni Michelsonov interferometar je zapravo osnovni model, prototip statičkog interferometra.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Nakon teoretskog dijela u kojem je pojašnjena teorija, odnosno samo mjeriteljstvo, pravocrtnost, linearne vodilice i mjerni sustav s interferometrom, u eksperimentalnom dijelu će biti pojašnjen proces smanjenja odstupanja od pravocrtnosti precizne linearne vodilice pomoću vijaka i ostalih alata i uređaja.

Najprije će se predstaviti mjerni sustav, odnosno njegove komponente koje su korištene pri mjerenju odstupanja od pravocrtnosti. Nakon toga će biti predstavljeni rezultati inicijalnih mjerenja kojim će se utvrditi odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice i njenog postolja.

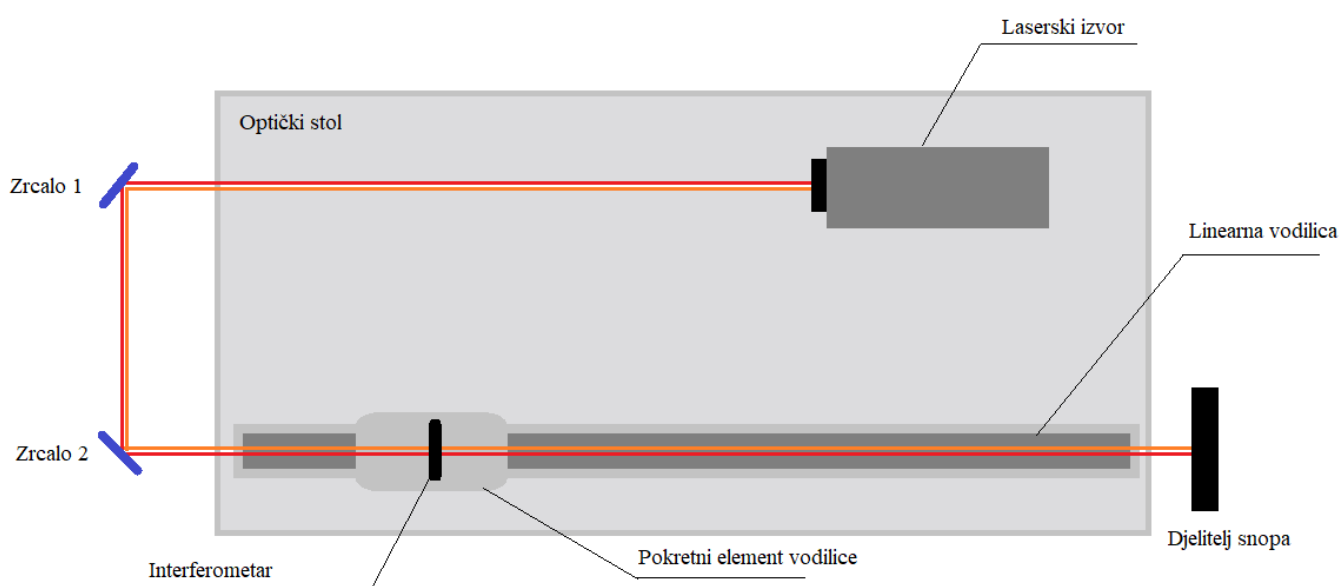
Nakon inicijalnih mjerenja, utvrdit će se utjecaj vijaka za pritezanje na y i z os te proces smanjenja odstupanja obe osi. Naposljetku će biti prikazani konačni rezultati smanjenja odstupanja precizne linearne vodilice.



**Slika 16. Montirana linearne vodilica proizvođača Bosch – Rexroth sa svim pripadajućim elementima**

### 5.1. Komponente mjernog sustava za umjeravanje preciznih mjernih skala

Mjerni sustav se sastoji od mnoštva uređaja različite svrhe. Osnovna komponenta uređaj koji stvara laserski snop te je spojen na kompenzator okolišnih uvjeta i računalo. Laserski snop se projicira na dva zrcala pod kutom pomoću kojih se zraka svjetlosti dovodi na liniju linearne vodilice. Na vodilici je montiran interferometar kroz koji laser prolazi te ide u razdjelnik zrake. Iz razdjelnika se vraća u interferometar montiran na vodilici te se istim putem vraća u osnovni laserski uređaj.

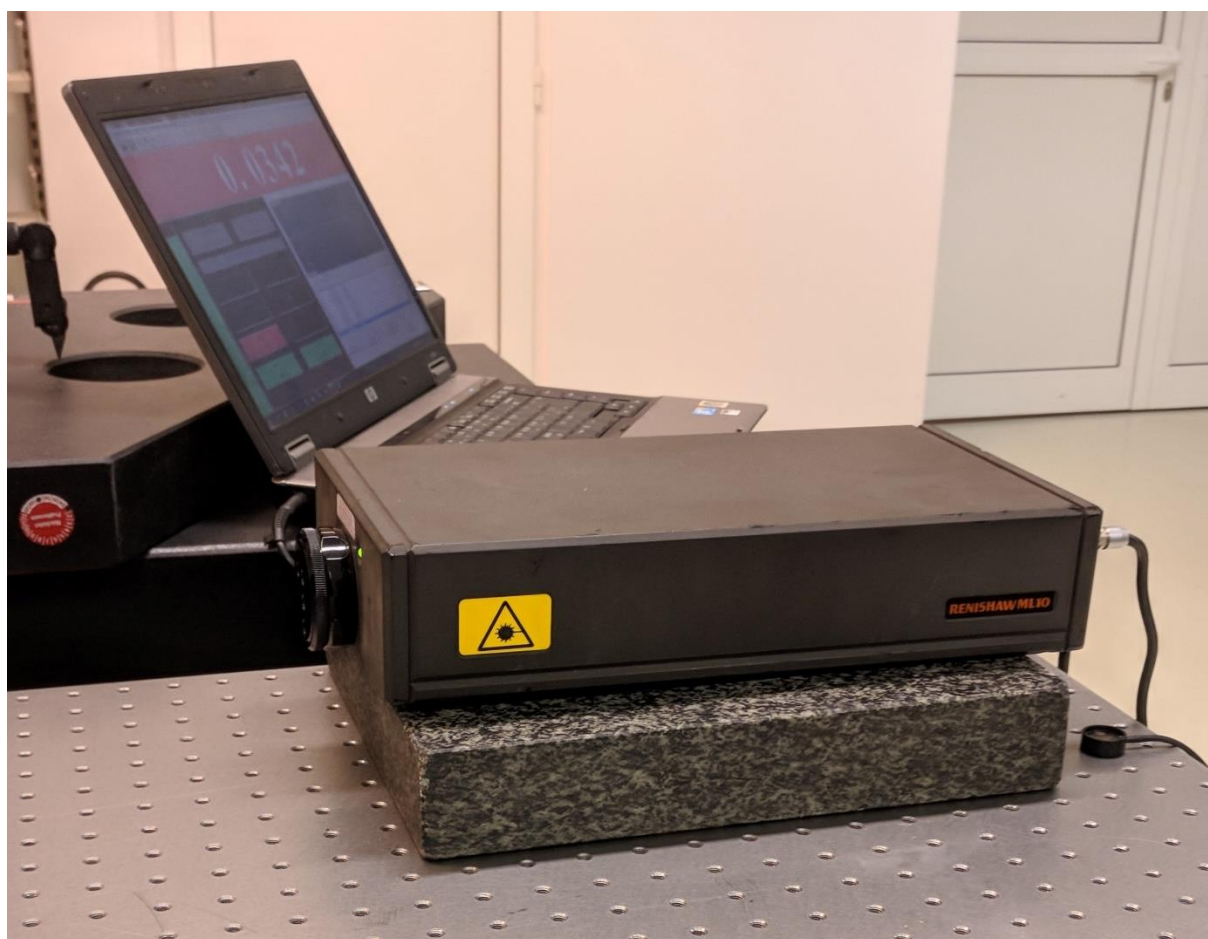


Slika 17. Pojednostavljeni shematski prikaz mjernog sustava

### 5.1.1. Renishaw ML10

Osnovna komponenta laserskog sustava koji je korišten je Renishaw ML10. Kako je i spomenuto, interferometri su uređaji vrlo visoke preciznosti koji se koriste za mjerenje duljine te je pomoću njega moguće mjeriti odstupanja vezana uz duljinu i poziciju kao što su pravocrtnost, ravnost, kut nagiba, pravokutnost i slično.

Uređaj je spojen na prijenosno računalo preko USB razdjelnika te se na računalu očitavaju rezultati mjerenja. Također je spojen sa kompenzatorom okoline Renishaw EC10.



Slika 18. Renishaw ML10



**Slika 19. Renishaw ML10 spojen na prijenosno računalo i kompenzator okolišnih uvjeta**

U tablici niže, dani su tehnički podaci, uređaja za izvor svjetlosti:

**Tablica 3. Tehnički podaci uređaja Renishaw ML10 [13]**

Izvor laserske zrake	Helij-neonska HeNe laserska cijev Klasa II IEC 60825-1 (2002)
Snaga lasera	<1 mW
Vakuumska valna duljina	632,990577 nm
Dugoročna frekventna preciznost	$\pm 0,055 \frac{mg}{m^3}$
Napajanje	100-240 VAC 50/60 Hz
Temperaturno područje djelovanja	0-40 °C
Dimenzije	335 x 176 x 75 mm

### 5.1.2. Renishaw EC10

S obzirom na visoku preciznost laserskog interferometra, potreban mu je dodatni uređaj pomoću kojeg kompenzira razliku okolišnih parametrima u kojima se nalazi sa onima pri kojima je laser umjeren pri izradi. To su parametri koje je teško kontrolirati poput temperature, vlažnosti zraka i tlaka zraka.



Slika 20. Mjerni senzor kompenzacijskog uređaja [13]

Tablica 4. Tehnički podaci kompenzacijskog uređaja [13]

Raspon temperature zraka	0-40 °C
Točnost temperature zraka	± 0,2 °C
Raspon pritiska tlaka	7500-115000 Pa
Točnost pritiska tlaka	± 100 Pa
Raspon relativne vlažnosti	0-95 % (bez kondenzacije)
Točnost relativne vlažnosti	± 15% relativne vlažnosti
Raspon temperature materijala	0-40 °C
Točnost temperature materijala	± 0,1 °C
Napajanje	100-240 VAC, 200-240 nominalno
Težina	4 kg
Dimenzije	335 x 176 x 75 mm

### 5.1.3. Mehaničke komponente sustava

Većina mehaničkih komponenta je proizvođača Thorlabs zbog jednostavne međusobne kompatibilnosti, počevši od samog optičkog stola pa do raznih postolja i elemenata za pozicioniranje. S obzirom da je zahtjevan zadatak dovesti sve elemente u ravninu, korišteno je mnoštvo elemenata te će bit navedeni samo najvažniji. Odgovarajuća ravnina izvora laserskog snopa je dobivena postavljanjem izvora na mramornu ploču dobre krutosti. Sam optički stol je postavljen na zračnim nosačima s kojima bi se smanjile eventualne vibracije.

#### 5.1.3.1. Elementi za pozicioniranje

S obzirom da je uvjet da bi se mjerenje izvelo uspješno, tj. da je povratni signal laserskog snopa dovoljno jak, potrebno je dovesti u ravninu više elemenata različiti dimenzija i oblika. Za to se koriste razni elementi koji su na raspolaganju u FSB-LPMD. Na slikama niže su prikazani korišteni elementi za visinu Thorlabs BA, PH i UPH noseći elementi i TR cilindri.



Slika 21. Thorlabs elementi za pozicioniranje [11]

Korištena su i postolja raznih dimenzija na koja se montiraju razni optički uređaji, također tvrtke Thorlabs.



Slika 22. Thorlabs postolja za pozicioniranje (MB1015/M, BA1/M) [14] [15]





**Slika 23.** Thorlabs postolja za pozicioniranje (BA4/M, MB12) [16] [17]

Za zrcala je korišten podesivi nosač zrcala KM200 tvrtke Thorlabs koji je montiran na prethodno prikazane mehaničke komponente.

