

Utjecaj postavljanja preciznih mjernih skala na točnost umjeravanja

Maričić, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:069168>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Bruno Maričić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Marko Katić, dipl. Ing.

Student:

Bruno Maričić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Marku Katiću i asistentu Marku Horvateku na pruženoj pomoći i savjetima.

Bruno Maričić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Maričić**

JMBAG: 0035219222

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj postavljanja preciznih mjernih skala na točnost umjeravanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of alignment of precision line scales to calibration accuracy**

Opis zadatka:

U okviru ovog rada potrebno je opisati sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a, te analitički i eksperimentalno demonstrirati utjecaj pogrešaka kod postavljanja precizne mjerne skale na sustav za linearni pomak.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Marko Katić

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS DIJAGRAMA	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPIS SUSTAVA ZA UMJERAVANJE	2
2.1. Sustav za umjeravanje.....	2
2.2. Optički stol.....	2
2.3. Linearna vodilica.....	3
2.4. Koračni motori	3
2.4.1. Koračni motor	3
2.4.2. Koračni motor 28BYJ-48.....	4
2.4.3. Kućište s motorima	4
2.5. Precizna mjerna skala.....	5
2.6. Mikroskop	5
2.6.1. Mikroskop definicija.....	5
2.6.2. Mikroskop Olympus	5
2.7. Kamera DMK 37AUXC264.....	6
2.8. Laserski interferometarski sustav.....	6
2.8.1. Laser.....	6
2.8.2. Renishaw ML10 laser	6
2.8.3. Laserski interferometar	7
2.8.4. Princip rada laserskog interferometra	7

3. UMJERAVANJE.....	9
3.1. Umjeravanje najbolje moguće postavljene skale	9
3.2. Umjeravanje s pogreškom u x osi	13
3.3. Umjeravanje s pogreškom u z osi	17
3.4. Utjecaj pomaka uslijed promjene temperature.....	19
3.4.1. Mjerenje pomaka 1	19
3.4.2. Mjerenje pomaka 2	20
3.4.3. Mjerenje pomaka 3	21
4. ANALIZA PODATAKA.....	22
4.1. Utjecaj pogreške u x osi	22
4.1.1. Položaj 1.....	22
4.1.2. Položaj 2.....	23
4.2. Utjecaj pogreške u z osi	24
4.3. Utjecaj pomaka uslijed promjene temperature.....	24
5. ZAKLJUČAK.....	25

POPIS SLIKA

Slika 1.	Sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala.....	2
Slika 2.	Optički stolovi na mramornoj ploči.....	3
Slika 3.	Linearna vodilica s postoljem za prihvat skala.....	3
Slika 4.	Koračni motor [2]	4
Slika 5.	Motori u kućištima.....	4
Slika 6.	Precizna mjerna skala	5
Slika 7.	Olympus mikroskop	5
Slika 8.	Kamera DMK 37AUX264.....	6
Slika 9.	Laserski interferometarski sustav	7
Slika 10.	Princip rada laserskog interferometra	8
Slika 11.	Očitavanje s laserskog interferometra i mikroskopa	9
Slika 12.	Mjerna linija pod kutem na skali pod mikroskopom.....	13
Slika 13.	Postav za mjerenje pomaka mjerne skale	19
Slika 14.	Trokut greške za položaj 1	22
Slika 15.	Trokut greške za položaj 2.....	23

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Rezultati umjeravanja 1 i 2 najbolje moguće postavljene skale	11
Tablica 2.	Rezultati umjeravanja 3 i 4 najbolje moguće postavljene skale	12
Tablica 3.	Rezultati umjeravanja 1 i 2 skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 1 14	
Tablica 4.	Rezultati umjeravanja 1 i 2 skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 2 16	
Tablica 5.	Rezultati mjerenja 1 i 2 skale pod nagibom.....	18

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1.	Rezultati umjeravanja 1 i 2 najbolje moguće postavljene skale.....	10
Dijagram 2.	Rezultati umjeravanja 3 i 4 najbolje moguće postavljene skale.....	13
Dijagram 3.	Rezultati umjeravanja skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 1 .	15
Dijagram 4.	Rezultati umjeravanja skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 2 .	15
Dijagram 5.	Rezultati umjeravanja skale pod nagibom	17
Dijagram 6.	Mjerenje 1 utjecaj temperature na pomak	19
Dijagram 7.	Mjerenje 2 utjecaj temperature na pomak	20
Dijagram 8.	Mjerenje 3 utjecaj temperature na pomak	21
Dijagram 9.	Usporedba najbolje moguće postavljene skale i skale pod kutem u položaju 122	
Dijagram 10.	Usporedba najbolje moguće postavljene skale i skale pod kutem u položaju 223	
Dijagram 11.	Rezultati umjeravanja najbolje moguće postavljene skale i skale pod nagibom	

24

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>x</i>	nazivna vrijednost koja se mjeri	mm
<i>y</i>	aproksimacija greške	mm

SAŽETAK

Tema rada bila je opisati sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a te odrediti utjecaj postavljanja preciznih mjernih skala na točnost umjeravanja. Cilj ispitivanja bio je utvrditi koliko pogrešno postavljanje precizne mjerne skale utječe na rezultate umjeravanja provedenim laserskim interferometarskim sustavom. Na početku rada dan je opis sustava i dijelova sustava za umjeravanje preciznih mjernih skala. U nastavku opisan je postupak umjeravanja, te analiza rezultata. U zaključku je definirano koje greške kod postavljanja preciznih mjernih skala utječu na rezultate umjeravanja.

Ključne riječi: umjeravanje, precizna mjerna skala, laserski interferometar, precizna mjerenja

SUMMARY

The topic of the paper is to describe the system for calibration of precision scales in the The Precision Length Measurement Laboratory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture and to determine the influence of the positioning of precision scales on calibration accuracy. The aim of the study was to determine how a misaligned precision scale affects calibration, which was performed with a laser interferometer system. In the beginning of the paper a description of the system and the components of the precision scale calibration system is given. Following, the calibration process and the results analysis are included. In the end, it is defined which errors in the positioning of the precision scales affect the calibration results.

Key words: calibration, precision line scale, laser interferometer, precise measurement

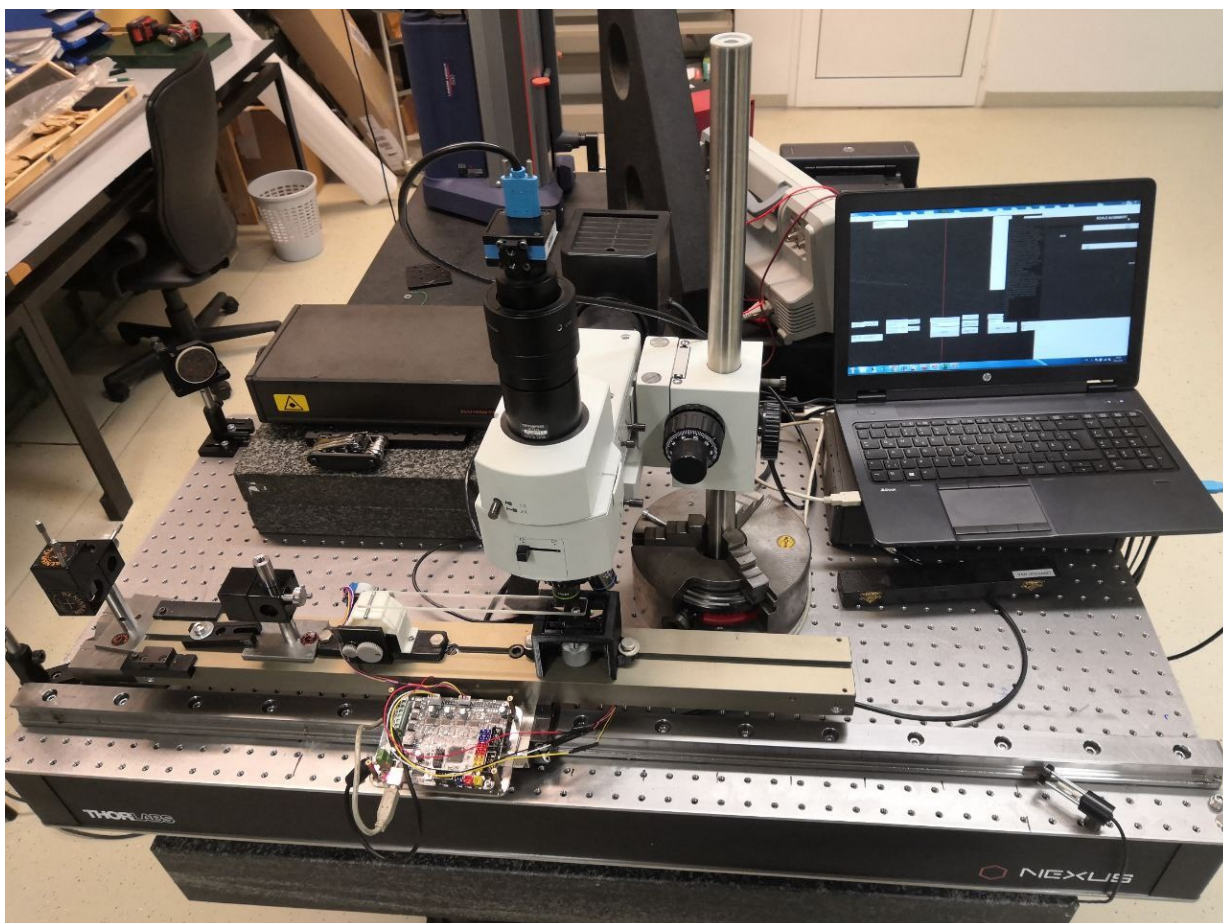
1. UVOD

U današnje doba kada su želje kupca sve zahtjevnije i sve treba biti po mjeri, mjerenje je vrlo važan dio procesa proizvodnje. No kako bi uređaj za mjerenje davao pouzdane rezultate, prvo ga treba umjeriti. Umjeravanje (eng. *calibration*) je skup postupaka kojima se uspostavlja odnos između vrijednosti koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima [1]. Cilj rada je odrediti kako postavljanje mjerila, u ovom slučaju preciznih mjernih skala, utječe na točnost umjeravanja te opisati sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a.

