Razvoj sustava za umjeravanje mjernih skala

Medić, Srđan

Doctoral thesis / Disertacija

2011

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:235:881966

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

RAZVOJ SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA

DOKTORSKI RAD

SRĐAN MEDIĆ

ZAGREB, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

RAZVOJ SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. VEDRAN MUDRONJA

SRĐAN MEDIĆ

ZAGREB, 2011.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 389.151

Ključne riječi: Etaloni duljine, mjerna skala, umjeravanje, mjerna nesigurnost, usporedbena mjerenja, Monte Carlo simulacije, laserski interferometar, viziranje linija.

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: prof.dr.sc. Vedran Mudronja

Broj stranica: 168

Broj slika: 140

Broj tablica: 11

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 30

Datum obrane: 13. 09. 2011.

Povjerenstvo: prof.dr.sc. Biserka Runje
prof.dr.sc. Vedran Mudronja
prof.dr.sc. Bojan Ačko

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAHVALA

Ovom priliko prvenstveno bih se želio zahvaliti mentoru prof.dr.sc. Vedranu Mudronji koji mi je upornim znanstvenim raspravama i savjetima pomogao da izradim ovaj rad. Nadalje bih se posebno želio zahvaliti prof.dr.sc. Biserki Runje koja je uvijek spremno odgovarala na moja pitanja u svezi mjerne nesigurnosti i lasera, te Gorani koja je znala pronaći pravu riječ podrške i kada mi nije baš najbolje išlo.

Velika zahvala ide Marku i Šimi koji su mi jako pomogli oko softvera za pronalazak sredine linija i mjerenja temperatura.

Posebno se zahvaljujem prijatelju Đoki koji je uvijek pomagao oko tehničkih modifikacija na uređaju te svim djelatnicima Laboratorija za precizna mjerenja dužina u kojemu sam proveo predivne godine. Isto tako, zahvaljujem se tvrtkama Baming d.o.o. i Banko d.o.o. koje su sudjelovale u izradi uređaja te Franji koji je uskakao oko brzih modifikacija.

Naposljetku, želim se zahvaliti mojim roditeljima, bratu i svim prijateljima koji su vjerovali u mene.

SADRŽAJ

PREDGOVOR ..... **I**

SAŽETAK RADA NA HRVATSKOM JEZIKU ..... **III**

SAŽETAK RADA NA ENGLESKOM JEZIKU ..... **IV**

KLJUČNE RIJEČI ..... **VI**

POPIS OZNAKA ..... **VII**

POPIS SKRAĆENICA ..... **X**

POPIS SLIKA ..... **XI**

POPIS TABLICA ..... **XVII**

1. UVOD **1**

2. HIPOTEZA RADA **4**

3. MJERILA DULJINE S LINIJSKIM PODJELAMA **5**

3.1 MJERNE SKALE 6

4. SUSTAV ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA IZRAĐEN U LFSB-U **11**

4.1 SUSTAV ZA VIZIRANJE 14

4.2 SOFTVERSKO RJEŠENJE ZA VIZIRANJE LINIJA 16

4.3 LASERSKI INTERFEROMETAR 19

4.3.1 Postavljanje suosnosti laserskog interferometra s pravcem kretanja pokretnog stola 21

4.3.2 Postavljanje laserskog interferometra i mrtvi hod 23

4.4 POSTAVLJANJE SUOSNOSTI MJERNE SKALE S PRAVCEM KRETANJA POKRETNOG STOLA 27

4.4.1 Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini 27

4.4.2 Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini 30

5. REFERENTNA MJERNA SKALA **33**

5.1 NPL MJERNA SKALA 33

5.2 NANOMETER KOMPARATOR 35

5.3 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE U PTB-U 39

6. MJERNA NESIGURNOST UZ UPOTREBU IZRAĐENOG SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA 42

6.1 ODREĐIVANJE STANDARDNE NESIGURNOSTI 43

6.1.1 Modeliranje mjerenja 43

6.1.2 Određivanje standardne nesigurnosti A-vrste 44

6.1.3 Određivanje standardne nesigurnosti B-vrste 45

6.2 ODREĐIVANJE SASTAVLJENE MJERNE NESIGURNOSTI 47

6.2.1 Nekorelirane ulazne veličine 48

6.2.2 Korelirane ulazne veličine 48

6.3 ODREĐIVANJE PROŠIRENE MJERNE NESIGURNOSTI 49

6.4 MONTE CARLO SIMULACIJA 50

6.4.1 Proračun mjerne nesigurnosti MCS metodom 50

6.4.2 Uvjeti za valjanu primjenu MCS metode 52

6.5 USPOREDBA GUM I MCS METODE 53

6.6 UTJECAJNE VELIČINE U POSTUPKU UMJERAVANJA MJERNIH SKALA ... 55

7. USPOREDBENO MJERENJE U OKVIRU PROJEKTA EURAMET 882, EURAMET.L-K7 "CALIBRATION OF LINE SCALES" 58

7.1 REZULTATI MJERENJA U OKVIRU PROJEKTA EURAMET 882 59

7.1.1 Vrijednosti E_n provedenog usporedbenog mjerenja 74

7.1.2 Povezivanje rezultata mjerenja obje grupe laboratorija 76

8. VALIDACIJA SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA 80

8.1 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE S POSTAVKOM LASERA S LIJEVE STRANE 80

8.2 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE S POSTAVKOM LASERA S DESNE STRANE 84

8.3 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE SA ZAŠTITOM UREĐAJA OD TEMPERATURNIH UTJECAJA 88

9. ISTRAŽIVANJE TEMPERATURNIH UTJECAJA NA UREĐAJ 92

10. MODIFIKACIJA SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA 96

10.1 MJERENJE DEFORMACIJA STOLA S POSTAVLJENIM KLIZNIM OSLONCIMA 102

10.2 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE S POSTAVLJENIM KLIZNIM OSLONCIMA 105

11. NESIGURNOST UMJERAVANJA MJERNIH SKALA UZ UPOTREBU MODIFICIRANOG SUSTAVA 108

11.1 MATEMATIČKI MODEL MJERENJA 108

11.2 STANDARDNE NESIGURNOSTI UTJECAJNIH VELIČINA 110

11.2.1 Nesigurnost očitanja interferometra $u(N_i)$ 110

11.2.2 Nesigurnost valne duljine He-Ne Renishaw lasera $u(\lambda)$ 111

11.2.3 Nesigurnost indeksa loma zraka $u(n_{air})$ 112

11.2.4 Nesigurnost uslijed nelinearnosti $u(\delta L_{ni})$ 114

11.2.5 Nesigurnost uslijed mrtvog hoda $u(\delta L_{DP})$ 115

11.2.6 Nesigurnost uslijed kosinus pogreške $u(\delta L_{li})$ 118

11.2.7 Nesigurnost zakreta stola i Abbeovog odmaka u Z $u(\delta l_{Az})$ 120

11.2.8 Nesigurnost skretanja stola i Abbeovog odmaka u Y $u(\delta l_{Ay})$ 123

11.2.9 Nesigurnost uslijed gubitka fokusa $u(\delta e_{fok})$ 125

11.2.10 Nesigurnost uslijed nesuosnosti mjerne skale i pravca kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini $u(\delta l_{sv})$ 127

11.2.11 Nesigurnost uslijed nesuosnosti mjerne skale i pravca kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini $u(\delta l_{sh})$ 129

11.2.12 Nesigurnost mjerne optike uslijed promjene temperature $u(\delta L_{opt})$ 131

11.2.13 Nesigurnost temperature mjerne skale $u(\Delta t_s)$ 132

11.2.14 Nesigurnost linearnog koeficijenta temperaturnog rastezanja $u(\alpha_s)$ 133

11.2.15 Nesigurnost obnovljivosti viziranja sredine linije $u(\delta L_{sE})$ 134

11.2.16 Nesigurnost zbog utjecaja kvalitete ruba linije $u(\delta E_{alg})$ 137

11.2.17 Nesigurnost uslijed utjecaja oslonaca na savijanje mjerne skale $u(\delta L_{ai})$ 139
11.2.18 Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(L_{MS})$ i proširena mjerna nesigurnost $U(L_{MS})$ 140
11.3 PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI MONTE CARLO SIMULACIJAMA 142
11.3.1 Određivanje najznačajnijih utjecaja mjerne nesigurnosti umjeravanja mjernih skala 145
12. USPOREDBENO MJERENJE MJERNE SKALE DULJINE 300 mm 151
12.1.1 Rezultati mjerenja mjerne skale duljine 300 mm 152
12.1.2 Procjena mjerne nesigurnosti umjeravanja mjerne skale duljine 300 mm 154
12.1.3 Usporedbeni rezultati mjerenja mjerne skale duljine 300 mm 158
13. ZAKLJUČAK 161
14. LITERATURA 164
15. KRATKI ŽIVOTOPIS 167
16. KRATKI ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU 168

PREDGOVOR

Uznapredovali tehnološki razvoj, poglavito u elektronskoj industriji postavlja sve veće zahtjeve na ostvarenje dimenzija koje ulaze u područje mikro i nanotehnologije. Takvi zahtjevi ujedno predstavljaju i stalno poboljšavanje (smanjenje) mjernih nesigurnosti. Mjerne skale su fundamentalni mjerni element proizvodnih i mjernih uređaja te su osnovni etaloni duljine koji se upotrebljavaju za umjeravanje optoelektronskih mjernih uređaja. Stoga je mogućnost umjeravanja mjernih skala od vitalnog značaja za svaku državu u postupku osiguravanja sljedivosti.

Isto tako, osnovna je uloga mjeriteljskih instituta, pa tako i Nacionalnog laboratorija za duljinu osiguravanje sljedivosti i veza prema definiciji metra. Kako je od 1983. godine po novoj definiciji metra tzv. "valni metar" najuže povezan sa stabiliziranim laserskim izvorom svjetla, implicira se da će adekvatan mjerni uređaj za umjeravanje mjernih skala koristiti laserski interferometar za mjerni sustav, a ne drugu mjernu skalu. Mjerne skale se za razliku od planparalelnih graničnih mjerki umjeravaju beskontaktnom metodom, te je najveći nedostatak do nedavno upotrebljavanih mjernih metoda predstavljao utjecaj (subjektivnost) mjeritelja u postupku viziranja mjerne skale. Naime, udaljenost na mjernoj skali mjeri se od sredine jedne do sredine druge linije što je u većini slučajeva zbog nesavršenosti linija jako kompliciran proces koji zahtjeva razvoj specijalnog algoritma. Iako u zadnje vrijeme dolazi do snažnog razvoja mjerne opreme u području nanomjeriteljstva, takav sustav za umjeravanje mjernih skala još uvijek nije moguće nabaviti na tržištu. Većina zemalja svijeta svjesna je nužnosti posjedovanja takvog sustava koji će omogućiti direktnu vezu prema definiciji metra i čije će se sposobnosti mjerenja i iskazane mjerne nesigurnosti potvrditi u CIPM MRA usporedbenim mjerenjima.

S tim u svezi, istraživanje u sklopu ovog rada kojim je razvijen i fizički realiziran potpuno originalan sustav za umjeravanje mjernih skala mjernog područja do 300 mm koji omogućava mjerenja na svjetskim razinama mjernih nesigurnosti, predstavlja značajan doprinos mjeriteljstvu vizualnih mjerenja u europskim i svjetskim okvirima.

Rezultatima ovog rada, Republici Hrvatskoj su širom otvorena vrata za priključak u europski i svjetski mjeriteljski sustav na području umjeravanja mjernih skala.

SAŽETAK RADA NA HRVATSKOM JEZIKU

Laboratorij za precizna mjerenja dužina koji je ujedno i Nacionalni laboratorij za duljinu (u daljnjem tekstu Laboratorij) sudjeluje u CIPM MRA (Comité International des Poids et Mesures, Mutual Recognition Arrangement) ključnim usporedbama etalona duljine među kojima su od posebnog značaja i precizne mjerne skale. U cilju sudjelovanja u CIPM MRA ključnim usporedbama, Laboratorij je 2003. godine pokrenuo tehnologijski projekt TP-02/0120-16 "Uređaj za umjeravanje mjernih skala" u okviru kojeg je izrađen mjerni uređaj koji je korišten za ovo istraživanje. Tijekom 2008. autor rada provodio je istraživanja umjeravajući mjernu skalu duljine 100 mm na navedenom uređaju u sklopu projekta EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7 "Calibration of line scales" u kojem su sudjelovali svi najznačajniji mjeriteljski instituti na svijetu. U pripremi za usporedbeno mjerenje, u okviru gore navedenog tehnologijskog projekta nabavljena je NPL precizna mjerna skala duljine 100 mm koju je autor rada umjeravao u PTB-u (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Njemačka). Navedena mjerna skala je upotrijebljena za istraživanje ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja te za spoznaje o procjeni dostižne mjerne nesigurnosti. Po završetku projekta u kojem su postignuti potpuno kompatibilni rezultati s ostalim mjeriteljskim institutima, provedena je analiza udjela mjerne nesigurnosti temeljem eksperimentalnih mjerenja i simulacijske analize. U okviru istraživanja utjecaja na mjernu nesigurnost istražen je najpouzdaniji položaj laserskog izvora svjetla i optičkih komponenti, minimiziranje Abbeove greške, određivanja sredine linije mjerne skale, suosnost mjerne skale i laserskog snopa, pravocrtnost gibanja stola, kutovi nagiba, skretanja i uvijanja, okolišni uvjeti koji utječu na valnu duljinu lasera i geometriju uređaja te utjecaj gubljenja fokusa tijekom pomicanja stola. Nakon provedenih eksperimentalnih mjerenja i simulacijske analize u svrhu određivanja parametara mjerne nesigurnosti, provedena je modifikacija sustava s ciljem smanjivanja istih. Modifikacija je provedena postavljanjem posebnih kliznih oslonaca, te je sustav toplinski izoliran. Nakon modifikacije sustava izvršena je ponovna procjena mjerne nesigurnosti koja je validirana u usporedbenom mjerenju mjerne skale duljine 300 mm s jednim prestižnim svjetskim mjeriteljskim institutom.

SAŽETAK RADA NA ENGLESKOM JEZIKU

The Laboratory for Precise Measurement of Length, which is at the same time the National Laboratory for Length (in text 'Laboratory') takes part in CIPM MRA (Comité International des Poids et Mesures, Mutual Recognition Arrangement) comparisons of length standards, which include line scales as very important standards of length. In order to participate in the CIPM MRA key comparisons, Laboratory initiated technology project TP-02/0120-16 "The device for calibrating measurement scales" in 2003, in which a measurement device was constructed. This measurement device has been used in this research. During 2008, applicant was using this device to research calibration 100 mm measurements scale, participating in the EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7 "Calibration of line scales" (a project shared by the leading calibration institutes in the world). In preparation for comparison measurements as a part of technology project mentioned above, NPL line scale length of 100 mm was purchased and it has been calibrated in PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany) by the author of this paper. This line scale was used for studying repeatability and reproducibility of measurement results and for the cognition of evaluation of achievable measurement uncertainty. After completion of the project in which have been achieved results fully compatible with the results of other measurement institutes, each factor of measurement uncertainty was separately analyzed by conducting experimental measurements and simulation studies.

As a part of research on the impact of measurement uncertainty the following was investigated: the position of laser light sources and optical components, minimizing Abbe's error, the determination of the middle line of line scales, alignment of line scale and laser beam, straightness movement of table, pitch, roll and yaw angles, environmental conditions affect the laser wavelength and the geometry of device and the impact of losing focus while moving of table. After performed experimental measurements and simulation studies in order to analyze the parameters of uncertainties, the modification of system was performed by applying special sliding supports, and the system is completely thermally isolated. After modification of the system, reevaluation of measurement uncertainty was performed, which has been

validated in comparison measurements of line scale length of 300 mm with a prestigious international measurement institute.

KLJUČNE RIJEČI

Etaloni duljine, mjerna skala, umjeravanje, mjerna nesigurnost, usporedbena mjerenja, Monte Carlo simulacije, laserski interferometar, viziranje linija.

Length standards, line scale, calibration, measurement uncertainty, intercomparison measurements, Monte Carlo simulations, Laser Interferometer, sighting of lines.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Objašnjenje	Jedinica
a_+, a_-	granica intervala	
b	udaljenost između snopa i mjerne skale u z	mm
c_i, c_{ij}	koeficijent osjetljivosti	
c_z,	brzina pomicanja mjernog sustava	m/s
c	udaljenost između snopa i mjerne skale u y	mm
d	odstupanje suosnosti skale u vert. ravn.	µm
E	Youngov modul elastičnosti	kN/mm^2
E_n	faktor slaganja	
f	frekvencija	s^{-1}
f_1	frekvencija refer. dijela laserskog snopa	s^{-1}
f_2	frekvencija mjernog dijela laserskog snopa	s^{-1}
f_V	parcijalni tlak vodene pare u zraku	Pa
f_V	tlak zasićene vodene pare na temperaturi t	Pa
$g(x_i)$	funkcija gustoće vjerojatnosti ulazne veličine	
$g(Y_i)$	funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine	
g	gravitacija	m/s^2
H	visina skale	mm
h	relativna vlažnost zraka	%
h	odstupanje suosnosti skale u horiz. ravn.	µm
k	faktor pokrivanja	
k_{opt}	koeficijent promjene duljine optike	µm/ºC
L	nazivna duljina mjerne skale	m
L_{mh}	duljina mrtvog hoda	m
L_i	duljina mjerne grane interferometra	m
L_R	duljina referentne grane interfereometra	m
L_{MS}	duljina mjerne skale pri 20ºC	m
L_{MSi}	rezultat mjerenja linije *i*	m
$L_{interf(i)}$	očitanje interferometra linije *i*	m
L_{Si}	udaljenost sredine linije *i* od sred. linije ekrana	m

L_{post}	duljina postavljanja laserskog interferometra	m
M	broj simulacija	
N	broj ulaznih veličina x_i	
n	broj ponovljenih mjerenja	
n	broj laboratorija	
n_{air}	indeks loma zraka	
P	vjerojatnost	%
p	tlak zraka	Pa
q	veličina koja se slučajno mijenja	
q_k	neovisni rezultat mjerenja	
$\bar{q}$	aritmetička sredina rezultata mjerenja	
R_B	Birgeov omjer	
r	koeficijent korelacije	
s	procijenjeno standardno odstupanje	µm ili nm
t_{air}	temperatura zraka	ºC
t_{MS}	temperatura mjerne skale	ºC
t_p	varijabla studentove razdiobe	
U	proširena mjerna nesigurnost	nm
$u(x_i)$	standardna mjerna nesigurnost	
$u_c(y)$	sastavljena standardna nesigurnost	
$u_c^2(y)$	sastavljena varijanca	
$u(x_{ref})$	referentna standardna nesigurnost	
u_{int}	unutarnja standardna nesigurnost	
u_{ext}	vanjska standardna nesigurnost	
v_{eff}	stvarni broj stupnjeva slobode	
X_i	ulazna veličina	
x_i	procjena ulazne veličine	
z	razmak među točkicama na glavi lasera	mm
α_s	linearni koeficijent temp. rastezanja	K^{-1}
Δt_s	odstupanje temperature skale od 20 ºC	ºC
λ	valna duljina svjetlosti u vakumu	nm ili µm
φ	kut postavljanja suosnosti u vert. ravnini	"
γ	kut postavljanja suosnosti u horiz. ravnini	"

ε	kut između mjernog snopa i pravca reflektora	''
β	kut zakreta pokretnog stola	''
χ	kut skretanja pokretnog stola	''
δl_{ni}	Nelinearnost optike	nm
δl_{DP}	Utjecaj mrtvog hoda	nm
δl_{li}	Utjecaj kosinus pogreške interferometra	nm
δl_{Az}	Abbeov odmak u Z i zakret stola	nm
δl_{Ay}	Abbeov odmak u Y i skretanje stola	nm
δl_{sh}	Utjecaj suosnosti skale u horizontalnoj ravnini	nm
δl_{sv}	Utjecaj suosnosti skale u vertikalnoj ravnini	nm
δl_{ai}	Utjecaj savijanja skale	nm
δE_{alg}	Utjecaj kvalitete ruba linije	nm
δe_{fok}	Utjecaj gubitka fokusa	nm
δl_{opt}	Nesig. mjerne optike uslijed promjene temp.	nm
δl_{sE}	Obnovljivost viziranja sredine linije	nm

POPIS SKRAĆENICA

Skraćenica	Objašnjenje
LFSB	Laboratorij za precizna mjerenja dužina
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
DZM	Državni zavod za mjeriteljstvo
MCS	Monte Carlo simulacija
NPL	National Physical Laboratory
NMK	Nanometer Komparator

POPIS SLIKA

Slika 1. Drveno oruđe pronađeno na brodu Mary Rose 5

Slika 2. Mjerne skale različitih duljina i izvedbi 6

Slika 3. Objekt mikrometar 7

Slika 4. Dvodimenzionalna mjerna skala 7

Slika 5. Enkoderska mjerna skala 8

Slika 6. Geometrijska metoda generiranja signala (a - prolazni način, b - reflektirajući način) 9

Slika 7. Interferencijska metoda generiranja signala 9

Slika 8. Moireov efekt 10

Slika 9. Princip rada LFSB-ovog sustava za umjeravanje mjernih skala 11

Slika 10. Prihvati za mjernu skalu 12

Slika 11. Uređaj za umjeravanje mjernih skala 13

Slika 12. Olympus akromatski objektiv 14

Slika 13. CCD kamera Olympus DP 70 15

Slika 14. Osnovni dijelovi CCD kamere Olympus DP 70 15

Slika 15. Princip rada algoritma za pronalazak sredine linije 16

Slika 16. Princip rada algoritma za pronalazak sredine linije 18

Slika 17. Optički princip rada He-Ne interferometra 19

Slika 18. Prihvat za lasersku glavu 21

Slika 19. Postupak postavljanja suosnosti laserskog interferometra 22

Slika 20. Postavljanje interferometra i reflektora s udaljavanjem pomičnog reflektora od djelitelja snopa 24

Slika 21. Postavljanje interferometra i reflektora s približavanjem pomičnog reflektora djelitelju snopa 26

Slika 22. Prihvati za mjernu skalu i podešavanje mjerne skale 27

Slika 23. Mjerenje utjecaja pomaka u osi Z na fokus mikroskopa 28

Slika 24. Gubitak fokusa mikroskopa za različite pomake u osi Z (a - bez pomaka, tj. u fokusu, b – pomak od 2 μm, c – pomak od 5 μm) 29

Slika 25. Detalj NPL-ove mjerne skale 30

Slika 26. Postavljanje suosnosti mjerne skale (početak mjerne skale) 31

Slika 27. Postavljanje suosnosti mjerne skale (kraj mjerne skale) 31

Slika 28. NPL-ova mjerna skala 34

Slika 29. NPL-ova mjerna skala 34

Slika 30. Princip rada nanometer komparatora 35

Slika 31. Izgled nanometer komparatora 36

Slika 32. Princip kompenzacije sila nanometer komparatora 37

Slika 33. Sustav za viziranje Nanometer komparatora 38

Slika 34. Usporedbeni rezultati umjeravanja NPL-ove mjerne skale (odstupanje od nazivne duljine) 39

Slika 35. Usporedni rezultati umjeravanja NPL-ove mjerne skale (odstupanje od aritmetičke sredine) 40

Slika 36. Rezultati mjerenja NPL-ove mjerne skale na NMK (odstupanje od aritmetičke sredine) 40

Slika 37. Rezultati mjerenja NPL-ove mjerne skale na NMK (utjecaj kvalitete linije) 41

Slika 39. Pravokutna razdioba 46

Slika 40. Trokutasta razdioba 47

Slika 40 Shematski prikaz proračuna mjerne nesigurnosti MCS metodom [10] 51

Slika 41. Utjecajni parametri u postupku umjeravanja mjernih skala 55

Slika 42. Usporedni rezultati mjerenja linija od 0 mm do 1 mm 60

Slika 43. Usporedni rezultati mjerenja linija od 0 mm do 100 mm 61

Slika 44. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,1 mm 62

Slika 45. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,2 mm 62

Slika 46. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,3 mm 62

Slika 47. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,4 mm 63

Slika 48. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,5 mm 63

Slika 49. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,6 mm 63

Slika 50. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,7 mm 64

Slika 51. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,8 mm 64

Slika 52. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,9 mm 64

Slika 53. Usporedni rezultati mjerenja linije 1 mm 65

Slika 54. Usporedni rezultati mjerenja linije 5 mm 65

Slika 55. Usporedni rezultati mjerenja linije 10 mm 65

Slika 56. Usporedni rezultati mjerenja linije 15 mm 66

Slika 57. Usporedni rezultati mjerenja linije 20 mm 66

Slika 58. Usporedni rezultati mjerenja linije 25 mm 66

Slika 59. Usporedni rezultati mjerenja linije 30 mm 67

Slika 60. Usporedni rezultati mjerenja linije 35 mm 67

Slika 61. Usporedni rezultati mjerenja linije 40 mm 67

Slika 62. Usporedni rezultati mjerenja linije 45 mm 68

Slika 63. Usporedni rezultati mjerenja linije 50 mm 68

Slika 64. Usporedni rezultati mjerenja linije 55 mm 68

Slika 65. Usporedni rezultati mjerenja linije 60 mm 69

Slika 66. Usporedni rezultati mjerenja linije 65 mm 69

Slika 67. Usporedni rezultati mjerenja linije 70 mm 69

Slika 68. Usporedni rezultati mjerenja linije 75 mm 70

Slika 69. Usporedni rezultati mjerenja linije 80 mm 70

Slika 70. Usporedni rezultati mjerenja linije 85 mm 70

Slika 71. Usporedni rezultati mjerenja linije 90 mm 71

Slika 72. Usporedni rezultati mjerenja linije 95 mm 71

Slika 73. Usporedni rezultati mjerenja linije 100 mm 71

Slika 74. Usporedba mjernih nesigurnosti nekih mjeriteljskih instituta iskazanih u usporedbenom mjerenju EUROMET.L-K7.2006 - Key Comparison: Calibration of line scales za duljinu mjerne skale 100 mm..... 72

Slika 75. Rezultati provedenih mjerenja (odstupanje od nazivne duljine)..... 81

Slika 76. Rasponi provedenih mjerenja ... 81

Slika 77. Usporedba rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u i PTB-u (odstupanje od nazivne vrijednosti) ... 82

Slika 78. Odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u ... 83

Slika 79. Rezultati provedenih mjerenja (odstupanje od nazivne duljine) ... 85

Slika 80. Rasponi provedenih mjerenja ... 85

Slika 81. Usporedba rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u i PTB-u (odstupanje od nazivne vrijednosti) ... 86

Slika 82. Odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u ... 87

Slika 83. Toplinska zaštita mjernog sustava ... 88

Slika 84. Rezultati provedenih mjerenja s toplinskom zaštitom uređaja (odstupanje od nazivne duljine) ... 89

Slika 85. Rasponi provedenih mjerenja s toplinskom zaštitom i bez toplinske zaštite ... 89

Slika 86. Usporedba rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u i PTB-u (odstupanje od nazivne vrijednosti) ... 90

Slika 87. Odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u ... 90

Slika 88. Pozicije postavljenih temperaturnih sondi ... 92

Slika 89. Rezultati mjerenja temperature bez toplinske izolacije ... 93

Slika 90. Rezultati mjerenja temperature s toplinskom izolacijom ... 93

Slika 91. Rezultati mjerenja temperature bez toplinske zaštite dok se radi na uređaju ... 94

Slika 92. Rezultati mjerenja temperature s toplinskom zaštitom dok se radi na uređaju ... 94

Slika 93. Usporedbeni rezultati mjerenja temperature s toplinskom zaštitom i bez nje ... 95

Slika 94. Mjerenja zakreta stola provedeno s dva komparatora ... 96

Slika 95. Rezultati mjerenja zakreta stola komparator 1 ... 97

Slika 96. Rezultati mjerenja zakreta stola komparator 2 ... 97

Slika 97. Niveliranje pokretnog stola ... 98

Slika 98. Postavljanje komparatora ... 99

Slika 99. Rezultati mjerenja zakreta stola s jednim komparatorom i uz niveliranje stola 99

Slika 100. Deformiranje pokretnog stola 100

Slika 101. Klizni oslonac pokretnog stola 101

Slika 102. Klizni oslonci postavljeni na pokretni stol 101

Slika 103. Rezultati mjerenja zakreta stola s postavljenim kliznim osloncima 102

Slika 104. Ponovljeni rezultati mjerenja zakreta stola s postavljenim kliznim osloncima..... 103

Slika 105. Rezultati mjerenja zakreta stola sa i bez kliznim osloncima s postavljenim reflektorom s desne strane pokretnog stola 104

Slika 106. Rezultati provedenih mjerenja s kliznim osloncima (odstupanje od nazivne duljine)105

Slika 107. Usporedni rezultati mjerenja provedenih u LFSB-u s kliznim osloncima i PTB-u 106

Slika 108. Usporedni prikaz odstupanja rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u 106

Slika 109. Rezultati mjerenja od 0 do 100 mm..... 116

Slika 110. Rezultati mjerenja od 100 do 0 mm..... 117

Slika 111. Kosinus pogreška 118

Slika 112. Abbeova pogreška u z osi 120

Slika 113. Postavljanje reflektora autokolimatora 121

Slika 114. Pravocrtnost gibanja stola u z osi..... 121

Slika 115. Abbeova pogreška u y osi 123

Slika 116. Pravocrtnost gibanja stola u y osi..... 124

Slika 117. Mjerenje pomaka objektiva pomoću elektronskog komparatora 125

Slika 118. Rezultati mjerenja pomaka objektiva u osi x uslijed gubitka fokusa..... 126

Slika 119. Postavljanje suosnosti mjrne skale u vertikalnoj ravnini 127

Slika 120. Gubitak fokusa mikroskopa za različite pomake u osi Z (a - bez pomaka, tj. u fokusu, b – pomak od 5 μm)..... 128

Slika 121. Postavljanje suosnosti mjerne skale u horizontalnoj ravnini 129

Slika 122. a) Detalj vizirane linije, b) vizirana linija u softveru za pronalazak sredine linije 134

Slika 123. Dobiveni rezultati sredine vizirane linije 135

Slika 124. Vizirana linija s lošijom kvalitetom ruba u softveru za pronalazak sredine linije 137

Slika 125. Rezultati sredine vizirane linije s lošijom kvalitetom rubom 138

Slika 126. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm 144

Slika 127. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, s = 3 mm .. 145

Slika 128. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, s = 5 mm .. 146

Slika 129. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, b = 5 mm, c = 5 mm..... 147

Slika 130. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, $\alpha_{MS}=10\cdot10^{-6}\ K^{-1}$ 148

Slika 131. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, h=0,03 mm, d=0,03 mm 149

Slika 132. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, u(t)=0,5 ºC 150

Slika 133. Mjerna skala duljine 300 mm..... 151

Slika 134. Rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od nazivne duljine) 152

Slika 135. Rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od aritmetičke sredine)..... 153

Slika 136. Odstupanje temperature od 20 ° C tijekom provođenja mjerenja 154

Slika 137. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 300 mm 156

Slika 138. Usporedbeni rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od nazivne duljine) 158

Slika 139. Usporedbeni rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od aritmetičke sredine)..... 159

Slika 140. Normalizirani rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (LFSB korigirano-Eur. Lab.) 160

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastavnice standardne mjerne nesigurnosti.....56

Tablica 2. Sudionici grupe 1. EURAMET projekta 882, "Calibration of line scales".....59

Tablica 3. Sudionici grupe 2. EURAMET projekta 882, "Calibration of line scales".....59

Tablica 4. Linije mjerne skale mjerene u usporedbenom mjerenju.....60

Tablica 5. Prikaz vrijednosti E_n za rezultate mjerenja LFSB-a (grupa 1).....75

Tablica 6. Prikaz referentnih vrijednosti i vrijednosti faktora slaganja E_n za rezultate mjerenja LFSB.....78

Tablica 7. Rezultati očitanja sredine linije.....135

Tablica 8. Sastavnice standardne mjerne nesigurnosti modificiranog sustava.....141

Tablica 9. Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$.....143

Tablica 10. Sastavnice mjerne nesigurnosti pri umjeravanju mjerne skale duljine 300 mm.....155

Tablica 11. Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$.....157

1. UVOD

Potreba za mjerenjem duljine javlja se s razvojem čovječanstva i ljudske civilizacije. Još su stari Egipćani koristili mjerila duljine kojima su određivali površine svojih posjeda, a danas je upotreba mjernih traka i ostalih mjernih uređaja s linijskom podjelom ušla u svakodnevnicu. Samim time, nismo ni svjesni koliko je naš život postao ovisan o različitim vrstama mjerila s linijskom podjelom, a mjerne skale predstavljaju sam vrh piramide mjerila s linijskom podjelom. Isto tako bitno je napomenuti da su od svojih početaka mjerenja duljine bila usko vezana za upotrebu svjetlosti i optike. Jako važni događaji u upotrebi svjetlosti i optike u mjerenju duljine su prema [16] izum mikroskopa (Leeuwenhoek 1660.), upotreba interferencije svjetlosti (Michelson 1892.) i razvoj plinskog lasera (Maiman 1960.) koji je zamijenio dotadašnje izvore svjetlosti korištene u interferencijskim pojavama.