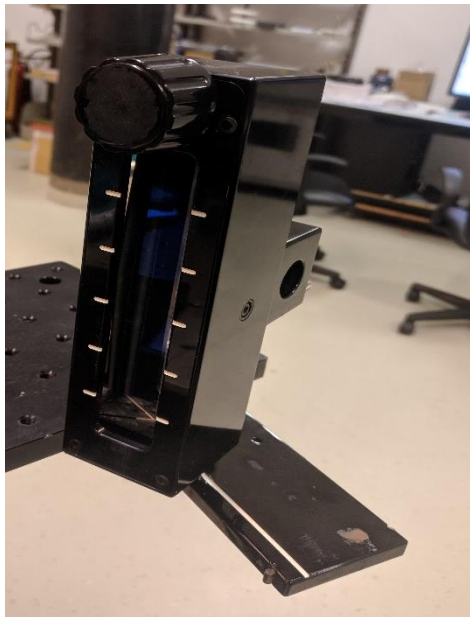


**Slika 24.** Thorlabs Podesivi nosač zrcala KM200 [18]

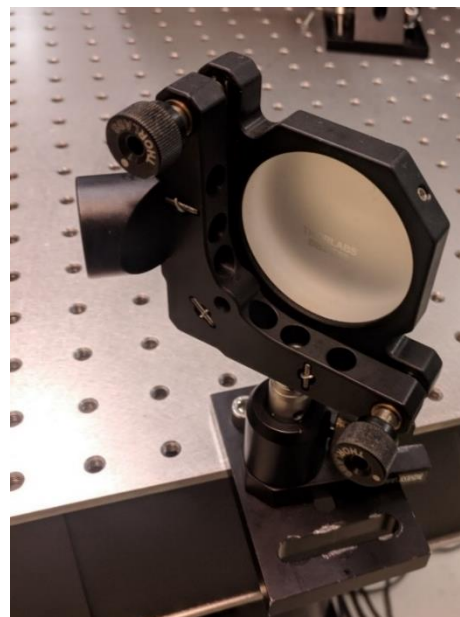
#### 5.1.3.2. Optičke komponente

Od optičkih komponenti u sustavu se nalaze dva identična zrcala, interferometar koji je montiran na klizač vodilice te reflektor. Interferometar i reflektor su proizvođača Renishaw dok su zrcala Thorlabs. Model zrcala je BB2-E02 promjera 7,62 cm.

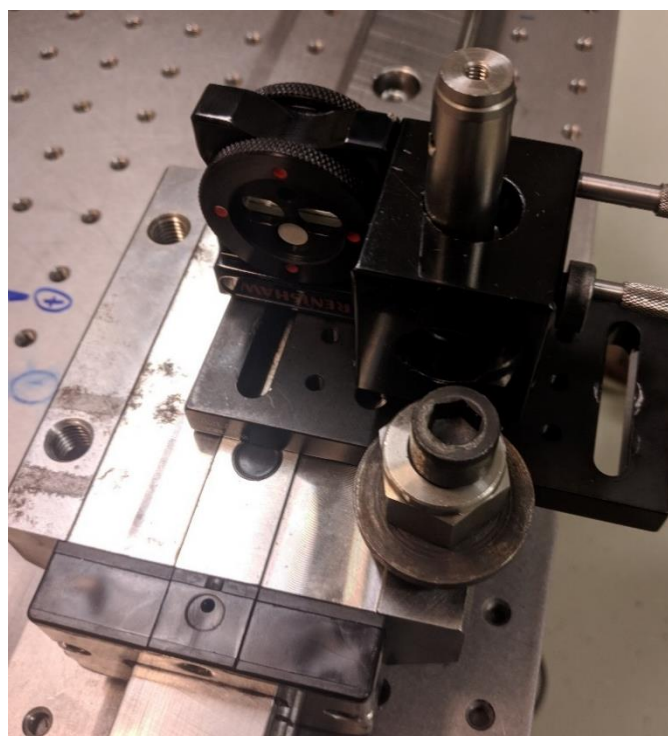
Na sljedećoj stranici su prikazani spoemenuti optički elementi:



Slika 26. Reflektor proizvođača Renishaw



Slika 25. Zrcalo BB2-E02 montirano na nosač

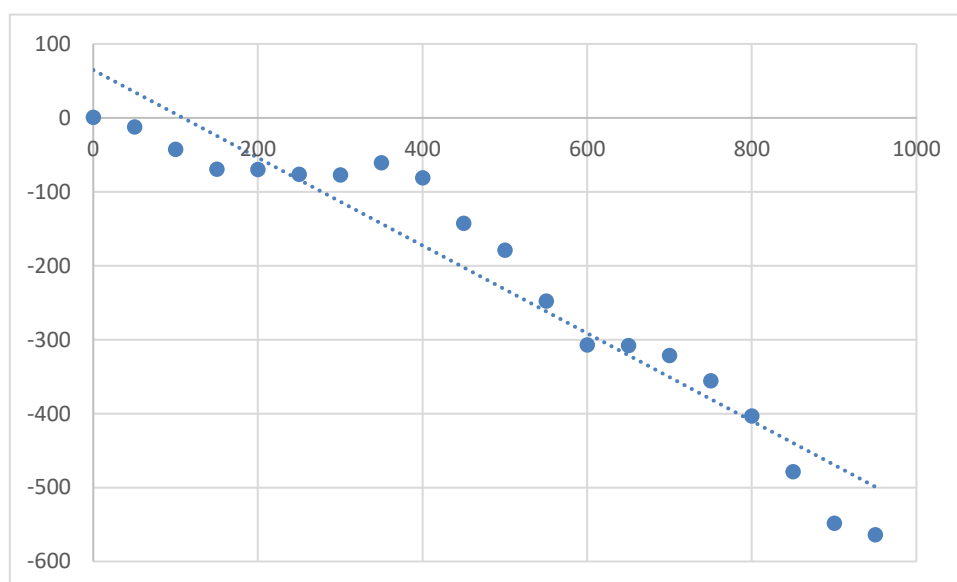


Slika 27. Interferometar montiran na klizač vodilice

## 5.2. Analitička obrada dobivenih rezultata

Podaci koji će biti dobiveni pomoću prethodno opisanog mjernog sustava sami po sebi ne daju direktan uvid u odstupanje od pravocrtnosti mjerenog elementa. U slučaju rezultata mjerenja pravocrtnosti (a i u mnogim drugim mjerenjima) koristi se metoda najmanjih kvadrata za obradu te dobivanje uporabljive vrijednosti.

Dijagram na slici je poznat kao „dijagram rasipanja“ te mu je moguće ucrtati pravac regresije koji najbolje opisuje odnos promatranih točaka. On se određuje uz pomoć jednadžbe pravca te koordinata točaka u ravnini.



Slika 28. Prikaz dijagrama rasipanja i pravca regresije

Funkcija i vrijednosti parametara funkcije određuju se tako da je zbroj kvadrata razlika između izmjerenih i izračunanih vrijednosti minimalan, odnosno, određuje se funkcija kojoj krivulja prilazi što bliže danim točkama. Dobivena funkcionalna ovisnost omogućava predviđanje vrijednosti mjerene veličine u područjima koja nisu obuhvaćena mjerenjem.

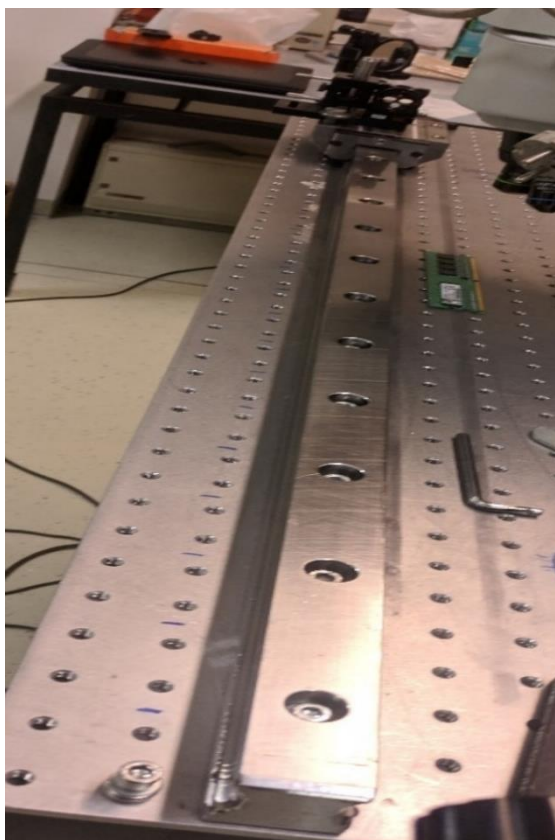
## 5.3. Mjerenja

### 5.3.1. Opis linearne vodilice

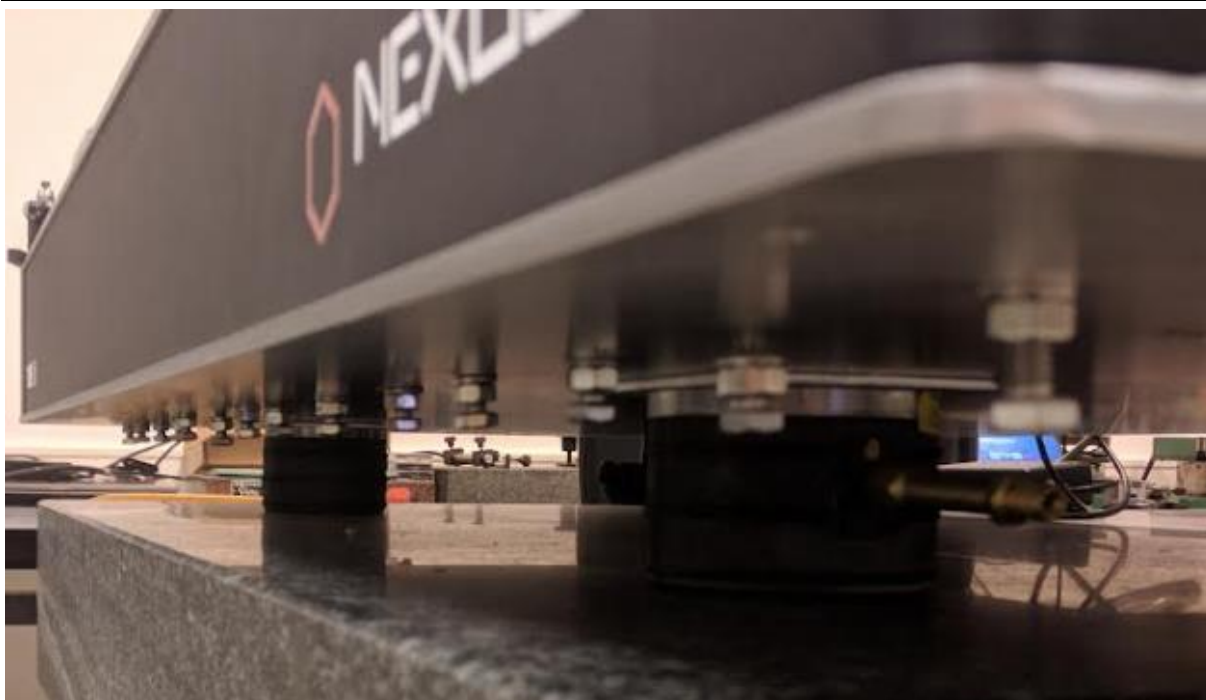
Mjereni dio linearne vodilice proizvođača Bosch – Rexroth je duljine 950 mm koji su podijeljeni u 20 segmenata (0-950 mm). Postavljena je na optičkom stolu marke Thorlabs čija vertikalna ravnost nije garantirana te će biti izmjerene u prvom mjerenju.

Na vodilici se nalazi klizač na koji je montiran interferometar pomoću kojeg će se mjeriti pravocrtost. U slučaju mjerenja vertikalne pravocrtosti stola, interferometar će biti montiran uz vodilicu te će biti vođen po stolu.

Vodilica je sa gornje strane pričvršćena sa 15 vijaka te sa donje strane sa istim brojem vijaka. Uloga gornjih vijaka je da drže vodilicu na imaju znatan utjecaj i na horizontalnost i vertikalnost vodilice dok donji vijci utječu isključivo na vertikalnost vodilice.