2. OPIS SUSTAVA ZA UMJERAVANJE

2.1. Sustav za umjeravanje

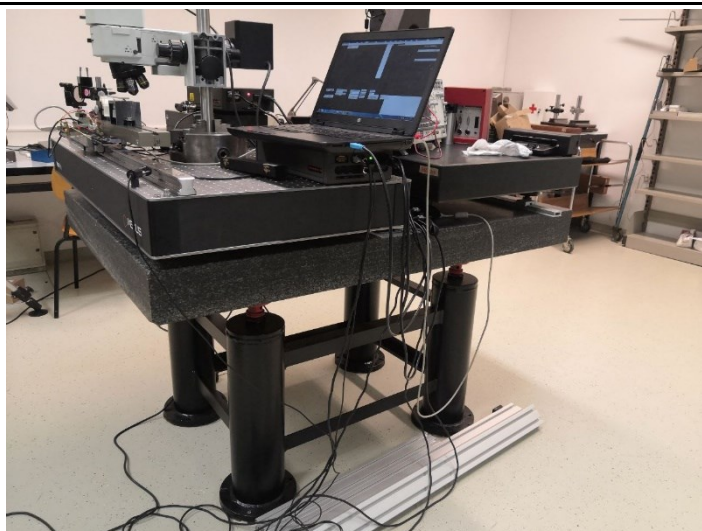
Sustav za umjeravanje koji će se ispitivati u ovom radu konstruiran je u svrhu umjeravanja preciznih mjernih skala duljine do 0,5 m [Slika 1]. Nalazi se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina. Neki od glavnih dijelova su: optički stol, linearna vodilica, precizna mjerna skala, dva koračna motora, laserski mjerni sustav te mikroskop s kamerom i računalom.



Slika 1. Sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala

2.2. Optički stol

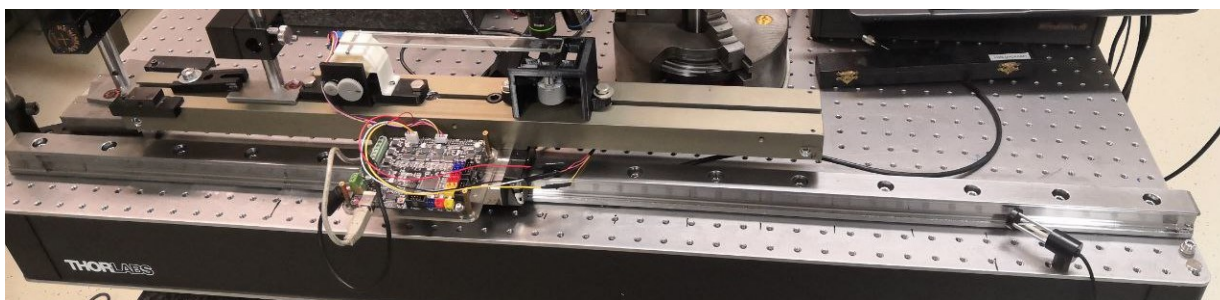
Optički stol je vrsta stola koja služi za podupiranje laserskih i optičkih pokusa, u ovome slučaju umjeravanje pomoću laserskog interferometra. Površina stola napravljena je s minimalnim odstupanjem te da ostane kruta tijekom podnošenja opterećenja [2]. Optički stol u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina postavljen je na mramornoj ploči te koristi pneumatske noge kako bi se smanjili utjecaji vibracija iz poda [Slika 2].



Slika 2. Optički stolovi na mramornoj ploči

2.3. Linearna vodilica

Na optičkom stolu montirana je vodilica s postoljem za prihvat skala [Slika 3]. Napravljeno je od aluminijske dok je vodilica od nehrđajućeg čelika. Na postolju se nalaze dva koračna motora u kućištima. Postolje se po vodilici može kretati samo po jednoj (y) osi.

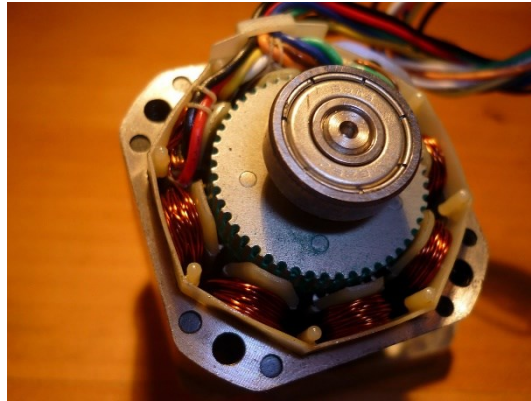


Slika 3. Linearna vodilica s postoljem za prihvat skala

2.4. Koračni motori

2.4.1. Koračni motor

Koračni motor je vrsta DC motora s rotiranjem u koracima [Slika 4]. Motor može zauzeti i ostati u bilo kojem koraku bez senzora za poziciju motora. Rotira pomoću više elektromagneta koji služe kao stator postavljeni oko rotora (ozubljeni čelični dio) [Slika 4]. Kada se pomoću mikrokontrolera prvom elektromagnetu da struja rotor se pomoću magnetske sile približi i poravna s prvim elektromagnetom te je u tom trenutku malo pomaknut od sljedećeg elektromagneta. U trenutku kada se prvi elektromagnet ugasi, a drugi upali, rotor rotira kako bi se poravnao s drugim, to predstavlja jedan korak motora [3].



Slika 4. Koračni motor [3]

2.4.2. Koračni motor 28BYJ-48

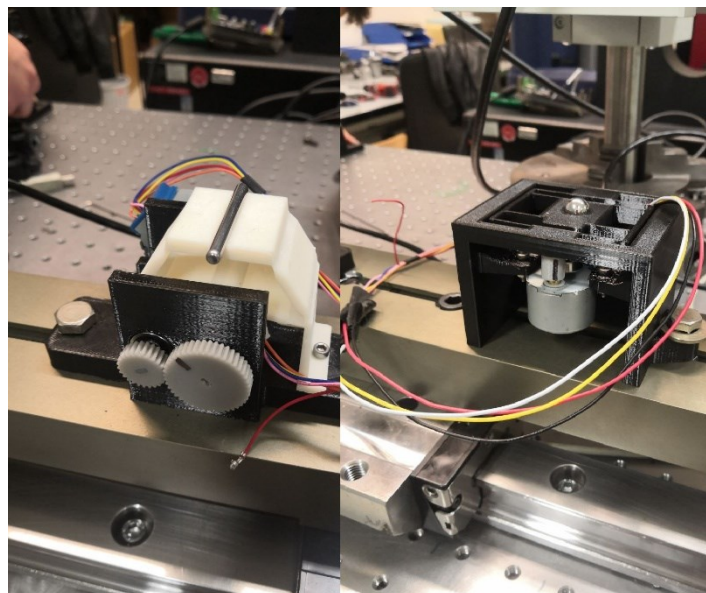
Koračni motori koji se koriste u ovome sustavu su 28BYJ-48. Služe kao aktuatori kojima se upravlja pomoću mikrokontrolera spojenog na računalo. Pomoću sustava zupčanika motor ima 2038 koraka u jednom okretaju.

Tehničke specifikacije motora [4]:

- radni napon: 5 V
- frekvencija: 100 hz

2.4.3. Kućište s motorima

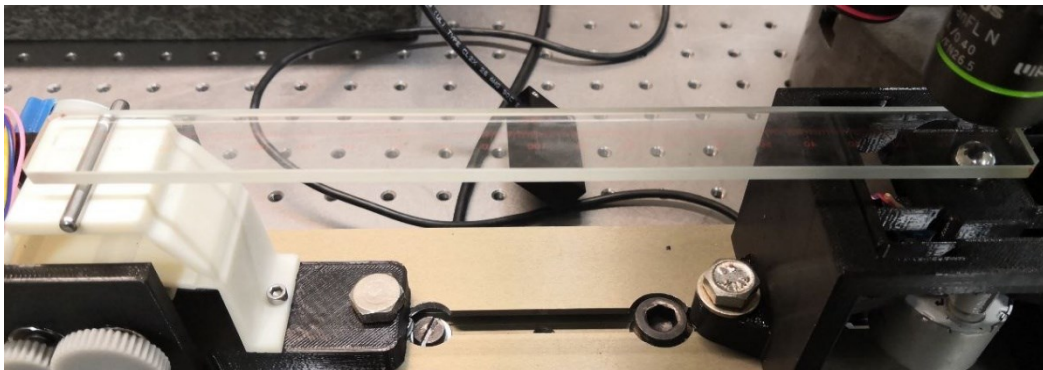
Motori su smješteni u 3D printanim kućištima konstruiranim kako bi jedan od motora omogućio fine pomake precizne mjerne skale u z osi, a drugi u x osi [Slika 5].



Slika 5. Motori u kućištima

2.5. Precizna mjerna skala

Precizna mjerna skala koja se umjeravanja u ovom ispitivanju je staklena, duljine 200 mm te ima ugravirane brojeve i mjerne linije. Postavljena je na kućišta što omogućuje precizno namještanje skale. Očitavanje vrijednosti na skali vrši se pomoću mikroskopa [Slika 6].



Slika 6. Precizna mjerna skala

2.6. Mikroskop

2.6.1. Mikroskop definicija

Mikroskop je instrument koji služi za prikazivanje uvećane slike predmeta. Najpoznatija vrsta je optički mikroskop koji stvara sliku pomoću staklenih leća i svjetla. Sastoji se od dva sustava leća, jedan na gornjem kraju kroz koji se promatra predmet, okular i jedan na donjem kraju iznad promatranog predmeta, objektiv. Moderni optički mikroskopi mogu imati uvećanja i do 2000 puta. Osim uvećanja bitna je i sposobnost razlučivanja mikroskopa pomoću koje možemo vidjeti dva susjedna elementa u predmetu odvojeno, ovisi o objektivu i duljini vala svjetlosti koja služi za rasvjetu [5].