Sva tri gore navedena izuma osnovni su elementi modernih sustava za umjeravanje mjernih skala.

Do izuma lasera mjerne skale su se uglavnom umjeravale usporedbenom metodom, odnosno mjerenjem mjerne skale na nekom od optoelektronskih uređaja čiji mjerni sustav čini druga mjerna skala. Kako se mjerne skale umjeravaju beskontaktnom metodom uz upotrebu mikroskopa u postupku viziranja linije mjerne skale, samim time je umjeravanje mjernih skala mnogo složeniji postupak od mjerenja koja se provode kontaktnim putem. Uznapredovali razvoj sve preciznijih digitalnih kamera, novih sustava osvjetljenja kao i novih objektiva omogućava postizanje mjernih nesigurnosti koje su u prošlosti bile nezamislive.

Uz sva navedena dostignuća, umjeravanje mjernih skala na razini mjernih nesigurnosti manjih od 100 nm još uvijek je svjetski problem i te razine mjernih nesigurnosti su dostižne za svega nekoliko svjetskih mjeriteljskih instituta. Stoga su se mnoge razvijene i tehnološki napredne države svijeta odlučile na razvoj mjernih sustava koji će im omogućiti postizanje navedenih mjernih nesigurnosti.

Kako bi pratio svjetske trendove i istraživanja na području mjerenja duljine, odnosno umjeravanja mjernih skala, Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje je 2003. godine pokrenuo tehnologijski projekt TP-02/0120-16 "UREĐAJ ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA" u okviru kojeg je nabavljena neophodna oprema i izrađen uređaj koji se koristio za ovo istraživanje. U okviru navedenog projekta opremljen je i poseban prostor unutar Laboratorija za provođenje mjerenja u nano području. Mjerno područje izrađenog uređaja je 800 mm, te je prvenstveno namijenjen za umjeravanje mjernih skala. Proces viziranja provodi se upotrebom mikroskopa s digitalnom CCD kamerom Olympus DP 70 s 12, 5 megapiksela. Detaljan opis sustava sa svim sastavnim komponentama dan je u prvom dijelu rada.

U dugogodišnem iskustvu Laboratorija, prije razvoja ovog mjernog sustava, umjeravanje mjernih skala uglavnom se provodilo upotrebom alatnog mikroskopa i horizontalnog Abbe uređaja za umjeravanje mjernih skala koji imaju ograničavajuće mogućnosti u pogledu viziranja linija i sljedivosti mjerenja. Temeljem tako primijenjenih metoda, mjerne nesigurnosti umjeravanja mjernih skala nisu bile manje od 1 μm što je nedostatna razina za osiguranje sljedivosti. Za istraživanje ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja te u svrhu posjedovanja "fiksnih" točaka za određivanje odstupanja od umjerenih (referentnih) vrijednosti, u sklopu tehnologijskog projekta nabavljena je i NPL mjerna skala duljine 100 mm koja je umjerena u PTB-u tijekom boravka autora ovog rada u navedenom institutu. S pokretanjem navedenog tehnologijskog projekta, Laboratorij se prijavio i za sudjelovanje u usporedbenom mjerenju EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7 "Calibration of line scales" u kojem je provedeno mjerenje mjerne skale duljine 100 mm i u kojem su postignuti potpuno kompatibilni rezultati s ostalim mjeriteljskim institutima.

Kako bi se detaljno istražile geometrijske pogreške izrađenog uređaja, u drugom dijelu rada provedena su istraživanja utjecajnih veličina te je izvršen proračun mjerne nesigurnosti GUM metodom i Monte Carlo simulacijama. U sklopu istraživanja postavljen je inovativni simulacijski model za determiniranje najdominantnijih utjecaja mjerne nesigurnosti. Temeljem takvog simulacijskog modela u radu se daju odgovori na osnovne probleme koje navode autori u radovima [3, 5, 7, 9] što podrazumijeva razvoj algoritma za viziranje linija te specifično rješenje postavljanja suosnosti laserskog

interferometra i pravca kretanja pokretnog stola. U okviru istraživanja najznačajnijih parametara mjerne nesigurnosti istraženi su utjecaji očitanja interferometra, indeksa loma zraka i nelinearnosti optike, zatim utjecaj mrtvog hoda, utjecaj kosinus pogreške, Abeov odmak, zakret i skretanje stola, utjecaj temperature, utjecaj suosnosti skale u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, utjecaj savijanja skale, obnovljivost viziranja i kvaliteta ruba linije te utjecaj gubitka fokusa. U sklopu istraživanja provedena je modifikacija uređaja postavljanjem posebnih kliznih oslonaca za smanjenje deformacija pokretnog stola te je uređaj kompletno toplinski izoliran.

Na osnovu provedenog istraživanja definirana je i mjerna nesigurnost u postupku umjeravanju mjernih skala koja iznosi U = (130+0,66·L) nm, L u mm, k = 2; P = 95% i koja je na svjetskoj razini. Mjerna nesigurnost pri umjeravanju mjerne skale duljine 300 mm i koeficijenta temperaturnog rastezanja $\alpha=9\cdot10^{-6}$ K^{-1} iznosi U=(130+2·L) nm, L u mm, k=2, P=95%.

Potvrda iskazane mjerne nesigurnosti i provedenih modifikacija uređaja potvrđena je učešćem u međunarodnom usporedbenom mjerenju mjerne skale duljine 300 mm čiji su rezultati navedeni u zadnjem dijelu rada. Temeljem rezultata provedenog usporedbenog mjerenja vidljivo je da je mjerni sustav potpuno sposoban za umjeravanja mjernih skala do 300 mm s gore navedenom mjernom nesigurnošću.

Rezultati ostvareni u ovom radu omogućuju ravnopravan priključak Hrvatske u dimenzionalno nanomjeriteljstvo na svjetskoj razini te njezino aktivno sudjelovanje u CIPM MRA (*International Committee for Weights and Measures Mutual Recognition Agreement*) usporedbama i međunarodnim znanstvenim projektima iz područja preciznih mjernih skala.

2. HIPOTEZA RADA

Razvijenim i realiziranim mjernim sustavom za umjeravanje mjernih skala do 300 mm biti će moguće ostvariti rezultate mjerenja mjernih skala uz mjernu nesigurnost u iznosu od $U = (100+1 \cdot L)$ nm, L u mm, $k = 2$; $P = 95\%$ što predstavlja svjetsku razinu. U tom cilju biti će primijenjena originalna rješenja postavljanja suosnosti laserskog interferometra i mjerne skale te određivanja sredine linije mjerne skale bez utjecaja mjeritelja. Teorijskom i eksperimentalnom analizom minimizirat će se utjecaji geometrijskih pogrešaka uređaja na točnost i preciznost rezultata mjerenja.

Temeljem rezultata ovog rada Republika Hrvatska će se ravnopravno uključiti u mjerenja mjernih skala na svjetskim razinama mjernih nesigurnosti te će ravnopravno sudjelovati u CIPM MRA usporedbama iz područja umjeravanja mjernih skala koje su jedan od fundamentalnih elemenata mjernih i proizvodnih sustava.

3. MJERILA DULJINE S LINIJSKIM PODJELAMA

Najčešće upotrebljavana mjerila duljine s linijskim podjelama su mjerne letve, mjerne trake, mjerne skale i enkoderske mjerne skale. Potrebno je napomenuti kako su mjerne letve poznate još od davnina, pa su tako prilikom iskopavanja na području doline rijeke Ind pronađene letve od bjelokosti, a pripadale su civilizaciji koja je tamo živjela u brončanom dobu prije 1500.g. pr. Kr. Kasnije kroz povijest najčešći materijal koji se koristio prilikom izrade ravnala je bilo drvo, a slika 1. prikazuje drveno oruđe iz 16. stoljeća s potonulog broda Mary Rose gdje se između ostalog vidi i drvena mjerna letva.

Slika 1. Drveno oruđe pronađeno na brodu Mary Rose

Pojavom polimera mjerne letve su bile jedan od prvih predmeta koji su se počeli izrađivati od tog materijala, naravno zbog potrebe da budu izdržljivije. U industrijskoj praksi mjerne letve su najčešće izrađene od čelika. Osim od čelika u praksi su također vrlo česte i staklene mjerne letve koje se koriste ukoliko je potrebno predmet mjerenja prosvjetljavati.

3.1 MJERNE SKALE

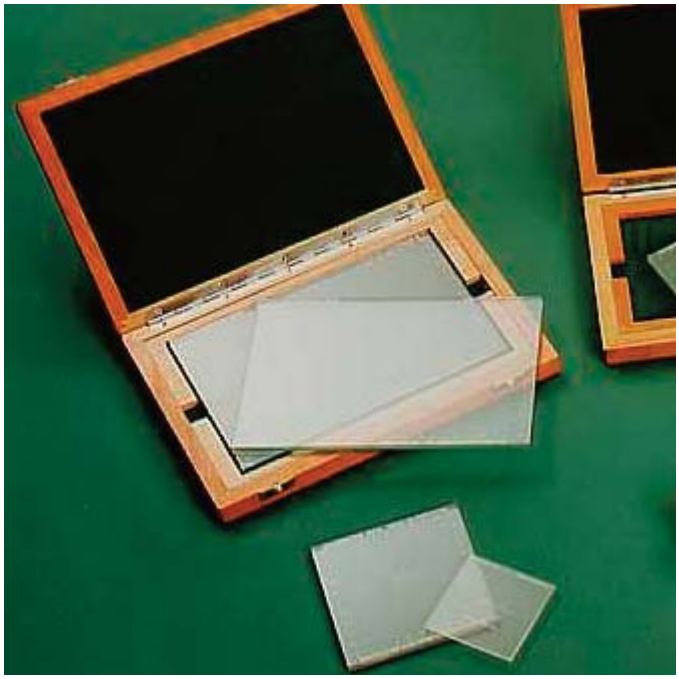
Mjerne skale se najčešće upotrebljavaju kao etaloni duljine za umjeravanje optičkih mjernih uređaja kao što su profil projektori, mjerni mikroskopi i video mjerni sustavi. Najčešći materijal za izradu mjernih skala je staklo. Za jako precizna umjeravanja upotrebljavaju se mjerne skale s niskim koeficijentom temperaturnog rastezanja. Najčešći materijal za izradu takvih skala je staklokeramika i to zerodur i clearceram [23]. Mjerne se skale proizvode u jako širokom rasponu mjernih područja pa ih tako nalazimo u mjernim područjima od 1 mm pa do duljina od nekoliko metara. Slika 2. prikazuje mjerne skale raznih duljina i izvedbi.

Slika 2. Mjerne skale različitih duljina i izvedbi

Mjerna skala mjernog područja 1 mm i podjele od 0,01 mm naziva se objekt mikrometar i najčešće se upotrebljava za umjeravanje optičkih mjernih uređaja. Slika 3. prikazuje jedan objekt mikrometar.

Slika 3. Objekt mikrometar

Osim jednodimenzionalnih mjernih skala postoje i dvodimenzionalne mjerne skale koje se najčešće upotrebljavaju za umjeravanje dvokoordinatnih optičkih mjernih sustava. Nalazimo ih različitih mjernih područja, a najčešće je središnji dio podijeljen u kvadrate duljine 1 mm. Slika 4. prikazuje dvodimenzionalnu mjernu skalu.

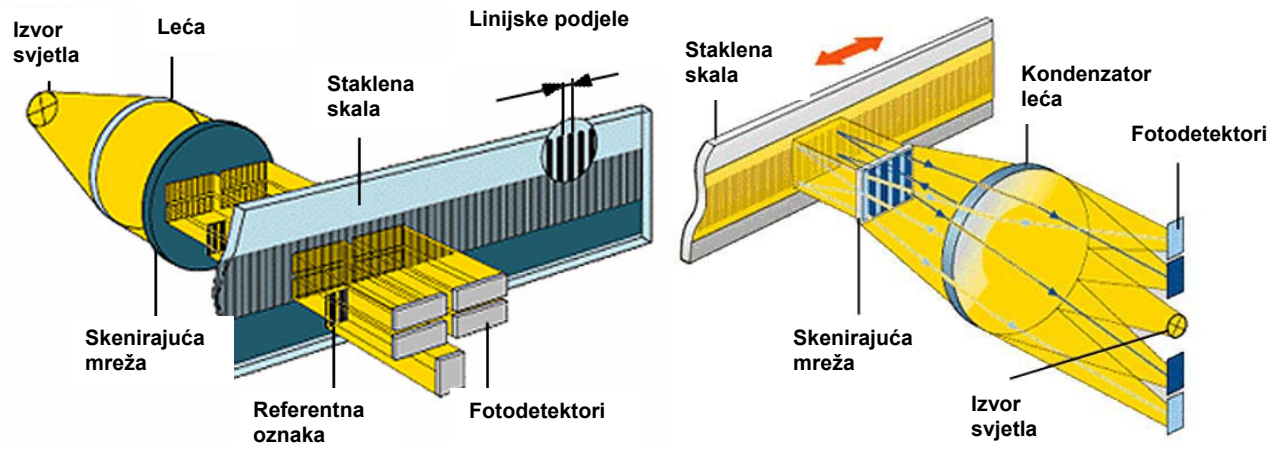


Slika 4. Dvodimenzionalna mjerna skala

Točnost umjeravanja mjernih skala uvelike ovisi o optičkim osobinama linijskih podjela, optičkim osobinama pozadine te o ravnosti površine na kojoj su linijske podjele. Točnost umjeravanja mjernih skala bit će optimalna ako linije mjerne skale imaju ravne i precizne rubove, ako postoji dobar kontrast između linija podjele i pozadine te ako je površina mjerne skale na kojoj se nalazi linijska podjela jako malog odstupanja ravnosti kako ne bi dolazilo do gubljenja fokusa tijekom provedbe umjeravanja. Naime, udaljenosti na mjernoj skali se mjere od sredine jedne do sredine druge linije mjerne skale, te je za određivanje sredine linije potrebna jako dobra kvaliteta linije.
Dulje mjerne skale najčešće se upotrebljavaju kao mjerni sustavi u alatnim strojevima i mjernim uređajima kao što su profil projektori, koordinatni mjerni uređaji, univerzalni uređaji za mjerenje duljine... Naime, udaljenosti očitane na monitoru nekog mjernog uređaja ili alatnog stroja direktno se očitavaju s mjerne skale koja se nalazi u tom uređaju.
Mjerna skala u takvim uređajima najčešće se sastoji od dva dijela, optičke staklene skale i fotoelektričnog čitača te se takva mjerna skala zove enkoderska mjerna skala. Slika 5. prikazuje enkodersku mjernu skalu.

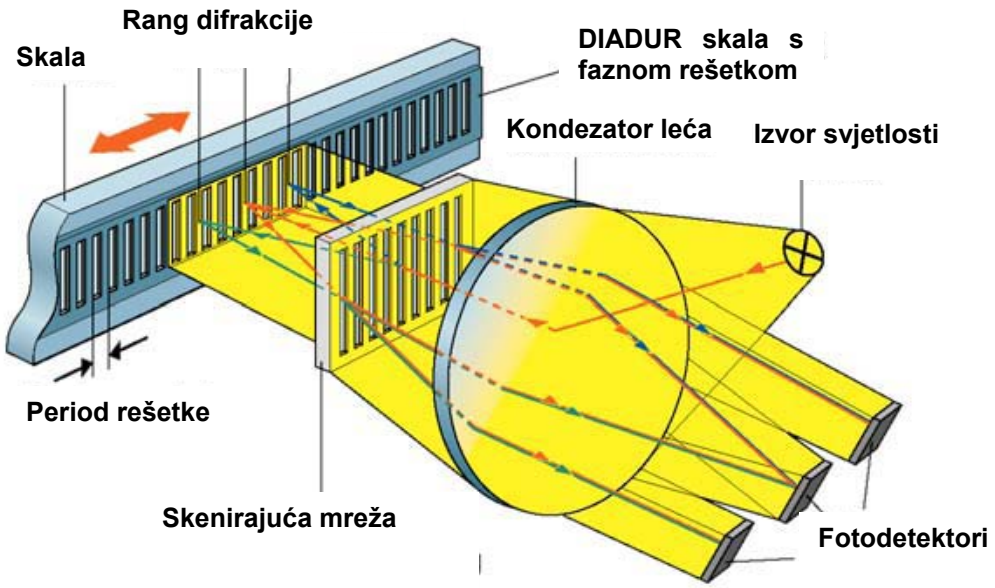
Slika 5. Enkoderska mjerna skala

Staklena mjerna skala klizi po fotoelektričnom čitaču koji osvjetljava linije kroma nanesene na staklo. Unutar čitača se nalaze fotodetektori koji generiraju električni signal. Za generiranje signala upotrebljavaju se tri najčešće metode: geometrijska, interferencijska i Moire efekt. Geometrijska metoda temelji se na činjenici da svjetlost putuje pravocrtno te je provođenje skeniranja moguće prolaznim i reflektirajućim načinom. Kod prolaznog načina pokretna mjerna skala smještena je između izvora osvjetljenja i fotodetektora dok su kod reflektirajuće metode izvor svjetla i fotodetektor s iste strane mjerne skale koja je pokretna. Prolazni i reflektirajući način generiranja signala prikazani su na slici 6.



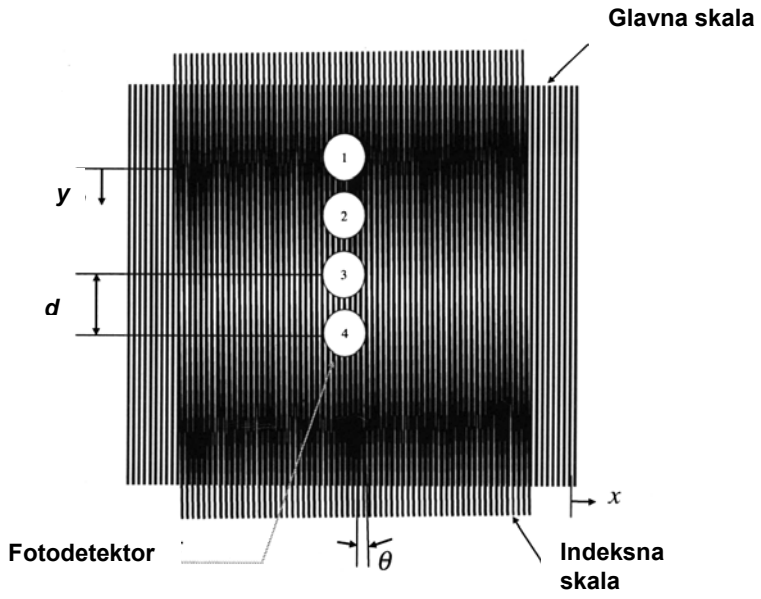
Slika 6. Geometrijska metoda generiranja signala (a - prolazni način, b - reflektirajući način)

Kako bi se generirao signal kod interferencijske metode, upotrebljava se difrakcija (ogib) svjetlosti na linijskoj podjeli skale. Interferencijska je metoda objašnjena na slici 7.



Slika 7. Interferencijska metoda generiranja signala

Dok se mjerna skala pomiče, svjetlost u obliku vala prolazi kroz pukotine na mjernoj skali gdje dolazi do difrakcije svjetlosti, odnosno promjene u fazi koja je proporcionalna pomaku. Enkoderske mjerne skale s upotrebom Moire efekta najčešće su upotrebljavane enkoderske skale zbog jednostavnosti izrade i jako dobre točnosti.



Slika 8. Moireov efekt

Moire enkoderske skale temelje se na generiranju Moireovih resa [18] (slika 8.) koje nastaju uslijed pomicanja glavne skale prema indeksnoj mjernoj skali koja je zakrenuta za kut φ. Dok se rese pomiču, fotodetektori detektiraju promjenu inteziteta svjetlosti, odnosno promjenu faze nastajanja resa koja je proporcionalna pomaku glavne skale.

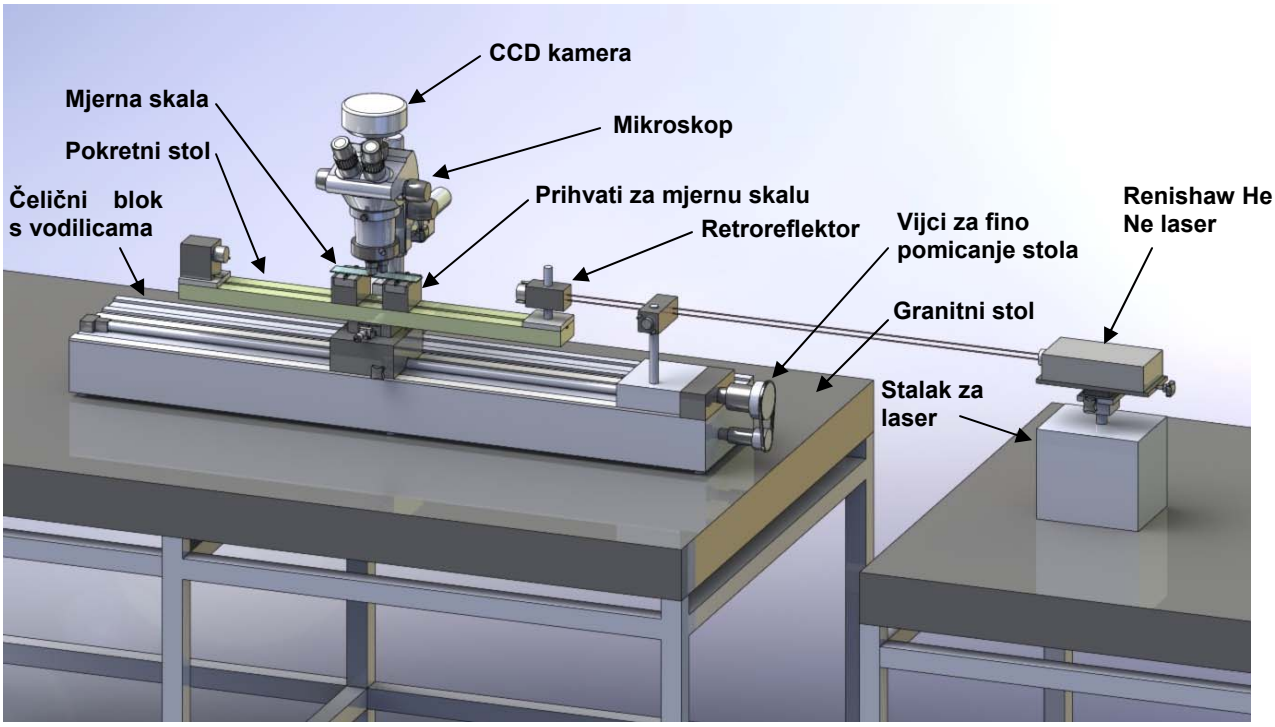
Kako bi se nanijele precizne linije kroma na staklenu površinu koristi se fotolitografski proces [28]. Tehnološki proces omogućava nanošenje linija debljine od svega nekoliko mikrometara. Debljina linija ovisi o upotrebi mjerne skale, a najčešće se kreće oko 40 mikrometara. Proces se odvija u čistoj sobi klase 100 uz upotrebu opreme koja je kompletno izolirana od ostatka prostorije kako bi se spriječile vibracije.

Pošto je tehnologija izrade mjernih skala jako komplicirana, u svijetu postoji svega nekoliko proizvođača mjernih skala (Heidenhainn, SIP...). Tek s razvojem digitalnih kamera i mikroskopa mjerne skale sve više ulaze u upotrebu. Stoga je i jasno da su mjerne skale etaloni duljine koji još uvijek nisu standardizirani i podijeljeni u klase za razliku od planparalelnih graničnih mjerki koje su ušle u upotrebu još u 19. stoljeću.
Iz svega navedenog jasno je da su mjerne skale jedan od osnovnih etalona duljine za umjeravanje optičkih sustava i fundamentalni element mjernih i proizvodnih uređaja, te je stoga mogućnost umjeravanja mjernih skala od vitalnog značaja za svaku državu pa tako i za Republiku Hrvatsku.

4. SUSTAV ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA IZRAĐEN U LFSB-U

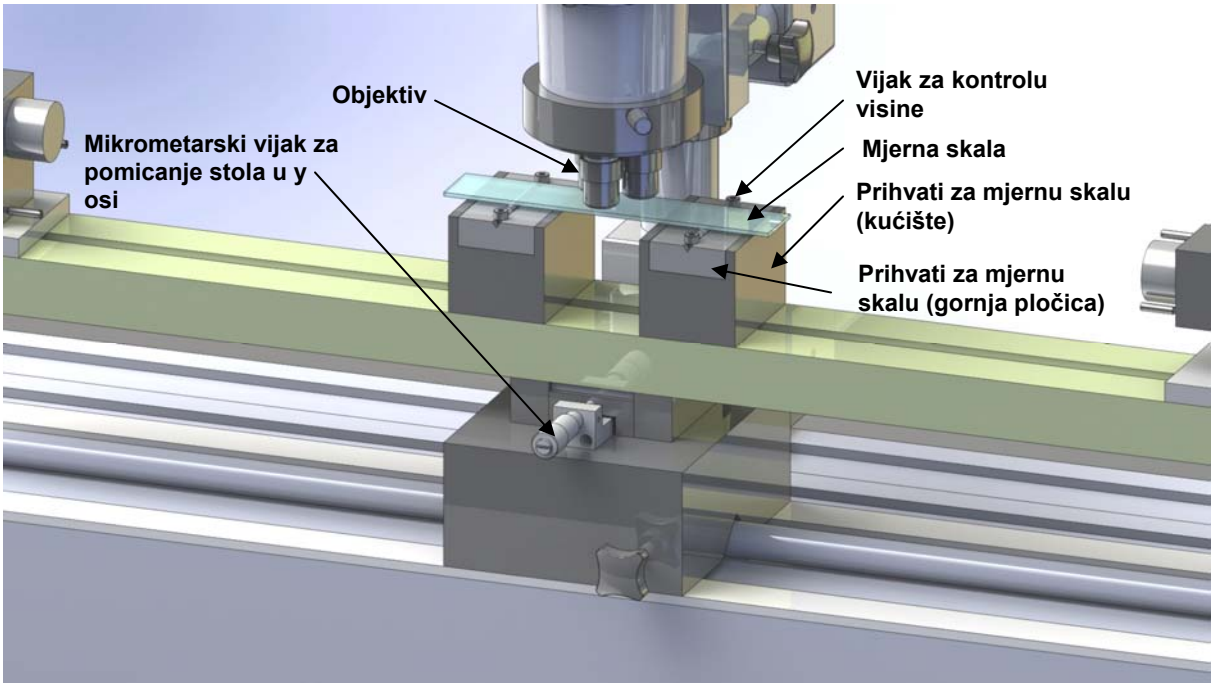
Pri razvoju sustava za umjeravanje mjernih skala velika je pozornost posvećena činjenici da sustav omogućava umjeravanje mjernih skala širokog mjernog područja. Mjerno područje sustava je 800 mm te je prvenstveno namijenjen za umjeravanje mjernih skala. Uređaj se sastoji od čeličnog kućišta s vodilicama po kojima klizi pokretni stol. U svrhu smanjenja utjecaja vibracija, čelično kućište uređaja je postavljeno na granitni stol koji je izoliran od zidova prostorije i tla po kojem se hoda. Princip rada sustava za umjeravanje mjernih skala prikazan je na slici 9.