**Slika 29. Linearna vodilica Bosch – Rextroth**



**Slika 30. Set vijaka za pritezanje sa donje strane optičkog stola i vodilice**

### **5.3.2. Plan mjerenja**

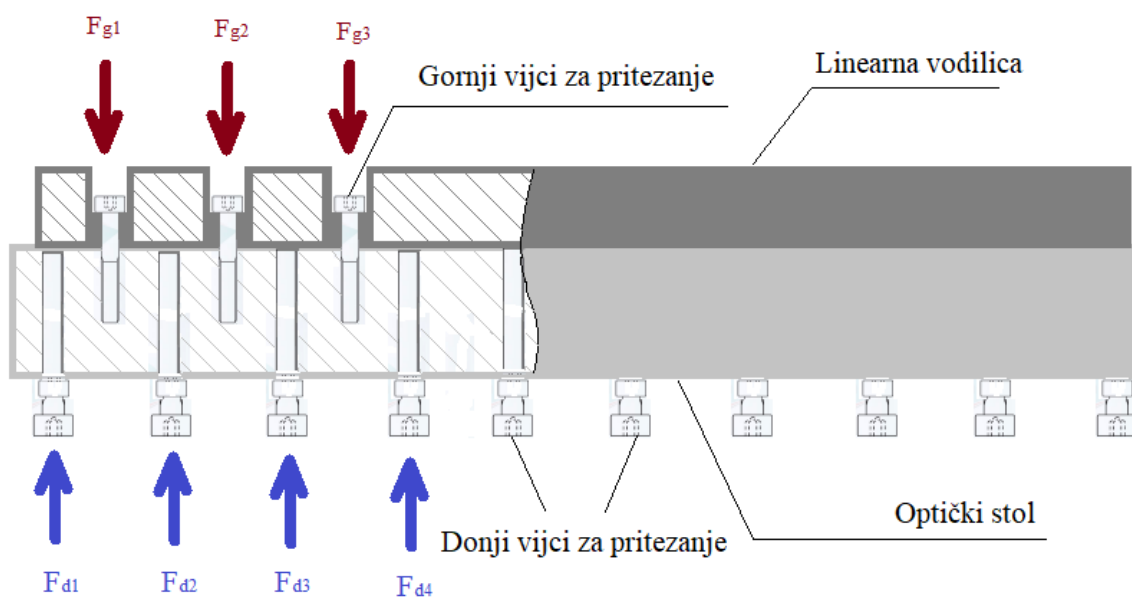
Nakon što je mjerni sustav postavljen, potrebno je pristupiti mjerenju. Ono je provođeno u dva prolaza da bi se izbjegle grube i slučajne greške. Pretpostavljeno je da optički stol na koji je vodilica postavljena nije idealne pravocrtnosti po vertikalnoj osi te da utjecaj neravnina može utjecati na pravocrtnost vodilice po vertikalnoj osi.

Nakon određene pravocrtnosti optičkog stola, odlučeno je da će inicijalno stanje vertikalne osi vodilice biti kada su svi vijci otpušteni, kako s gornje tako i s donje strane. Nakon inicijalnog mjerenja vertikalne osi, vijci se pritežu sa gornje strane te se nakon toga provode mjerenja da bi se utvrdio njihov utjecaj. Nakon što se pritegnu gornji vijci, potrebno je pomoću donjih vijaka regulirati vertikalnu pravocrtnost vodilice.

Najveći problem kod smanjivanja odstupanja je što gornji vijci utječu na obe osi pravocrtnosti, te je potrebno dobiti najbolji omjer vertikalne i horizontalne osi jer ukoliko se jedna os dovede do idealne situacije, druga os će izgubiti pravocrtnost.

Nakon procjene je utvrđeno da je vertikalna os ipak zahtjevnija i njezina pravocrtnost je korisnija u daljnjoj upotrebi, pa je naglasak stavljen na nju no nije zanemarena ni horizontalna os.

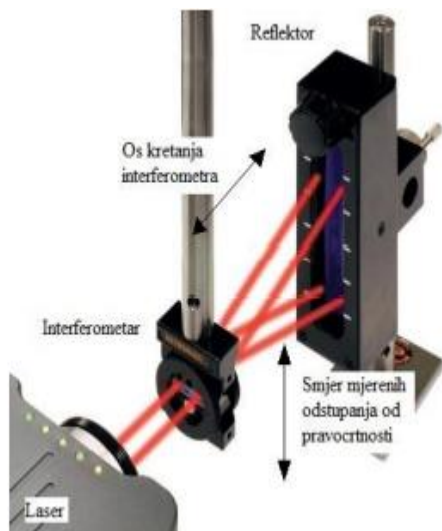
Poboljšavanje odstupanja od pravocrtosti vodilica je regulirano sa setom gornjih i donjih vijaka sa početnom idejom da se izmjeri pravocrtost, pronađu kritične točke, te se na njih utječe pomoću gornjih ili donjih vijaka ovisno o njihovoj poziciji u odnosu na pravocrtost. Kasnije je zaključeno da je s tom metodom moguće doći do određene razine pravocrtosti koja nije prihvatljiva te je predložena metoda u kojoj se izravnavaju prva i posljednja točka te se u realnom vremenu sa sitnim podešavanjima utječe na vodilicu te se na taj način ona izravnavava. Rezultati oba pristupa su prikazani u daljnjim poglavljima.



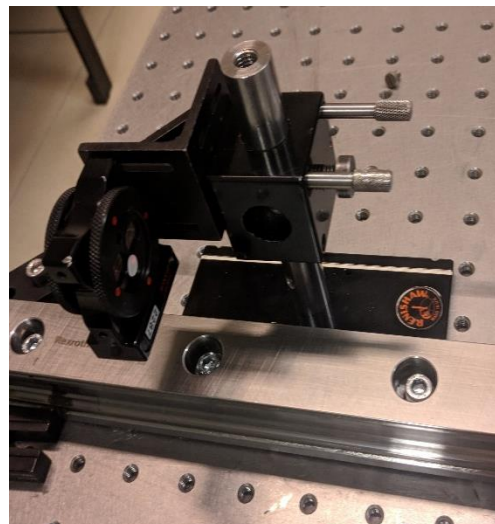
Slika 31. Pojednostavljeni shematski prikaz gornjih i donjih vijaka te njihovih utjecaja

#### 5.4. Mjerenje odstupanja optičkog stola

Mjerni sustav je postavljen za mjerenje vertikalne osi te je interferometar montiran na pločicu koja se vuče kraj vodilice kako je prikazano na slikama niže,



Slika 33. Reflektor postavljen za vertikalno mjerenje [19]



Slika 32. Interferometar postavljen na pločicu pomoću kojeg se mjeri odstupanje stola

Dobiveni su sljedeći rezultati mjerenja:

Tablica 5. Rezultati vertikalnih mjerenja optičkog stola

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	1,00
50	-12,30
100	-42,30
150	-69,20
200	-69,90
250	-76,10
300	-77,10
350	-60,70

400	-81,20
450	-142,50
500	-179,00
550	-247,50
600	-307,00
650	-307,90
700	-321,40
750	-355,60
800	-403,00
850	-478,70
900	-548,00
950	-563,80

S obzirom da je aparatura za mjerenje stola bila slabije fiksirana te sam stol ima možebitne sitnije neravnine, rezultati ne prate trend već imaju sitnija odstupanja po mjerenoj dužini.

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = -0,5933x + 64,721$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtosti optičkog stola:

**Tablica 6. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje optičkog stola**

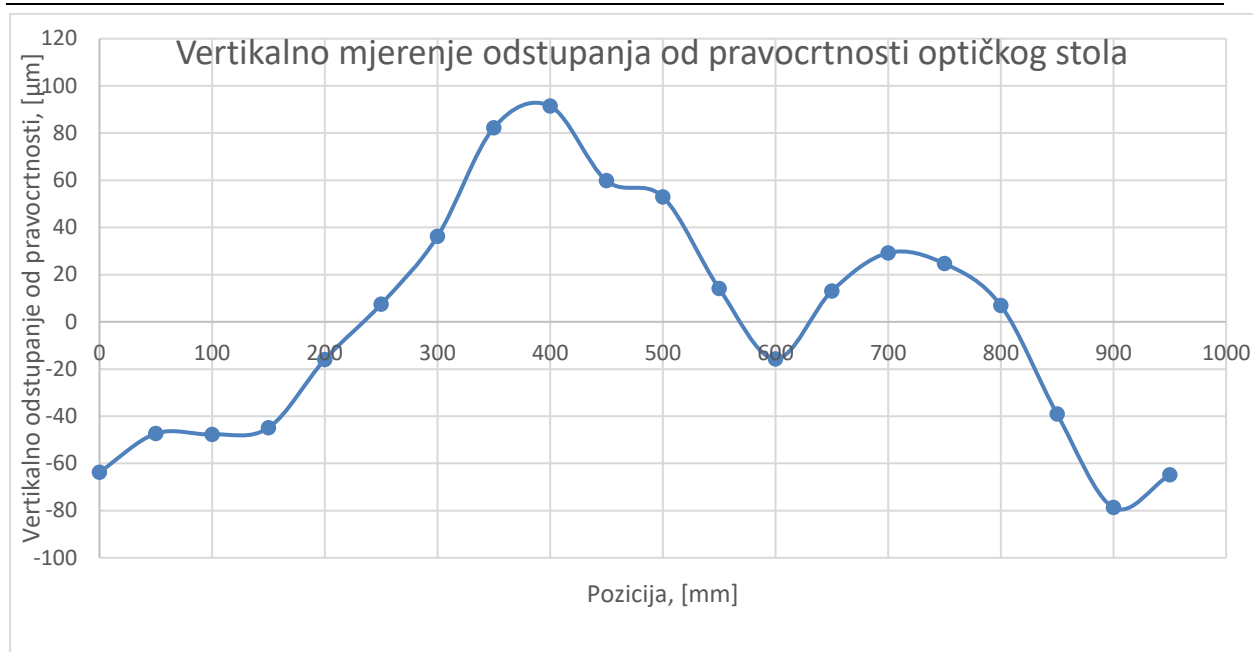
Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	-63,7214
50	-47,355
100	-47,6885
150	-44,922
200	-15,9556
250	7,5109



---

300	36,1773
350	82,2438
400	91,4103
450	59,7767
500	52,9432
550	14,1097
600	-15,723
650	13,0426
700	29,2091
750	24,6755
800	6,9420
850	-39,0915
900	-78,725
950	-64,858

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 170,135  $\mu\text{m}$ . Iz podataka mjerenja dobiven je sljedeći graf:



**Slika 34. Graf vertikalnog odstupanja od pravocrtnosti optičkog stola**

Pomicanjem podloški je pokušano smanjiti odstupanje stola od pravocrtosti međutim položaj podloški nije utjecao na odstupanje stola od pravocrtnosti.

### 5.5. Mjerenje početnog odstupanja vodilice po vertikalnoj osi

Reflektor mjernog sustava ostaje u istom položaju dok se interferometar sada montira na klizač linearne vodilice. Provode se mjerenje kao i u slučaju stola u 20 segmenata sa 50 mm razlike. Određeno je da je početna pozicija pravocrtnosti po vertikalnoj osi onda kada su svi vijci gotovo potpuno otpušteni, tj. kada vodilica slobodno „leži“ na optičkom stolu.