2.6.2. Mikroskop Olympus

Mikroskop koji se koristi u ovom umjeravanju je optički mikroskop Olympus s objektivima 10x, 20x i 50x te okularom 10x što nam daje uvećanja od 100 do 500 puta [Slika 7].



Slika 7. Olympus mikroskop

2.7. Kamera DMK 37AUXC264

Kamera DMK 37AUX264 je industrijska USB kamera koja je montirana na mikroskop i povezana na računalo kako bi se omogućilo očitavanje vrijednosti sa skale [Slika 8].

Tehničke specifikacije kamere [6]:

- rezolucija: 5 MP
- dinamički raspon: 12 bit
- brzina snimanja: 38 sličica u sekundi



Slika 8. Kamera DMK 37AUX264

2.8. Laserski interferometarski sustav

2.8.1. Laser

Laser (pojačanje svjetlosti s pomoću stimulirane emisije zračenja) je uređaj za stvaranje usmjerenog elektromagnetskog zračenja. Zraka nastaje kada se elektronima u optičkim materijalima (staklo, kristal...) dovede energija iz svjetla ili električne struje. Ta energija omogućuje atomima da pređu u stanje više energije, a kad se vraćaju u stanje niže energije ispuste svjetlosnu česticu [7].

2.8.2. Renishaw ML10 laser

Uređaj korišten za umjeravanje je Renishaw ML10 laser koji služi kao interferometar [Slika 9]. Laser je spojen na računalo s kojeg se vrši očitavanje vrijednosti.

Karakteristike ML10 lasera [8]:

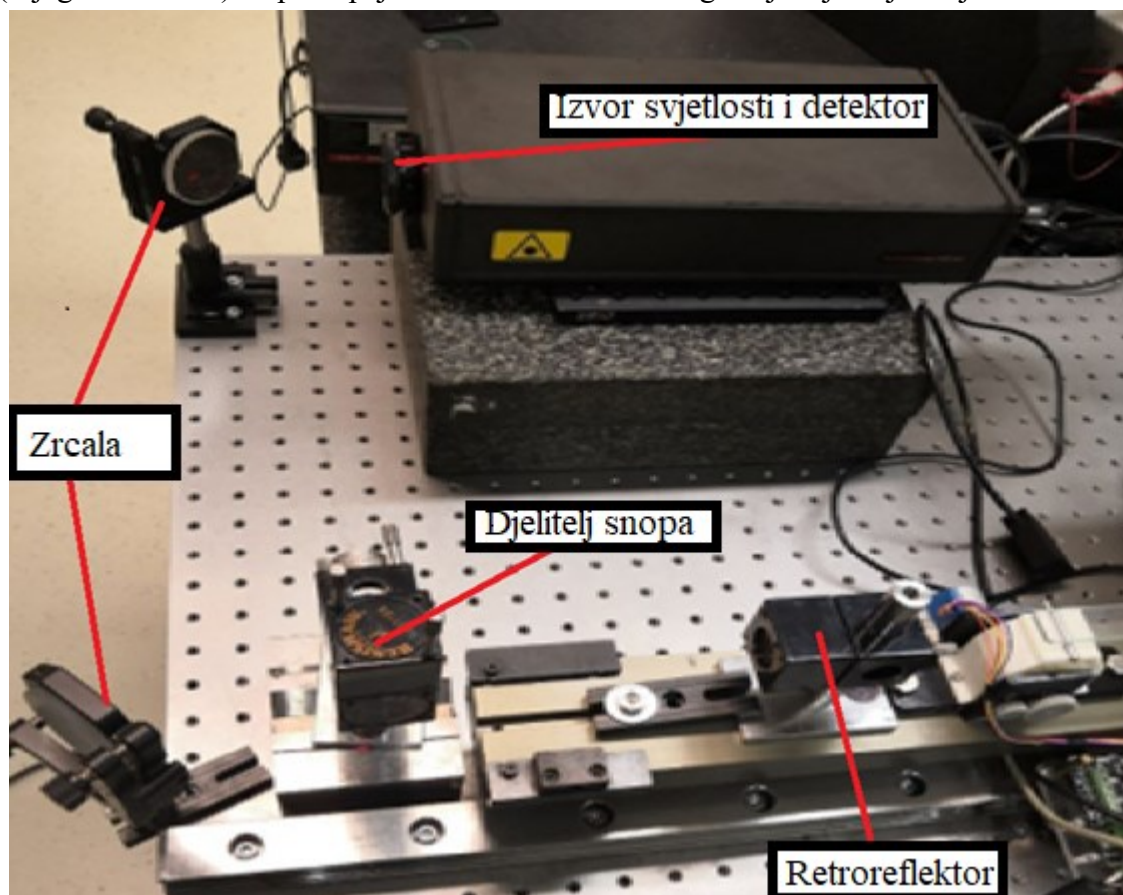
- helij neonski laser
- rezolucija mjerenja: 1 nm
- domet mjerenja: 40 m
- valna duljina: 632,9 nm
- mogućnost mjerenja: pravokutnost, ravnost, kut nagiba, položaj (duljina)

2.8.3. Laserski interferometar

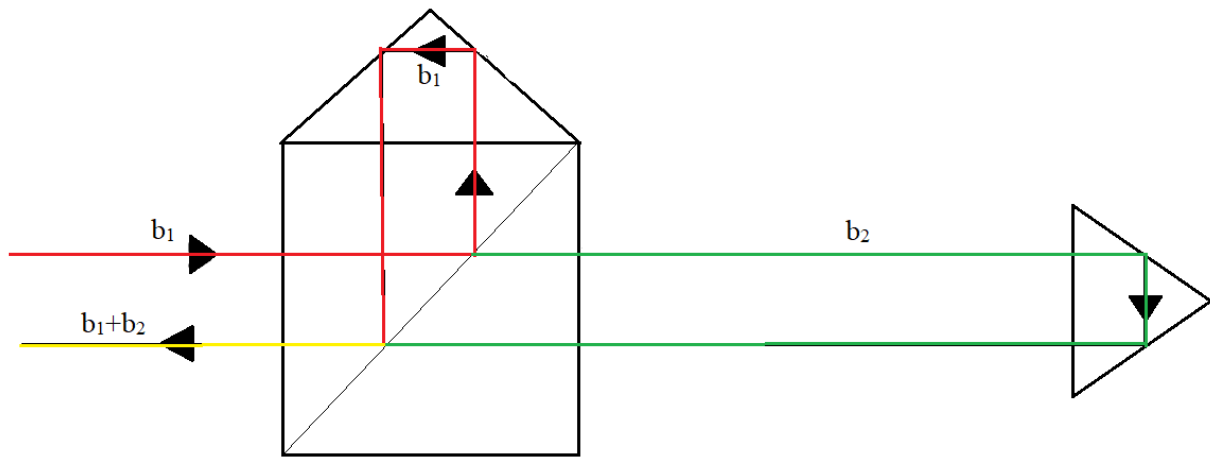
Laserski interferometar je instrument koji prima elektromagnetske valove izvora uz pomoć detektora te se s pomoću interferencije valova provode precizna mjerenja [9]. Potrebni dijelovi su izvor svjetlosti (laser), (zrcala), djeliteľ snopa (*beam splitter*) i retroreflektor [Slika 9].

2.8.4. Princip rada laserskog interferometra

Laser šalje zraku koja se odbija od zrcala, prolazi kroz djeliteľ snopa i dolazi do retroreflektora gdje se odbija i vraća u detektor [Slika 10]. U razdvajaču zraka se dijeli na dva dijela od kojih se jedan dio zrake odbija i vraća u detektor. Razdvajač zraka je stacionarni dio, a retroreflektor se giba s mjernom skalom koja se ispituje. Pošto laserske zrake putuju drugačijim putanjama prije vraćanja u detektor njihove se valne duljine (brjegovi i dolovi) ne poklapaju. Pomoću te razlike moguće je mjerenje duljine.



Slika 9. Laserski interferometarski sustav



Slika 10. Princip rada laserskog interferometra

3. UMJERAVANJE

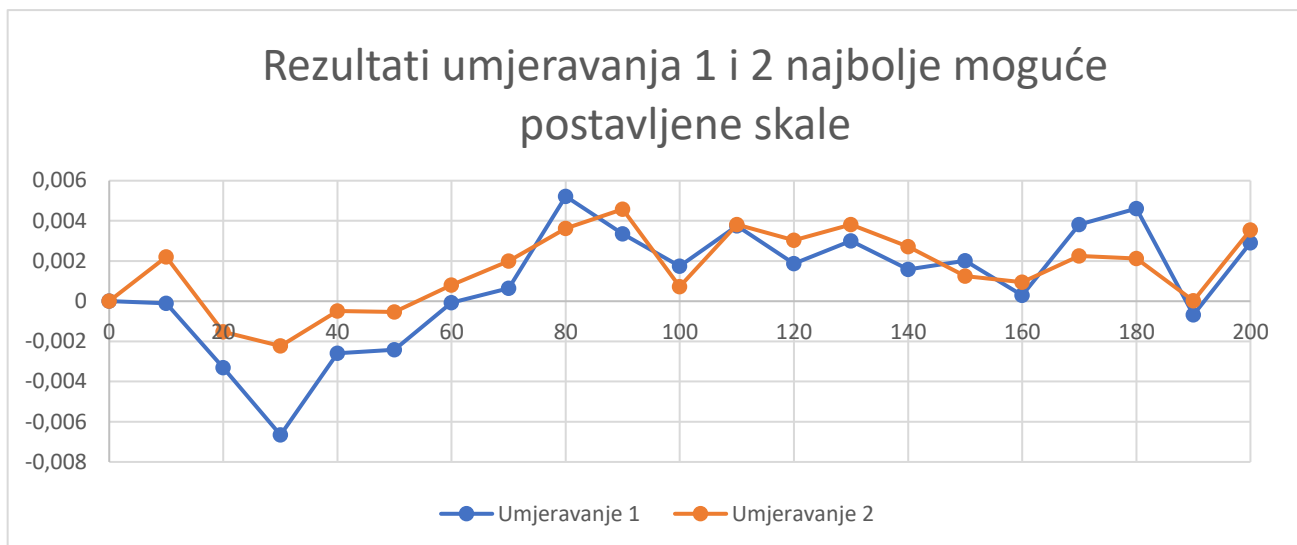
3.1. Umjeravanje najbolje moguće postavljene skale

Kako bi se analizirao utjecaj postavljanja preciznih mjernih skala na točnost umjeravanja potrebno je prvo dobiti rezultate umjeravanja u najboljem mogućem slučaju, tj. kada je precizna mjerna skala paralelna s vodilicom. Paralelnost skale s vodilicom postignuto je pomoću motora za fini pomak skale i kamere s kojom je utvrđeno da su oba kraja skale jednako usmjerena pod mikroskopom. Kada je skala postavljena u paralelni položaj i dovedena na 0 mm, na laserskom interferometru se vrijednost resetira i postavlja na 0 mm. Zatim se skala pomiče za 10 mm te se dokumentira očitavanje s interferometra svakih 10 mm [Slika 11].