Pomak pokretnog stola obavlja se ručno te je omogućeno fino pomicanje stola uz pomoć dva vijka. Veći vijak je preko redukcije spojen na manji vijak koji omogućava kontrolirano postizanje pomaka od 0,1 μm. Očitavanje pozicije tijekom pomaka stola osim na laserskom interferometru moguće je i na monitoru enkoderske skale kojom je uređaj opremljen.



Slika 9. Princip rada LFSB-ovog sustava za umjeravanje mjernih skala

Mjerni je sustav konstruiran u skladu s Abbeovim principom, tj. mjerna skala se nalazi u produžetku mjernog snopa pa su tako isključene pogreške 1. reda.

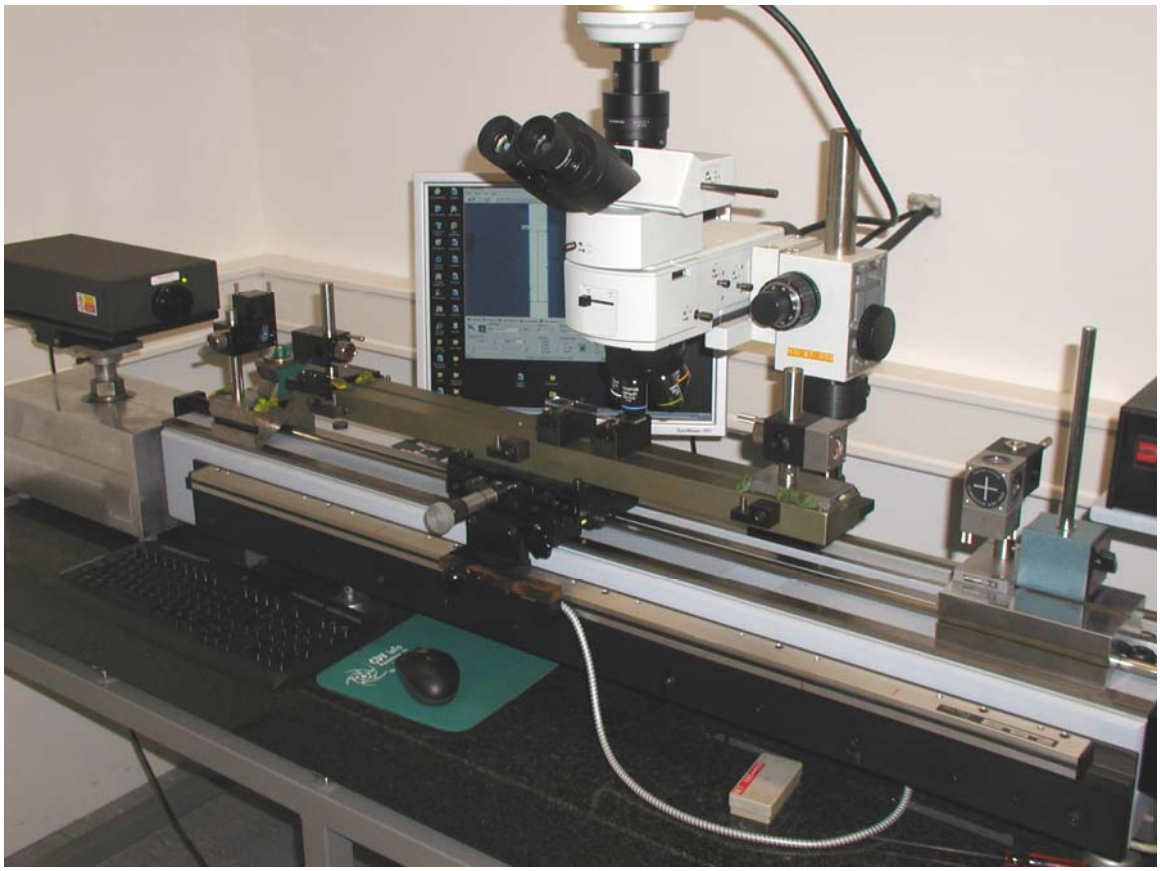


Slika 10. Prihvati za mjernu skalu

Osim pomaka u smjeru x osi, uređaj je opremljen i mikrometarskim vijkom koji omogućava fino podešavanje stola u smjeru y osi. Mjerno područje pomaka stola u y osi je 20 mm. Mjerna skala je preko dva valjčića oslonjena na prihvate (slika 10.) koji omogućavaju postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini. Prihvati su originalno konstruirani na način da gornja pločica prihvata ulazi u kućište s dvije opruge kroz koje su postavljena dva vijka čijim se zakretanjem kontrolira visina. Naime, opruge svojom silom pritišću pločicu prema gore, a vijak je održava u spoju s kućištem oslonca.

Na lijevom i desnom kraju pokretnog stola nalaze se prihvati za reflektor pa je tako omogućeno postavljanje reflektora na obje strane pokretnog stola što onda omogućava postavljanje izvora svjetla s obje strane uređaja.

Kako bi se smanjio utjecaj vibracija na izvor svjetla, Renishaw He-Ne laser je postavljen na posebno konstruiran aluminijski stalak (slika 18.) koji se postavlja direktno na granitni stol. Stalak omogućava fino podešavanje laserskog sustava u sve tri osi.



Slika 11. Uređaj za umjeravanje mjernih skala

Slika 11. prikazuje sustav za umjeravanje mjernih skala. Proces viziranja provodi se uz pomoć mikroskopa s digitalnom CCD kamerom Olympus DP 70 koja omogućava rezolucije slika od 12,5 megapiksela. Mikroskop je opremljen objektivima različitih povećanja, a izbor povećanja objektiva provodi se sukladno predmetu mjerenja.

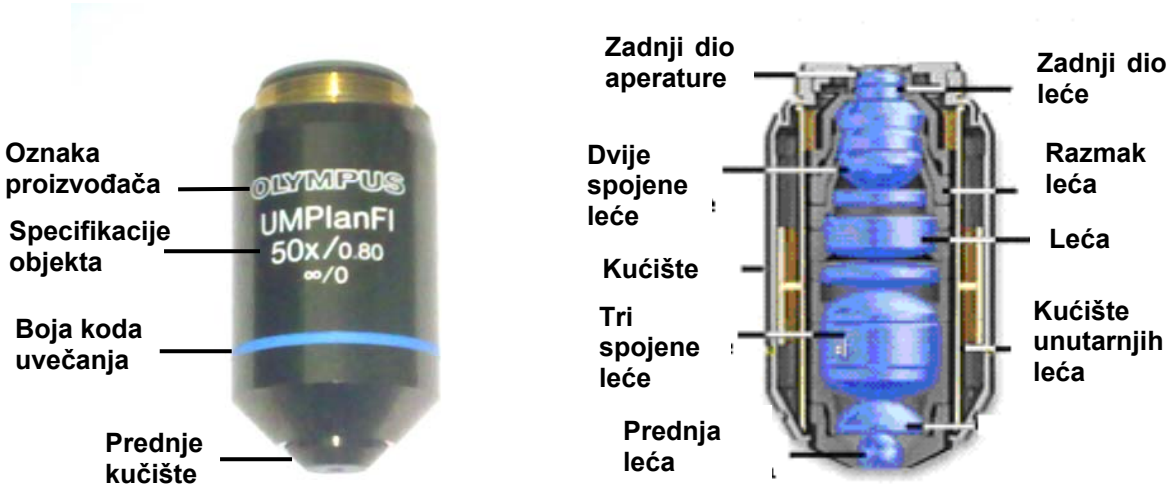
Mjerni sustav uređaja je komercijalni laserski interferometar (Renishaw ML 10). Izvor svijetlosti laserskog interferometra je He-Ne laser valne duljine 633 nm.

Umjeravanje mjernih skala je statično što znači da je neophodno obrađivati slike, a nije moguće obrađivati "živi" signal prikaza koji daje CCD kamera.

4.1 SUSTAV ZA VIZIRANJE

Osnovni element sustava za viziranje je komercijalni Olympus mikroskop BXFM-S koji je opremljen hladnim izvorom svjetla kako se ne bi zagrijavao predmet mjerenja.

Mikroskop je spojen s kućištem uređaja uz pomoć čelične cijevi i prihvata na kojemu se nalaze vijci za grubo i fino podešavanje visine. Mikroskop je opremljen objektivima različitih povećanja, a slika se može pratiti okom preko okulara ili na monitoru preko CCD kamere. Za viziranje linija mjerne skale upotrebljavaju se Olympus akromatski objektivi različitih povećanja (10X, 20X, 50X, 100X). Akromatski objektiv je najčešće upotrbljavan objektiv u mikroskopiji i daje jako kvalitetnu sliku za relativno niske troškove. Projektiran je tako da projicira svjetlo dviju određenih valnih duljina, jedne u plavom, a druge u crvenom području spektra, a projicira ga u isti fokus gdje se javlja kromatska aberacija (sekundarni spektar). Sastavni dijelovi objektiva prikazani su na slici 12.

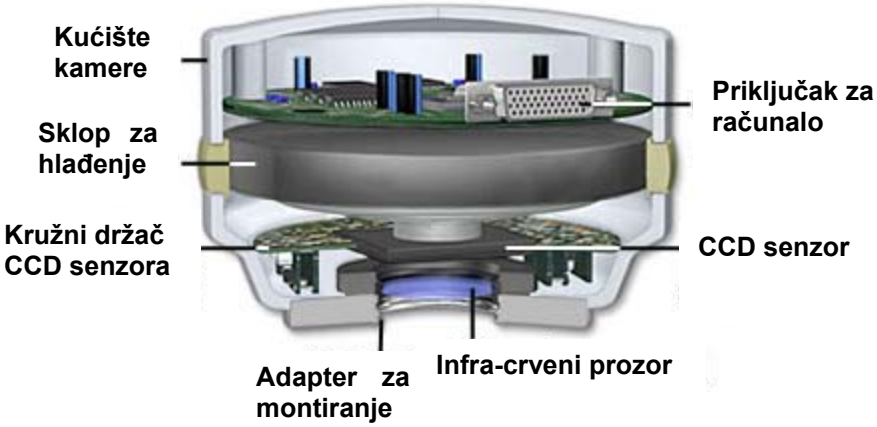


Slika 12. Olympus akromatski objektiv

Za viziranje linija upotrebljava se digitalna CCD (Charg Coupled Devices) kamera Olympus DP 70 koja je prikazana na slici 13. CCD kamera je najčešći tip kamere koji se upotrebljava u optičkim mjernim sustavima. Umjesto upotrebe filma, CCD senzor smješten iza leće pretvara intenzitet svjetla u elektronske signale koji se prenose direktno u računalo.

Slika 13. CCD kamera Olympus DP 70

Kamera DP 70 omogućuje računalni prikaz u više rezolucija (4080 x 3072 piksela, 2040 x 1536 piksela, 1360 x 1024 piksela i 680 x 512 piksela). Osnovni dijelovi kamere prikazani su na slici 14.

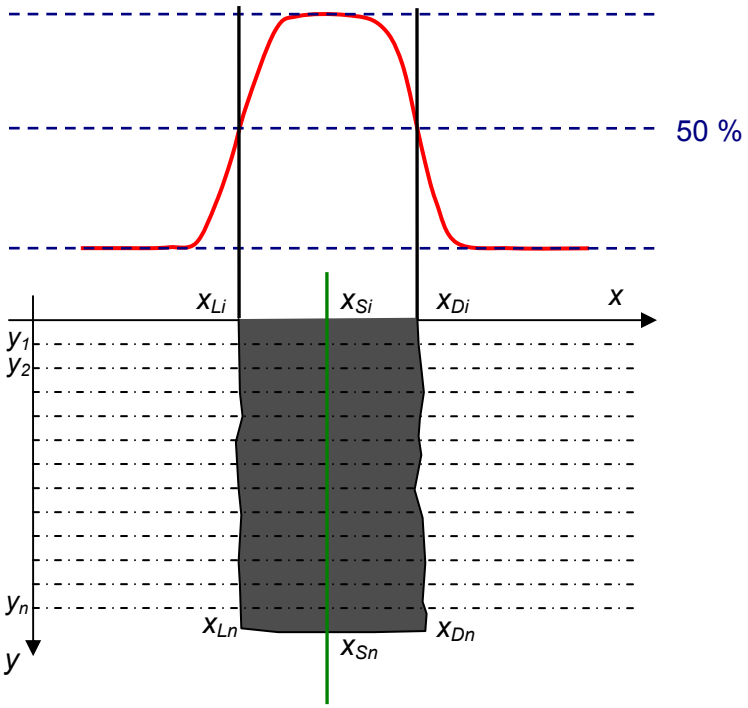


Slika 14. Osnovni dijelovi CCD kamere Olympus DP 70

4.2 SOFTVERSKO RJEŠENJE ZA VIZIRANJE LINIJA

Viziranje linije mjerne skale, odnosno pronalazak sredine linije skale provodi se uz pomoć originalnog softverskog rješenja čiji algoritam daje udaljenost sredine linije u pikselima od referentne linije koju predstavlja središnja linija ekrana. Piksel predstavlja najmanji element digitalne slike koji u zapisu slike ima određeni intenzitet. Proces obrade slike je statičan, odnosno, analizira se slika određene linije koja se postavlja što bliže središnjoj liniji ekrana kako bi moguća pogreška u kalibraciji pixela imala što manji utjecaj na krajnji rezultat mjerenja.

Dobivena slika CCD kamerom Olympus DP 70 je u boji, te se softverom za obradu slike prebacuje u sivu sliku s 256 nivoa. Kako bi se odredio granični nivo inteziteta piksela, kroz dobivenu sivu sliku linije provlači se srednja razdioba intenziteta na kojoj se uzimaju referentne linije koje se pak nalaze na 50% intenziteta kao što je prikazano na slici 15. Nakon što je tako određen granični nivo intenziteta piksela, slika se prebacuje u binarni oblik gdje su pikseli samo crni ili bijeli. Crni pikseli su oni s intenzitetom većim od graničnog nivoa intenziteta, a bijeli oni s nižim intenzitetom od graničnog nivoa intenziteta.



Slika 15. Princip rada algoritma za pronalazak sredine linije

Kada je dobivena crno bijela slika, sredina linije na razini y_i se računa prema izrazu:

$$x_{Si} = x_{Li} + \frac{x_{Di} - x_{Li}}{2} \tag{4.1}$$

gdje su:

x_{Li} - vrijednost piksela lijeve strane linije na razini y_i

x_{Di} - vrijednost piksela desne strane linije na razini y_i

x_{Si} - vrijednost piksela sredine linije na razini y_i

Nakon što su dobivene sredine linije na svim presjecima sredina linije se računa prema:

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{si}}{n} \tag{4.2}$$

Kako bi se vrijednost u pikselima prebacila u duljinske vrijednosti potrebno je provesti kalibraciju piksela. Proces kalibracije piksela provodi se apsolutno uzimanjem dviju slika iste linije, a koje su međusobno pomaknute za udaljenost očitanu na laserskom interferometru. Kalibraciju piksela potrebno je provesti svaki put prije upotrebe sustava za umjeravanje mjernih skala s ciljem da se izbjegnu male promjene u dužinskoj vrijednosti piksela koje bi se mogle pojaviti zbog različitog nivoa fokusa. Za objektiv povećanja 50 puta koji se uglavnom upotrebljava za viziranje linija na sustavu za umjeravanje mjernih skala, duljinska vrijednost jednog piksela iznosi 128 nm. Konačni rezultat mjerenja linije *i* dobiva se tako da se udaljenost sredine linije od središnje linije ekrana očita sa slike u pikselima (slika 16.), te se preko procesa kalibracije piksela, udaljenost u pikselima transformira u jedinicu duljine koja se pridodaje vrijednosti očitanoj na interferometru, odnosno rezultat mjerenja linije *i* iznosi:

$$L_{MSi} = L_{interf(i)} + L_{si} \tag{4.3}$$

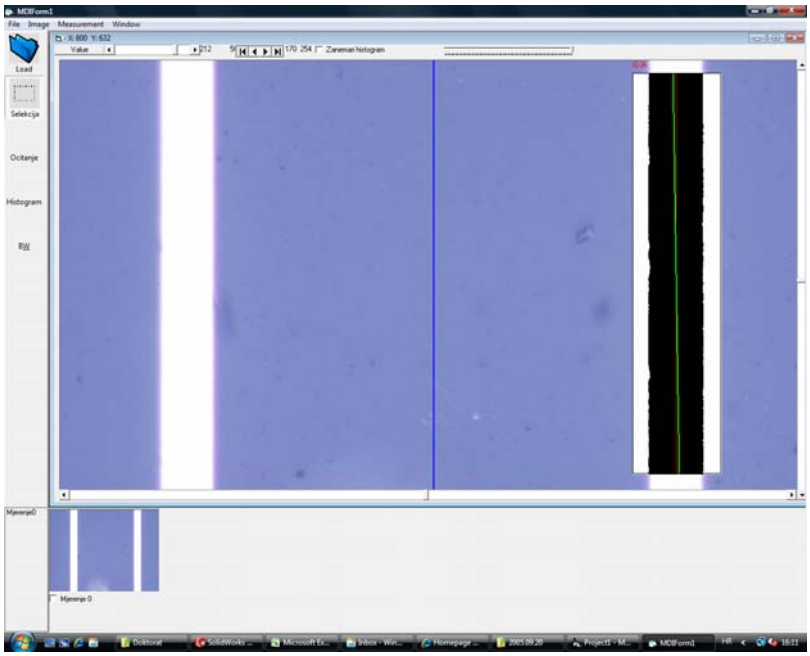
gdje su:

L_{MSi} - rezultat mjerenja linije *i*

$L_{interf(i)}$ - očitanje interferometra linije *i*

L_{Si} - udaljenost sredine linije *i* od središnje linije ekrana

Slika 16. prikazuje selektiranu liniju mjerne skale s pripadajućom sredinom linije koja je označena zelenom bojom.

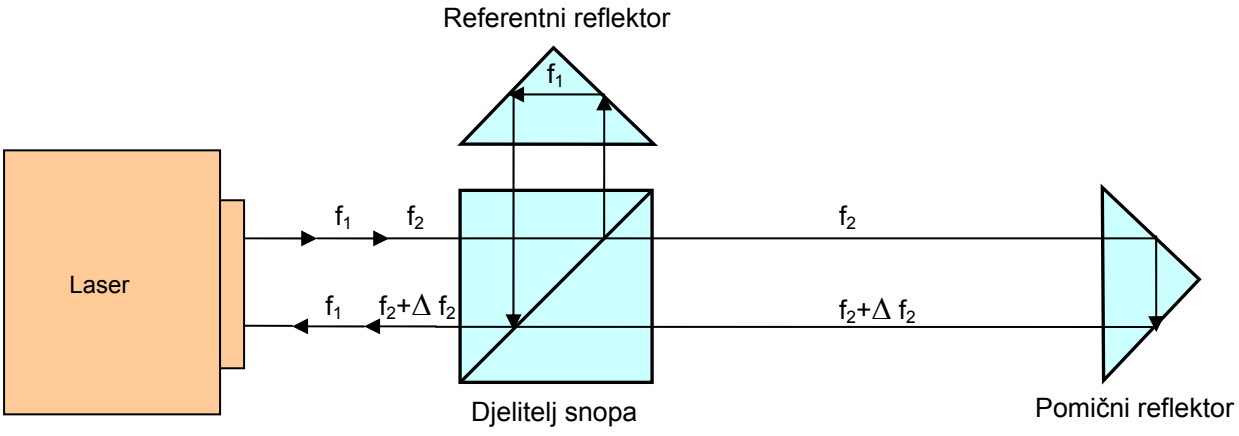


Slika 16. Princip rada algoritma za pronalazak sredine linije

Plava linija predstavlja središnju liniju ekrana te služi za što bliže postavljanje sredine mjerene linije središnjoj liniji ekrana kako bi kalibracija vrijednosti piksela imala što manji utjecaj na konačni mjerni rezultat.

4.3 LASERSKI INTERFEROMETAR

Renishaw ML 10 komercijalni laserski interferometar primarno se upotrebljava za umjeravanje i kontrolu pozicioniranja alatnih strojeva i koordinatnih mjernih uređaja. Konstruiran je kako bi se mogao lako premještati, postavljati i upotrebljavati. Laserski izvor svjetlosti je crveno vidljiv He-Ne laser valne duljine 0,633 μm, klase II (manje od 1 mW), kontinuiranog izlaza i dugotrajne stabilnosti. Glava lasera je dužine 335 mm, širine 176 mm i visine 75 mm, masa iznosi 4500 grama, a domet lasera je 40 metara. Laserski sustav je spojen s računalom preko programskog paketa Reinshaw Laser 10 koji računa pomake. Ovaj laserski interferometar omogućava mjerenja duljine, brzine, kuta i ravnosti. Optički princip rada laserskog He-Ne interferometra pri mjerenju duljine prikazuje slika 17 [11]. Iz laserskog izvora izlazi dvofrekvetna laserska zraka, frekvencija f_1 i f_2. Dvije frekvencije nastale uslijed Zeemanovog efekta međusobno su linearno ortogonalno polarizirane, od kojih je jedna okomita, a druga horizontalna tako da ih je moguće djeliteljem snopa odvojiti u dvije strane interferometra. Djelitelj snopa propušta frekvenciju f_2 kojom se mjeri (mjerni dio zrake), a frekvencija f_1 reflektira se od reflektora koji se nalazi na djelitelju snopa (zajedno čine interferometar) te se vraća nazad u glavu lasera (referentni dio zrake).



Slika 17. Optički princip rada He-Ne interferometra

Tijekom provođenja mjerenja jedna optička komponenta (interferometar) je fiksna dok se druga (reflektor) giba duž osi. Kada se reflektor pomakne, reflektirana frekvencija f_2

modificira se uz Dopplerov efekt za Δf_2 i vraća nazad u lasersku glavu. Prema Dopplerovom efektu mjerni se snop modificira:

$$f_2 + \Delta f_2 = \frac{c \pm c_z}{c} \cdot f_2 \tag{4.4}$$

gdje je:

f_2 - frekvencija mjernog snopa

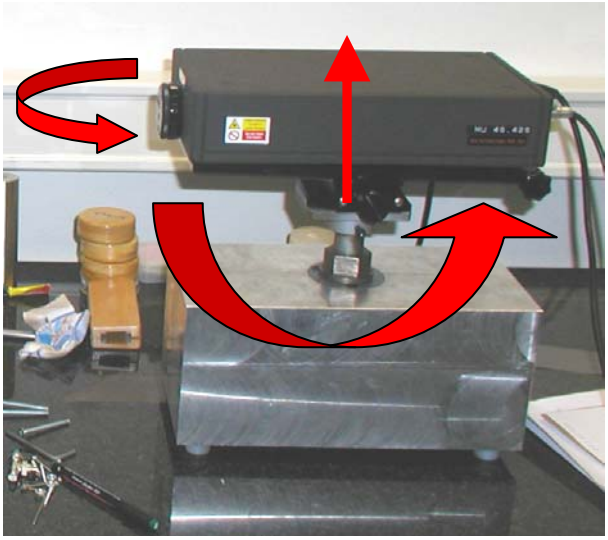
Δf_2 - promjena frekvencije mjernog snopa

c_z - brzina pomicanja mjernog sustava

Zbog razlike udaljenosti između fisknog i pomičnog reflektora, mjerni snop 2 s frekvencijom f_2 kasni u foto diodu u odnosu na referentni snop s frekevencijom f_1 koji je putovao do fiksnog reflektora. U foto diodi se prikupljaju oba snopa istovremeno, snopovi su relativno bliskih frekvencija, a jednakih amplituda. Zbog kašnjenja mjernog snopa 2 javlja se interferencijska pojava. Izlaz iz foto diode je signal koji se uobičajeno naziva udarom, a intenzitet izlaznog signala periodički se mijenja s frekvencijom koja je jednaka razlici frekvencija signala koji ulazi u fotodiodu. Obzirom na uobičajene vrijednosti ta frekvencija (beet frequency) ulazi u mikrovalno područje. Foto diode u laserskoj glavi na taj način mjere frekvenciju povratnog signala i tako sustav računa pomak koji se povećava ili smanjuje za pomak reflektora u iznosu od λ/2.

4.3.1 Postavljanje suosnosti laserskog interferometra s pravcem kretanja pokretnog stola

Jedan od ključnih utjecaja na mjernu nesigurnost umjeravanja mjernih skala je postavljanje suosnosti laserskog interferometra s pravcem kretanja pokretnog stola. Naime, izlazni se mjerni snop iz lasera koji prolazi kroz interferometar i reflektira se od pomičnog reflektora mora vratiti točno u središte povratne mete na laseru. Kako bi se to postiglo, potrebno je pravilno postaviti optičke komponente i laser (izvor svjetlosti), odnosno potrebna je mogućnost finog podešavanja laserske glave. Kako je već opisano, dizajniran je poseban prihvat za lasersku glavu koji omogućava fini pomak laserske glave u smjeru osi *z*, te rotaciju laserske glave oko sve tri osi. Izrađeni prihvat za laser prikazan je na slici 18.

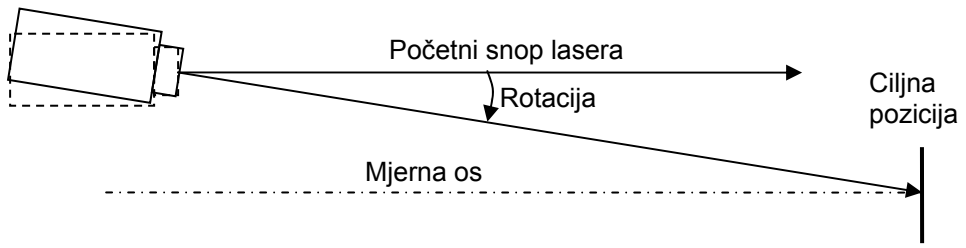


Slika 18. Prihvat za lasersku glavu

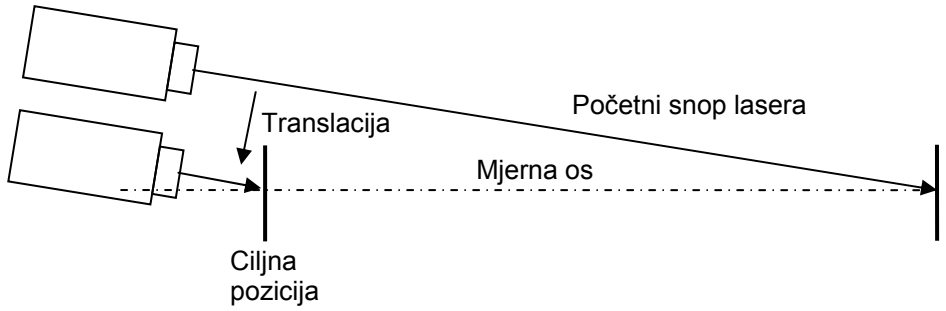
Postavljanje suosnosti laserskog interferometra započinje s podešavanjem visine prihvata u smjeru osi *z*. Visina prihvata, odnosno visina postavljenog pomičnog interferometra odabire se kako bi Abbeova pogreška bila što manja, odnosno kako bi mjerni snop bio u ravnini graviranih linija koje su najčešće na površini mjerne skale. Početno postavljanje suosnosti provodi se bez interferometra, odnosno upotrebljava se samo pomični reflektor. Interferometar se postavlja tek kad je postavljena suosnost s pomičnim reflektorom. Kada je visina prihvata postavljena na način da se povratni snop

vraća u visinu povratne mete na laseru slijedi fino podešavanje laserske glave odnosno pomičnog interferometra. Proces se vrši iterativno i prikazan je na slici 19. Pomični reflektor prvo se postavlja na dalji kraj putanje. Laserska se glava zatim rotira u horizontalnoj (XY) i vertikalnoj (XZ) ravnini sve dok se povratni snop ne fokusira na otvor ili metu pomičnog reflektora.