Dobiveni su sljedeći rezultati mjerenja:

**Tablica 7. Rezultati vertikalnih mjerenja početnog stanja vodilice**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, µm
0	1,90
50	-1,00
100	-2,90
150	-3,20
200	-3,70

250	-4,40
300	-6,40
350	-13,30
400	-26,40
450	-43,30
500	-61,50
550	-84,10
600	-108,60
650	-138,30
700	-173,80
750	-214,60
800	-256,10
850	-303,50
900	-347,60
950	-393,60

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = -0,4006x + 81,0586$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po vertikalnoj osi:

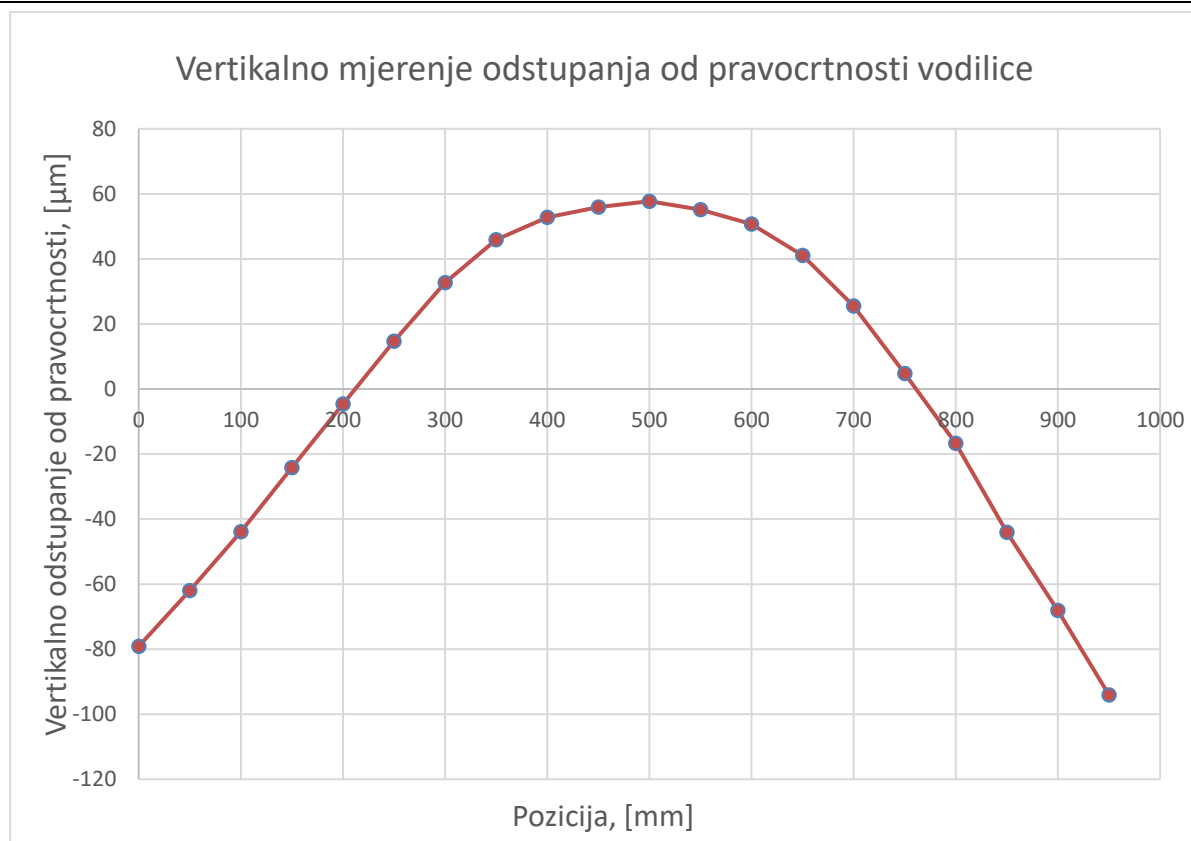
**Tablica 8. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja početnog stanja vodilice**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	-79,1586
50	-62,0292
100	-43,8999
150	-24,1706
200	-4,6412

---

250	14,6880
300	32,7173
350	45,8466
400	52,7760
450	55,9053
500	57,7346
550	55,1639
600	50,6933
650	41,0226
700	25,5519
750	4,7812
800	-16,6894
850	-44,0601
900	-68,1308
950	-94,1014

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 151,836  $\mu\text{m}$ . Iz podatak mjerenja dobiven je sljedeći graf:



Slika 35. Graf početnog stanja vodilice po vertikalnoj osi

## 5.6. Mjerenje odstupanja vodilice po vertikalnoj osi nakon podešavanja vijaka

### 5.6.1. Početni pristup kod smanjenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću vijaka

Prvotna zamisao je da bi se nakon mjerenja početnog stanja vodilice po vertikalnoj osi i dobivenog grafa iz kojeg se jasno može isčitati gdje se nalaze kritične točke, podesili gornji i donji vijci ovisno o potrebama. U ovom slučaju su to bili gornji vijci na pozicijama između 400 – 500 mm te bi se onda ponovilo mjerenje da se zaključi njihov utjecaj. Dobiveni su sljedeći rezultat:

Tablica 9. Rezultati vertikalnih mjerenja stanja vodilice kod prvog pristupa

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, µm
0	-1,80
50	8,90
100	25,40

---

150	46,70
200	66,70
250	88,40
300	113,60
350	142,30
400	185,40
450	235,40
500	290,50
550	334,50
600	367,70
650	394,40
700	426,50
750	472,70
800	530,90
850	595,70
900	663,80
950	725,50

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

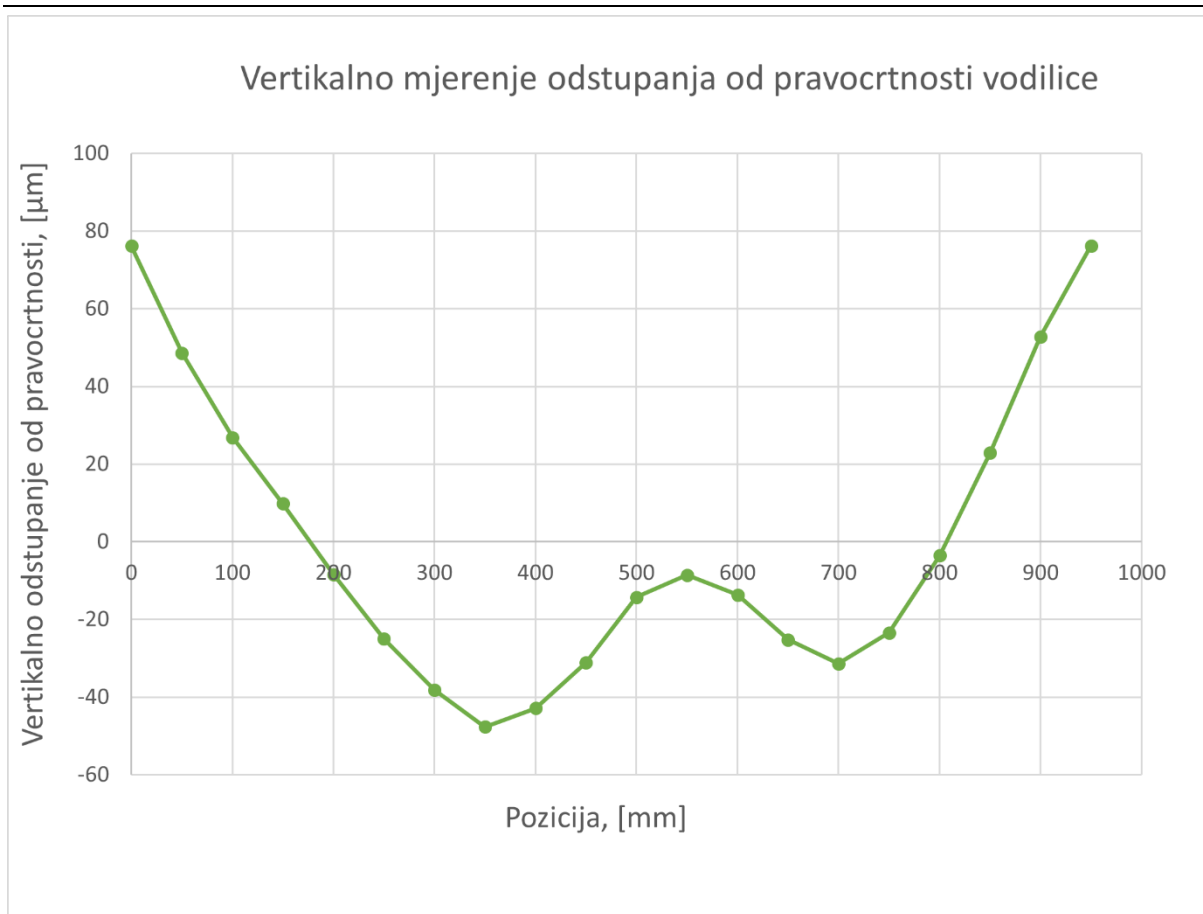
$$y = -0,7655x - 77,9471$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po vertikalnoj osi:

**Tablica 10.      Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja stanja vodilice kod prvog pristupa**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	76,1471
50	48,5727
100	26,7982
150	9,8238
200	-8,4506
250	-25,025
300	-38,0995
350	-47,6739
400	-42,8483
450	-31,1228
500	-14,2972
550	-8,5716
600	-13,6461
650	-25,2205
700	-31,395
750	-23,4694
800	-3,5438
850	22,9817
900	52,8072
950	76,2328

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 123,907  $\mu\text{m}$ . Iz podataka mjerenja dobiven je sljedeći graf:



**Slika 36. Grafički prikaz stanja vodilice nakon prve iteracije**

Iz grafa je vidljiva promjena u odnosu na početno stanje vodilice, no samo odstupanje od pravocrtnosti je i dalje znatno. Nastavljeno je korištenje prvotnog pristupa te su sada i donji vijci pritegnuti dovoljno da izravnavaju vodilicu, a krajnji gornji vijci dodatno zategnuti. Nakon tih podešenja su dobiveni sljedeći rezultati:

**Tablica 11. Rezultati mjerenja nakon druge iteracije**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, µm
0	-141,90
50	-131,00
100	-111,30
150	-83,60
200	-43,90



250	0,00
300	49,10
350	97,40
400	143,50
450	184,20
500	223,70
550	266,10
600	305,90
650	344,60
700	380,60
750	410,10
800	443,80
850	486,60
900	542,40
950	603,20

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = -0,8026x - 182,72$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po vertikalnoj osi:

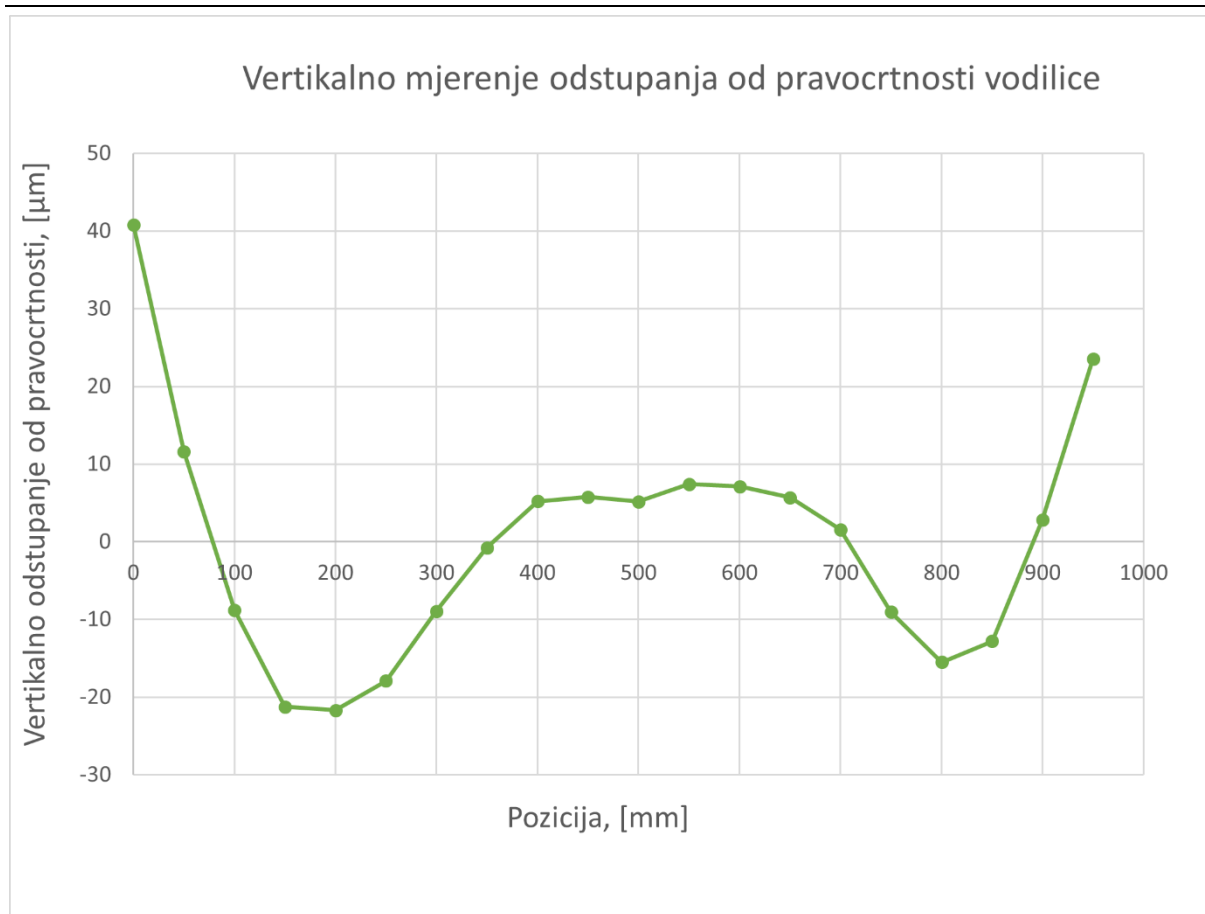
**Tablica 12. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja stanja vodilice nakon druge iteracije**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	40,8185
50	11,5929
100	-8,8327
150	-21,2583

---

200	-21,684
250	-17,9096
300	-8,9352
350	-0,7609
400	5,2134
450	5,7878
500	5,1621
550	7,4365
600	7,1109
650	5,6852
700	1,5596
750	-9,0660
800	-15,4917
850	-12,8173
900	2,8570
950	23,5314

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 62,50  $\mu\text{m}$ . Iz podataka mjerenja dobiven je sljedeći graf:



**Slika 37. Grafički prikaz stanja vodilice nakon druge iteracije**

Iz grafa je vidljivo da se stanje znatno popravilo nakon ovih podešenja u smislu smanjenja odstupanja od pravocrtnosti. Središnji dio se dodatno izravnao, a kod krajnjih dijelova odstupanje znatno smanjeno stoga se nastavilo sa istom metodom.