Slika 11. Očitavanje s laserskog interferometra i mikroskopa

Umjeravanje je ponovljeno 4 puta radi povećanja pouzdanosti rezultata i eliminacije potencijalnih grubih grešaka. U umjeravanju 1 i 2 očitavanje na mikroskopu je ravnano s lijevom rubom mjerne linije na skali što uvodi pretpostavku da je svaka mjerna linija na skali jednake duljine [Dijagram 1 i Tablica 1]. U umjeravanju 3 i 4 očitavanje na mikroskopu je ravnano sa sredinom mjerne linije [Dijagram 2 i Tablica 2].



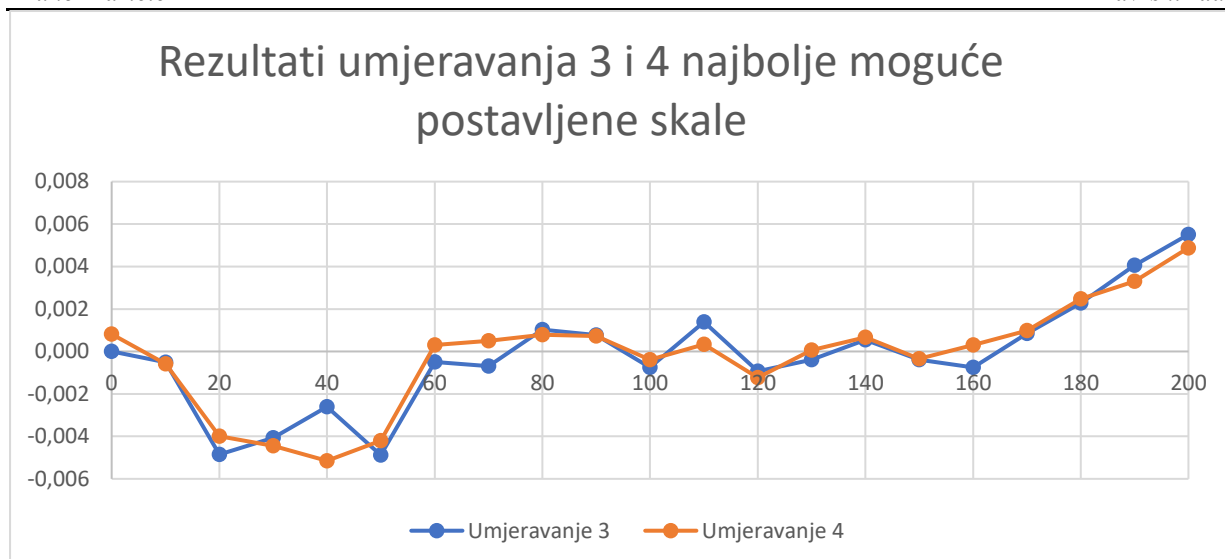
Dijagram 1. Rezultati umjeravanja 1 i 2 najbolje moguće postavljene skale

Tablica 1. Rezultati umjeravanja 1 i 2 najbolje moguće postavljene skale

Nazivna vrijednost, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 1, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 2, mm	Odstupanje mjerenje 1, μm	Odstupanje mjerenje 2, μm
0	0	0	0	0
10	9,9999	10,00221	-0,10	2,21
20	19,9967	19,99848	-3,30	-1,52
30	29,99334	29,99777	-6,66	-2,23
40	39,99741	39,99951	-2,59	-0,49
50	49,99759	49,99947	-2,41	-0,53
60	59,99993	60,00081	-0,07	0,81
70	70,00064	70,002	0,64	2
80	80,00522	80,00362	5,22	3,62
90	90,00335	90,00458	3,35	4,58
100	100,00174	100,00072	1,74	0,72
110	110,00375	110,00381	3,75	3,81
120	120,00187	120,00303	1,87	3,03
130	130,00301	130,00381	3,01	3,81
140	140,00158	140,00272	1,58	2,72
150	150,00202	150,00125	2,02	1,25
160	160,0003	160,00095	0,30	0,95
170	170,00382	170,00225	3,82	2,25
180	180,00462	180,00212	4,62	2,12
190	189,99932	190,00002	-0,68	0,02
200	200,0029	200,00355	2,90	3,55

Tablica 2. Rezultati umjeravanja 3 i 4 najbolje moguće postavljene skale

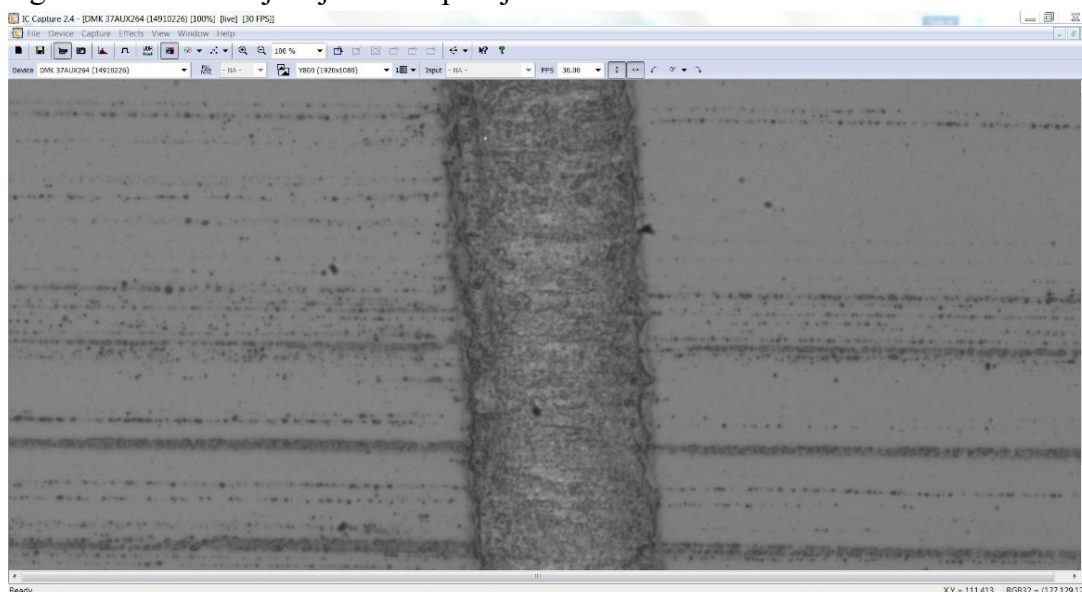
Nazivna vrijednost, mm	Izmjerena vrijednost mjerjenje 3, mm	Izmjerena vrijednost mjerjenje 4, mm	Odstupanje mjerjenje 3, μm	Odstupanje mjerjenje 4, μm
0	0	0,00081	0	0,81
10	9,99949	9,99941	-0,51	-0,59
20	19,99515	19,99601	-4,85	-3,99
30	29,99593	29,99555	-4,07	-4,45
40	39,99739	39,99485	-2,61	-5,15
50	49,99512	49,99579	-4,88	-4,21
60	59,99951	60,00031	-0,49	0,31
70	69,99931	70,0005	-0,69	0,50
80	80,00103	80,00078	1,03	0,78
90	90,00077	90,00072	0,77	0,72
100	99,99925	99,99961	-0,75	-0,39
110	110,00139	110,00034	1,39	0,34
120	119,99907	119,99877	-0,93	-1,23
130	129,99961	130,00006	-0,39	0,06
140	140,00055	140,00066	0,55	0,66
150	149,99961	149,99965	-0,39	-0,35
160	159,99925	160,00031	-0,75	0,31
170	170,00085	170,00098	0,85	0,98
180	180,00228	180,00247	2,28	2,47
190	190,00406	190,0033	4,06	3,30
200	200,00551	200,00488	5,51	4,88