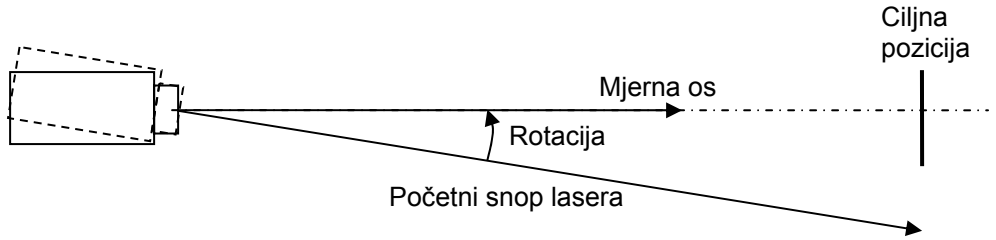
a) Prvi korak – rotacija udaljenijeg kraja



b) Drugi korak – translacija bližeg kraja



c) Treći korak – rotacija udaljenijeg kraja



Slika 19. Postupak postavljanja suosnosti laserskog interferometra

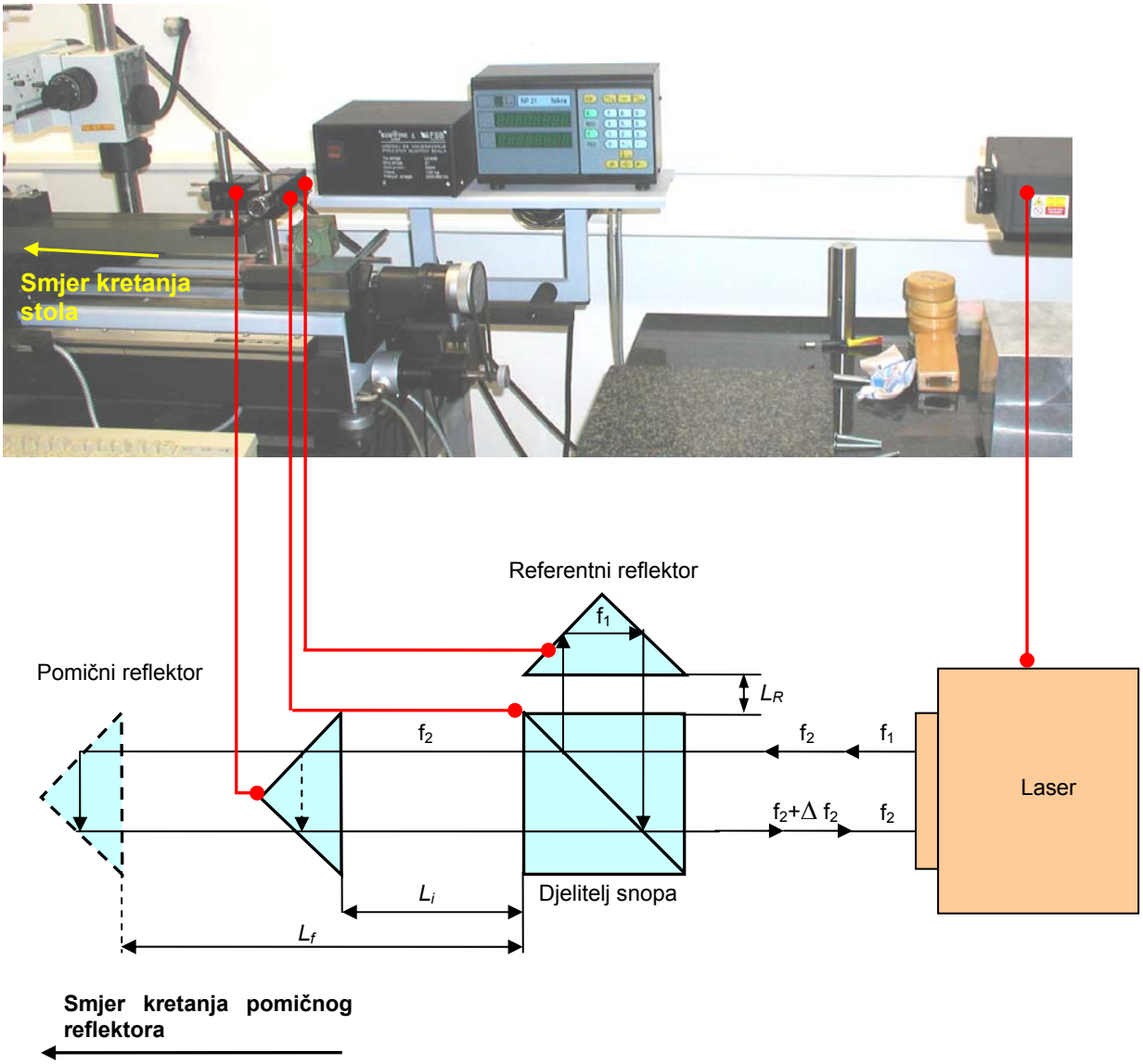
Tada se pomični reflektor postavlja na bliži kraj putanje. Laserska se glava tada translatira u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini te se povratni snop ponovno fokusira na otvor ili metu. Treći korak je pomicanje pomičnog reflektora na udaljeniji kraj putanje, a ujedno i ponovna rotacija lasera u obje ravnine te njegovo ponovno fokusiranje na otvor ili metu. Opisani se postupak ponavlja sve dok se ne postigne potpuno poklapanje snopa s mjernom osi. Nakon toga se postavlja interferometar na način da se oba reflektirana snopa (od pomičnog i fiksnog reflektora) vraćaju točno u sredinu mete na laserskoj glavi. Kada je to postignuto, pristupa se pronalasku prekretnih točaka i to na način da se pomični reflektor postavlja što bliže interferometru, na svega nekoliko milimetara te se laser polagano rotira u obje ravnine. Ukoliko postoji bilo kakva promjena u očitanju laserskog interferometra, povratni snop iz optike nije u osi s ulazom odnosno metom na laseru te je potrebno dodatno podešavanje optike sve dok nema promjene u očitanju laserskog interferometra.
Nakon toga se pomični reflektor pomiče u dalji kraj putanje te se laser ponovo polagano rotira u obje ravnine. Dok se laser rotira pažljivo se prati očitanje interferometra. Rotacija lasera u svakoj od ravnina provodi se sve dok se ne očita maksimalna vrijednost na laserskom interferometru. Kada je očitana maksimalna vrijednost, laserski interferometar je u suosnosti s pravcem kretanja pokretnog stola.

4.3.2 Postavljanje laserskog interferometra i mrtvi hod

Pri razvoju ovog mjernog sustava omogućeno je postavljanje izvora svjetla (lasera) s obje strane strane pokretnog stola. Sam način postavljanja lasera uvelike utječe na postavljanje suosnosti laserskog interferometra s pravcem kretanja pokretnog stola te na pogrešku mrtvog hoda što u konačnici utječe i na mjernu nesigurnost umjeravanja. Naime, kako je već opisano u poglavlju 4.3.1, povratni laserski snop mora se vratiti točno u sredinu mete na laseru. Ukoliko je duljina puta laserskog snopa različita za isto odstupanje laserskog snopa od sredine mete, onda je pogreška postavljanja suosnosti obrnuto proporcionalna duljini puta, tj. što je put laserskog snopa dulji, to je za isto odstupanje laserskog snopa od sredine mete pogreška postavljanja suosnosti manja. Iz

navedenoga je jasno da je laser potrebno postaviti što dalje od pomičnog reflektora kako bi umanjili pogrešku susosnosti interferometra s pravcem kretanja pokretnog stola.

Pri razvoju mjernog sustava predviđeno je da se laser nalazi s desne strane pokretnog stola što vodi manjoj pogrešci mrtvog hoda. Slika 20. prikazuje konkretan prikaz uređaja i postavljanja optičkih komponenti kada se izvor svjetla nalazi s desne strane uređaja.



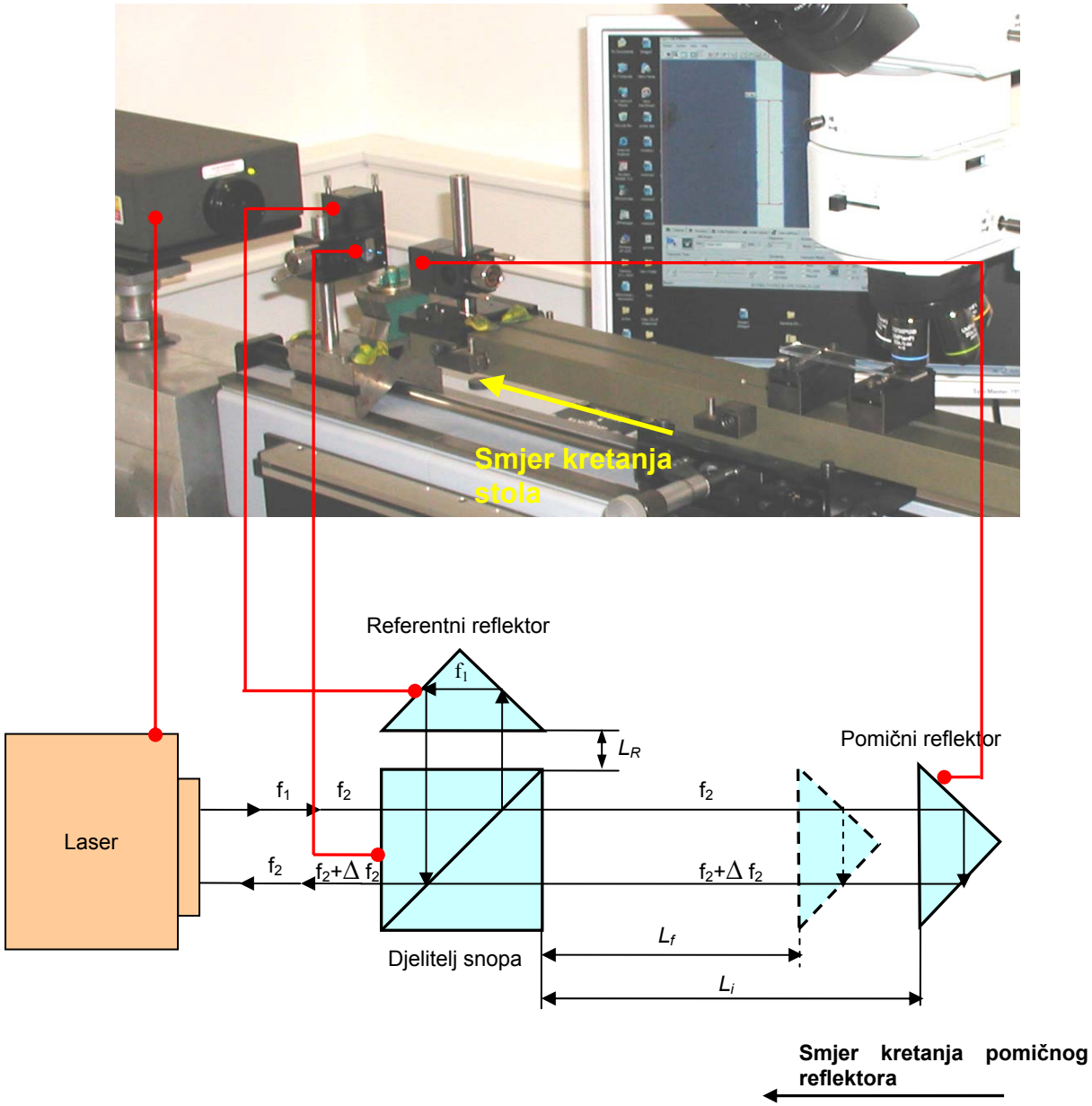
Slika 20. Postavljanje interferometra i reflektora s udaljavanjem pomičnog reflektora od djelitelja snopa

Sa slike 20. vidljivo je da se u ovoj postavci lasera i optičkih komponenti pomični reflektor udaljava od interferometra pa se može umanjiti pogreška mrtvog hoda. Naime, pogreška mrtvog hoda definirana je kao razlika optičkih puteva između mjerne i referentne grane kod postavljanja interferometra na nulu. Po toj definiciji duljina mrtvog hoda jednaka je $L_{mh}=L_i-L_R$. Kako je kod ove konfiguracije interferometra referentni reflektor direktno postavljen na djelitelj snopa što je vidljivo sa slike 20., onda je L_R približno jednak nuli, pa duljina mrtvog hoda iznosi $L_{mh}=L_i$. Duljina L_i je početna duljina između pomičnog reflektora i djelitelja snopa, te je sa slike 20. vidljivo da ona iznosi svega nekoliko milimetara pa je pogreška mrtvog hoda u ovoj postavci lasera i optičkih komponenti svedena na minimum.

Ukoliko se zbog specifičnosti predmeta umjeravanja laser postavi s lijeve strane pokretnog stola, mjerenja se provode na način da se pomični reflektor približava interferometru te se na taj način nikako ne može umanjiti pogreška mrtvog hoda.

Slika 21. prikazuje konkretan prikaz uređaja i postavljanja optičkih komponenti kada se izvor svjetla nalazi s lijeve strane uređaja. Kod ovog načina postavljanja lasera i optičkih komponenti, pomični se reflektor približava interferometru pa se ne može umanjiti pogreška mrtvog hoda. Naime, kao što je već rečeno, pogreška mrtvog hoda definirana je kao razlika optičkih puteva između mjerne i referentne grane kod postavljanja interferometra na nulu. Po toj definiciji duljina mrtvog hoda iznosi $L_{mh}=L_i$., a kako je duljina L_i minimalno jednaka duljini mjerne skale koja se mjeri, to znači da će u ovoj postavci lasera i optike uvijek postojati pogreška mrtvog hoda koja će minimalno biti jednaka dužini mjerne skale koja se umjerava.

Kako je ova definicija mrtvog hoda postavljena za slučajeve kada se pomični reflektor udaljava od djelitelja snopa, u ovakvom slučaju kada se reflektor približava djelitelju snopa puno je bolje koristiti termin "pogreška nultog položaja" umjesto "pogreška mrtvog hoda". Na taj je način sasvim svejedno je li se pomični reflektor približava ili udaljava od djelitelja snopa.



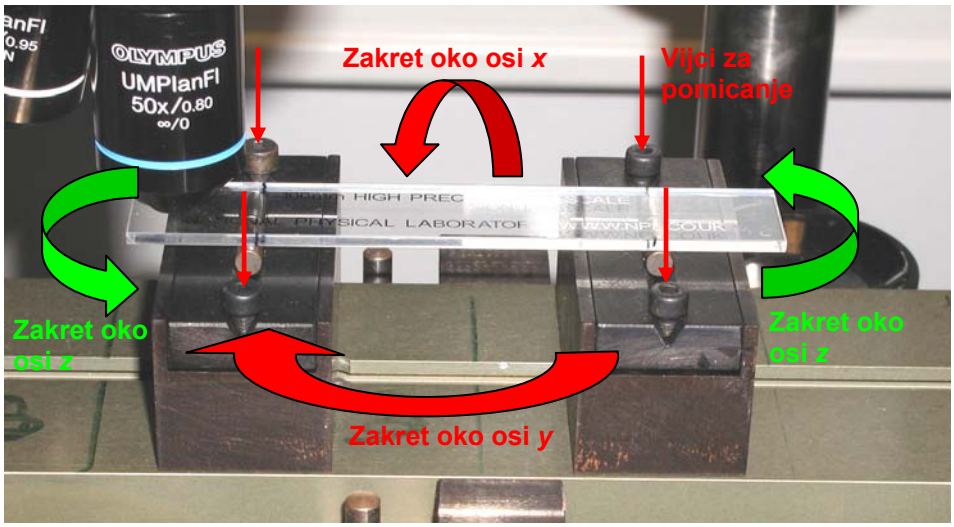
Slika 21. Postavljanje interferometra i reflektora s približavanjem pomičnog reflektora djelitelju snopa

4.4 POSTAVLJANJE SUOSNOSTI MJERNE SKALE S PRAVCEM KRETANJA POKRETNOG STOLA

Jedan od značajnijih utjecaja na mjernu nesigurnost je i postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola pa se stoga samom procesu postavljanja suosnosti mjerne skale mora posvetiti posebna pozornost. Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola provodi se u horizontalnoj (XY) i vertikalnoj (XZ) ravnini.

4.4.1 Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini

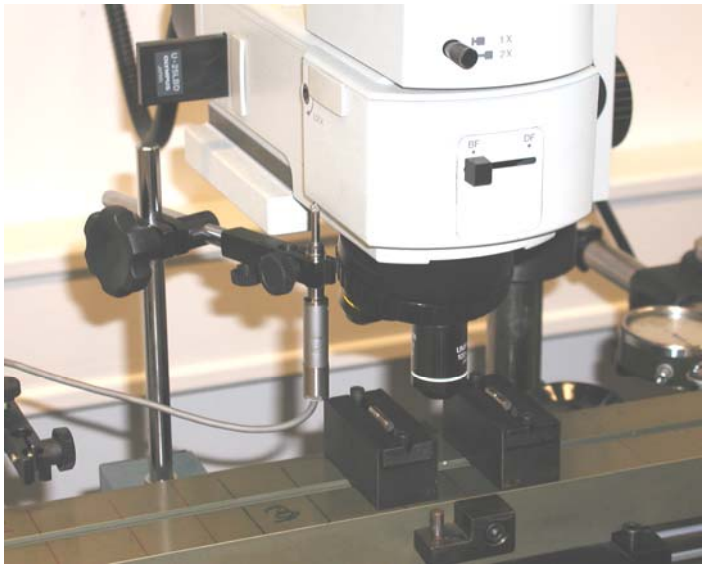
Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini jedan je od ključnih utjecaja na mjernu nesigurnost. Naime, osim na samu suosnost mjerne skale s mjernim snopom, postavljanje suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini utječe i na fokus mikroskopa, odnosno na kvalitetu slike određene linije skale. Pošto se kod objektiva povećanja 50 puta fokus nalazi unutar svega nekoliko mikrometara, potrebno je osmisliti posebne prihvate koji će omogućiti što bolje postavljanje skale odnosno što manji gubitak fokusa. Prihvati koji omogućuju fino podešavanje skale u vertikalnoj ravnini prikazani su na slici 22. Osnova samog prihvata je pločica koja je uz pomoć dva vijka spojena s osloncem prihvata.



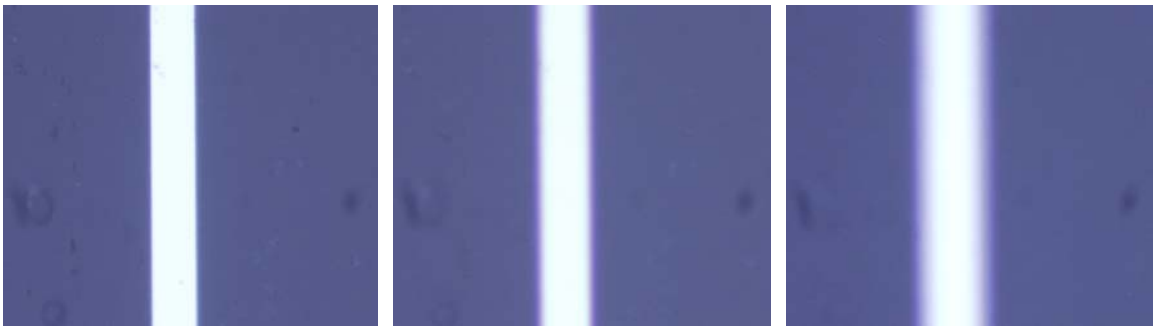
Slika 22. Prihvati za mjernu skalu i podešavanje mjerne skale

Pomicanje u vertikalnoj ravnini omogućeno je uz pomoć dviju opruga koje su postavljene između pločice i oslonca prihvata. Laganim uvijanjem ili odvijanjem vijaka kontrolira se visina i na taj se način kontroliraju zakreti oko osi *x* i osi *y* kao što je crvenim strelicama prikazano na slici 22. Zakret oko osi *z* (postavljanje suosnosti u horizontalnoj ravnini) provodi se laganim pomicanjem jednog odnosno drugog prihvata mjerne skale te je zelenim strelicama prikazan na slici 22. Mjerna skala je preko dvaju valjčića slobodno oslonjena na prihvate u "Airy" točkama. "Airy" točke predstavljaju točke oslanjanja mjerne skale kod kojih je najmanje smanjenje duljine mjerne skale uslijed savijanja pod utjecajem vlastite težine.

Samo postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini odvija se uz upotrebu mikroskopa i objektiva povećanja 50 puta. Naime, fokus objektiva 50 puta nalazi se na točno definiranoj udaljenosti između objektiva i predmeta mjerenja pa je samom kontrolom fokusa mikroskopa moguće provesti postavljanje suosnosti mjerne skale i pravca kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini. Kako bi se točno utvrdilo koliko iznosi gubitak fokusa, provedeno je istraživanje gubitka fokusa objektiva 50 puta uslijed pomaka u osi *z*. Naime, kako bi se pouzdano provelo postavljanje suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini potrebno je pouzdano znati koliko pomak u osi *z* utječe na gubitak fokusa. Pomak u osi *z* mjeren je pomoću elektronskog komparatora s militronom "Mahr" kako je prikazano na slici 23. Rezultirajuće slike gubitka fokusa uslijed pomaka u osi *z* prikazuje slika 24.



Slika 23. Mjerenje utjecaja pomaka u osi *z* na fokus mikroskopa

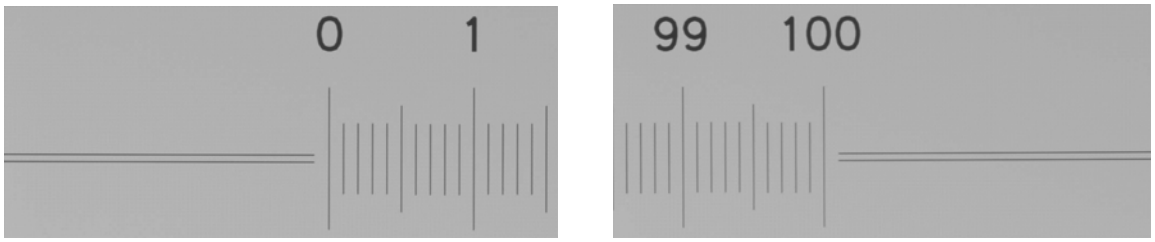


Slika 24. Gubitak fokusa mikroskopa za različite pomake u osi *z* (a - bez pomaka, tj. u fokusu, b – pomak od 2 μm, c – pomak od 5 μm)

Sa slike 24. jasno je vidljivo da pomak već od 2 μm (slika 3 - b) u smjeru osi *z* rezultira jasno vidljivim gubitkom fokusa. Gubitak fokusa za pomak od 5 μm prikazuje slika 3 - c. Postavljanje suosnosti u vertikalnoj ravnini provodi se na način da se objektiv postavlja iznad lijeve "Airy" točke mjerne skale te se slika postavlja u fokus pomicanjem mikroskopa u *z* osi. Kada je linija skale u fokusu, pokretni stol pomiče se u lijevo kako bi se dobio fokus linije na desnoj "Airy" točki mjerne skale. Dobivanje fokusa linije mjerne skale provodi se uvijanjem ili odvijanjem vijaka na prihvatu kako prikazuje slika 22. Kada je linija na desnoj "Airy" točki u fokusu, pokretni se stol pomiče u desno kako bi se provjerio fokus na lijevoj "Airy" točki te se ako je potrebno provodi odvijanje ili uvijanje vijaka na prihvatu. Za dobro postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola potrebno je nekoliko puta pomicati stol ulijevo i udesno te odvijati ili uvijati vijke na prihvatima mjerne skale.

4.4.2 Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini

Mjerne skale uobičajeno posjeduju dvije horizontalno paralelne linije na početku i na kraju koje služe za postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u horizontalnoj (XY) ravnini. Kod NPL-ove mjerne skale udaljenost među tim linijama iznosi 50 μm. Slika 25. prikazuje detalje NPL-ove mjerne skale.

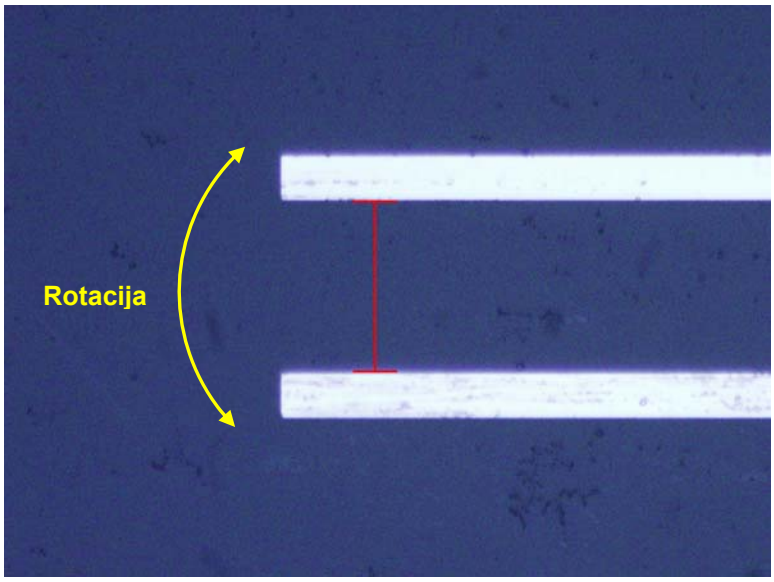


Slika 25. Detalj NPL-ove mjerne skale

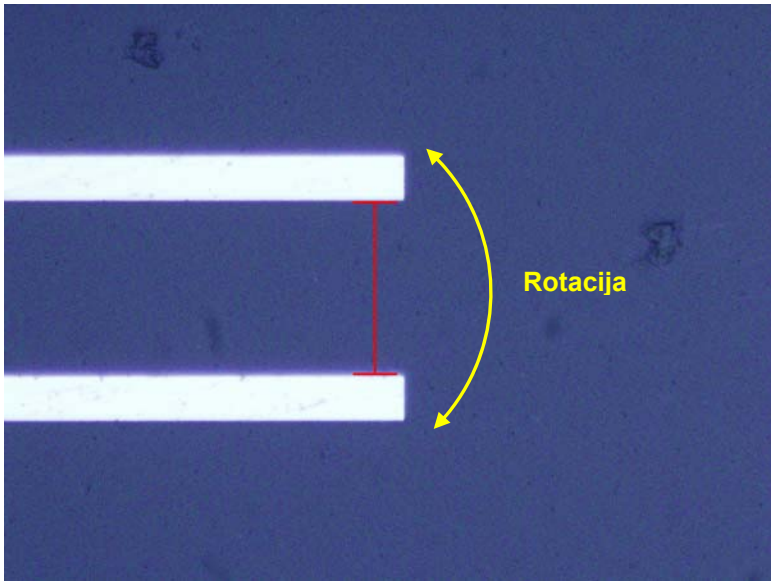
Za postavljanje suosnosti skale s pravcem kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini upotrebljava se mikroskop s kamerom i objektiv 50 puta kojim se provodi i samo mjerenje. Prije upotrebe objektiva povećanja 50 puta provodi se grubo postavljanje suosnosti upotrebom manjeg povećanja (10 ili 20 puta). Sam proces postavljanja suosnosti provodi se na način da se pokretni stol pomiče u desno toliko dugo dok paralelne linije lijevo od linije 0 nisu u vidnom polju objektiva, odnosno da su vidljive na monitoru. Nakon toga se postavlja marker duljine koja je jednaka razmaku među paralelnim linijama.

Laganim zakretanjem u horizontalnoj ravnini paralelne se linije moraju poklopiti s markerom kako je prikazano na slici 26. Zakretanje se provodi laganim pomicanjem oba prihvata skale u smjeru osi *y* te se ostvaruje zakret oko osi *z* koji je zelenim strelicama prikazan na slici 22.

Nakon toga se pokretni stol pomiče ulijevo kako bi u vidno polje objektiva došle paralelne linije koje se nalaze na kraju mjerne skale. Postupak je isti kao i na početku mjerne skale, tj. skala se lagano rotira u horizontalnoj ravnini sve dok se paralelne linije ne poklope s markerom kao što je prikazano na slici 27.



Slika 26. Postavljanje suosnosti mjerne skale (početak mjerne skale)



Slika 27. Postavljanje suosnosti mjerne skale (kraj mjerne skale)

Obično je za ovako dobro poklapanje paralelnih linija s markerom kao što je to prikazano na slikama 26. i 27., postupak pomicanja stola i laganog zakretanja skale potrebno ponoviti nekoliko puta. Kada je postignuto poklapanje paralelnih linija s markerom na početku i na kraju mjerne skale, postavljena je suosnost mjerne skale i pravca kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini.

Usporedno s izradom uređaja uspostavljani su i kontakti s poznatim svjetskim mjeriteljskim institutima koji imaju dugogodišnje iskustvo iz umjeravanja mjernih skala. Ta suradnja rezultirala je boravkom autora ovog rada u PTB-u tijekom kojeg je

provedeno mjerenje NPL-ove mjerne skale koja je nabavljena tijekom izrade uređaja. U sklopu boravka u PTB-u autor je u potpunosti ovladao postupkom umjeravanja mjernih skala na njihovom mjernom sustavu.

5. REFERENTNA MJERNA SKALA

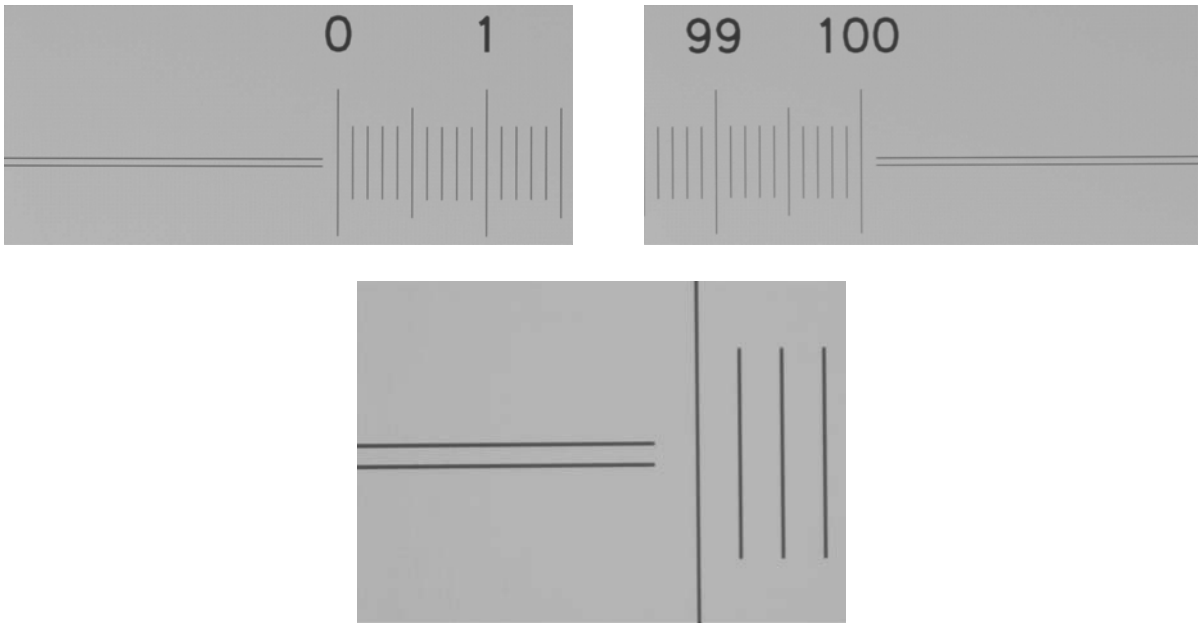
Autor ovog rada u tri je navrata boravio u Njemačkom mjeriteljskom institutu PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Njemačka) gdje je bio na usavršavanju iz područja umjeravanja mjernih skala i upotrebe mikroskopa u postupku viziranja linija mjerne skale. Dobivena iskustva u tim posjetima bila su od velike važnosti pri razvoju sustava za umjeravanje mjernih skala te za istraživanja provedena u ovom radu. Tijekom boravka u PTB-u autor je provodio istraživanja mjereći NPL-ovu mjernu skalu duljine 100 mm koja je u vlasništvu Laboratorija, te je mjerenja provodio na jednom od najmodernijih sustava za umjeravanje mjernih skala na svijetu [3]. Naime, prije početka upotrebe uređaja neophodno je posjedovanje određenih "fiksnih točaka" koje će se upotrebljavati kao referentne vrijednosti pa se stoga još tijekom izrade uređaja pristupilo nabavci kvalitetne mjerne skale.

5.1 NPL MJERNA SKALA

Mjerna skala je kompletno izrađena u NPL-u, napravljena je od kvarca i upotrebljava se kao etalon u preciznim beskontaktnim umjeravanjima koja se provode u industrijske svrhe. Slika 28. prikazuje NPL-ovu mjernu skalu. Kao i većina mjernih skala koje se koriste u svrhu umjeravanja optoelektroničkih uređaja tako i ova mjerna skala ima ugravirane linije na samoj površini mjerne skale. Zbog materijala izrade, dujlina ove mjerne skale nije jako ovisna o temperaturi pošto joj koeficijent temperaturnog rastezanja iznosi α=0,5 K^{-1}.