Podešeni su odgovarajući vijci na preostalim kritičnim točkama vodilice te su dobiveni sljedeći rezultati:

**Tablica 13. Rezultati mjerenja nakon treće iteracije**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, µm
0	10,00
50	20,70
100	52,40
150	104,00
200	150,20
250	202,00

300	238,90
350	282,20
400	325,20
450	364,10
500	407,20
550	454,70
600	511,30
650	566,30
700	625,40
750	681,90
800	742,70
850	795,40
900	838,90
950	879,40

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = -0,9534x - 40,249$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po vertikalnoj osi:

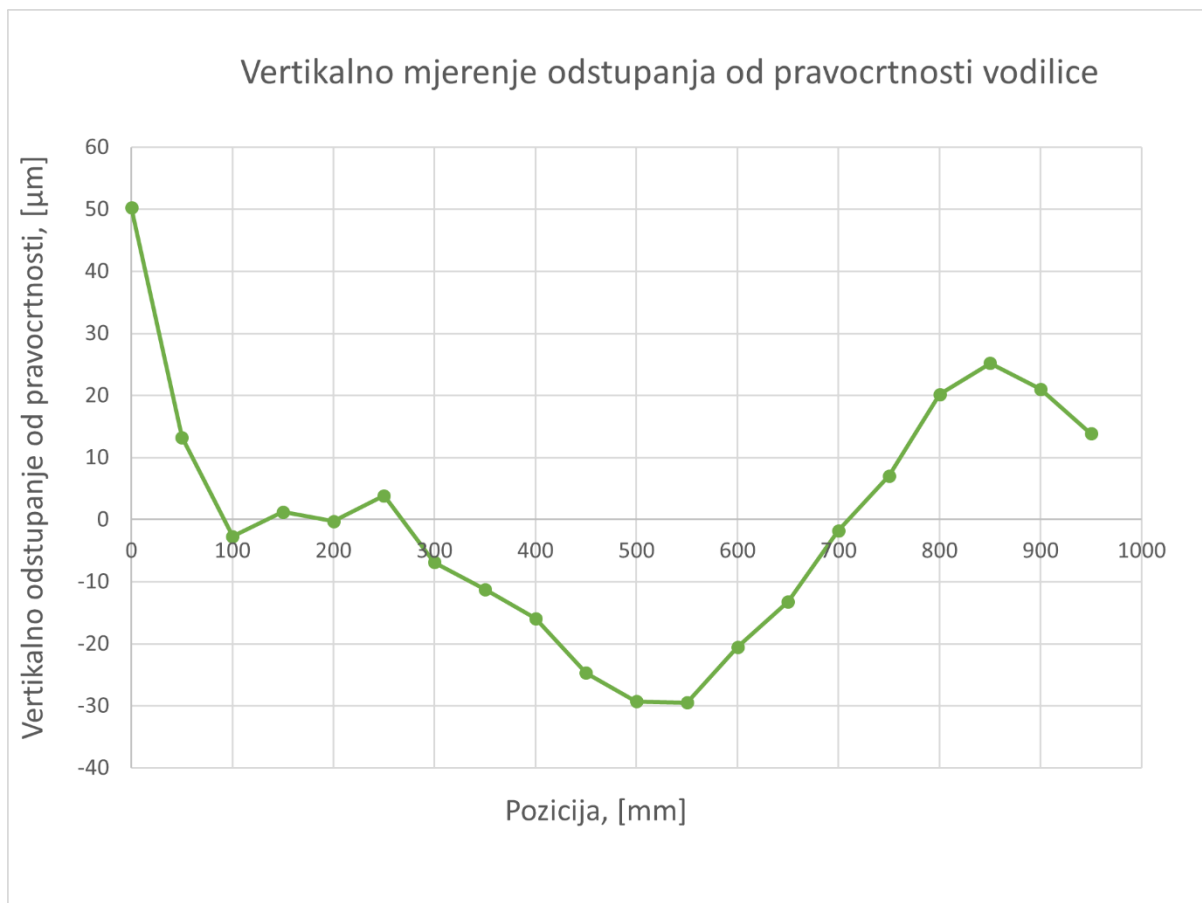
**Tablica 14. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja stanja vodilice nakon treće iteracija**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	50,2428
50	13,2704
100	-2,7019
150	1,2256
200	-0,24677

---

250	3,8808
300	-6,8915
350	-11,264
400	-15,9364
450	-24,7088
500	-29,2812
550	-29,4536
600	-20,526
650	-13,1984
700	-1,7708
750	7,0567
800	20,1843
850	25,2119
900	21,0395
950	13,8671

Odstupanje od pravocrtnosti se u ovom slučaju pogoršalo u odnosu na prethodni slučaj te je dobiven sljedeći oblik grafa:



**Slika 38. Grafički prikaz stanja vodilice nakon prve iteracije**

Vidljivo je da se oblik grafa promijenio znatno u ovom slučaju te su se pojavile nove kritične točke koje su u prethodnom slučaju bile točke na kojima je odstupanje prihvatljivo.

Nastavljeno je s istim pristupom.

### **5.6.2. Konačni pristup kod smanjenja odstupanja od pravocrtnosti pomoću vijaka**

Nakon 15 iteracija početnog pristupa gdje bi se zabilježio graf te se nakon toga išle podešavati kritične točke, zaključeno je da će odstupanje po pravocrtnosti teško moći smanjiti početnim pristupom. U pravilu nakon dvije uspješne iteracije koje djeluju pozitivno prema smanjenju odstupanja, treća utječe negativno te se vrati prethodno stanje koje ima drugačiji oblik grafa no istu vrijednost odstupanja koja nije prihvatljiva. To proizlazi iz razloga što kod veće preciznosti i najmanji moment na vijku može prouzročiti znatnija odstupanja te što zbog

krutosti same vodilice, utjecaj vijka u jednoj točki može utjecati na susjedne točke, ali i točke koje su znatno udaljene.

Nakon tog zaključka, odlučeno je da je potrebno promijeniti metodu te se koristi drugačiji pristup poboljšanja odstupanja od pravocrtnosti:

U novom pristupu, konačno stanje vertikalne osi je dobiveno na način da se početna i posljednja točka mjerenja dovedu u ravninu te da se finim podešavanjem vijaka sa obe strane (gornjih i donjih) poboljšava stanje pravocrtnosti vodilice tako da se izravnavaju kritični dijelovi vodilice u realnom vremenu.

To je znatno utjecalo na pravocrtnost vodilice te je polučilo sljedeće rezultate:

**Tablica 15. Rezultati vertikalnih mjerenja idealnog stanja vodilice**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	-0,10
50	-21,20
100	-33,50
150	-49,30
200	-66,40
250	-79,50
300	-90,40
350	-104,10
400	-120,90
450	-137,40
500	-154,10
550	-167,70
600	-181,00
650	-196,40
700	-208,90
750	-225,50
800	-241,00

850	-256,20
900	-273,30
950	-300,50

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = -0,3011x + 16,3211$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtosti linearne vodilice po vertikalnoj osi:

**Tablica 16. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje vertikalnog odstupanja idealnog stanja vodilice**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	2,24
50	-3,8042
100	-1,0484
150	-1,7926
200	-3,8368
250	-1,8810
300	2,2747
350	3,6305
400	1,8863
450	0,4421
500	-1,2021
550	0,2536
600	2,0094
650	1,6652
700	4,2210
750	2,6768



800	2,2326
850	2,0884
900	0,0442
950	-12,1

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 16.3211  $\mu\text{m}$ . Iz podataka mjerenja dobiven je sljedeći graf:



**Slika 39. Graf idealnog stanja vodilice po vertikalnoj osi**

Iz grafa je vidljivo da zapravo najveći dio odstupanja se nalazi na posljednjoj poziciji (950 mm) koju nije moguće bilo „izravnati“ pomoću vijaka. To je bila idealna situacija vertikalne pravocrtnosti vodilice koja bi bilo uporabljiva samo ako na horizontalna pravocrtnost ne bi bila potrebna. Nakon što se drugi pristup pokazao kao kvalitetniji, on je korišten u daljnjim mjerenjima.

### 5.7. Mjerenje početnog odstupanja vodilice po horizontalnoj osi

Proces određivanja pravocrtnosti horizontalne osi izvodi se na gotovo identičan način kao i kod vertikalne osi. Jedina razlika je postav aparature s kojom se izvode mjerenja, kao npr. dio koji raspolavlja zraku te je ključan za mjerenje pravocrtnosti se postavlja u vodoravan položaj kao na slici:



Slika 40. Aparatura postavljena za mjerenje horizontalne osi

S obzirom da vertikalna os predstavlja zahtjevniju os kod poboljšanja pravocrtnosti, inicijalno stanje horizontalne osi predstavlja stanje dobiveno nakon poboljšavanja pravocrtnosti vertikalne osi, a koje je dobiveno podešavanjem gornjih i donjih vijaka od kojih gornji vijci imaju direktan utjecaj na stanje horizontalne osi. Inicijalno stanje horizontalne osi je sljedeće:

Tablica 17. Rezultati horizontalnih mjerenja početnog stanja vodilice

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	1,40
50	22,40
100	38,00

---

150	52,10
200	62,10
250	72,80
300	83,20
350	91,80
400	99,60
450	109,40
500	121,30
550	131,70
600	147,60
650	163,40
700	182,80
750	201,70
800	225,20
850	252,00
900	277,10
950	307,80