Dijagram 2. Rezultati umjeravanja 3 i 4 najbolje moguće postavljene skale

3.2. Umjeravanje s pogreškom u x osi

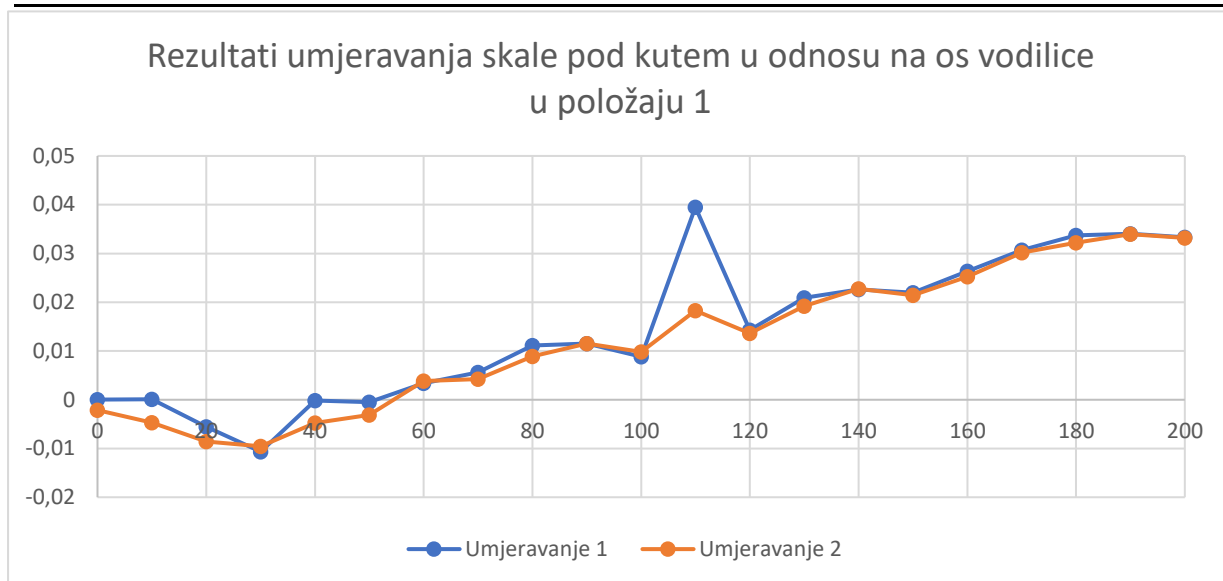
Za određivanje utjecaja pogrešnog postavljanja skale u x osi skala je postavljena pod kutem u odnosu na os vodilice, tj. lasera. U položaju 1 skala je ukošena tako da se u vidnom polju mikroskopa na lijevom kraju (200 mm) vidi vrh mjerne linije na skali, a na desnom kraju (0 mm) dno mjerne linije na skali što predstavlja realni slučaj maksimalne pogreške postavljanja skale. Slika 12 prikazuje ukošenu mjernu liniju pod mikroskopom. Nakon postavljanja skale ponovljen isti postupak umjeravanja kao u 3.1. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3 i dijagramu 3. Kod nazivne vrijednosti 110 mm u umjeravanju 1 primjećuje se nagli skok, to je gruba greška nastala uslijed ljudske nepažnje.



Slika 12. Mjerna linija pod kutem na skali pod mikroskopom

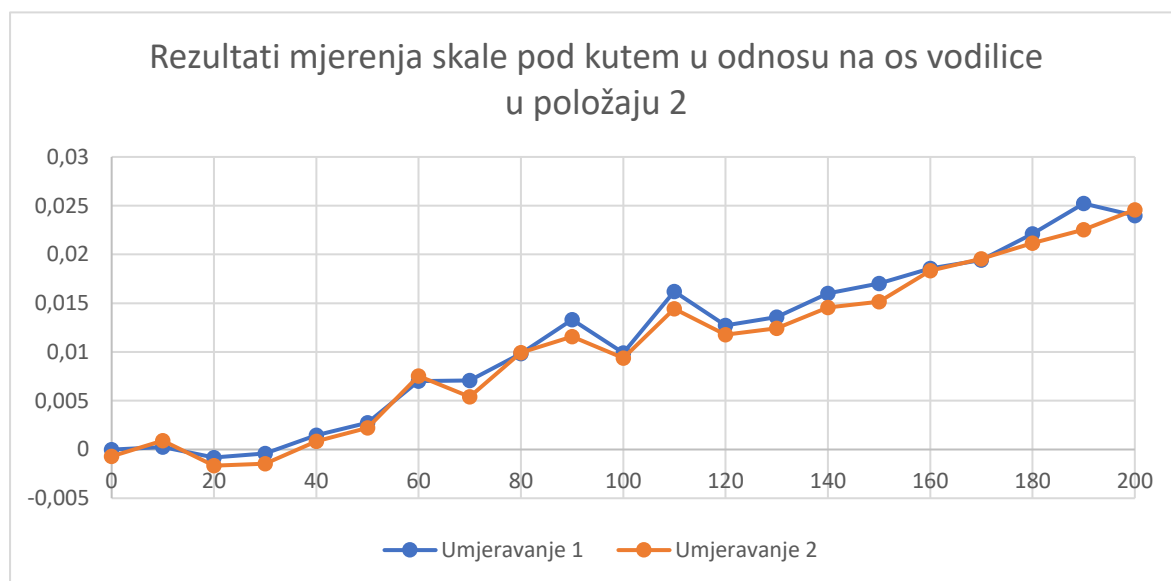
Tablica 3. Rezultati umjeravanja 1 i 2 skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 1

Nazivna vrijednost, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 1, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 2, mm	Odstupanje mjerenje 1, μm	Odstupanje mjerenje 2, μm
0	0	-0,00213	0	-2,13
10	10,00011	9,99531	0,11	-4,69
20	19,99445	19,99141	-5,55	-8,59
30	29,98935	29,99045	-10,65	-9,55
40	39,99981	39,99527	-0,19	-4,73
50	49,99951	49,99689	-0,49	-3,11
60	60,00341	60,00385	3,41	3,85
70	70,00564	70,00423	5,64	4,23
80	80,01115	80,00888	11,15	8,88
90	90,01152	90,01155	11,52	11,55
100	100,00885	100,00979	8,85	9,79
110	110,03950	110,01829	39,5	18,29
120	120,01431	120,01362	14,31	13,62
130	130,02088	130,01919	20,88	19,19
140	140,02259	140,02278	22,59	22,78
150	150,02199	150,02145	21,99	21,45
160	160,02637	160,02525	26,37	25,25
170	170,03069	170,03015	30,69	30,15
180	180,03371	180,03217	33,71	32,17
190	190,03407	190,03395	34,07	33,95
200	200,03329	200,03321	33,29	33,21



Dijagram 3. Rezultati umjeravanja skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 1

U položaju 2 skala je ukošena tako da se na lijevom kraju vidi dno mjerne linije, a na desnom vrh mjerne linije na skali, tj. suprotno nego u položaju 1. Dobiveni rezultati prikazani su u dijagramu 4 i tablici 4.



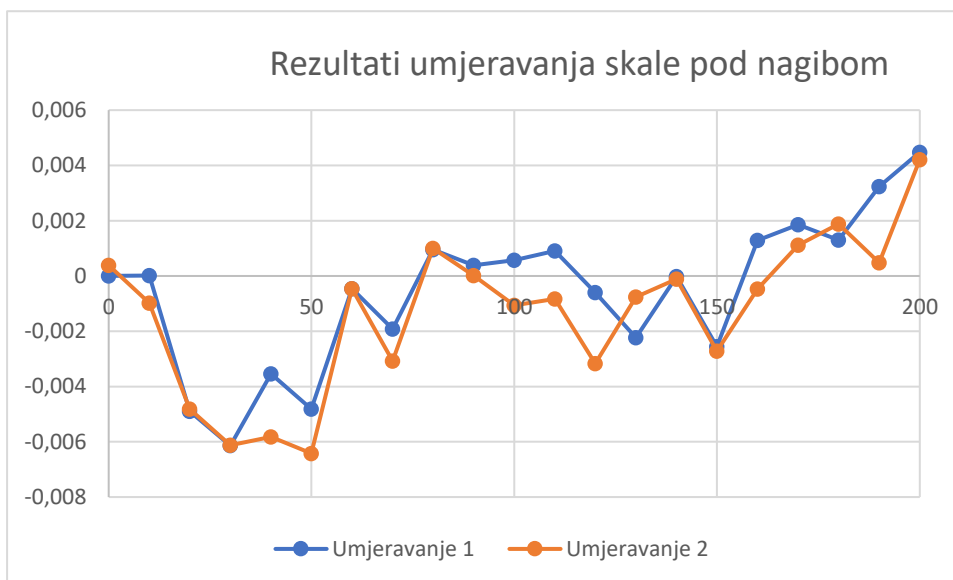
Dijagram 4. Rezultati umjeravanja skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 2

Tablica 4. Rezultati umjeravanja 1 i 2 skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 2

Nazivna vrijednost, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 1, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 2, mm	Odstupanje mjerenje 1, μm	Odstupanje mjerenje 2, μm
0	0	-0,00071	0	-0,71
10	10,00026	10,0092	0,26	0,92
20	19,99918	19,99834	-0,82	-1,66
30	29,99961	29,99855	-0,39	-1,45
40	40,00147	40,00085	1,47	0,85
50	50,00275	50,00221	2,75	2,21
60	60,00701	60,00753	7,01	7,53
70	70,00709	70,00539	7,09	5,39
80	80,00985	80,00992	9,85	9,92
90	90,01333	90,01158	13,33	11,58
100	100,00989	100,00939	9,89	9,39
110	110,01622	110,01444	16,22	14,44
120	120,01271	120,01178	12,71	11,78
130	130,01359	130,01242	13,59	12,42
140	140,01601	140,01455	16,01	14,55
150	150,01701	150,01515	17,01	15,15
160	160,01857	160,01833	18,57	18,33
170	170,01941	170,01955	19,41	19,55
180	180,02211	180,02115	22,11	21,15
190	190,02522	190,02255	25,22	22,55
200	200,02398	200,02458	23,98	24,58

3.3. Umjeravanje s pogreškom u z osi

Za određivanje utjecaja pogrešnog postavljanja skale u z osi skala je nagnuta tako da joj je lijevi kraj (200 mm) na 20 μm viši od desnog (0 mm) što predstavlja realan slučaj maksimalne pogreške zato što se na oba kraja još može očitati vrijednost na mikroskopu, tj. računalu. Zatim se ponavlja postupak umjeravanja kao u 3.1. i 3.2. Rezultati umjeravanja prikazani su u dijagramu 5 i tablici 5.