Slika 28. NPL-ova mjerna skala

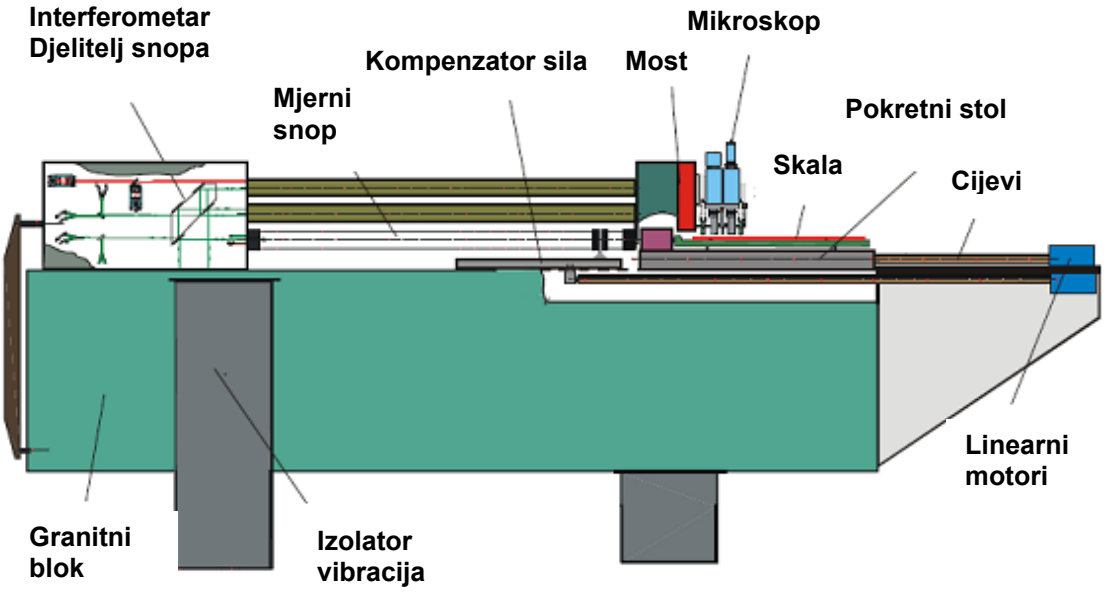
Nazivna debljina linija mjerne skale iznosi 3 μm. Mjerna skala posjeduje dvije paralelne linije na početku i na kraju mjerne skale koje su udaljene 50 μm i koje služe za postavljanje suosnosti mjerne skale i pravca kretanja stola u horizontalnoj ravnini. Slika 29. prikazuje detalje NPL-ove mjerne skale.



Slika 29. NPL-ova mjerna skala

5.2 NANOMETER KOMPARATOR

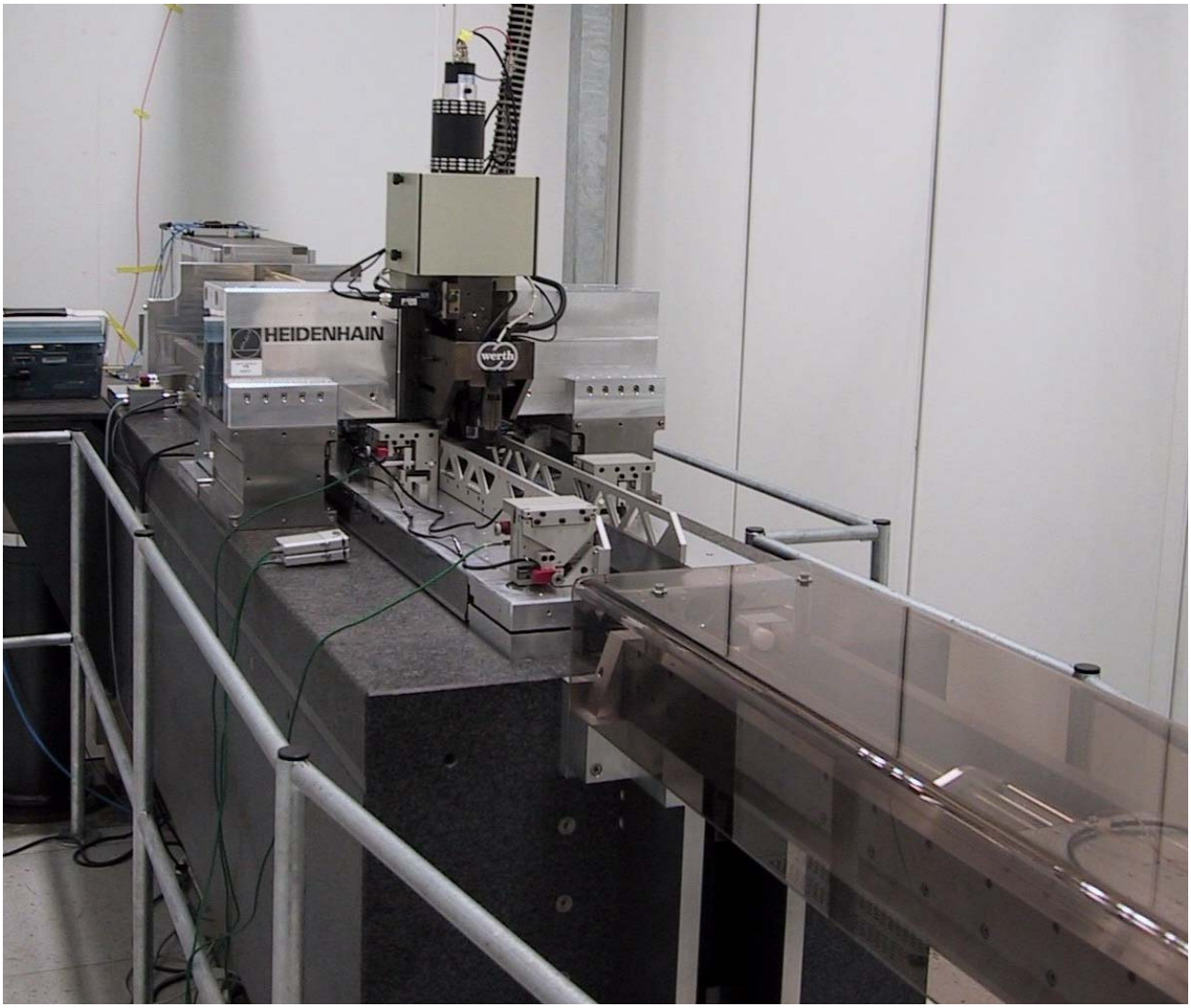
Tijekom studijskog boravka u njemačkom mjeriteljskom institutu PTB autor je ovog rada provodio mjerenja mjernih i enkoderskih skala na njihovom uređaju za umjeravanje mjernih skala [3]. Uređaj je zamišljen za osiguranje direktne sljedivosti prema definiciji metra. Uređaj je nazvan "Nanometer komparator" i prvenstveno je namijenjen za umjeravanje mjernih skala, linearnih enkodera i laserskih interferometara. Mjerno područje uređaja je 610 mm, te je uređaj razvijen u suradnji PTB-a i tvornica mjerne opreme Dr. Johannes Heidenhain Gmbh i Werth Mestechnik Gmbh. Slika 30. prikazuje princip rada Nanometer komparatora [3].



Slika 30. Princip rada nanometer komparatora

Kako bi se postigle najbolje mjeriteljske sposobnosti, interferometar uređaja kompletno je smješten u vakuumu dok se mjerni objekti nalaze u atmosferskim uvjetima pošto je rukovanje mjernim objektima u atmosferskim uvjetima puno jednostavnije nego u vakuumu. Isto tako, razlika između atmosferskog tlaka i vakuuma mogla bi uzrokovati razliku duljine mjernog objekta. Zbog toga se kod većine mjernih uređaja mjerni objekti nalaze u atmosferskim uvjetima sa strogo kontroliranom temperaturom. Nanometer komparator prati klasični dizajn Abbeovog komparatora, odnosno mjerni se objekt

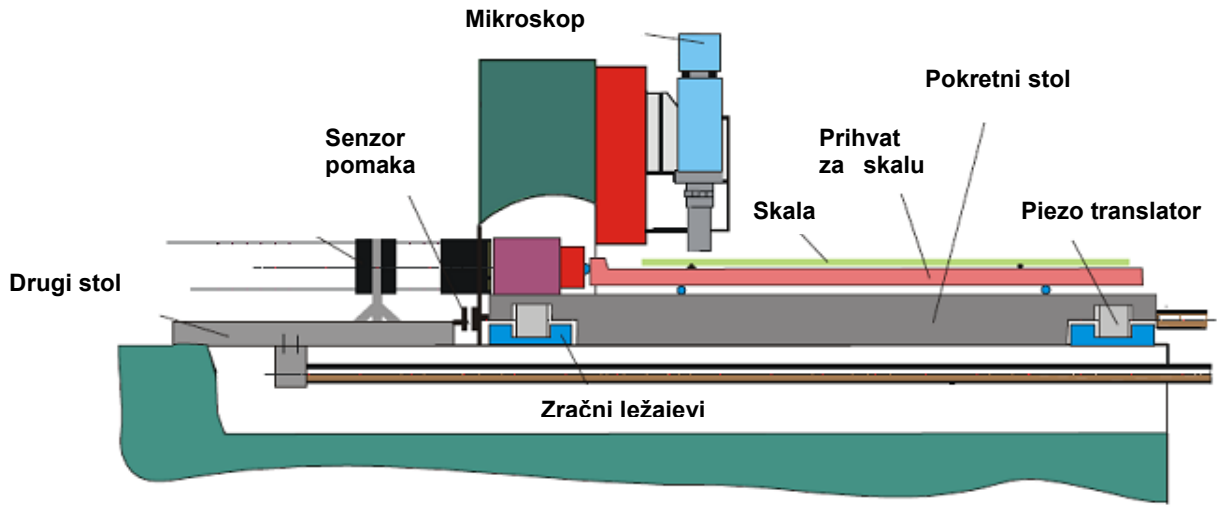
postavlja na pokretni stol i mjerenja se provode u liniji mjerenja laserskog interferometra. Mikroskop sa CCD kamerom ili drugi čitači postavljeni su na masivni aluminijski most velike krutosti kako bi se spriječile vibracije i pomaci mikroskopa tijekom provođenja mjerenja. Aluminijski je most postavljen iznad pokretnog stola na kojemu se nalazi mjerni objekt. Slika 31. prikazuje fotografiju nanometer komparatora.



Slika 31. Izgled nanometer komparatora

Uređaj je postavljen na 70 cm debeli granitni blok koji je od tla odvojen komercijalnim antivibracijskim elementima. Ovi antivibracijski elementi omogućavaju izolaciju vibracija u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Mjerni se reflektor postavlja na pokretni stol. Promjena duljine između fiksnog djelitelja snopa i pokretnog mjernog reflektora realizirana je metalnom cijevi. Razlika tlakova između vakuuma i atmosferskih uvjeta

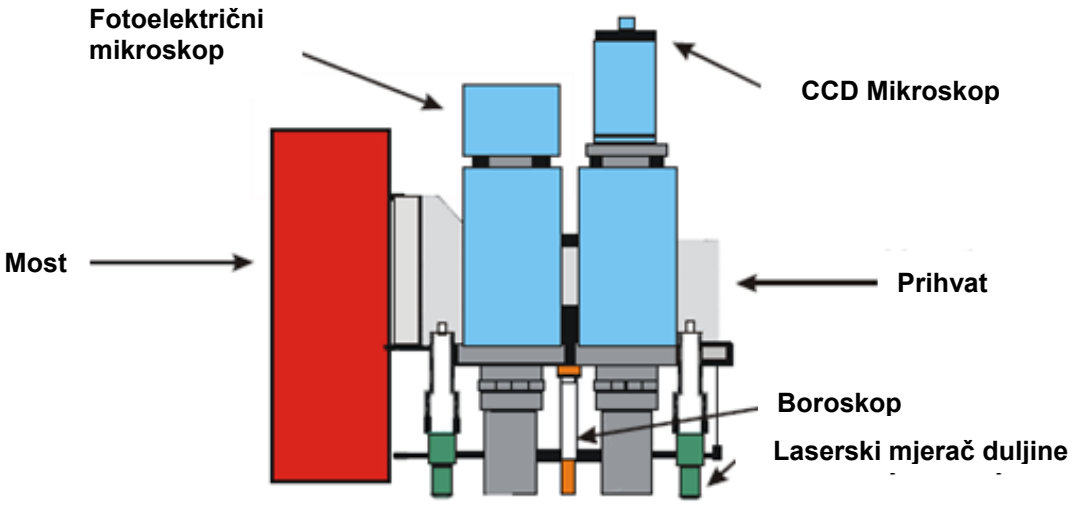
može uzrokovati sile u najgorem slučaju od 700 N koje se kompenziraju drugim pokretnim stolom kako bi se minimizirala odstupanja vođenja stola. Dok nema promjene udaljenosti među stolovima, ne postoji razlika sila koja bi mogla uzrokovati odstupanja u vođenju stola s mjernim objektom. Udaljenost među stolovima kontinuirano se mjeri uz pomoć beskontaktnog senzora. Najveća izmjerena promjena udaljenosti među stolovima iznosila je 1 μm. Oba se stola pokreću odvojenim linearnim motorima kontroliranim s Heidenhain LIP 401 linearnim enkoderima. Slika 32. prikazuje princip kompenzacije sila Nanometer komparatora.



Slika 32. Princip kompenzacije sila nanometer komparatora

Izvor svjetla interferometra je iodno stabilizirani Nd:YAG laser valne duljine 532 nm. Laserski interferometar i njegovo postavljanje u mjerni uređaj ključna je komponenta nanometer komparatora. Najjednostavnija je postavka interferometra klasični Michelson interferometar s jednim pomičnim reflektorom postavljenim na pokretni stol te s jednim fiksnim. Ova postavka interferometra je jako osjetljiva na promjenu duljine između djelitelja snopa i mikroskopa koja može nastati zbog temperaturne dilatacije granitnog bloka. Kako bi se kompenzirao ovaj efekt, na miroskop je postavljeno referentno zrcalo koje omogućava kontrolu promjene duljine između mikroskopa i djelitelja snopa. Sustav za viziranje sastoji se od boroskopa, dva mikroskopa i dva laserska mjerila duljine. Svi su dijelovi postavljeni na kruti aluminijski most preko invarskih prihvata. Boroskop se

uglavnom upotrebljava za mjerne objekte koji ne trebaju veliko povećanje, posebno za kontrolu mjernog objekta i grubo postavljanje objekta u horizontalnoj ravnini. Laserski mjerači duljine upotrebljavaju se za pronalazak i postavljanje mjernog objekta u ravninu fokusa mikroskopa te za postavljanje mjernog objekta u horizontalnu i vertikalnu ravninu. Slika 33. prikazuje sustav za viziranje nanometer komparatora.

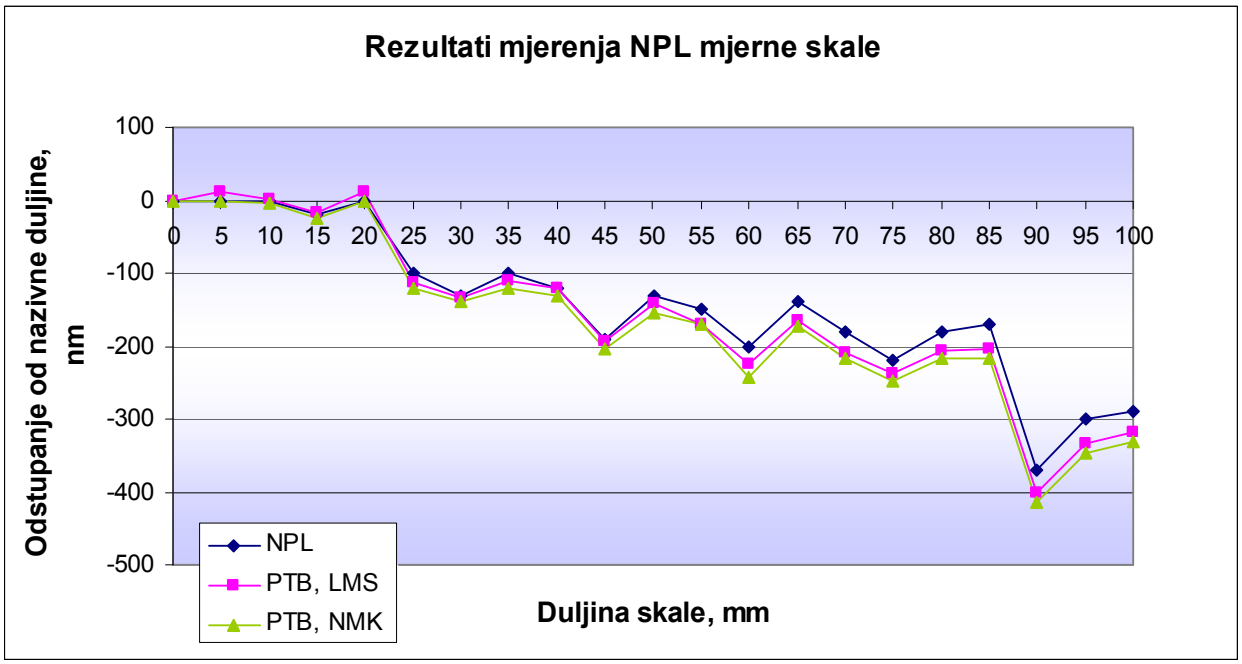


Slika 33. Sustav za viziranje Nanometer komparatora

Fotoelektrični se mikroskop upotrebljava za fino postavljanje mjerne skale i za provođenje mjerenja. Ovaj mikroskop omogućava samo dinamička mjerenja, odnosno nije moguće uzimanje slike linija mjerne skale. Drugi CCD mikroskop primarni je sustav za viziranje linija mjerne skale koji nije tako brz kao fotoelektrični pa su s njegovom upotrebom mjerenje puno sporija. Kako bi se postigla slika visoke kvalitete upotrebljava se autofokus. Najčešće upotrebljavana metoda autofokusa - pomicanje mikroskopa odnosno objektiva u z osi - ima ozbiljne negativne utjecaje. Pomak objektiva u z osi rezultira odstupanjima u mjerenju duljine i smanjuje samu stabilnost mikroskopa. Stoga je kod Nanometer komparatora primijenjena metoda u kojoj se pokretni stol pomoću piezo translatora pomiče u smjeru osi z. Veličina pomaka pokretnog stola mjeri se uz pomoć kutnog interferometra, te se tako kontroliraju kutovi nagiba i skretanja te pravocrtnost gibanja stola.

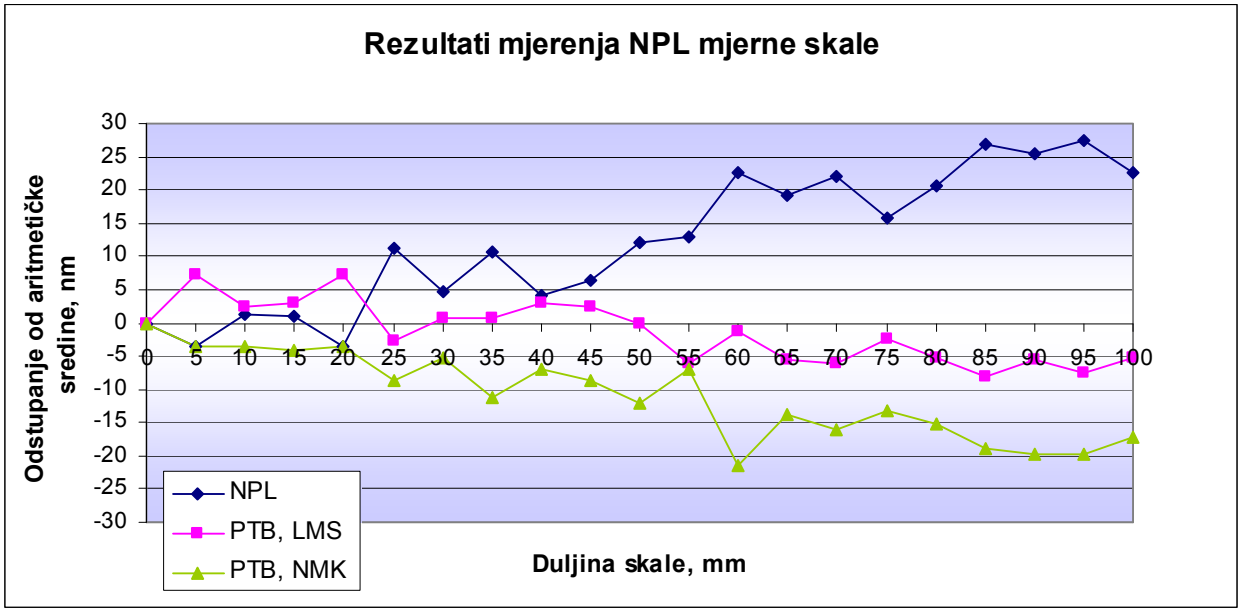
5.3 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE U PTB-U

Spoznaje dobivene umjeravanjem mjerne skale u navedenom institutu bile su od značajne važnosti za istraživanja u ovom radu. Mjerna je skala također umjerena od strane NPL-a s mjernom nesigurnošću umjeravanja od *U*=200 nm te je službeno umjerena od strane PTB-a (LMS uređaj) s mjernom nesigurnošću od U=21 nm. Slika 34. prikazuje usporedbene rezultate umjeravanja mjerne skale od strane NPL-a, PTB-a i autora ovog rada tijekom boravka u PTB-u (Nanometer komparator). Mjerna nesigurnost mjerenja koje je proveo autor ovog rada na Nanometer komparatoru iznosi *U* = 42 nm.



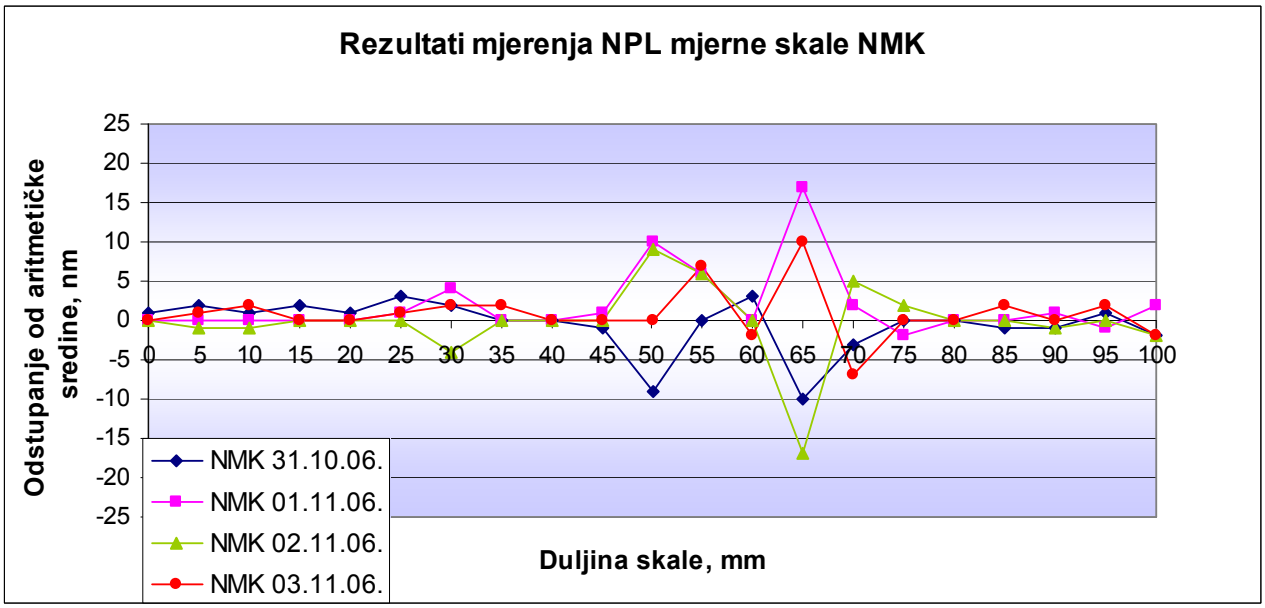
Slika 34. Usporedbeni rezultati umjeravanja NPL-ove mjerne skale (odstupanje od nazivne duljine)

Ukoliko se pogledaju rezultati umjeravanja skale dobiveni od tri neovisna mjerenja na tri različita uređaja, može se uočiti da je rasipanje rezultata u rasponu od 50 nm (slika 35.). Pošto je NPL iskazao mjernu nesigurnost od 200 nm, može se reći da se svi NPL-ovi rezultati podudaraju s oba niza rezultata PTB-a. Zanimljivo je što su rezultati NPL-a približno 30 nm u plusu u odnosu na PTB, tako da PTB sa svojom mjernom nesigurnošću ne obuhvaća rezultate NPL, što bi bilo jako indikativno za jedan od instituta da se radilo o službenom međunarodnom usporedbenom mjerenju.



Slika 35. Usporedni rezultati umjeravanja NPL-ove mjerne skale (odstupanje od aritmetičke sredine)

Tijekom umjeravanja NPL mjerne skale u PTB-u (NMK) autor ovog rada proveo je četiri neovisna mjerenja tijekom četiri dana. Mjerenja su provedena ujutro nakon noćnog temperiranja, s tim da se tijekom dana provodilo ponovno postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola. Aritmetička sredina provedenih mjerenja prikazana je na slici 34., a odstupanje od aritmetičke sredine provedenih mjerenja prikazano je na slici 36.

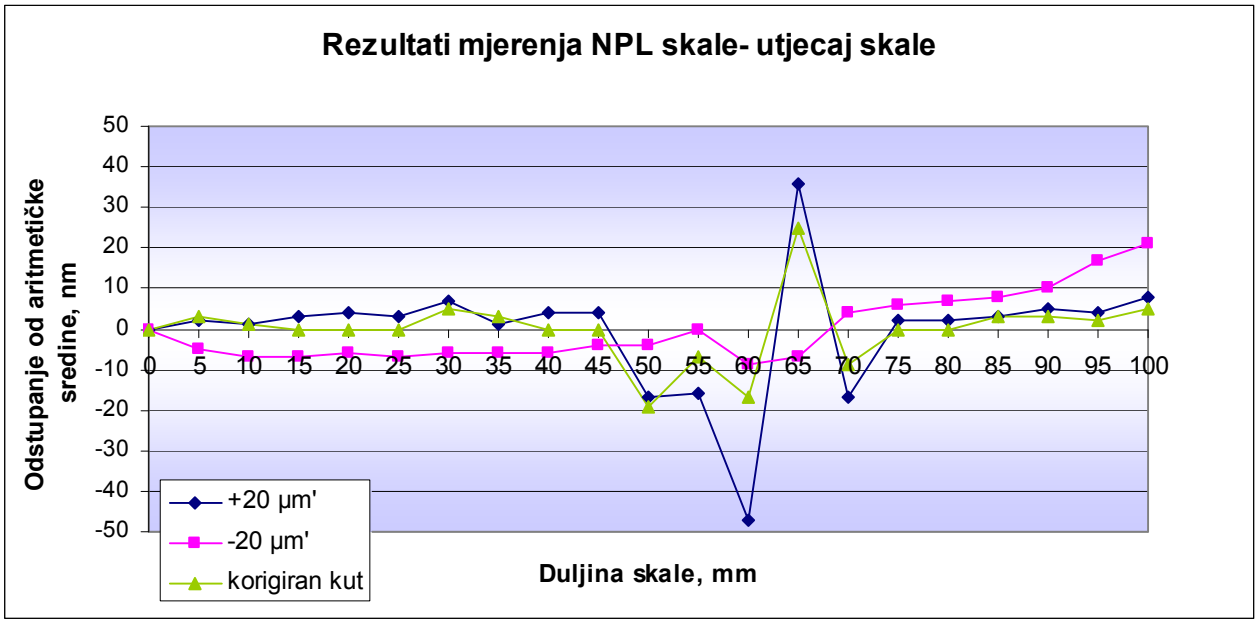


Slika 36. Rezultati mjerenja NPL-ove mjerne skale na NMK (odstupanje od aritmetičke sredine)

Sa slike 36. vidljivo je da nema značajnijih odstupanja među rezultatima ponovljenih mjerenja provedenih tijekom četiri dana. Određeno rasipanje rezultata mjerenja od tridesetak nanometara vidljivo je između linija od 50 mm do 70 mm dok je na ostalom dijelu mjerne skale rasipanje vidljivo unutar svega 10 nm.

Dobiveno rasipanje moglo bi se jedino logično pripisati utjecaju same mjerne skale, odnosno kvaliteti navedenih linija mjerne skale. Loše obrađen rub linija može uzrokovati varijaciju u određivanju sredine linije koja onda utječe na rezultat mjerenja.

Kako bi se provjerilo je li dobiveno rasipanje uzrokovano lošijom kvalitetom linije, provedena su dodatna tri neovisna mjerenja i to s pomacima mjerne skale od +20 µm i -20 µm u smjeru osi *y* i s korigiranim kutom postavljana mjerne skale. S pomakom mjerne skale u smjeru osi *y* mijenja se i presjek određivanja sredine linije odnosno sredina se linije određuje na osnovu različitog ruba linije mjerne skale. Rezultati provedenih mjerenja s pomakom skale u smjeru osi *y* i s korigiranim kutom prikazani su na slici 37.



Slika 37. Rezultati mjerenja NPL-ove mjerne skale na NMK (utjecaj kvalitete linije)

Sa Slike 37. je vidljivo da s pomakom mjerne skale od -20 µm u smjeru osi Y dolazi do potpunog otklanjanja odstupanja rezultata mjerenja od aritmetičke sredine što potvrđuje da je uzrok rasipanja rezultata mjerenja bila kvaliteta ruba tih linija koja u tom presjeku nije bila zadovoljavajuća te je uzrokovala varijacije sredine linije.