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

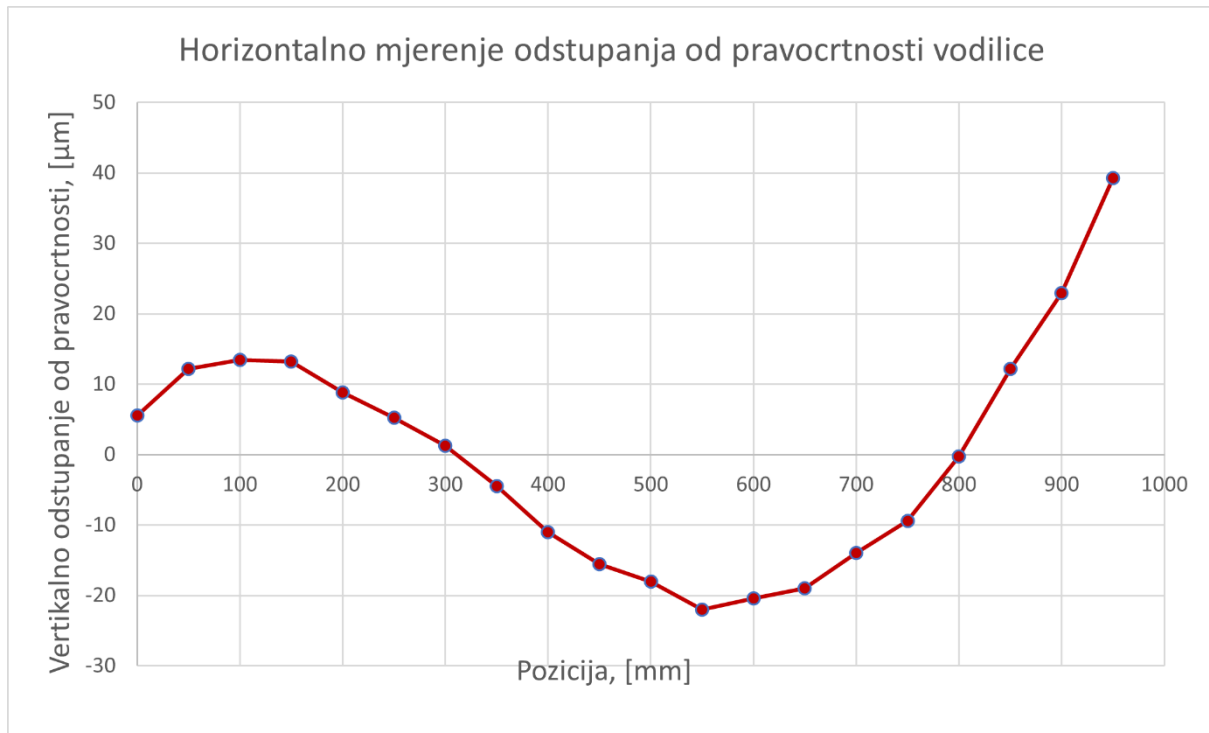
$$y = 0,28701x - 4,1586$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po horizontalnoj osi:

**Tablica 18. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje horizontalnog odstupanja početnog stanja vodilice**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	5,5585
50	12,2082
100	13,4578
150	13,2074
200	8,8570
250	5,2066
300	1,2563
350	-4,4940
400	-11,0444
450	-15,5948
500	-18,0452
550	-21,9956
600	-20,4459
650	-18,9963
700	-13,9467
750	-9,3970
800	-0,2474
850	12,2021
900	22,9518
950	39,3014

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 61,297  $\mu\text{m}$ . Iz podataka mjerenja dobiven je sljedeći graf:



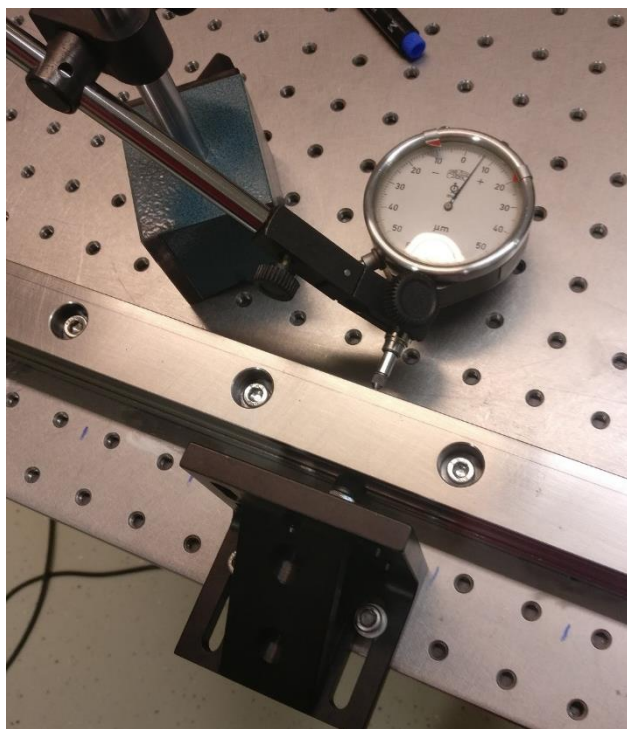
**Slika 41. Graf početnog stanja vodilice po horizontalnoj osi**

Ukoliko se postavimo u početnu točku 0 i gledamo prema kraju vodilice, (+) označava odstupanje u desno, a (-) u lijevo.

Iz grafa je vidljivo da je i po horizontalnoj osi najveće odstupanje od pravocrtnosti u krajnjoj točki kao i u idealnom slučaju vertikalnog odstupanja.

### 5.8. Mjerenje odstupanja vodilice po horizontalnoj osi nakon podešavanja vijaka

Poboljšavanje horizontalne osi je dobiveno na način da se blago otpuštaju gornji vijci (ne previše zbog utjecaja na vertikalnu os) te se preko pomoćne aparature koja je sastavljena od vijka s kojim se napreže vodilica (i komparatora s kojim se mjeri utjecaj), izravnavaju kritične točke.



Slika 42. Aparatura postavljena za mjerenje horizontalne osi

Na taj način su dobiveni sljedeći rezultati:

Tablica 19. Rezultati horizontalnih mjerenja konačnog stanja vodilice

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	0,70
50	29,60
100	58,30
150	81,00
200	102,40
250	125,10
300	148,20

350	169,10
400	189,20
450	211,90
500	233,00
550	256,00
600	278,20
650	300,20
700	323,40
750	344,60
800	364,30
850	385,10
900	400,80
950	414,20

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = 0,43657x - 13,3957$$

Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po horizontalnoj osi:

**Tablica 20. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje horizontalnog odstupanja konačnog stanja vodilice**

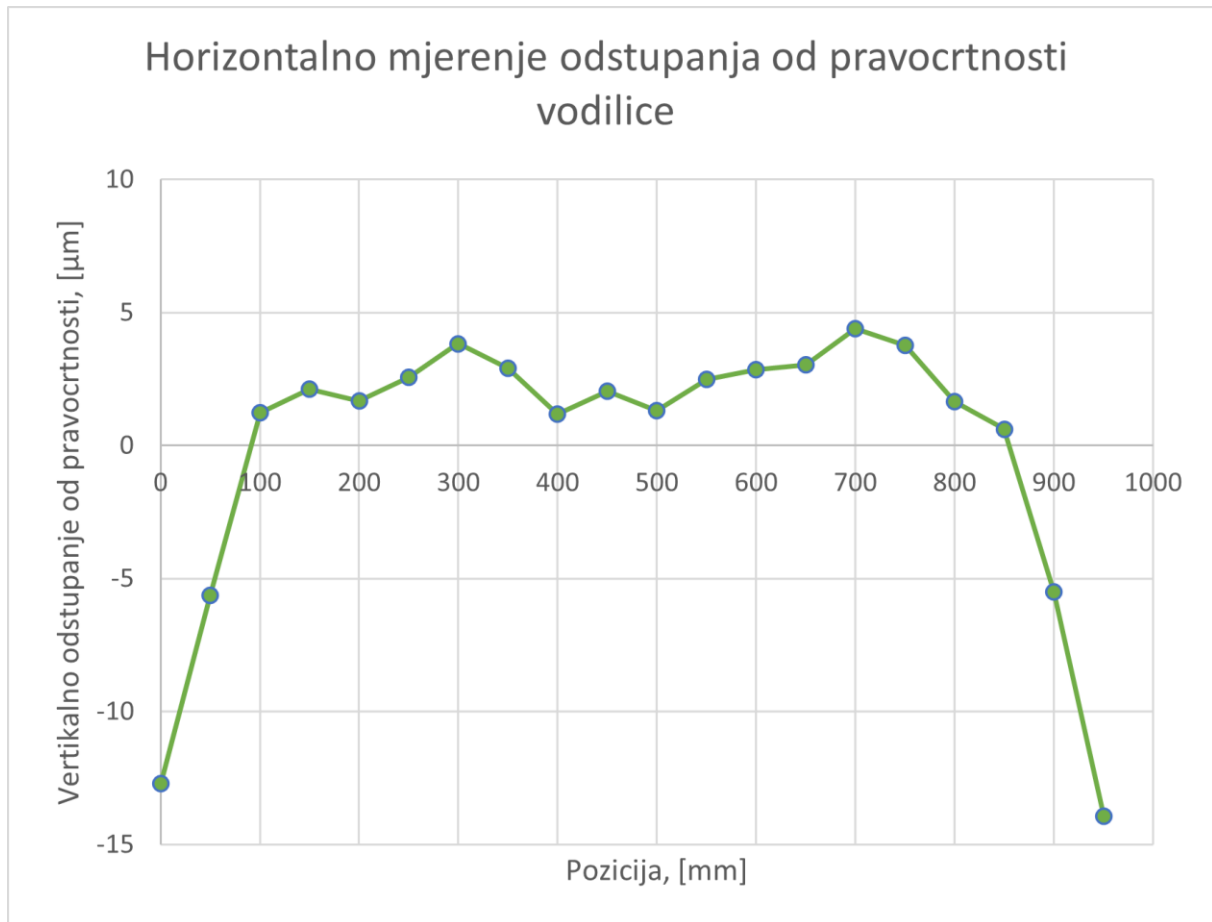
Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	-12,6957
50	-5,6240
100	1,2475
150	2,1192
200	1,6909
250	2,5625

---

300	3,8342
350	2,9058
400	1,1775
450	2,0491
500	1,3208
550	2,4924
600	2,8641
650	3,0357
700	4,4074
750	3,7790
800	1,6507
850	0,6224
900	-5,505
950	-13,9343



Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi  $18.3417 \mu\text{m}$ . Iz podataka mjerenja dobiven je sljedeći graf:



**Slika 43. Graf konačnog stanja vodilice po horizontalnoj osi**

Iz grafa je vidljivo da kao i u mjerenjima prijašnje osi, kritične točke i dalje predstavljaju početna i krajnja točka.

### 5.9. Mjerenje odstupanja vodilice po vertikalnoj osi nakon smanjenja odstupanja horizontalne osi

Kako je i spomenuto prije, glavni problem prilikom smanjenja odstupanja predstavlja ovisnost pravocrtnosti obaju osi o vijcima koji su montirani s gornje strane. Podešavanjem gornjih vijaka, utjecalo se na odstupanje vertikalne osi. Stoga je bilo potrebno opet presložiti aparaturu te tražiti poboljšanje vertikalne osi no u ovom slučaju samo preko donjih vijaka za koje je prethodno utvrđeno da nemaju značajan utjecaj na pravocrtnost horizontalne osi.

Sljedeći rezultati predstavljaju konačno odstupanje vertikalne osi nakon poboljšane horizontalne osi:

**Tablica 21. Rezultati vertikalnih mjerenja stanja vodilice nakon poboljšanje horizontalne osi**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	0,70
50	-9,90
100	-24,60
150	-41,30
200	-58,40
250	-67,80
300	-76,30
350	-85,60
400	-98,60
450	-108,40
500	-119,30
550	-129,60
600	-136,80
650	-145,00
700	-153,50
750	-165,20
800	-178,20