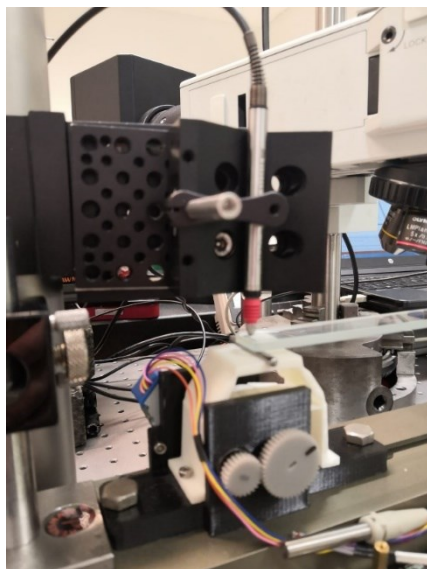
Dijagram 5. Rezultati umjeravanja skale pod nagibom

Tablica 5. Rezultati mjerenja 1 i 2 skale pod nagibom

Nazivna vrijednost, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 1, mm	Izmjerena vrijednost mjerenje 2, mm	Odstupanje mjerenje 1, μm	Odstupanje mjerenje 2, μm
0	0	0,00039	0	0,39
10	10,00002	9,99902	0,02	-0,98
20	19,9951	19,99518	-4,9	-4,82
30	29,99386	29,99388	-6,14	-6,12
40	39,99646	39,99418	-3,54	-5,82
50	49,99518	49,99358	-4,82	-6,42
60	59,99954	59,99954	-0,46	-0,46
70	69,99808	69,99692	-1,92	-3,08
80	80,00095	80,001	0,95	1
90	90,00039	90,00001	0,39	0,01
100	100,00057	99,99894	0,57	-1,06
110	110,00091	109,99917	0,91	-0,83
120	119,9994	119,99683	-0,6	-3,17
130	129,99777	129,99924	-2,23	-0,76
140	139,99998	139,99989	-0,02	-0,11
150	149,99744	149,99728	-2,56	-2,72
160	160,00129	159,99953	1,29	-0,47
170	170,00186	170,00112	1,86	1,12
180	180,0013	180,00188	1,3	1,88
190	190,00324	190,00048	3,24	0,48
200	200,00448	200,00421	4,48	4,21

3.4. Utjecaj pomaka uslijed promjene temperature

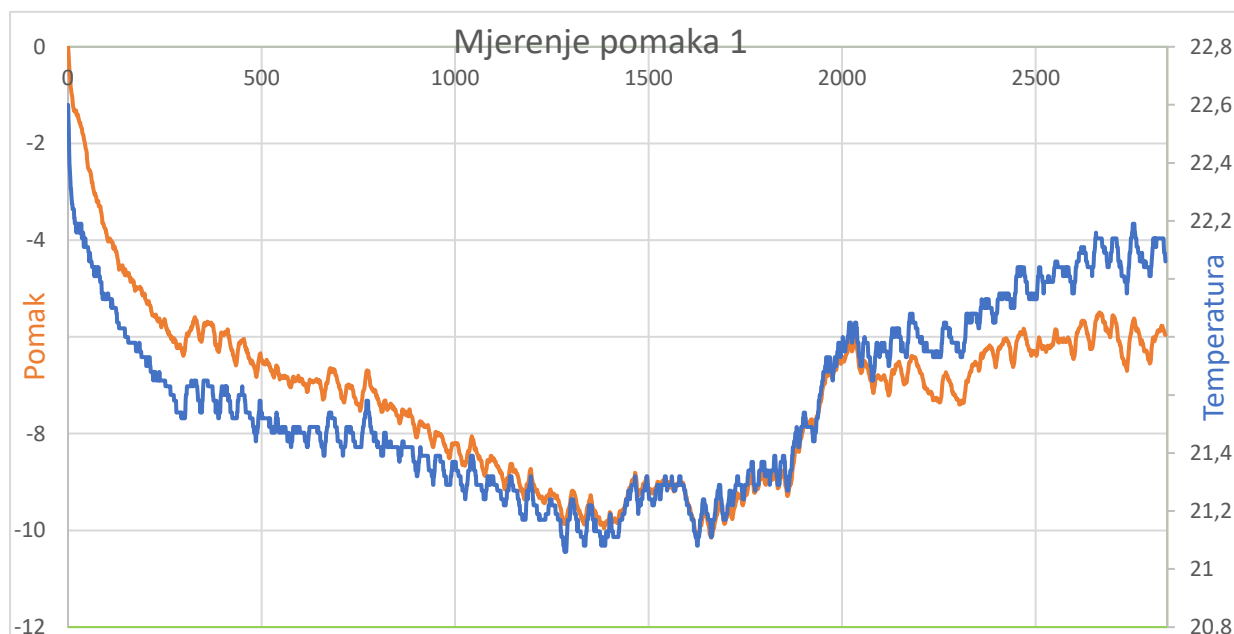
Nakon ispitivanja utjecaja pogrešno postavljene mjerne skale, ispitan je utjecaj pomaka uslijed promjene temperature na vertikalni pomak skale. Pomoću uređaja na slici 13 kojeg se postavilo iznad ruba mjerne skale na kućištu za fine pomake u osi z, obavljena su 3 mjerenja gdje se u jednom mjerenju uzimao podatak o temperaturi i pomaku svakih 30 s, a u druga dva mjerenja svakih 5 minuta.



Slika 13. Postav za mjerenje pomaka mjerne skale

3.4.1. Mjerenje pomaka 1

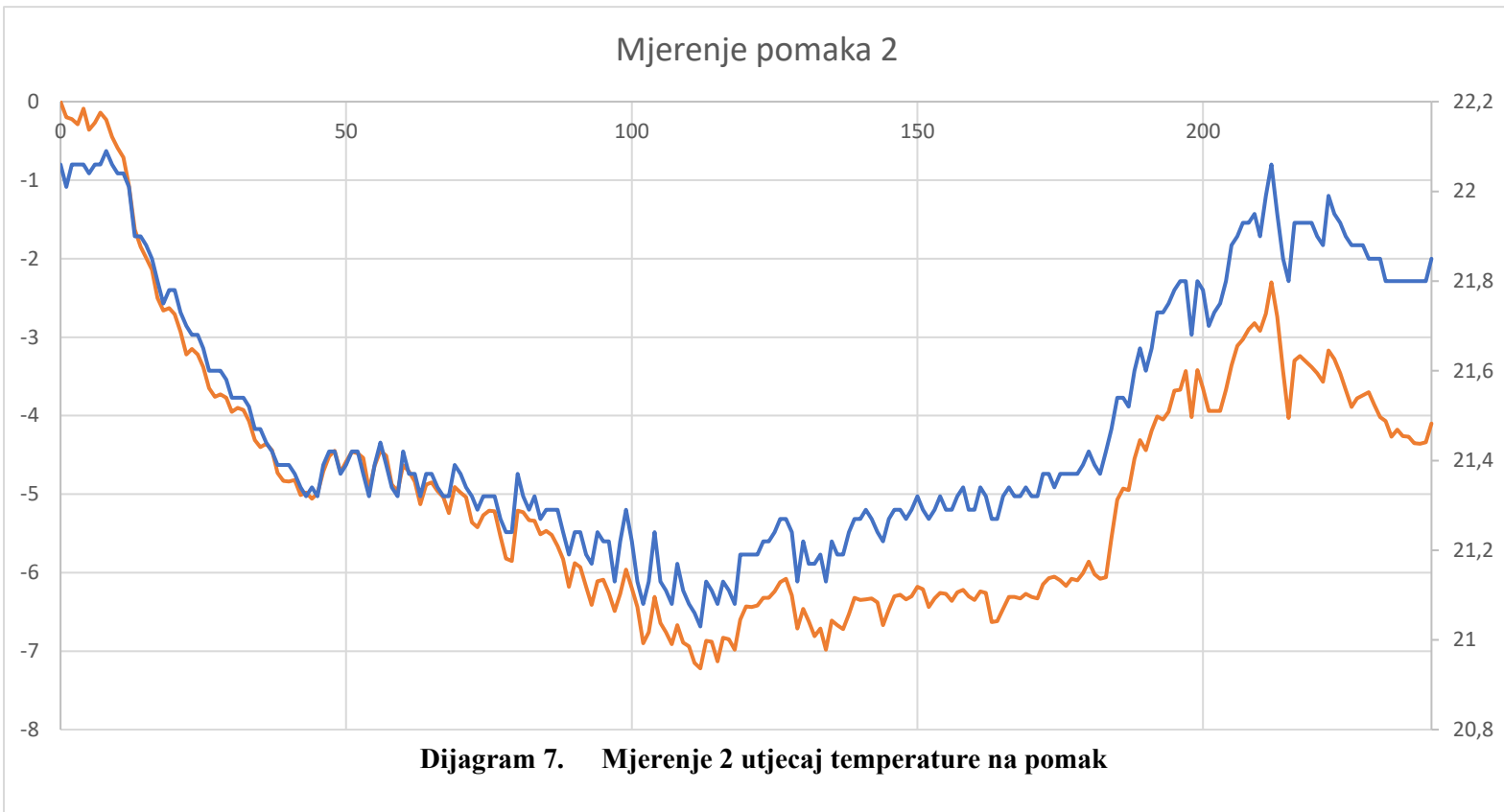
Mjerenje 1 trajalo je 24 sata. Dobiveni rezultati prikazani su u dijagramu 6.