6. MJERNA NESIGURNOST UZ UPOTREBU IZRAĐENOG SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA

Kad se iskazuje rezultat mjerenja bilo koje fizičke veličine pa tako i mjerenja duljine, obvezatno se daje neki količinski pokazatelj kvalitete tog rezultata, tako da oni koji ga upotrebljavaju mogu procijeniti njegovu pouzdanost. Bez takva se pokazatelja mjerni rezultati ne mogu uspoređivati ni međusobno niti s referentnim vrijednostima danim u specifikaciji ili u normi. Kako bi se lakše primjenjivali, razumjeli i uopće prihvaćali postupci za opis kvalitete mjernog rezultata, nužno je da se također izračunava i izražava njegova nesigurnost.

Pojam nesigurnosti kao količinskog atributa razmjerno je nov u povijesti mjerenja, premda su pogreške i analiza pogrešaka već dugo dio prakse znanosti o mjerenju ili mjeriteljstva. Danas je široko prihvaćeno da kad se izračunaju sve poznate ili sumnjive sastavnice pogreške i primijene svi primjereni ispravci, još uvijek ostane nesigurnost oko ispravnosti navedenog rezultata, tj. sumnja koliko dobro mjerni rezultat prikazuje vrijednost veličine koja se mjeri.

1993. je godine na zahtjev CIPM-a, grupa stručnjaka iz područja mjeriteljstva izradila Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. U skladu s GUM-om, 1999. je godine Europska organizacija European co-operation for accreditation (EA) izdala dokument EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. GUM je utemeljio opća pravila za iskazivanje, procjenu i proračun mjerne nesigurnosti, a EA dokument je objasnio i opisao načine proračunavanja mjernih nesigurnosti u ispitnim i umjernim Laboratorijima.

Riječ "nesigurnost" znači sumnju i, prema tome, u najširem smislu "mjerna nesigurnost" znači sumnju u valjanost mjernog rezultata. Mjerna nesigurnost u [1] je definirana kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Nesigurnost mjernog rezultata odražava pomanjkanje točnog znanja kolika je vrijednost izmjerene veličine. Mjerni rezultat je i nakon korekcije sustavnih pogrešaka zbog nesigurnosti koja potječe od slučajnih uzroka

varijacija te zbog nesavršenosti provedene korekcije rezultata koja nastaje zbog sustavnih pogrešaka još uvijek samo procjena vrijednosti mjerene veličine.

U praksi postoji mnogo mogućih izvora nesigurnosti u mjerenju, uključujući:

a) nepotpunu definiciju mjerene veličine

b) nesavršeno ostvarenje definicije mjerene veličine

c) nedostatno poznavanje djelovanja uvjeta okoliša na mjerenje ili nesavršeno mjerenje uvjeta okoliša

e) osobnu pristranost u čitanju analognih instrumenata

f) konačno razlučivanje instrumenata ili prag pokretljivosti

g) netočne vrijednosti mjernih etalona ili referentnih vrijednosti

h) aproksimacije i pretpostavke uključene u mjernu metodu i postupak

j) promjene opetovanih opažanja mjerene veličine u očigledno istovjetnim uvjetima.

6.1 ODREĐIVANJE STANDARDNE NESIGURNOSTI

Proračun mjerne nesigurnosti temelji se na procjenama iz nepoznatih razdioba vjerojatnosti koje su određene pomoću ponovljenih ili obnovljenih mjerenja, ili iz subjektivnih ili apriornih razdioba koje se temelje na sveukupnim raspoloživim podacima.

6.1.1 Modeliranje mjerenja

U većini slučajeva mjerena veličina Y ne mjeri se izravno, nego se određuje iz N drugih veličina $X_1, X_2, \ldots, X_N$ na temelju funkcijskog odnosa f:

$$Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_N) \tag{6.1}$$

Ulazne veličine $X_1, X_2, \ldots, X_N$ o kojima ovisi izlazna veličina Y mogu se same promatrati kao mjerene veličine i mogu same ovisiti o drugim veličinama, uključujući ispravke i faktore ispravka zbog sustavnih djelovanja, dovodeći tako do složenog funkcijskog odnosa f koji se ne mora uvijek moći eksplicitno napisati. Nadalje, funkcija f može biti određena eksperimentalno ili postojati samo kao kakav algoritam koji se mora brojčano

odrediti. Funkciju *f* kako se pojavljuje u ovom radu treba tumačiti u tom širem smislu, a posebno kao funkciju koja sadržava svaku veličinu, uključujući i sve korekcije, koje mogu značajnom sastavnicom nesigurnosti doprinijeti mjernom rezultatu.

Svaka procjena ulazne veličine X_i i njezina pridružena standardna nesigurnost $u(x_i)$ dobivaju se iz razdiobe mogućih vrijednosti ulazne veličine X_i. Ta razdioba vjerojatnosti može se temeljiti na frekvenciji, tj. na nizu opažanja $X_{i,k}$ veličline X_i, ili to može biti kakva apriorna razdioba. Određivanja A-vrste sastavnica standardne nesigurnosti temelje se na statističkoj analizi ponovljenih mjerenja, dok se određivanja B-vrste temelje na apriornim razdiobama.

6.1.2 Određivanje standardne nesigurnosti A-vrste

U većini slučajeva najbolja je raspoloživa procjena očekivane vrijednosti μ_q veličine q koja se mijenja na slučajan način, i za koju je u istim mjernim uvjetima dobiveno n neovisnih rezultata mjerenja q_k, aritmetička sredina ili prosjek $\bar{q}$ tih n mjerenja:

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} q_k \tag{6.2}$$

Pojedinačni rezultati mjerenja q_k razlikuju se po vrijednosti zbog slučajnih promjena utjecajnih veličina ili slučajnih djelovanja. Eksperimentalna varijancija tih rezultata mjerenja, koja daju procjenu varijancije s^2 razdiobe vjerojatnosti veličine q, dana je izrazom:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(q_j - \bar{q})^2 \tag{6.3}$$

Ta procjena varijancije i njezin pozitivni drugi korijen $s(q_k)$, koji se naziva eksperimentalnim standardnim odstupanjem, opisuju promjenljivost rezultata mjerenja q_k ili, točnije, njihovo rasipanje oko njihove srednje vrijednosti q.

Najbolja procjena varijancije srednje vrijednosti $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2 / n$ dana je izrazom:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \tag{6.4}$$

Eksperimentalna varijancija srednje vrijednosti $s^2(\overline{q})$ i eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti $s(\overline{q})$, koje je jednako pozitivnom drugom korijenu iz $s^2(\overline{q})$, količinski određuju mjeru koliko dobro q procjenjuje očekivanje μ_q veličine q, a oboje se može upotrebljavati kao mjera nesigurnosti srednje vrijednosti q. Na taj je način za ulaznu veličinu x_i određenu iz n neovisnih rezultata mjerenja, $x_{i,k}$ standardna nesigurnost $u(xi)$ iznosi

$$u(x_i) = s(\overline{x_i}) \tag{6.5}$$

i naziva se standardna nesigurnost *A*-vrste.

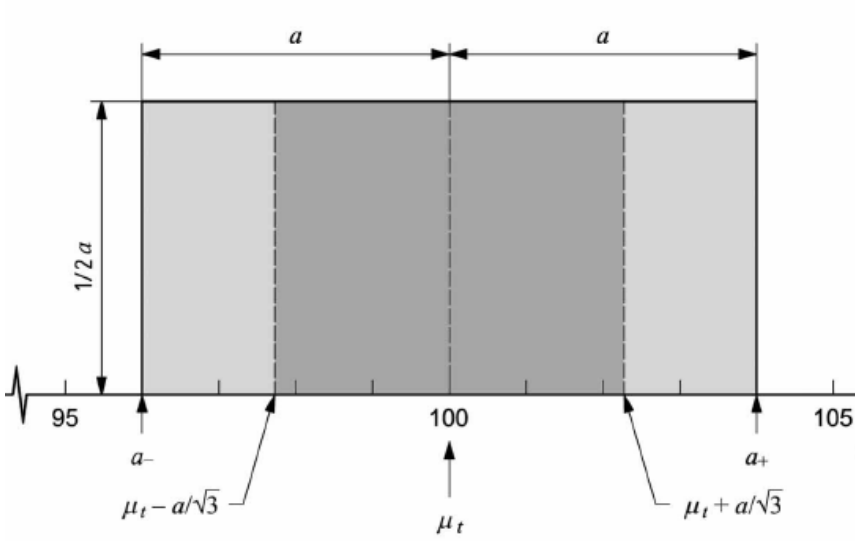
6.1.3 Određivanje standardne nesigurnosti B-vrste

Određivanje standardne nesigurnosti B-vrste ne određuje se samo statističkim putem niza ponovljenih mjerenja, već se primjenjuju neke druge metode koje se temelje na svim dostupnim podacima o naravi veličine koja se mjeri. Takav skup podataka može uključivati:

- prijašnje mjerne podatke
- iskustvo s etalonima i uređajima ili opće poznavanje ponašanja i svojstava bitnih tvari i uređaja
- proizvođačke specifikacije
- podatke iz potvrda o umjeravanju...

Kad se procjena ulazne veličine temelji na procjeni granica intervala pojavljivanja (od –a do +a), uz jednaku vjerojatnost pojavljivanja unutar cijelog procijenjenog intervala, odnosno vjerojatnost da ulazna veličina leži izvan tog intervala jednaka je nuli, tada se standardna nesigurnost dobiva iz pravokutne razdiobe (slika 39.) mogućih vjerojatnosti te ona iznosi:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{6.6}$$

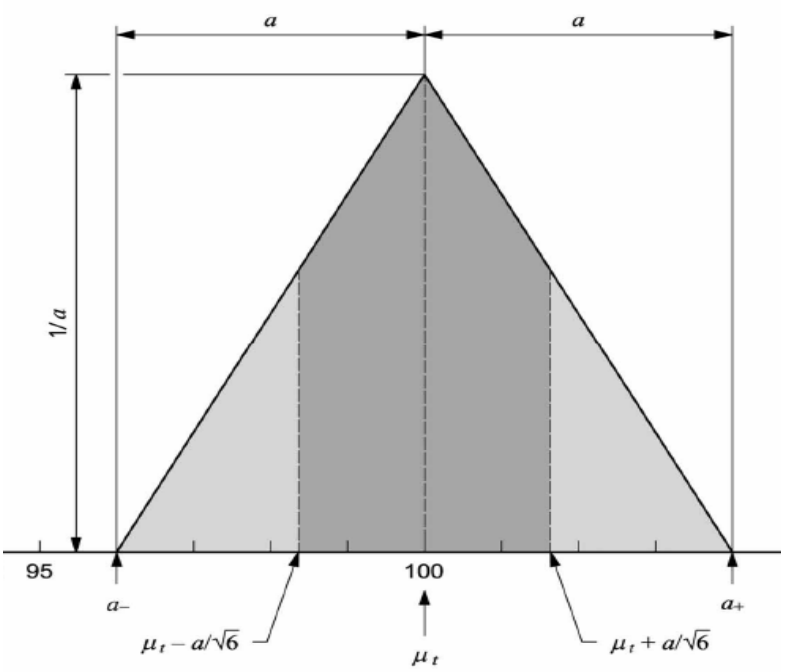


Slika 38. Pravokutna razdioba

U mnogim slučajevima stvarnije je očekivati da vrijednosti u blizini granica intervala budu manje vjerojatne od vrijednosti u blizini središta tog intervala. Tada je često razumno zamijeniti pravokutnu razdiobu trapeznom razdiobom s istim bočnim stranicama (istokračan trapez), širinom osnovice jednakom ($a_+ - a_-$) = 2a i širinom gornje stranice jednakom 2$a\beta$, gdje je $0 \leq \beta \leq 1$. Kad $\beta \rightarrow 1$ ta trapezna razdioba teži pravokutnoj, dok je za $\beta = 0$ ta trapezna jednaka trokutastoj razdiobi.

Simetrična trokutasta razdioba (slika 40.) koristi se u slučajevima kada se pretpostavlja procjena ulazne veličine određene vrijednosti, a vjerojatnost pojavljivanja u granicama od –a do +a u okolici pretpostavljene vrijednosti je nepoznata. Standardna nesigurnost tada iznosi:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \tag{6.7}$$



Slika 39. Trokutasta razdioba

Ukoliko se ulazna veličina mijenja ciklično po sinusnome zakonu s nepoznatom fazom φ unutar granica od –a do +a, gdje se faza φ mjenja po pravokutnoj razdiobi, tada se standardna nesigurnost dobiva iz Arkussinus razdiobe ili "U" razdiobe te ona iznosi:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \tag{6.8}$$

6.2 ODREĐIVANJE SASTAVLJENE MJERNE NESIGURNOSTI

Sastavljena mjerna nesigurnost kako i samo ime kaže određuje se sastavljanjem standardnih mjernih nesigurnosti $u(x_i)$ procjene ulaznih veličina x_1, x_2,...x_n. Ta se sastavljena standardna nesigurnost procjene y označuje s $u_c(y)$. Razlikujemo sastavljenu mjernu nesigurnost za nekorelirane i korelirane ulazne veličine.

6.2.1 Nekorelirane ulazne veličine

Prema [1], kada su sve ulazne veličine neovisne (nekorelirane) sastavljena standardna nesigurnost $u_c(y)$ jednaka je drugom korijenu sastavljene varijancije $u_c^2(y)$ koja je dana izrazom:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \tag{6.9}$$

Svako $u(x_i)$ standardna nesigurnost je određena prema izračunu A ili B vrste.

Kad je nelinearnost funkcije f značajna, u izraz za $u_c^2(y)$ moraju se uključiti i članovi višeg reda njenog razvoja u Taylorov red.

$\frac{\partial f}{\partial x_i} = c_i$ je koeficijent osjetljivosti opisuje kako se procjena vrijednosti izlazne veličine y mijenja s promjenama vrijednosti procjena $x_1, x_2, \ldots, x_N$ ulaznih veličina.

6.2.2 Korelirane ulazne veličine

Ukoliko su neke od veličina x_i znatno korelirane i te se korelacije moraju uzeti u obzir pa je izraz za sastavljenu mjernu nesigurnost dan izrazom:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \tag{6.10}$$

gdje su x_i i x_j procjene veličina X_i i X_j, a $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ procijenjena je kovarijanca pridružena procjenama x_i i x_j. Stupanj korelacije između procjena x_i i x_j opisuje se procijenjenim koeficijentom korelacije koji glasi:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \tag{6.11}$$

S pomoću korelacijskih koeficijenata i koeficijenata osjetljivosti, izraz za sastavljenu mjernu nesigurnost može se napisati kao:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \tag{6.12}$$

Ukoliko korelacije između ulaznih veličina postoje onda se ne mogu zanemariti, ali same se korelacije mogu izbjeći ukoliko se zajednički utjecaji uvode kao dodatne neovisne ulazne veličine s neovisnim standardnim mjernim nesigurnostima.

6.3 ODREĐIVANJE PROŠIRENE MJERNE NESIGURNOSTI

Prema [1] proširena mjerna nesigurnost je mjera nesigurnosti koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća velik dio razdiobe vrijednosti koje se razumno mogu pridružiti mjerenoj veličini. Proširena mjerna nesigurnost dobiva se množenjem sastavljene standardne nesigurnosti $u_c(y)$ s faktorom pokrivanja k te se označava s U:

$$U = k u_c(y) \tag{6.13}$$

Vrijednost faktora pokrivanja k odabire se na temelju zahtijevane razine povjerenja za interval $y - U$ do $y + U$. Općenito k će biti u području između 2 i 3. Međutim, za posebne primjene k može biti i izvan tog područja. Izbor prave vrijednosti za k može olakšati bogato iskustvo i potpuno znanje primjena koje će se postavljati na mjerni rezultat. Prema centralnom graničnom teoremu pretpostavlja se da je razdioba vjerojatnosti $(y-Y)/u_c(y)$, t-razdioba i pri tome je faktor pokrivanja $k = t_p(\nu_{eff})$ s t_p faktorom koji se temelji na stvarnom broju stupnjeva slobode. U mjernim situacijama gdje je razdioba vjerojatnosti opisana s y i $u_c(y)$ približno normalna, a broj stvarnih stupnjeva slobode sastavljene standardne nesigurnosti $u_c(y)$ značajan po iznosu, često je prikladan jednostavniji pristup koji se često pojavljuje u praksi, može se pretpostaviti da uzimanje $k = 2$ daje interval koji ima razinu povjerenja od približno 95 posto, a uzimanje $k = 3$ daje interval koji ima razinu povjerenja od približno 99 posto.

6.4 MONTE CARLO SIMULACIJA

Monte Carlo simulacija (statistička simulacija), kao što joj i samo ime kaže, povezana je slučajnim fenomenima. Zanimljivo je da je to jedna od prvih primjena programiranja računala. Metoda je razvijena tijekom Drugog svjetskog rata u Los Alamosu za rješavanje složenih problema vezanih za proizvodnju atomske bombe, poput proračuna raspršenja neutrona na atomskoj jezgri. Nema potpune suglasnosti o korištenju tog termina. Neki autori Monte Carlo simulacijama zovu bilo koje vrste programa što se koriste slučajnim brojevima. Razlikujemo sljedeće tipove Monte Carlo simulacija:

1. Deterministički problemi koje je teško ili skupo rješavati
2. Složeni fenomeni koji nisu dovoljno poznati
3. Statistički problemi koji nemaju analitičkog rješenja

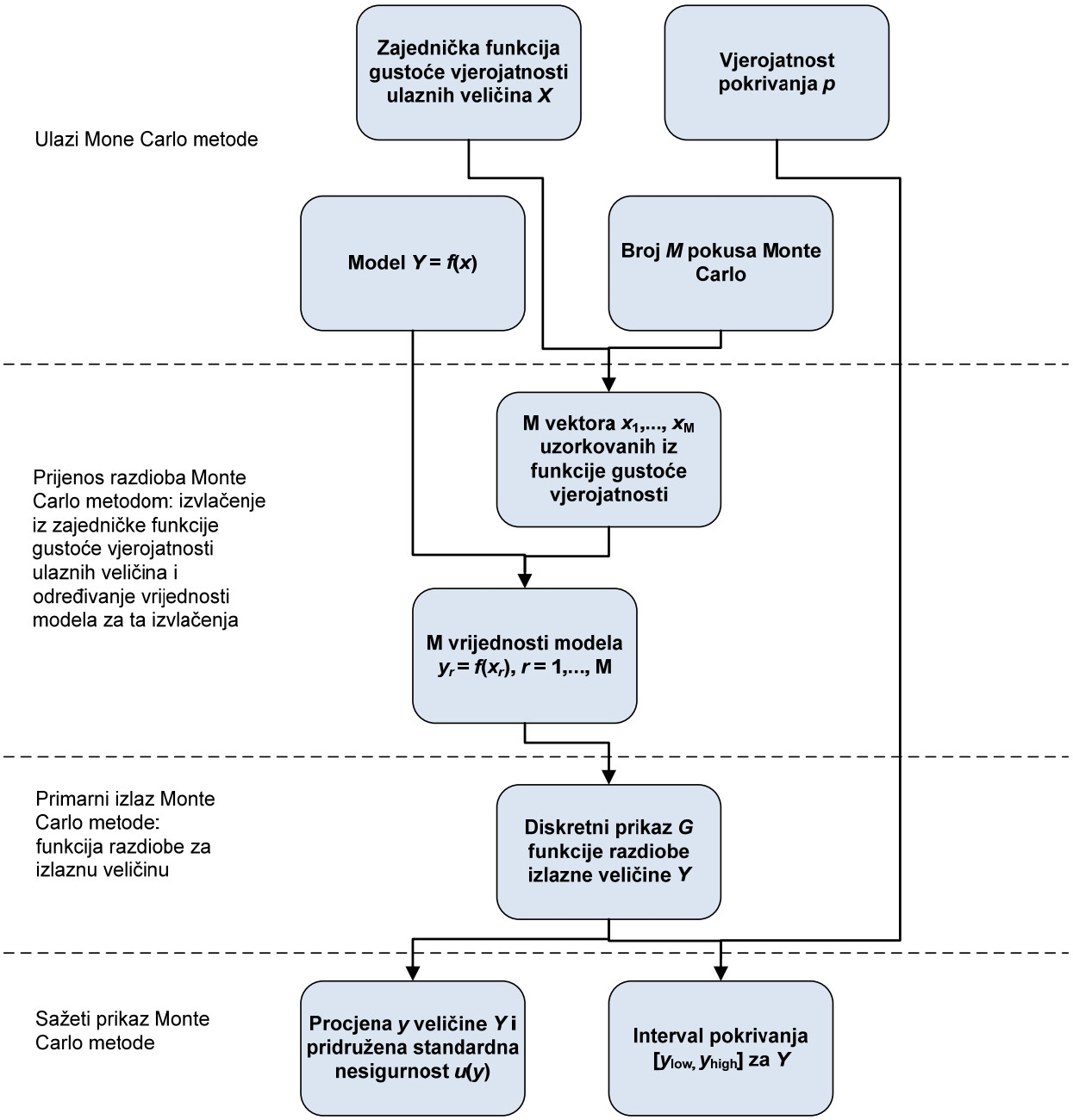
U novije vrijeme Monte Carlo simulacije (MCS) imaju sve veću primjenu na području procjenjivanja mjernih nesigurnosti pa je tako izdan dodatak 1 GUM-u JCGM 101:2008 Prijenos razdioba upotrebom Monte Carlo simulacija [10].

6.4.1 Proračun mjerne nesigurnosti MCS metodom

MCS metoda temelji se na generiranju slučajnih brojeva iz funkcija gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu x_i i stvaranju eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Y kombinirajući različite razdiobe kojima su definirane ulazne veličine. Postupak se ponavlja M puta te se na taj način stvara eksperimentalna funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine koja se temelji na M Y vrijednosti. Iz eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti slijedi procjena izlazne veličine y, procijenjeno standardno odstupanje, te procjena intervala $\left(Y_{(\frac{1-P}{2},M)}, Y_{(\frac{1+P}{2},M)} \right)$ [11].

Metoda MCS kao primjena prijenosa razdioba prikazana je dijagramom na slici 40. Metoda MCS može se opisati kao postupak korak po korak na sljedeći način [10]:

a) odabere se broj M pokusa Monte Carlo koje je potrebno izvesti
b) uzorkovanjem se generira M vektora iz dodijeljenih funkcija gustoće vjerojatnosti kao ostvarenja (skupa od N) ulaznih veličina X_i



Slika 40. Shematski prikaz proračuna mjerne nesigurnosti MCS metodom [10]

c) za svaki takav vektor odredi se odgovaraju}a vrijednost modela *Y* čiji je rezultat *M* vrijednosti modela

d) tih M vrijednosti modela razvrsta se strogo rastućim redom, uporabom tih razvrstanih vrijednosti modela dobiva se prikaz G
e) prikaz G upotrebljava se za određivanje procjene y izlazne veličine Y i standardne nesigurnosti $u(y)$ pridružene procjeni y
f) prikaz G upotrebljava se za određivanje odgovarajućeg intervala pokrivanja izlazne veličine Y za dogovorenu vjerojatnost pokrivanja p

Osnovne karakteristike MCS metode u postupku procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja su sljedeće [11]:

- Kombiniranje različitih funkcija gustoće vjerojatnosti kojima su definirane ulazne veličine
- U proračun mjerne nesigurnosti su uključeni viši redovi razvoja funkcije u Taylorov red
- Simuliraju se nepoznate sustavne pogreške
- Simuliraju se i korelacije između ulaznih veličina ukoliko su prisutne

6.4.2 Uvjeti za valjanu primjenu MCS metode

Prijenos razdioba koji se provodi uporabom metode MCS može se valjano primijeniti te se nakon toga može odrediti zahtijevani sažet prikaz podataka pod sljedećim uvjetima:

a) ako je f neprekidna funkcija po elementima X_i vektora X u blizini najboljih procjena x_i ulaznih veličina X_i
b) ako je funkcija razdiobe izlazne veličine Y neprekidna i strogo rastuća funkcija
c) ako je funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Y:
    - neprekidna na intervalu za koji je funkcija gustoće vjerojatnosti strogo pozitivna
    - unimodalna (s jednom vršnom vrijednošću) i
    - strogo rastuća (ili jednaka nuli) lijevo od moda te strogo padajuća (ili jednaka nuli) desno od moda
d) ako postoji očekivanje E(Y) i varijancija V(Y)
e) ako se upotrebljava dostatno velik broj simulacija M.

6.5 USPOREDBA GUM I MCS METODE

U odnosu na normirane postupke (GUM metoda) proračuna mjerne nesigurnosti, ova metoda ima čitav niz prednosti, ali ima i nedostataka. Međutim, prema iskustvu Laboratorija za precizna mjerenja dužina (LFSB) prednosti ove metode su jače iskazane, a posebice na razinama gdje je nužno provoditi proračun mjerne nesigurnosti, a ne postoji dostatno znanje (statistika, diferencijalni račun) i iskustvo. Drugim riječima, prednost simulacija je najviše naglašena u tome što se dobiveni rezultat doživljava vizualno.

Dok se GUM metoda proračuna mjerne nesigurnosti temelji na slaganju mjernih nesigurnosti uz stalno približavanje normalnoj razdiobi odnosno centralnom graničnom teoremu, a time i mogućem problemu određivanja faktora pokrivanja *k,* MCS metoda proračuna mjerne nesigurnosti temelji se na eksperimentalnoj funkciji gustoće vjerojatnosti dobivenoj slaganjem različitih funkcija gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina. Najznačajnija svojstva MCS metode u odnosu na GUM metodu:

a) manje posla na analizi koja se zahtijeva za složene ili nelinearne modele, posebno zato jer nisu potrebne parcijalne derivacije prvoga ili viših redova koje se upotrebljavaju za dobivanje koeficijenata osjetljivosti za zakon prijenosa nesigurnosti,
b) općenito bolja procjena izlazne veličine Y za nelinearne modele,
c) bolja standardna nesigurnost pridružena procjeni izlazne veličine Y za nelinearne modele, posebno kad su ulaznim veličinama Xi dodijeljene ne-Gaussove (npr. asimetrične) funkcije gustoće vjerojatnosti, bez potrebe da se daju derivacije višeg reda,
d) dobivanje intervala povjerenja koji odgovara dogovorenoj vjerojatnosti kad se funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Y ne mogu na prikladan način aproksimirati Gaussovom razdiobom ili normaliziranom neusredištenom t-razdiobom, tj. kad se ne primjenjuje centralni granični teorem. Takva neprikladna aproksimacija može nastati (1) kad funkcija gustoće vjerojatnosti dodijeljena dominantnoj ulaznoj veličini X_i nije Gaussova razdioba ili normalizirana i neusredištena t-razdioba, (2) kad je model nelinearan ili (3) kad pogreška

aproksimacije koja nastaje iz Welch-Satterthwaiteove formule za stvarni broj stupnjeva slobode nije zanemariva i,

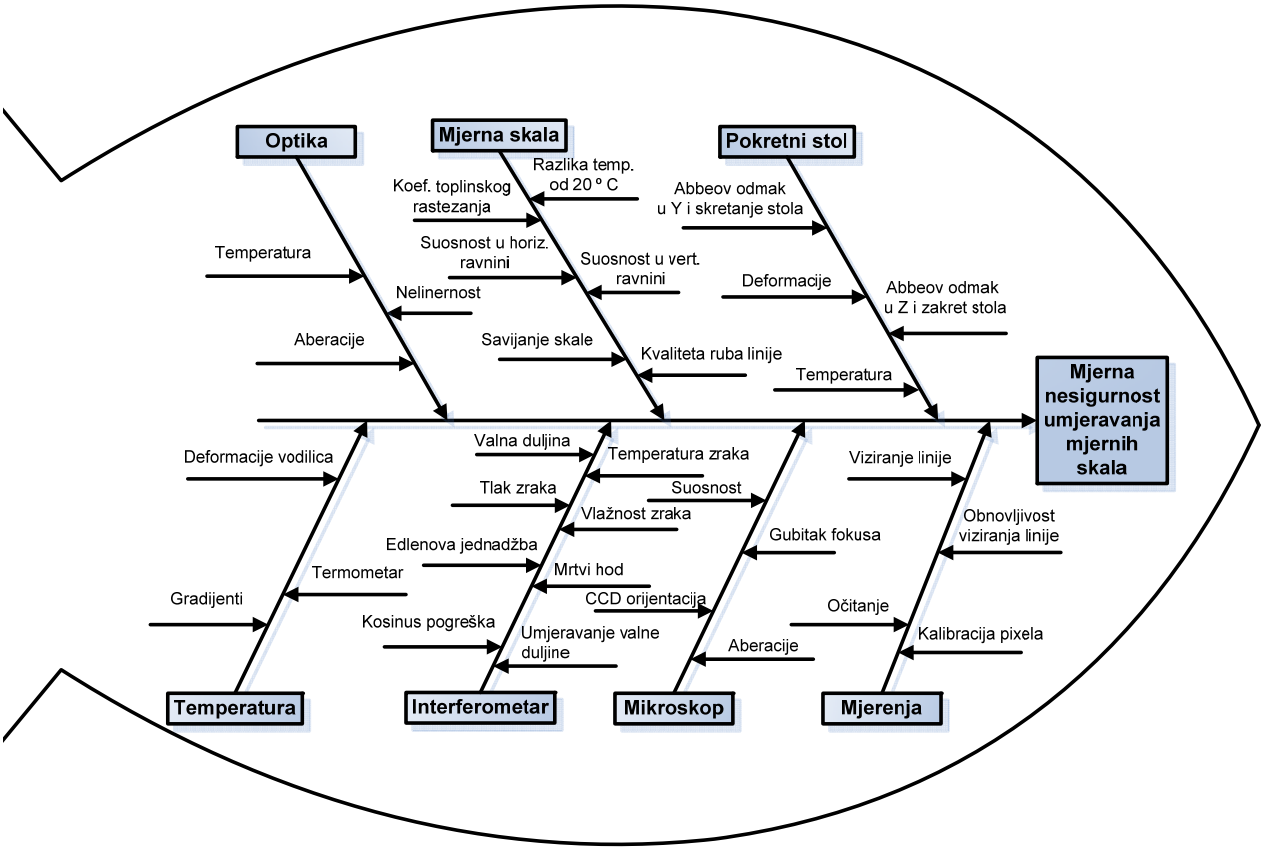
e) ne zahtijeva se faktor pokrivanja kad se određuje interval pokrivanja.