850	-190,30
900	-207,60
950	-231,80

Regresijski pravac je izračunat pomoću nagiba i presjeka te mu je formula:

$$y = -0,223x - 5,4429$$

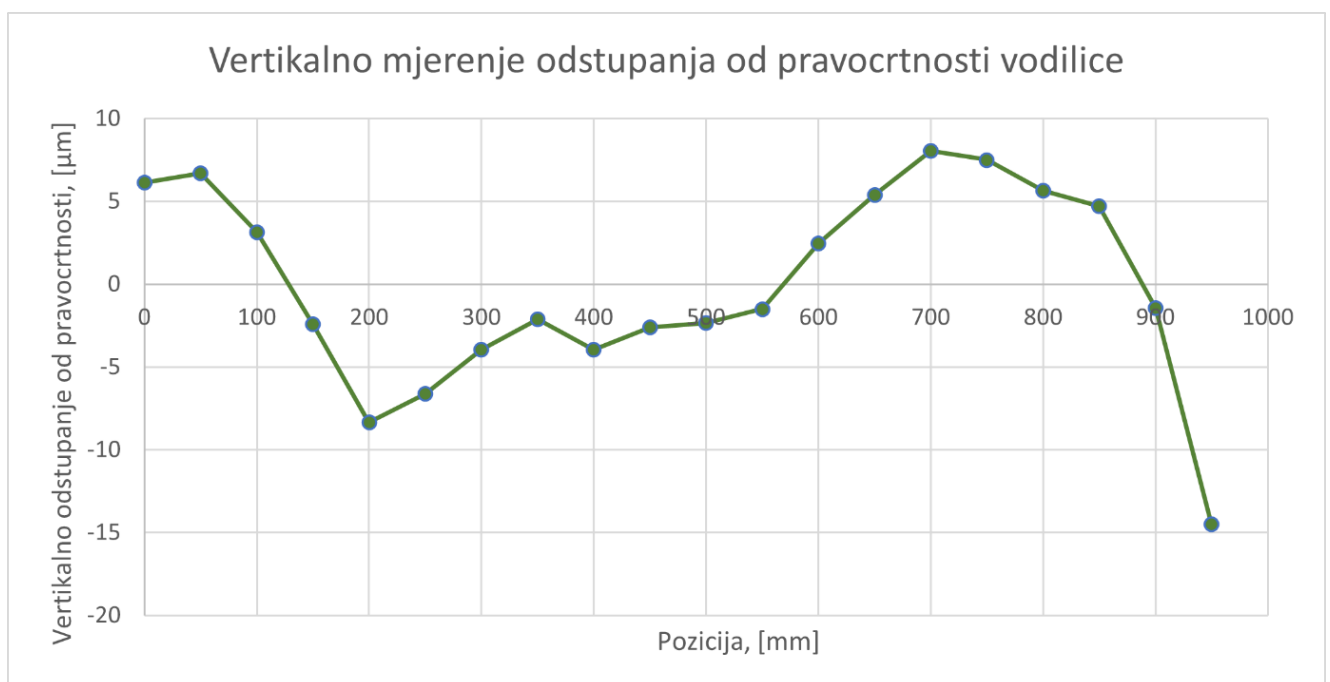
Pomoću metode najmanjih kvadrata i izračunatog regresijskog pravca, eliminira se nesuosnost i dobiva odstupanje od pravocrtnosti linearne vodilice po vertikalnoj osi:

**Tablica 22. Rezultati metode najmanjih kvadrata za mjerenje horizontalnog odstupanja konačnog stanja vodilice**

Pozicija, mm	Rezultat mjerenja, $\mu\text{m}$
0	6,1428
50	6,6936
100	3,1443
150	-2,4048
200	-8,3541
250	-6,6033
300	-3,9526
350	-2,1018
400	-3,9511
450	-2,6003
500	-2,3496
550	-1,4988
600	2,4518
650	5,4026
700	8,0533
750	7,5041

800	5,6548
850	4,7056
900	-1,4436
950	-14,4929

Najveća razlika između vrijednosti je odstupanje od pravocrtnosti, a u ovom slučaju ono iznosi 22,5462  $\mu\text{m}$ . Iz podatak mjerenja dobiven je sljedeći graf:

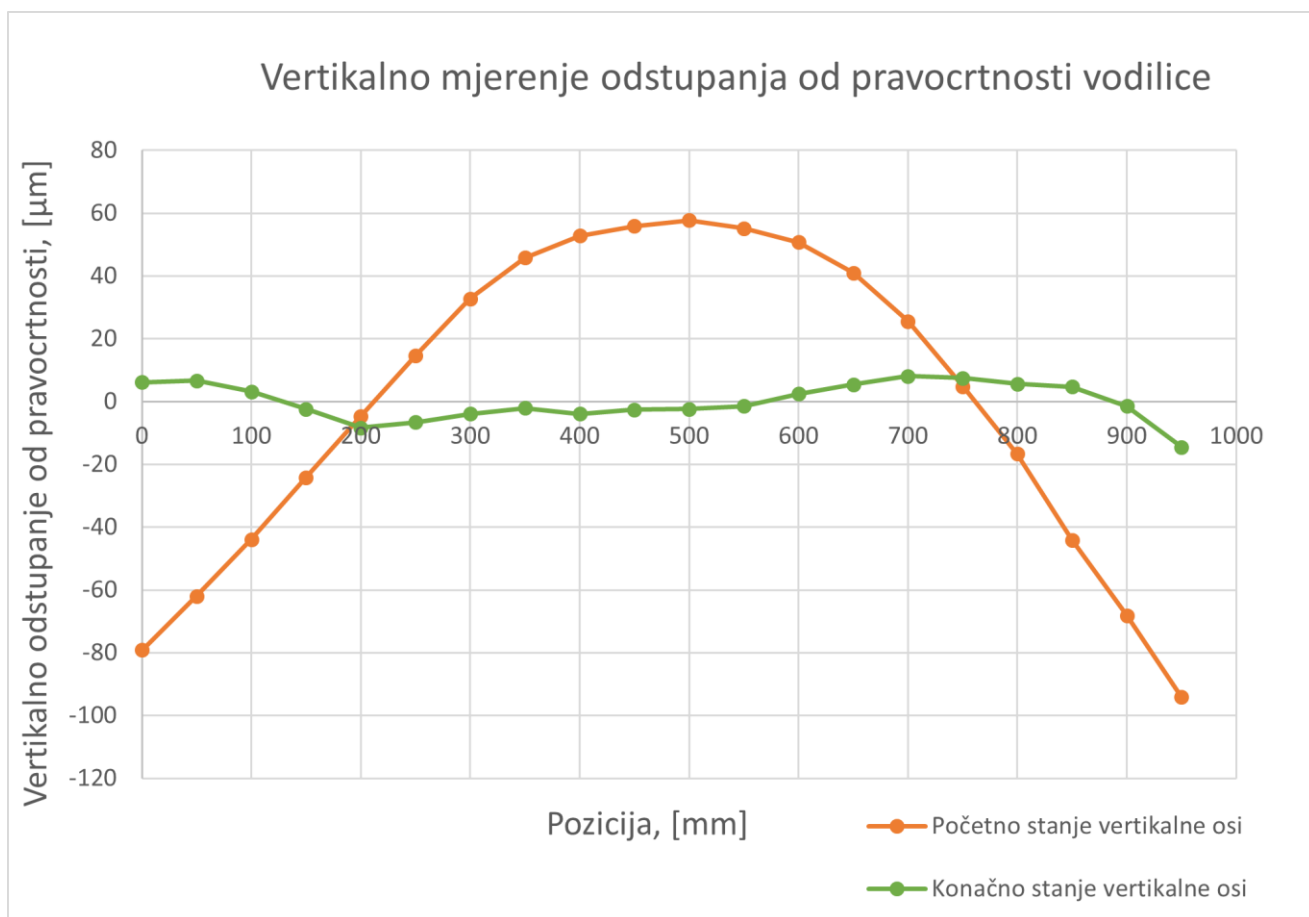


**Slika 44.** Graf konačnog stanja vodilice po vertikalnoj osi nakon poboljšanje horizontalne osi

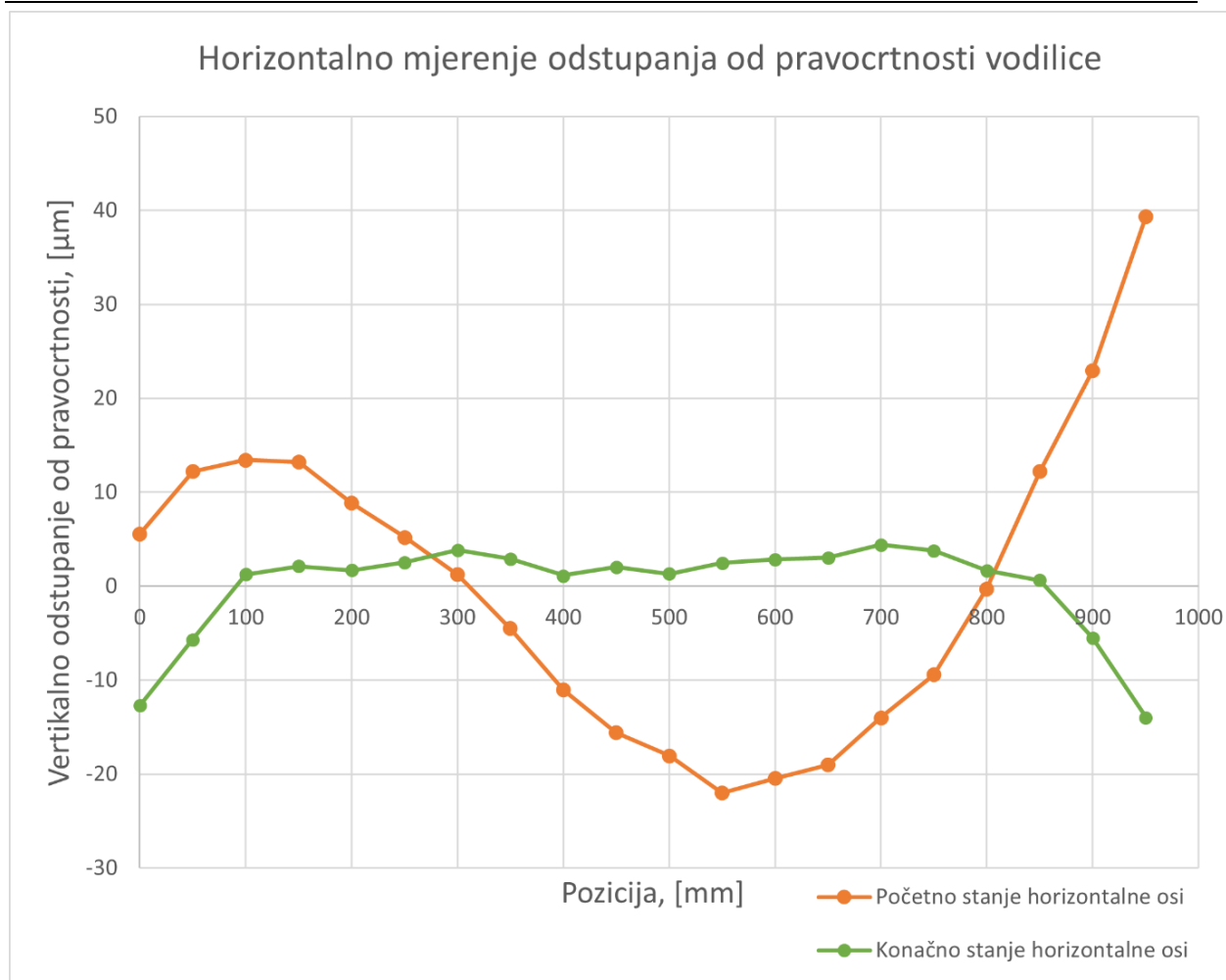
Iz podataka se može zaključiti da se odstupanje povećalo za otprilike 6 mikrometara što i nije velika razlika u odnosu na idealnu situaciju vertikalne osi.

### 5.10. Grafički prikaz smanjenja odstupanja za obe osi

Na donje dvije slike su prikazani su odnosi početnog i konačnog stanja za vertikalnu i horizontalnu os. Vidljivo je da su kritične točke na početku i na kraju mjerene dijela vodilice.