Dijagram 6. Mjerenje 1 utjecaj temperature na pomak

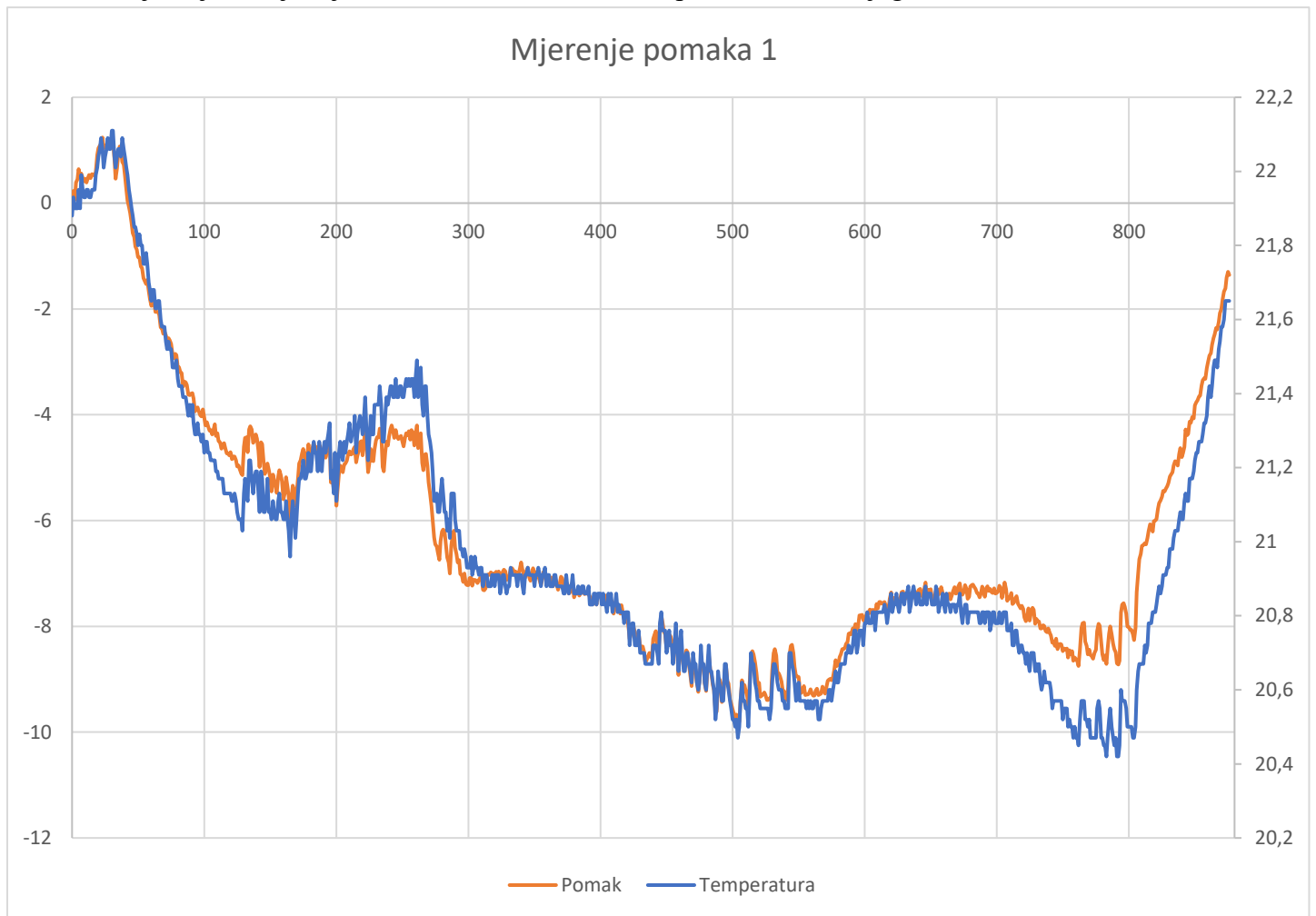
3.4.2. Mjerenje pomaka 2

Mjerenje 2 trajalo je 21 sat. Dobiveni rezultati prikazani su u dijagramu 7.



3.4.3. Mjerenje pomaka 3

Mjerenje 3 trajalo je 73 sata. Dobiveni rezultati prikazani su u dijagramu 8.



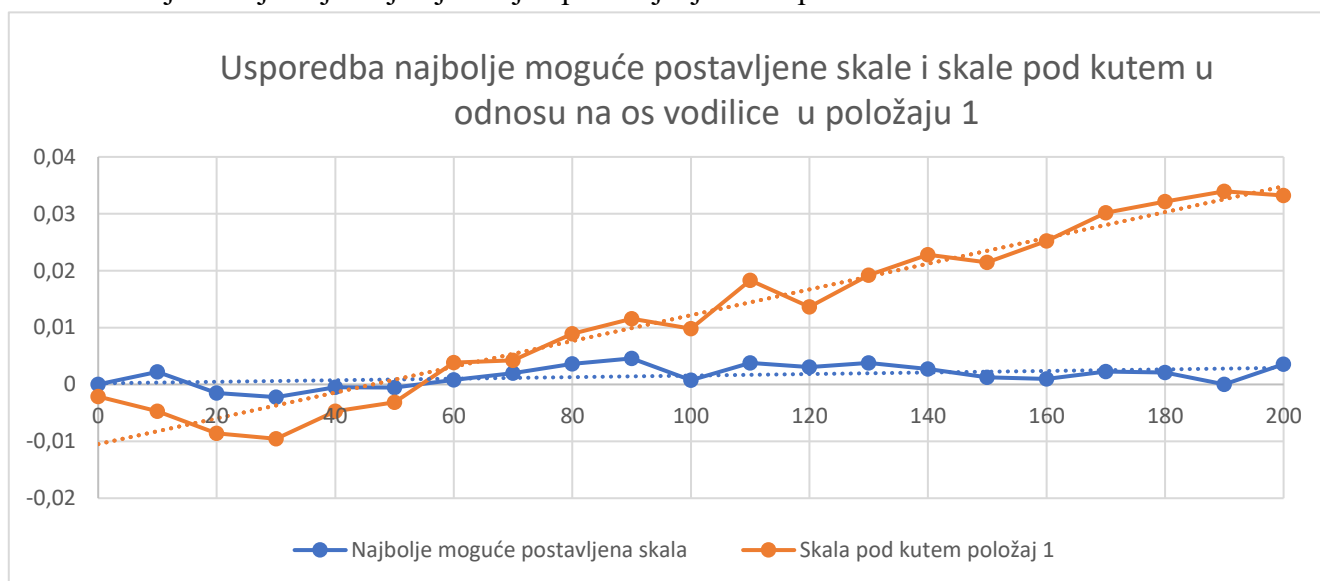
Dijagram 8. Mjerenje 3 utjecaj temperature na pomak

4. ANALIZA PODATAKA

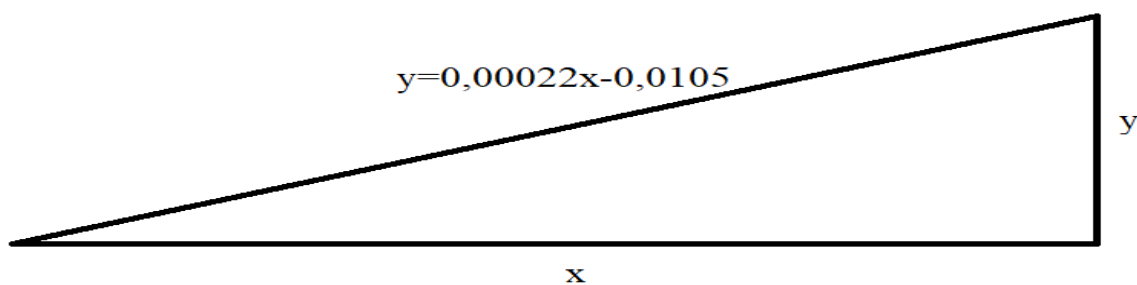
4.1. Utjecaj pogreške u x osi

4.1.1. Položaj 1

U dijagramu 9 prikazani su rezultati umjeravanja najbolje moguće postavljene skale i skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 1. Odmah se primjećuje razlika u veličini odstupanja od referente vrijednosti. Najveće odstupanje u najboljem mogućem slučaju je $6,66 \mu\text{m}$ [Tablica 1] dok je slučaju kada je skala pod kutem (u položaju 1) $34,07 \mu\text{m}$ [Tablica 3] što je razlika od $27,41 \mu\text{m}$. Rezultati skale pod kutem pokazuju trend rasta odstupanja od nazivne vrijednosti kako se izmjerene vrijednosti udaljavaju od početnog položaja (0 mm). Jednadžba pravca rezultata mjerenja ukošene skale je $y=0,00022x-0,0105$. Pomoću trokuta greške [Slika 14] kojem je hipotenuza pod nagibom pravca rezultata umjeravanja ukošene skale, jedna kateta predstavlja nazivnu vrijednost koja se mjeri x , a druga grešku y , može se aproksimirati greška kod umjeravanja koja se javlja uslijed postavljanja skale pod kutem u odnosu na os vodilice.