Bilo da je riječ o proračunu mjerne nesigurnosti GUM metodom ili MCS metodom, za uspješan proračun je najbitnije postavljanje matematičkog modela mjerenja koje jako dobro prati samo mjerenje. Kada je to ispunjeno onda su rezultati MCS i GUM metoda visoko kompatibilni.

Procjena mjerne nesigurnosti MCS metodom u ovom radu izvršena je primjenom softverskog paketa MathCad.

6.6 UTJECAJNE VELIČINE U POSTUPKU UMJERAVANJA MJERNIH SKALA

Zbog samog postupka umjeravanja mjernih skala, vrlo je širok raspon parametara koji utječu na mjernu nesigurnost umjeravanja. Na slici 41. prikazani su utjecajni faktori mjerne nesigurnosti umjeravanja mjernih skala. Sa slike je vidljivo da su najznačajniji utjecaji s najviše parametara laserski interferometer, mjerna skala i pokretni stol. Optika, mikroskop i provođenje samih mjerenja imaju puno manje utjecajnih parametara. Utjecaj temperature ponavlja se kod više utjecajnih parametara.



Slika 41. Utjecajni parametri u postupku umjeravanja mjernih skala

Kako se Laboratorij prijavio za sudjelovanje u EURAMET projektu 882, EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7, "Calibration of line scales" još dok je uređaj bio u izradi, bilo je neophodno procjenjivati mjernu nesigurnost iako nije provedena sustavna analiza svih parametara mjerne nesigurnosti. Provedena procjena parametara mjerne

nesigurnosti u svrhu sudjelovanja u navedenom usporedbenom mjerenju prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Sastavnice standardne mjerne nesigurnosti

Sastavnica i izvor stand. nes. x_i	**Distr.**	**Iznos standardne nes. $u(x_i)$**	**Koeficijent osjetljivosti, $c_i = \partial dL / \partial x_i$**	**Doprinos mj. nesig., u_i (dL) / nm, L u mm**
Abbeov odmak u z i zakret stola, δl_{Az}	R	10	1	10
Abbeov odmak u y i skretanje stola, δl_{Ay}	R	15	1	15
Valna duljina interferometra, $\delta\lambda$	R	0,03	L	0,03L
Temperatura zraka, t_{air}	R	0,12 ° C	$9{,}5\cdot10^{-7}$ L/°C	0,112·L
Tlak zraka, p_{air}	R	13 Pa	$2{,}7\cdot10^{-7}$ L/Pa	0,035·L
Relativna vlažnost, RH_{air}	R	0,06	$8{,}5\cdot10^{-7}$ L	0,050·L
Nesigurnost Edlenove jednadžbe, δn_{air}	N	$2\cdot10^{-8}$	L	0,020·L
Utjecaj mrtvog hoda, δl_{DP}	R	30	1	30
Kosinus pogreška interferometra, δl_{li}	R	0,8L	1	0,8·L
Razlika temperature skale od 20 °C, Δt_s	R	0,036 ° C	$5\cdot10^{-7}L$/K	0,018·L
Suosnost skale, δl_S	R	0,55L	1	0,55·L
Utjecaj oslonaca na duljinu mjerne skale, δl_{ai}	R	0,2L	1	0,2·L
Utjecaj kvalitete ruba linije, δE_{alg}	R	10	1	10
Obnovljivost mjerenja, R	N	55	1	55
Rezolucija interferometra, δl_{res}	R	6	1	6
Obnovljivost viziranja sredine linije, δl_{SE}	N	35	1	35
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost			**u = (75 + 0,5·L) nm, L u mm**	
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, P=95%, k=2			**U = (150 + 1·L) nm, L u mm**	

Iz tablice 1. vidljivo je da linearizirana proširena mjerna nesigurnost iznosi:

$$U(L_{MS}) = (150 + 1\cdot L)\ \text{nm},\ L\ \text{u mm};\ k = 2,\ P = 95\% \qquad (6.14)$$

Iskazana mjerna nesigurnost procijenjena je temeljem mjerenja NPL mjerne skale i s navedenom mjernom nesigurnošću Laboratorij je sudjelovao u međunarodnom usporedbenom mjerenju EURAMET projekt 882, EURAMET Key Comparison,

EURAMET.L-K7, "Calibration of line scales" čiji su rezultati prikazani u sljedećem poglavlju rada. Detaljna analiza svih parametara mjerne nesigurnosti provedena je nakon modifikacije uređaja te je prikazana u poglavlju 11.

7. USPOREDBENO MJERENJE U OKVIRU PROJEKTA EURAMET 882, EURAMET.L-K7 "CALIBRATION OF LINE SCALES"

Na području mjeriteljstva jedini autoritet je rezultat mjerenja. Je li iskazan dovoljno dobar rezultat i jesu li uključeni svi značajni parametri u postupku proračuna mjerne nesigurnosti ne može se naprosto saznati ponavljanjem i obnavljanjem mjerenja unutar Laboratorija. Mjerenje je dinamičan proces koji zahtijeva stalno potvrđivanje iskazanih mjernih nesigurnosti. U tome je i najveća vrijednost usporedbenih mjerenja temeljem kojih se periodički javno potvrđuju, ili ne, postignute razine točnosti svjetskih mjeriteljskih instituta [30].

Usporedbena mjerenja, bez obzira na razinu laboratorija, moraju biti stalna praksa svakog laboratorija. Tu se stječu saznanja o neotkrivenim sustavnim pogreškama, validiraju se procijenjene razine mjernih nesigurnosti, skupljaju se ideje za razvoj novih metoda mjerenja i drugo. Iznad svega, sudjelovanjem u usporedbama svaki se put dobivaju nova saznanja o korištenim mjernim metodama te se ugrađuje dodatna ozbiljnost i odgovornost u laboratorijsku praksu. Kako bi se validirao sustav za umjeravanje mjernih skala, Laboratorij se još tijekom izrade uređaja prijavio za sudjelovanje u EURAMET projektu 882, EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7, "Calibration of line scales". Kako je uređaj završen neposredno prije provedbe usporedbenog mjerenja, uređaj nije sustavno provjeren i nisu ispitane geometrijske pogreške uređaja. Jedino je provedeno mjerenje NPL mjerne skale koju je autor mjerio u PTB-u te su rezultati imali određeni linearno padajući trend u odnosu na referentne vrijednosti izmjerene u PTB-u (rezultati su prikazani u poglavlju 8.1). Zbog toga su iskazani rezultati u usporedbenom mjerenju korigirani s obzirom na spoznaje dobivene mjerenjem NPL mjerne skale.

7.1 REZULTATI MJERENJA U OKVIRU PROJEKTA EURAMET 882

Projekt je započeo sa sudjelovanjem 31. laboratorija iz cijelog svijeta. Zbog svoje brojnosti laboratoriji su bili podijeljeni u dvije grupe te su mjerili dvije različite mjerne skale od 100 mm. Tijekom provedbe mjerenja od projekta su odustala dva europska mjeriteljska instituta te se priključio tajlandski mjeriteljski institut. Laboratorij za precizna mjerenja dužina nalazio se grupi 1 koju su sačinjavali laboratoriji prikazani u tablici 2, dok su grupu 2 sačinjavali laboratoriji prikazana u tablici 3.

Tablica 2. Sudionici grupe 1. EURAMET projekta 882, "Calibration of line scales".

Red. broj	Laboratorij	Država	Red. broj	Laboratorij	Država
1	MIRS	Slovenija	9	MIKES	Finska
2	METAS	Švicarska	10	LNMC	Latvia
3	NPL	Velika Britanija	11	NML	Irska
4	OMH	Mađarska	12	NCM	Bugarska
5	BEV	Austrija	13	INM	Rumunjska
6	SMU	Slovačka	14	ZMDM	Srbija
7	PTB	Njemačka	15	DZM-FSB	Hrvatska
8	GUM	Poljska	16	NSCIM	Ukrajina

Tablica 3. Sudionici grupe 2. EURAMET projekta 882, "Calibration of line scales".

Red. broj	Laboratorij	Država	Red. broj	Laboratorij	Država
1	CEM	Španjolska	9	NIST	SAD
2	CENAM	Meksiko	10	NMi	Nizozemska
3	CMI	Češka Republika	11	NPL	Velika Britanija
4	EIM	Grčka	12	NPLI	Indija
5	INMETRO	Brazil	13	NRC	Kanada
6	INRIM	Italija	14	SMD	Belgija
7	METAS	Švicarska	15	NMC	Singapur
8	NIM	Kina	16	VNIIM	Rusija

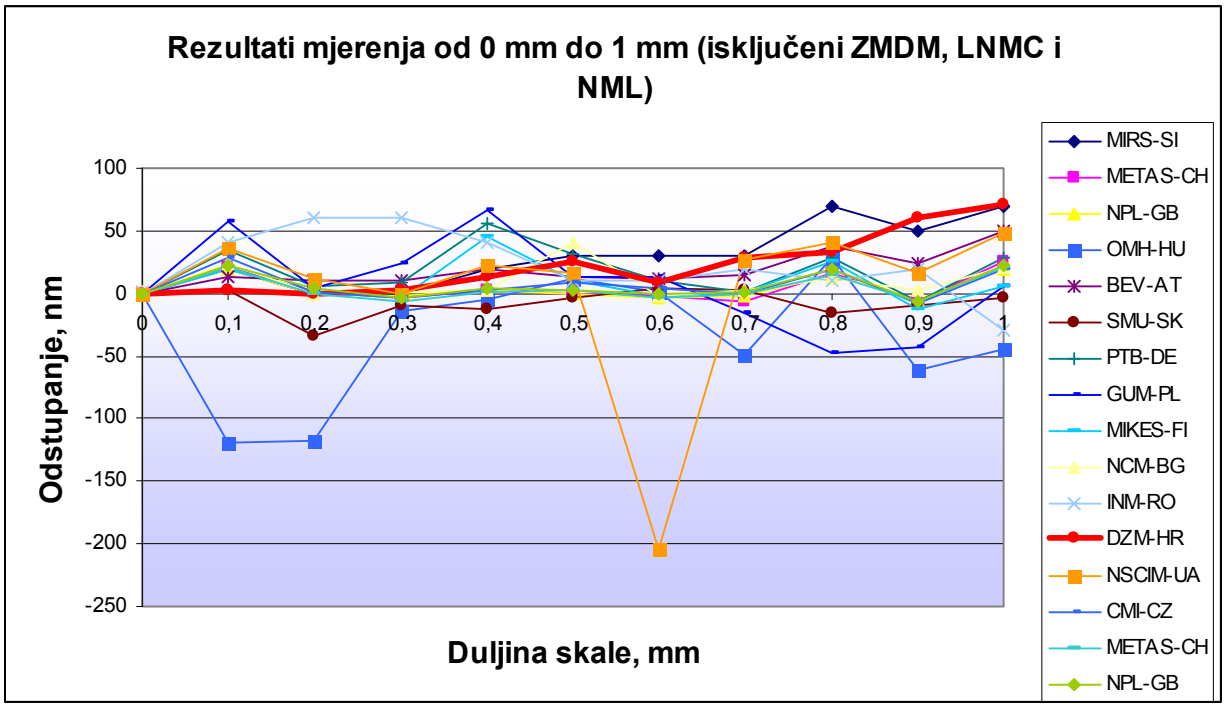
Iz tablica 2. i 3. vidljivo je da se laboratoriji METAS i NPL nalaze u obje grupe, te da su navedeni laboratoriji provodili mjerenja obiju mjernih skala u svrhu povezivanja rezultata

mjerenja obiju grupa. Mjerne linije odnosno nazivne duljine koje su mjerene prikazane su u tablici 4.

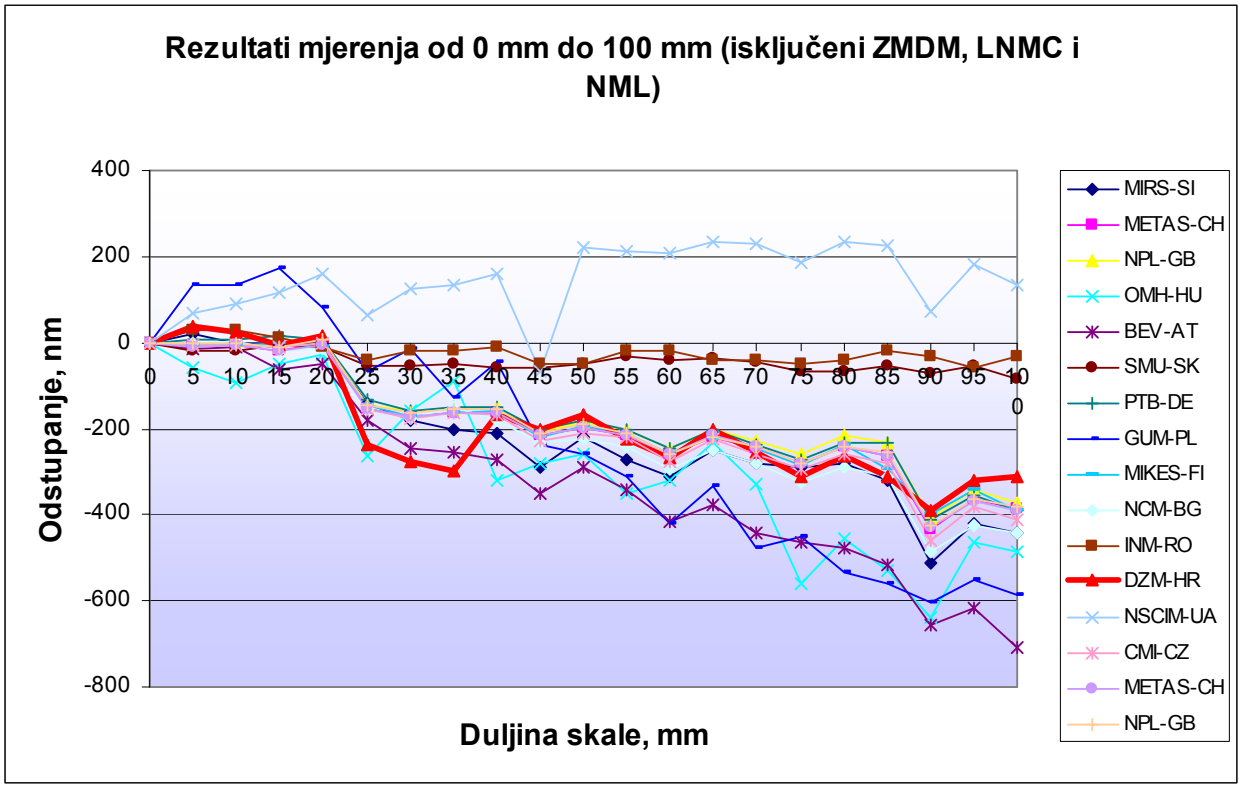
Tablica 4. Linije mjerne skale mjerene u usporedbenom mjerenju

Nazivne duljine, mm									
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

Rezultati međunarodnog usporedbenog mjerenja grupe 1 prikazani su na slikama od slike 42. do slike 73. Slika 42. prikazuje rezultate mjerenja grupe 1 za duljinu mjerne skale od 0 mm do 1 mm. Slika 43. daje prikaz rezultata mjerenja svih laboratorija za duljinu mjerne skale od 0 mm do 100 mm. Rezultati mjerenja LFSB-a označeni su crvenom bojom. Kako slike 42. i 43. daju skupni prikaz rezultata mjerenja bez mjernih nesigurnosti, s prikazanih se slika ne mogu donositi zaključci o kvaliteti prikazanih rezultata. Prikaz rezultata mjerenja grupe 1 s iskazanim mjernim nesigurnostima dan je na slikama od slike 44. do slike 73.

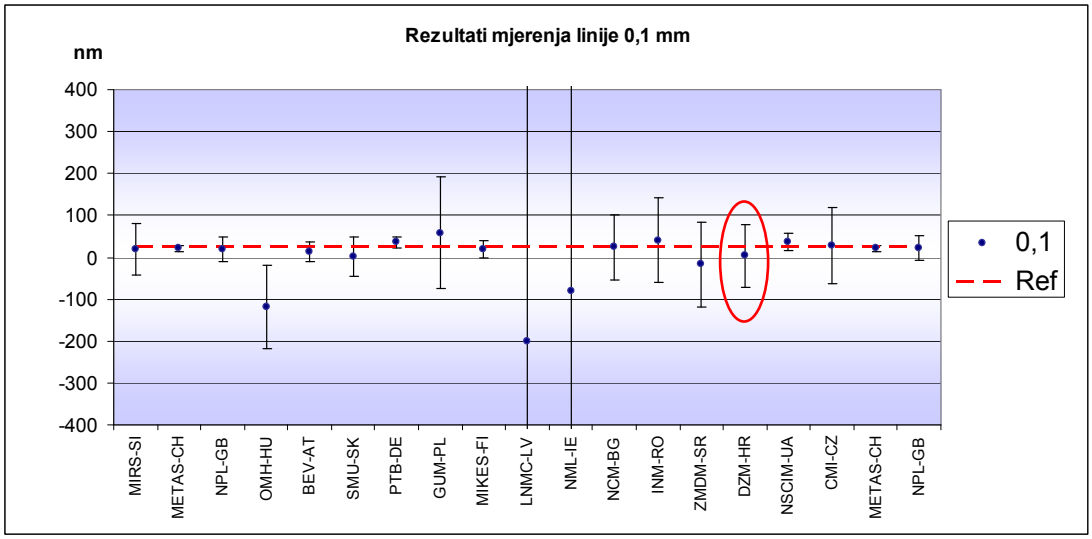


Slika 42. Usporedni rezultati mjerenja linija od 0 mm do 1 mm

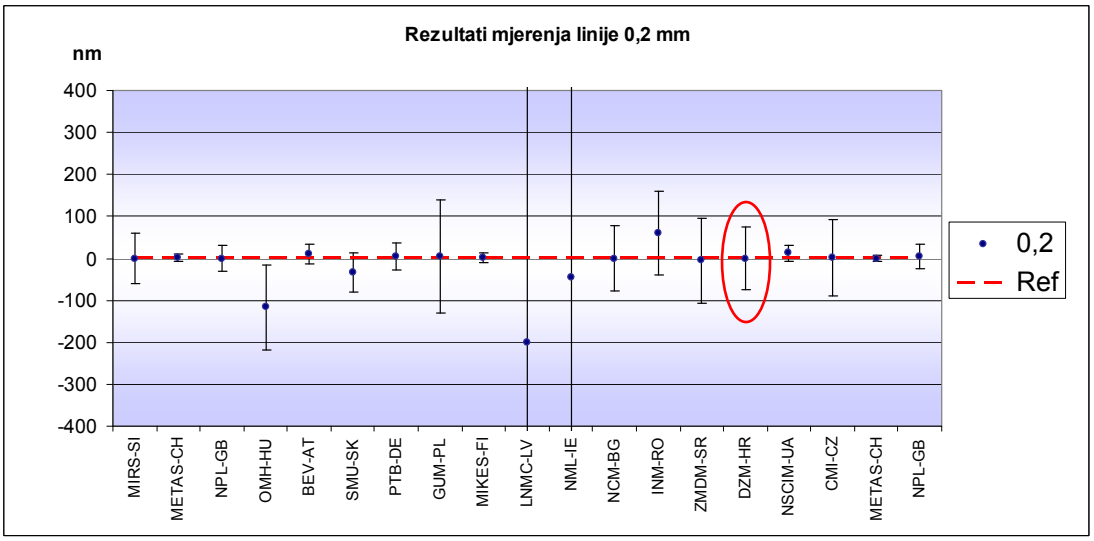


Slika 43. Usporedni rezultati mjerenja linija od 0 mm do 100 mm

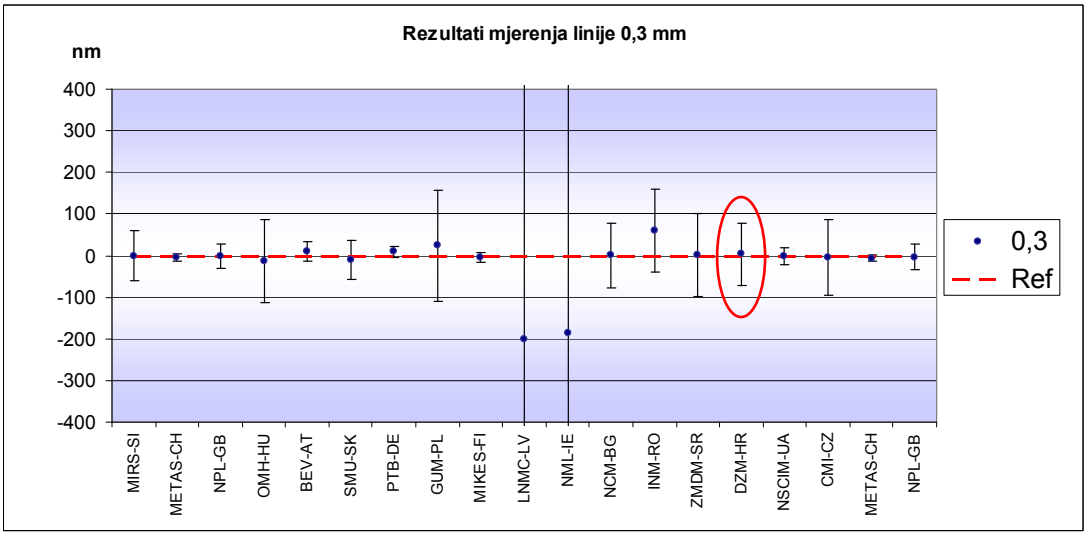
Na slikama od 44. do 73. prikazana je i referentna vrijednost rezultata mjerenja koja je jednaka ponderiranoj aritmetičkoj sredini rezultata mjerenja svih promatranih laboratorija i koja se računa prema izrazu 7.2. S prikazanih je slika vidljivo da su svi iskazani rezultati LFSB-a potpuno kompatibilni s referentnim vrijednostima. Najveća su odstupanja iskazanih rezultata mjerenja LFSB-a od referentne vrijednosti na linijama 30 i 35 mm te iznose 108 i 139 nm. Na ostalim linijama odstupanja su daleko manja od 100 nm, a na nekim linijama su čak jako blizu nuli.



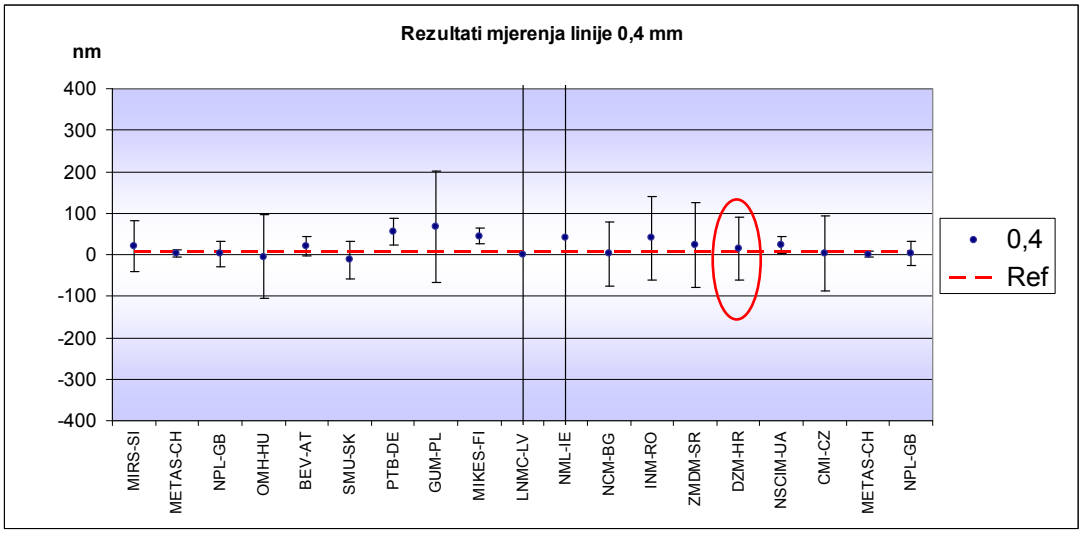
Slika 44. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,1 mm



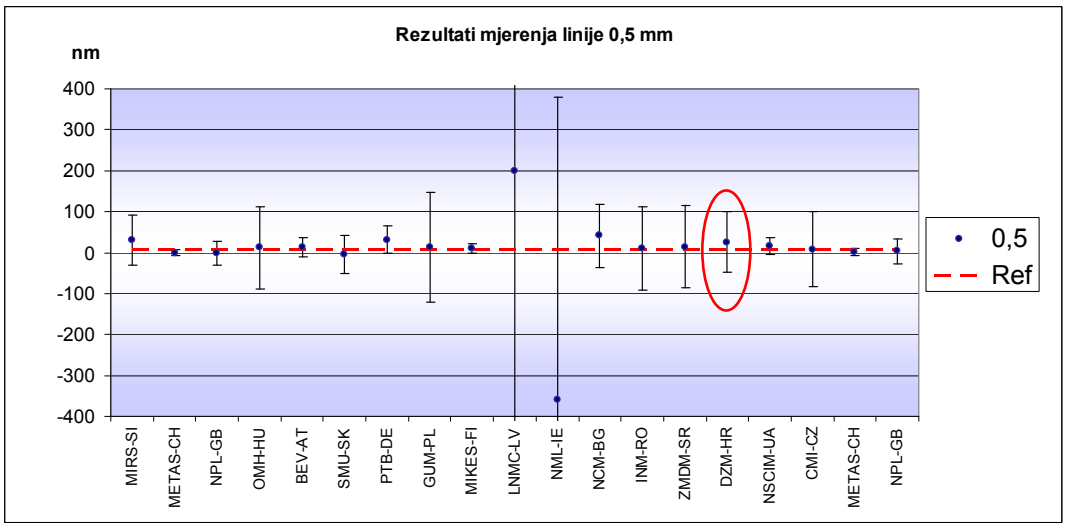
Slika 45. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,2 mm



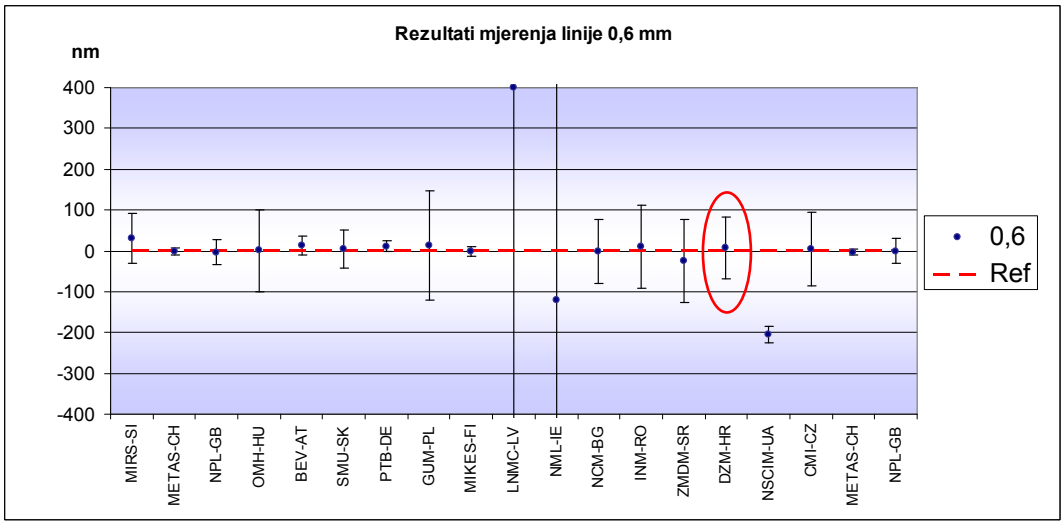
Slika 46. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,3 mm



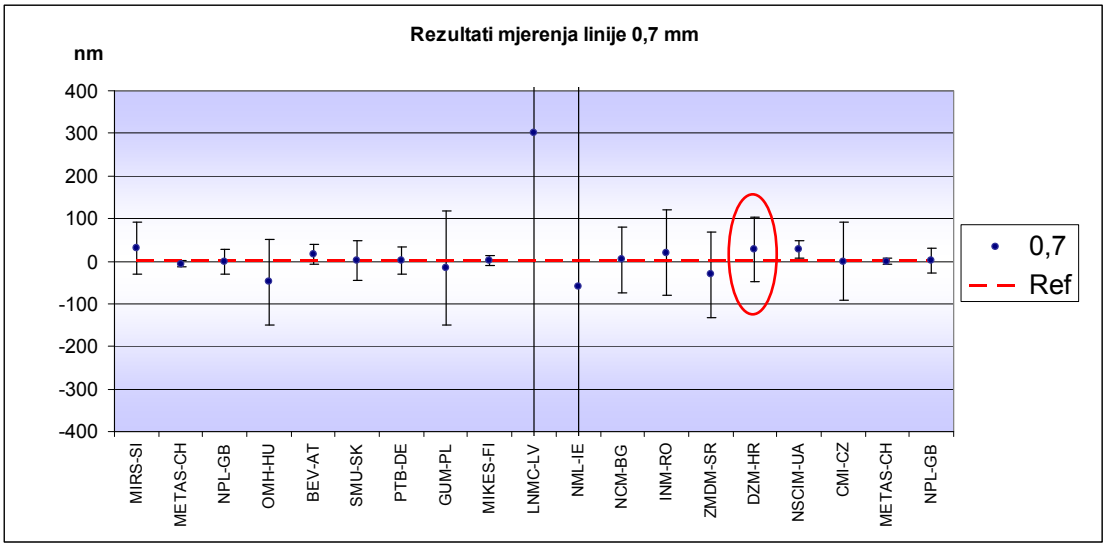
Slika 47. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,4 mm