**Slika 45. Grafovi početnog i konačnog stanja odstupanja od pravocrtnosti vodilice po vertikalnoj osi**



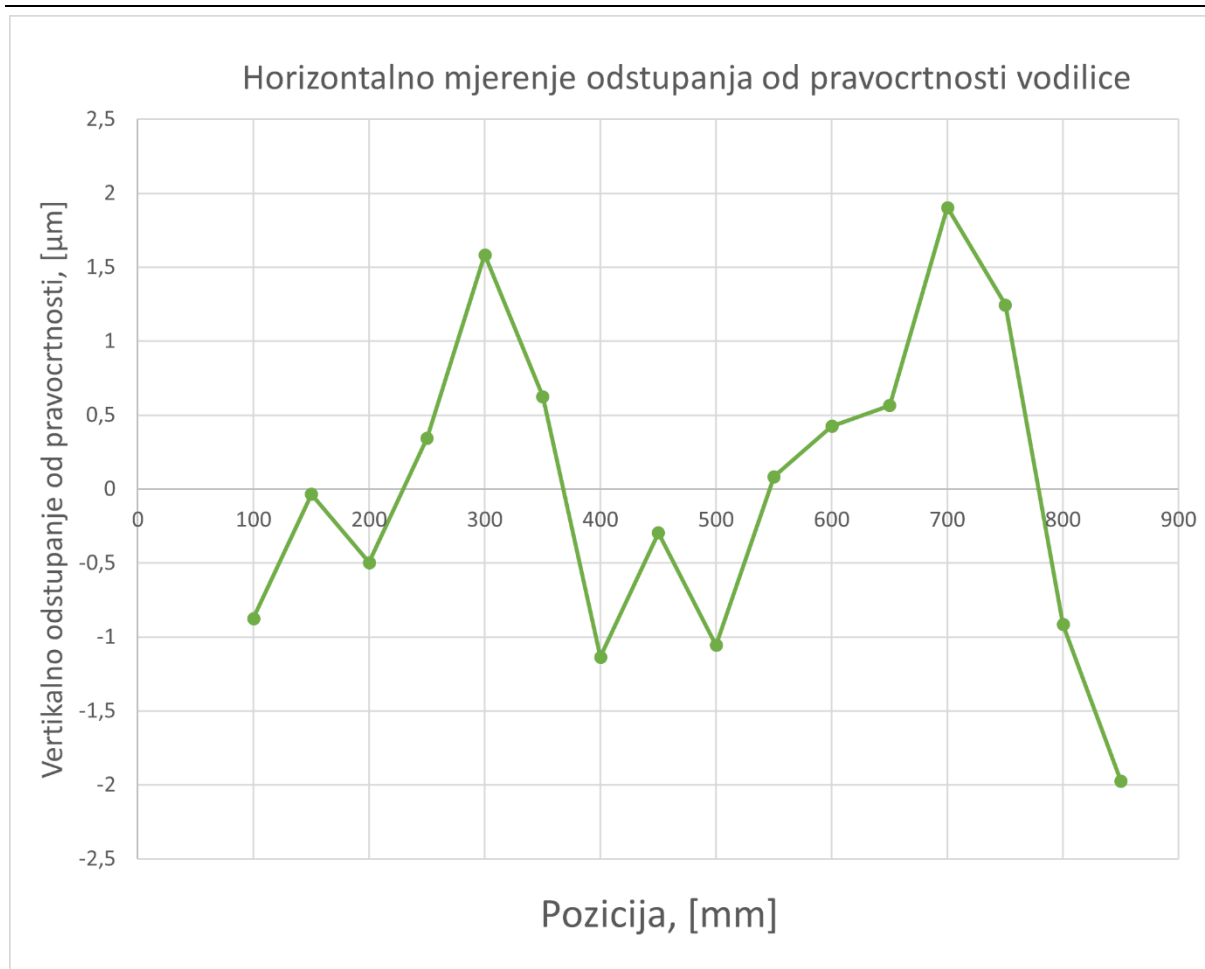
**Slika 46. Grafovi početnog i konačnog stanja odstupanja od pravocrtnosti vodilice po vertikalnoj osi**

### 5.11. Konačno stanje horizontalnog odstupanja bez kritičnih točaka

S obzirom da su kritične točke vodilice kod horizontalnog odstupanja na kraju i na početku, lako ih se može isključiti iz konačnog stanja vodilice. Ukoliko se izbace prve dvije i zadnje dvije točke, raspoloživa uporabljivost vodilice se smanji za 200 mm no odstupanje od pravocrtnosti se znatno smanji. Tada maksimalno odstupanje iznosi samo 3,88 μm, a jednadžba regresijskog pravca je tada:

$$y = 0,4372x + 15,455$$

Na sljedećoj stranici je prikazan graf odstupanja u tom slučaju:



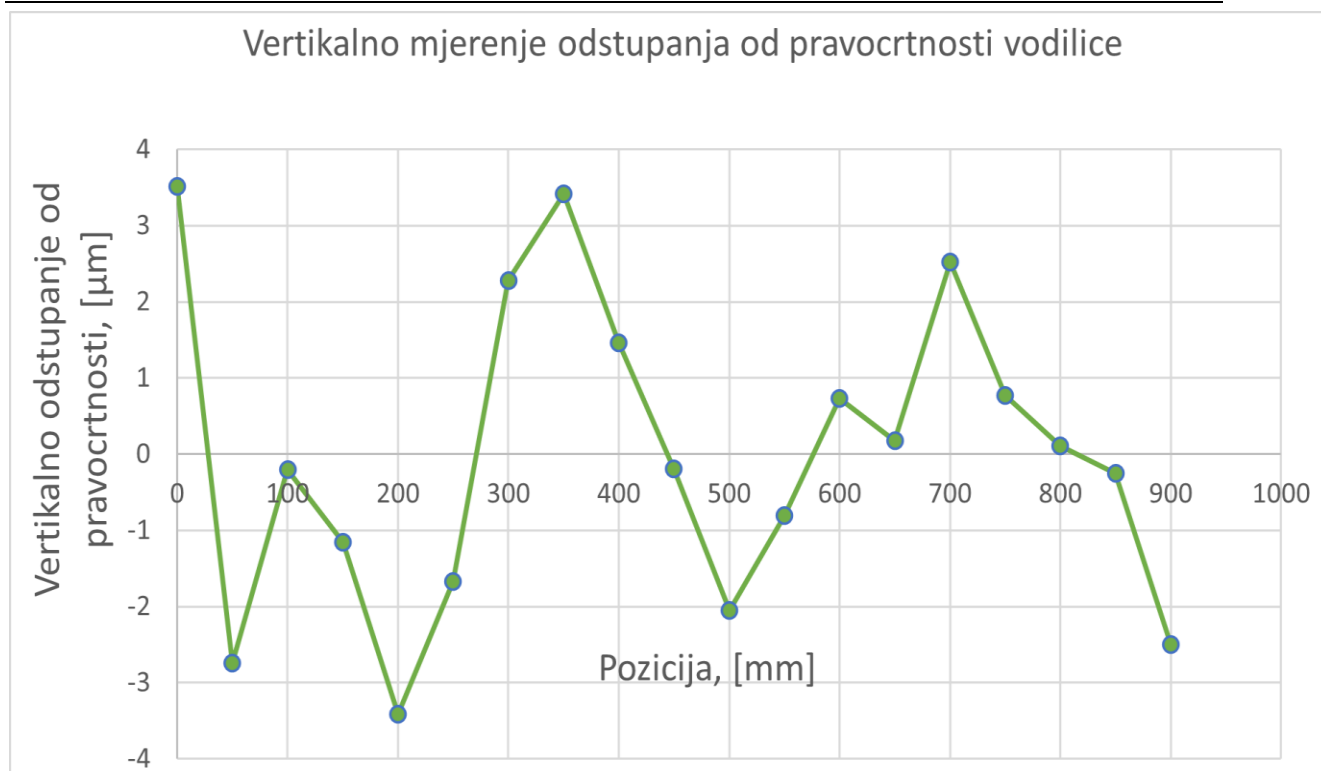
**Slika 47. Konačno stanje horizontalnog odstupanja od pravocrtnosti sa izbačenim kritičnim točkama**

### 5.12. Konačno stanje vertikalnog odstupanja bez kritičnih točaka

Slično kao i u prethodnom slučaju, postoji kritična točka koja znatno utječe na odstupanje od pravocrtnosti po vertikalnoj osi. Ona se nalazi na kraju vodilice te ju je također jednostavno isključiti. U ovom slučaju raspoloživost vodilice se smanjuje samo za 50 mm, ali se odstupanje znatno smanjuje na vrijednost od 6,93 µm. Pravac regresije u tom slučaju ima jednadžbu:

$$y = -0,2969x - 3,614$$

Na sljedećoj stranici je prikazan graf pravocrtnosti po vertikalnoj osi nakon isključivanja kritične točke:



**Slika 48.** Konačno stanje vertikalnog odstupanja od pravocrtnosti sa izbačenim kritičnim tačkama



## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad je postavljen na način da se ispita mogućnost smanjena odstupanja od pravocrtnosti pomoću ugrađenih vijaka za pritezanje sa gornje i donje strane vodilice.

Mjerenja odstupanja od pravocrtnosti linearne vodilice su izvedena pomoću interferometra proizvođača Renishaw te pomoćnih komponenti za pozicioniranje elemenata mjernog sustava. Sva mjerenja su izvršena u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Na mjerenoj duljini vodilice od 950 mm na vertikalnoj osi se odstupanje od pravocrtnosti smanjilo za 129,29  $\mu\text{m}$ , dok se po horizontalnoj osi odstupanje smanjilo za 42,96  $\mu\text{m}$ . Ukoliko bi se smanjilo područje uporabe po duljini, poboljšanje u odstupanju bi bilo i veće jer su kritične točke upravo na početku i na kraju linearne vodilice.

Glavni problem koji se javlja prilikom smanjena odstupanja od pravocrtnosti je što i vertikalna i horizontalna os ovise o gornjem setu vijaka što znači da podešavanje jedne osi može prouzročiti promjene na drugoj osi. Iz toga proizlazi zahtjevnost metode te potreba za mnoštvom iteracija jer i najmanja promjena momenta na vijku može prouzročiti znatne promjene u odstupanjima vodilice.

Za analizu eksperimentalnih podataka dobivenih prilikom mjerenja, korištena je metoda najmanjih kvadrata pomoću koje se može dobiti egzaktna vrijednost odstupanja od pravocrtnosti pojedinih osi.

Iako su odstupanja po pojedinim osima i dalje prisutna, te mogu znatno utjecati na mjerenja koja bi se eventualno izvodila koristeći linearnu vodilicu, važno je za zaključiti da je zapravo metoda postavljanja priteznih vijaka sa donje strane vodilice zapravo valjana metoda s kojom bi se moglo smanjiti odstupanje od pravocrtnosti. Prilikom montaže vijaka oni nisu bili perfektno centrirani iz čega proizlazi kritičnost točaka na početku i na kraju vodilice.

Kao zaključak se može navesti da je moguće smanjiti odstupanje od pravocrtnosti vertikalne i horizontalne osi pomoću priteznih vijaka što je vidljivo iz konačnih rezultata.

## LITERATURA

- [1] Definicija metra - 1. zaključak sa 17. Opće konferencije za utege i mjere (CGPM, 1983.) Međunarodnog odbora za utege i mjere (BIPM)
- [2] <https://dzm.gov.hr/istaknute-teme/zakonsko-mjeriteljstvo/o-mjeriteljstvu/431> Državni zavod za mjeriteljstvo (pristupio stranici 25.6.2022.)
- [3] <https://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/548-mjerni-etalon> Svijet kvalitete (pristupio stranici 25.6.2022)
- [4] Biserka Runje : Predavanja iz kolegija TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA, Zagreb, 2014
- [5] <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/linear-guide.php> Anaheim automation (pristupio stranici 26.6.2022)
- [6] [https://www.zetek.ru/en/products/linear\\_guidance\\_systems/linear\\_guideway\\_hiwin/hiwin\\_eg/guide\\_rail\\_eg\\_1/](https://www.zetek.ru/en/products/linear_guidance_systems/linear_guideway_hiwin/hiwin_eg/guide_rail_eg_1/) Zetek (pristupio stranici 26.6.2022)
- [7] Ređep, A. Finomehanika. Zagreb: Školska knjiga; 2009.
- [8] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017
- [9] Valjak, M. Ispitivanje točnosti 2D-koordinatnog mjernog uređaja [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [10] Marko Katić, Razvoj sustava za interferencijsko umjeravanje etalona duljine metodom faznih pomaka [doktorski rad], Zagreb, 2013
- [11] Marko Horvatek, Izrada sustava za akviziciju signala interferometra za mjerenje pomaka [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019.
- [12] Zvonimir Petković, Praktična realizacija definicije metra, Zagreb, 2013.
- [13] Ivan Mikulić, Umjeravanje 1D mjernog uređaja [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022.
- [14] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MB1015/M> Thorlabs (pristupio stranici 1.7.2022)
- [15] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BA1/M#ad-image-0> Thorlabs (pristupio stranici 1.7.2022)

- [16] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BA4/M#ad-image-0> Thorlabs (pristupio stranici 1.7.2022)
- [17] <https://www.directindustry.com/prod/thorlabs/product-36188-1096887.html> Direct industry (pristupio stranici 1.7.2022)
- [18] <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KM200#ad-image-0> Thorlabs (pristupio stranici 1.7.2022)
- [19] Chapman, M. A. V., Fergusson-Kelly, R., Lee, W.: Interferometric straightness measurement and application to moving table machines, Renishaw, 2013.

## **PRILOZI**

I. CD-R disk