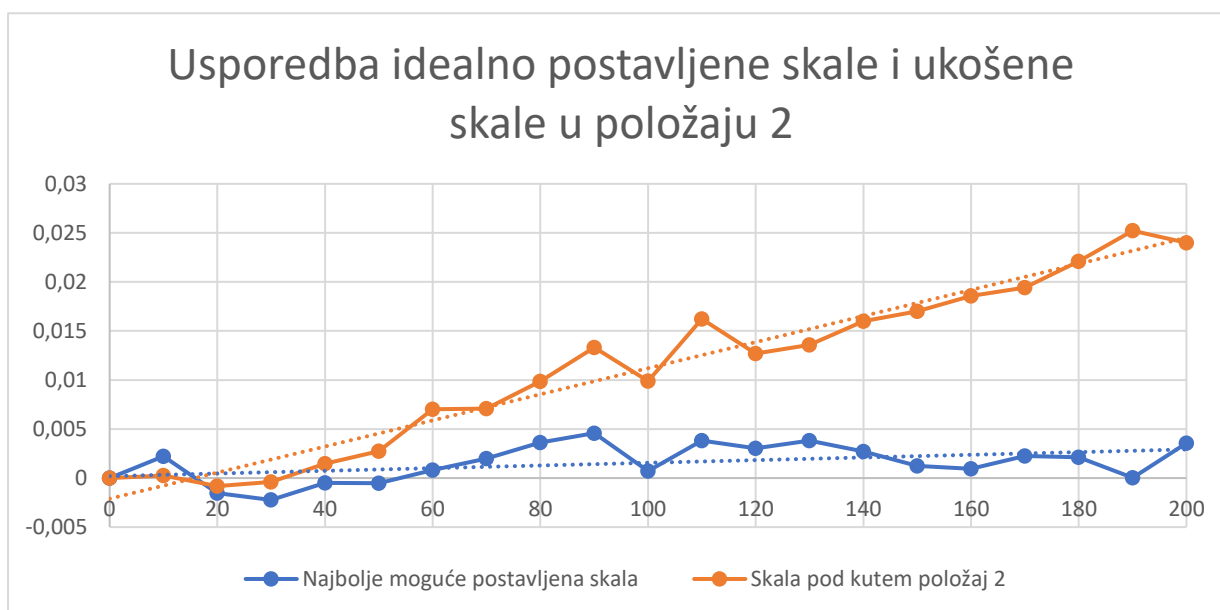
Dijagram 9. Usporedba najbolje moguće postavljene skale i skale pod kutem u položaju 1



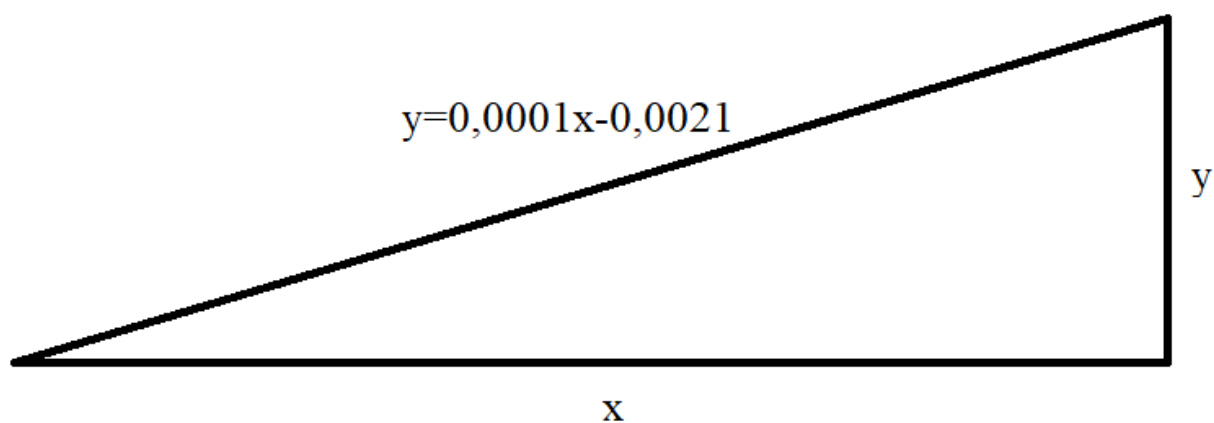
Slika 14. Trokut greške za položaj 1

4.1.2. Položaj 2

U Dijagramu 10 uspoređeni su rezultati umjeravanja najbolje moguće postavljene skale i skale pod kutem u odnosu na os vodilice u položaju 2. Najveće odstupanje u najboljem mogućem slučaju je $6,66 \mu\text{m}$ [Tablica 1] dok je slučaju kada je skala ukošena (u položaju 2) $25,22 \mu\text{m}$ [Tablica 4] što je razlika od $18,56 \mu\text{m}$. Rezultati ukošene skale pokazuju trend rasta odstupanja od nazivne vrijednosti kako se izmjerene vrijednosti udaljavaju od početnog položaja (0 mm). Jednadžba pravca rezultata mjerenja skale pod kutem je $y=0,0001x-0,0021$. Trokut greške za položaj 2 prikazan je na Slici 15.



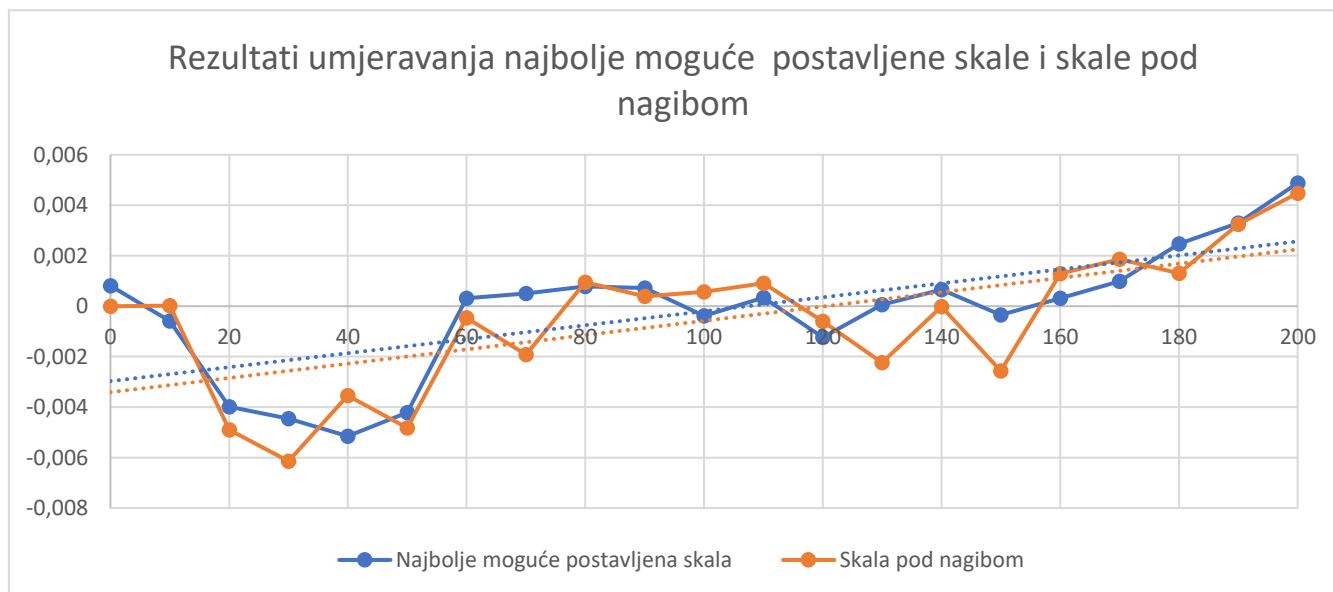
Dijagram 10. Usporedba najbolje moguće postavljene skale i skale pod kutem u položaju 2



Slika 15. Trokut greške za položaj 2

4.2. Utjecaj pogreške u z osi

U Dijagramu 11 uspoređeni su rezultati umjeravanja najbolje moguće postavljene skale i skale pod nagibom. Najveće odstupanje od nazivne vrijednosti u najboljem mogućem slučaju je $5,55 \mu\text{m}$ [Tablica 2] dok je slučaju kada je skala pod nagibom (u položaju 2) $6,42 \mu\text{m}$ [Tablica 5] što je razlika od $0,87 \mu\text{m}$. Pravci na dijagramu koji aproksimiraju rezultate su približno identični. Primjećuje se da rezultati umjeravanja idealno postavljene skale i skale pod nagibom ne odstupaju jedni od drugih, tj. vrlo su slični.



Dijagram 11. Rezultati umjeravanja najbolje moguće postavljene skale i skale pod nagibom

4.3. Utjecaj pomaka uslijed promjene temperature

Na dijagramima 6,7 i 8 primjećuje se da je pomak u osi z vezan uz temperaturu. Što je temperatura niža, pomak je veći. Maksimalni pomak je $10,15 \mu\text{m}$ i pojavljuje se u mjerenju 1. Za usporedbu, kod mjerenja utjecaja pogrešnog postavljanja skale u z osi, mjerna skala bila je nagnuta za $20 \mu\text{m}$ i to je rezultiralo odstupanjima od nazivne vrijednosti do $6,42 \mu\text{m}$. To znači da pomak uslijed promjene temperature ne rezultira utjecajnim greškama u umjeravanju mjerne skale.

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisan sustav za umjeravanje preciznih mjernih skala u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a te je ispitan utjecaj postavljanja precizne mjerne skale na točnost umjeravanja.

Umjeravanje precizne mjerne skale napravljeno je pomoću laserskog interferometarskog sustava Renishaw ML10.

Iz dijagrama i tablica s mjernim rezultatima zaključuje se da pogreška kod postavljanja mjerne skale neparalelno s vodicom dovodi do značajnih grešaka u umjeravanju (i do 34,07 μm) i može se aproksimirati jednadžbom pravca. Pogreška kod postavljanja mjerne skale pod nagibom ne rezultira u značajnim greškama kod umjeravanja.

Tijekom ispitivanja okolišna temperatura nije bila konstantna što je moglo uzrokovati pogreške u mjerenju i zato je ispitan utjecaj pomaka mjerne skale zbog promjene temperature. Iz rezultata se zaključuje da pomak uslijed promjene temperature ne uzrokuje značajne greške kod umjeravanja.

LITERATURA

- [1] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63149>, pristupljeno 23.1.2023.
- [2] <http://hr.sdfortune.net/info/optical-table-24847769.html>, pristupljeno 23.1.2023.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor, pristupljeno 23.2.2023.
- [4] <https://lastminuteengineers.com/28byj48-stepper-motor-arduino-tutorial/>, pristupljeno 23.1.2023.
- [5] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=40775>, pristupljeno 25.1.2023.
- [6] <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-3.1-monochrome/dmk37aux264/>, pristupljeno 25.1.2023.
- [7] <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>, pristupljeno 29.1.2023.
- [8] https://www.igp.fraunhofer.de/content/dam/agp/en/documents/equipment/Measuring_technology/Laser_interferometer_Renishaw_ML10.pdf, pristupljeno 29.1.2023.
- [9] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27623>, pristupljeno 1.2.2023.