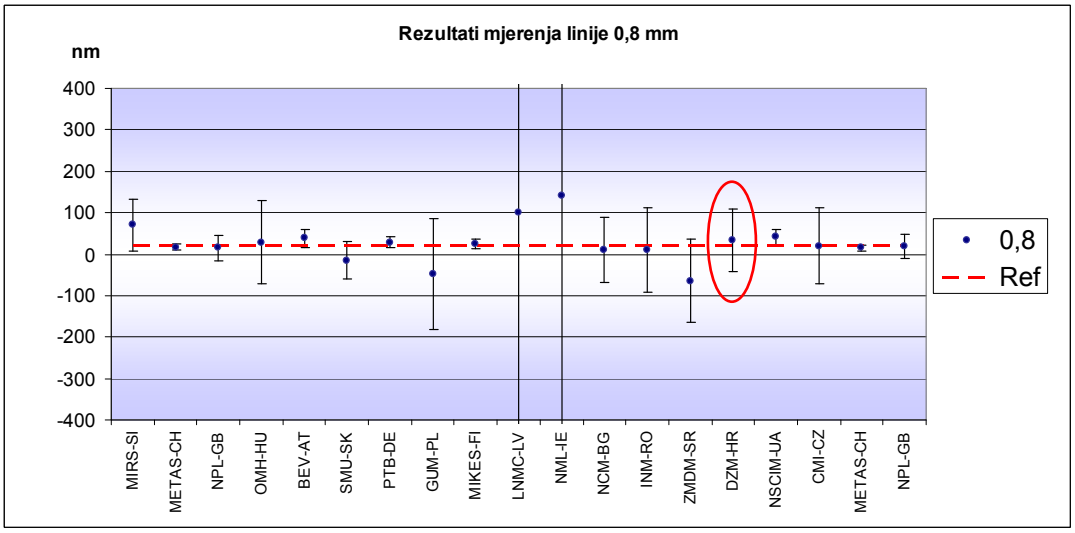
Slika 48. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,5 mm



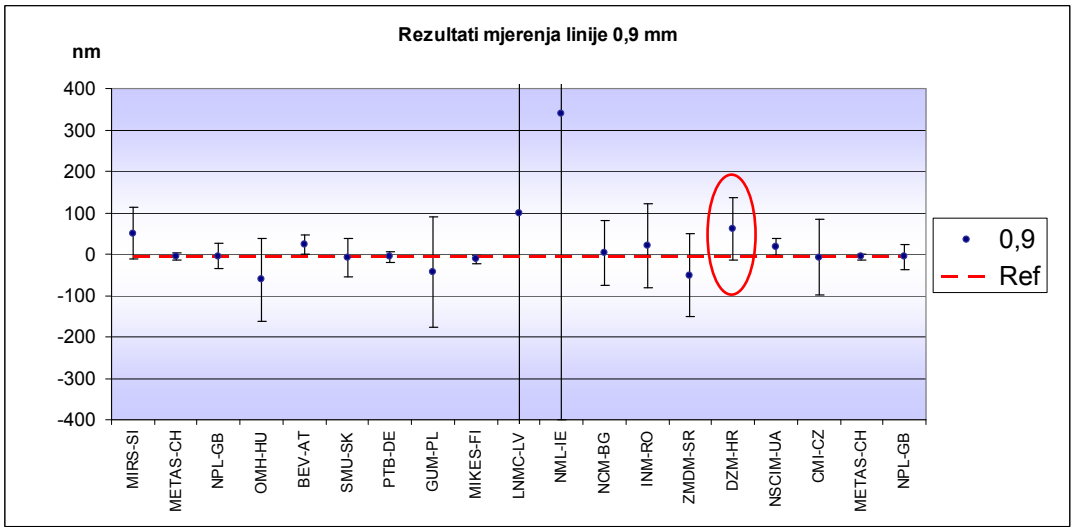
Slika 49. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,6 mm



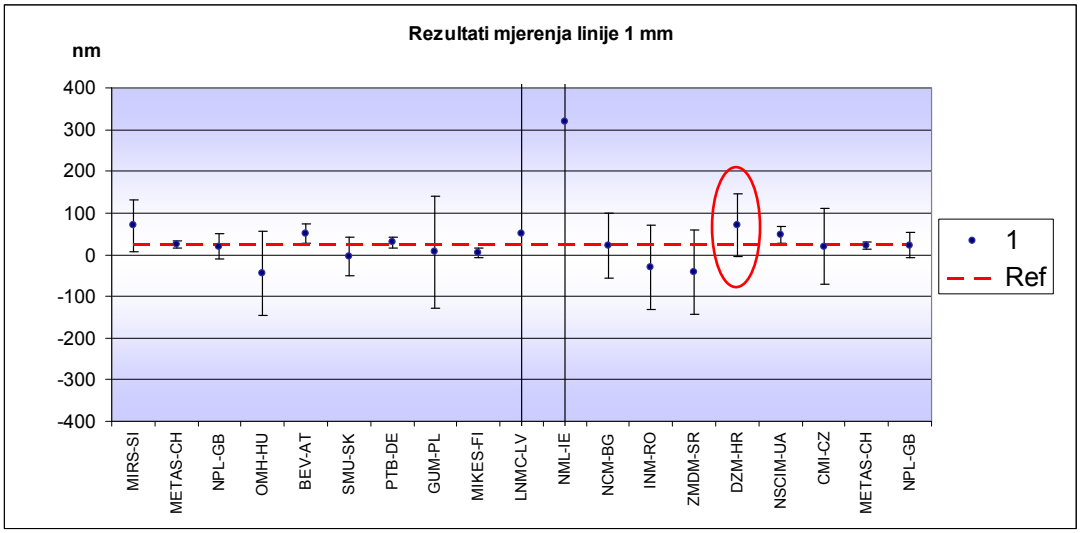
Slika 50. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,7 mm



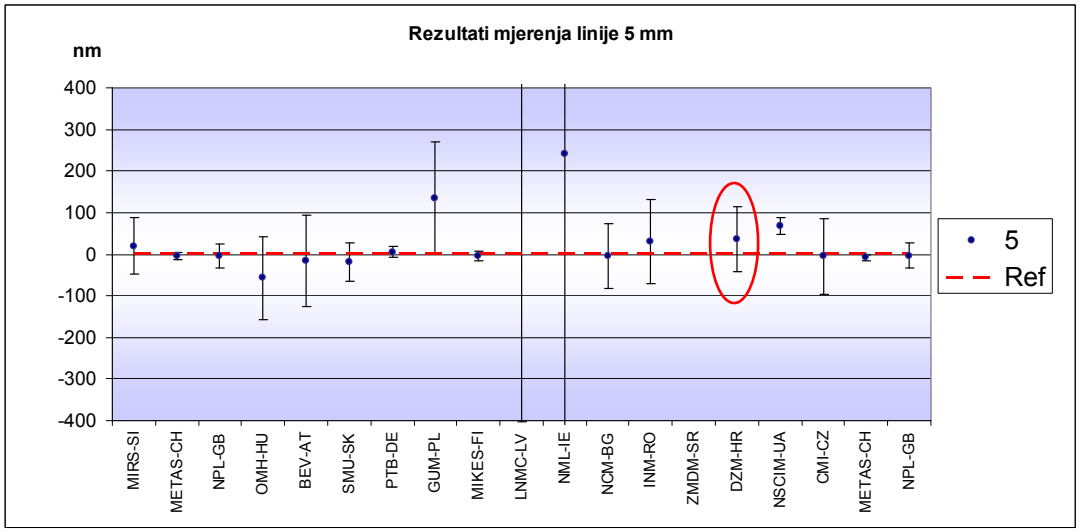
Slika 51. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,8 mm



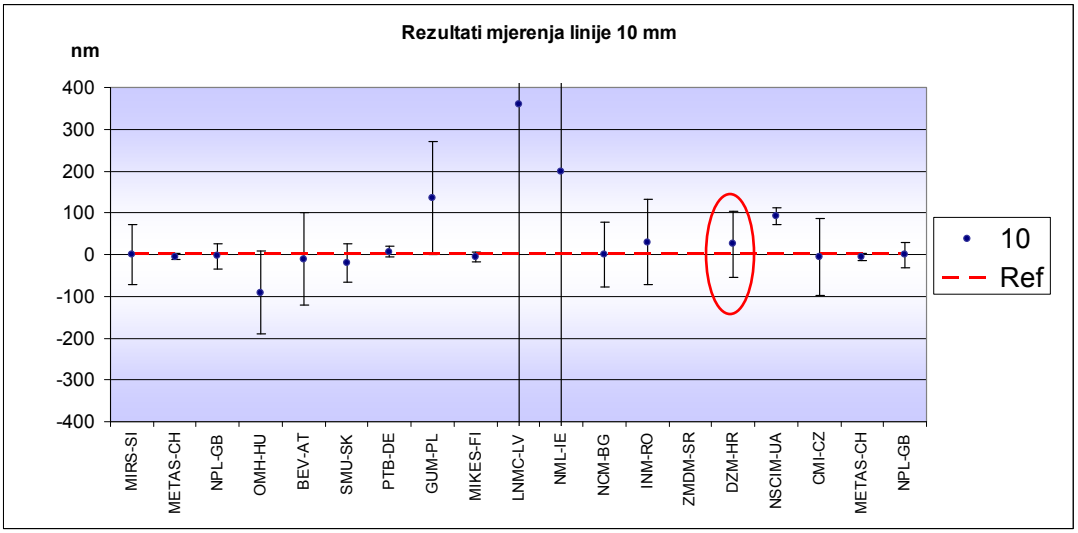
Slika 52. Usporedni rezultati mjerenja linije 0,9 mm



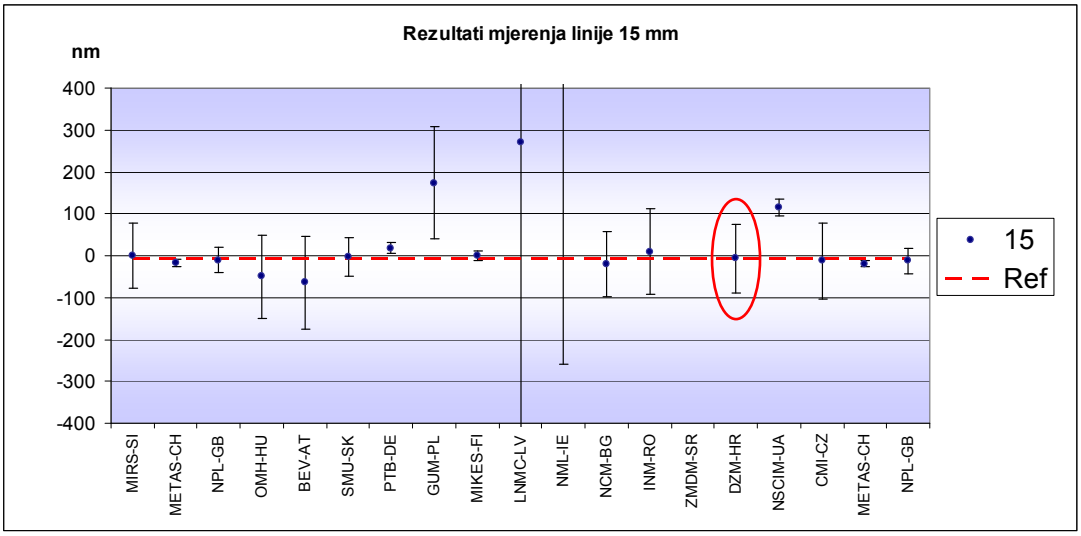
Slika 53. Usporedni rezultati mjerenja linije 1 mm



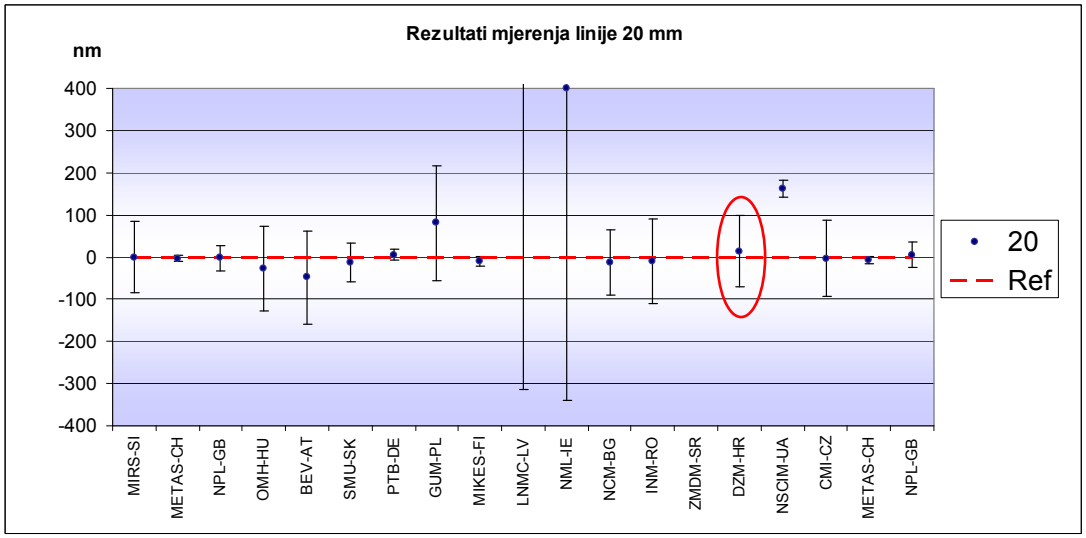
Slika 54. Usporedni rezultati mjerenja linije 5 mm



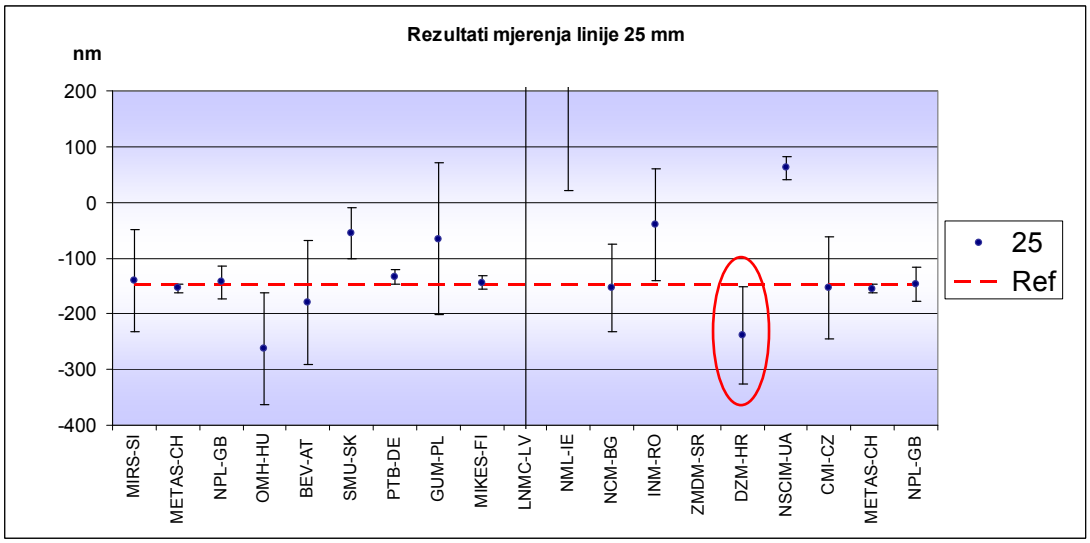
Slika 55. Usporedni rezultati mjerenja linije 10 mm



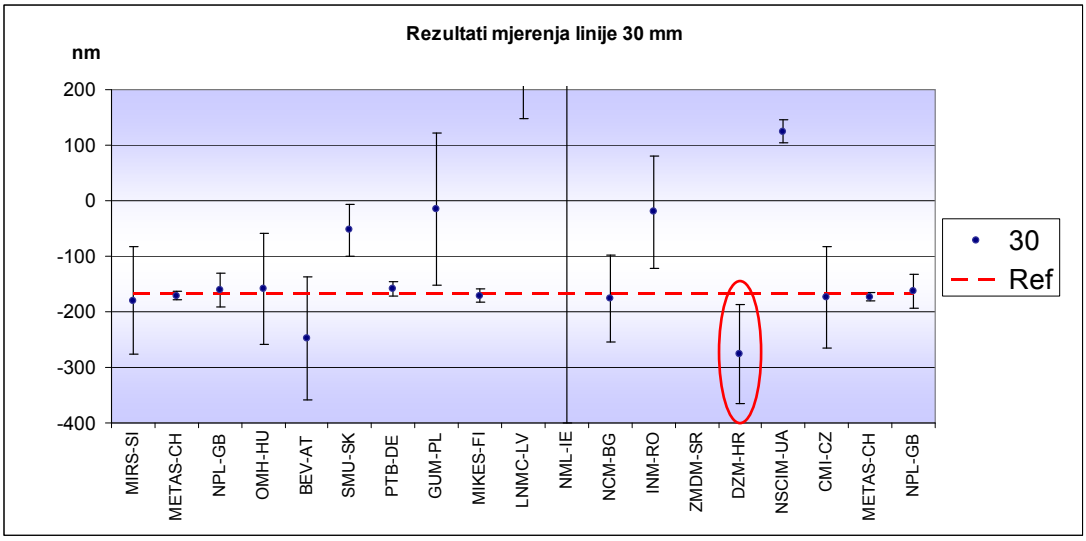
Slika 56. Usporedni rezultati mjerenja linije 15 mm



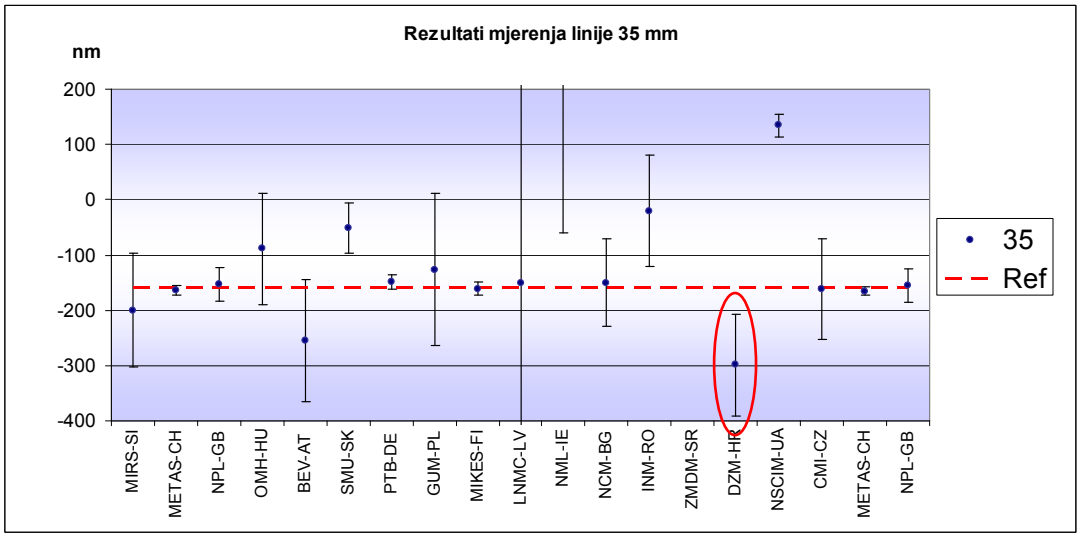
Slika 57. Usporedni rezultati mjerenja linije 20 mm



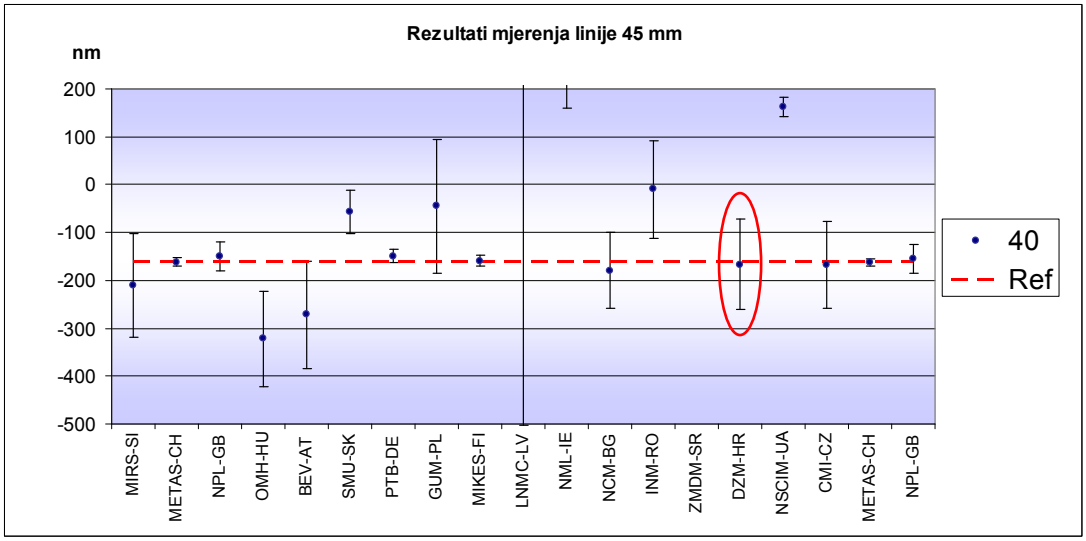
Slika 58. Usporedni rezultati mjerenja linije 25 mm



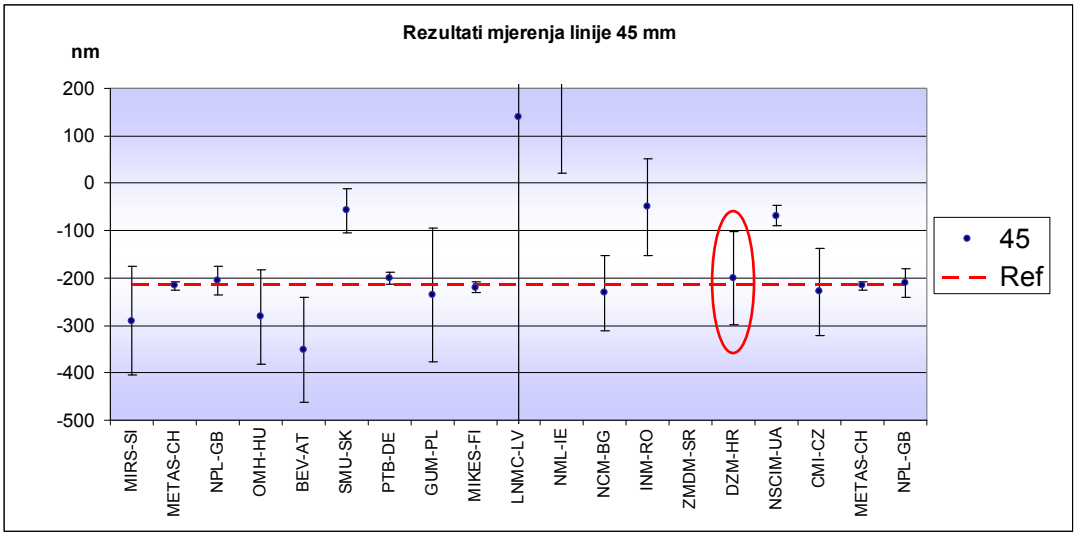
Slika 59. Usporedni rezultati mjerenja linije 30 mm



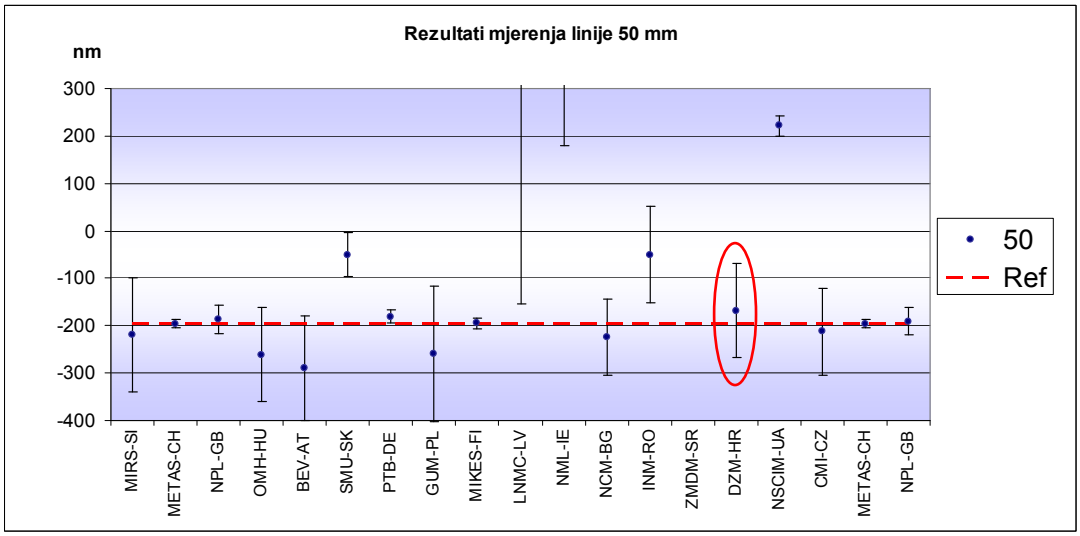
Slika 60. Usporedni rezultati mjerenja linije 35 mm



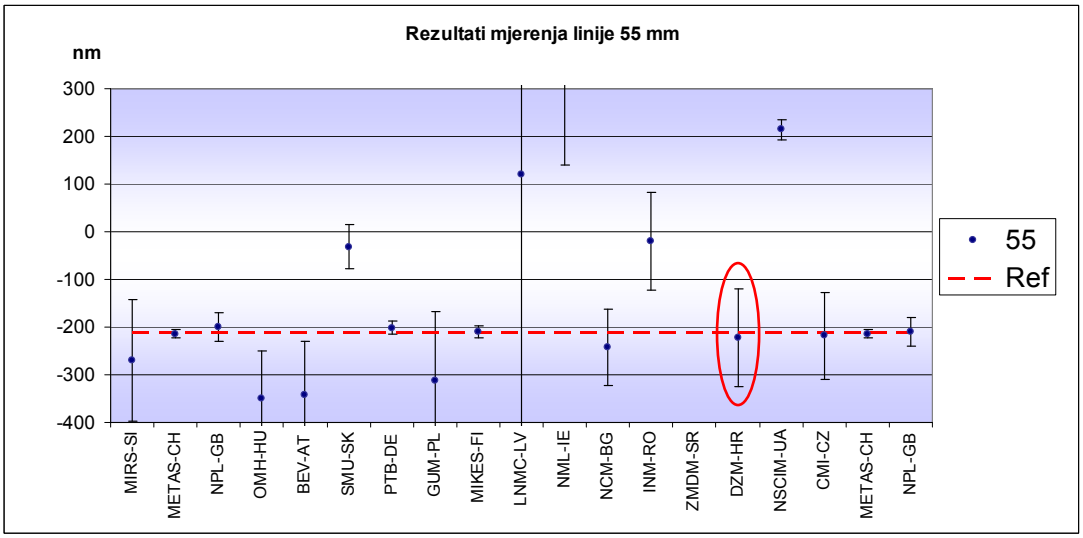
Slika 61. Usporedni rezultati mjerenja linije 40 mm



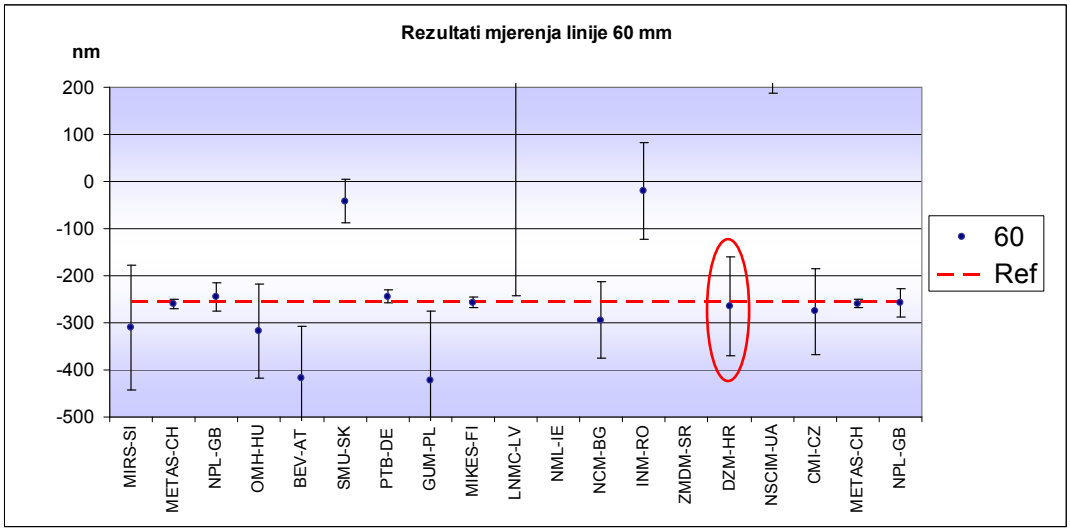
Slika 62. Usporedni rezultati mjerenja linije 45 mm



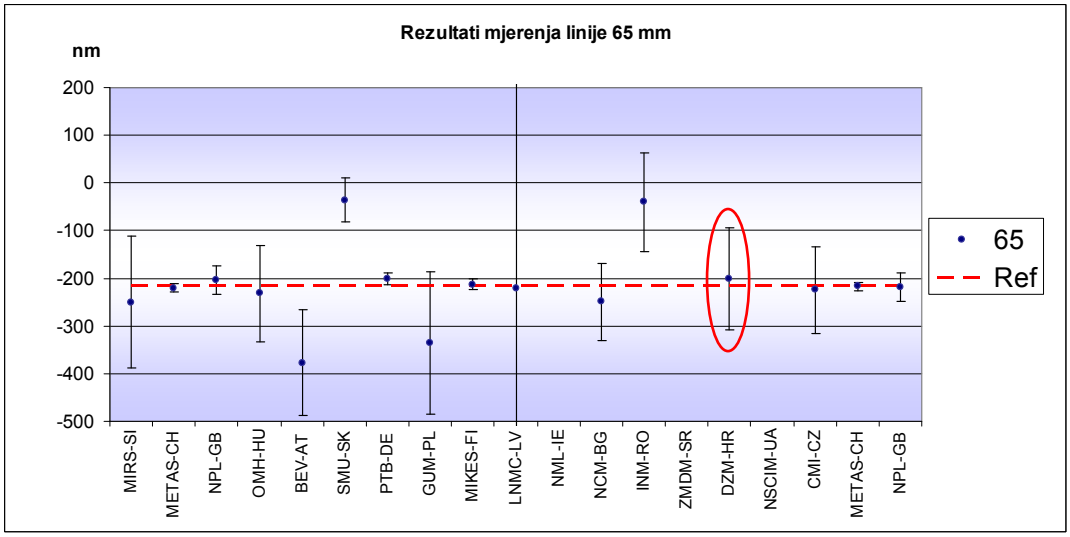
Slika 63. Usporedni rezultati mjerenja linije 50 mm



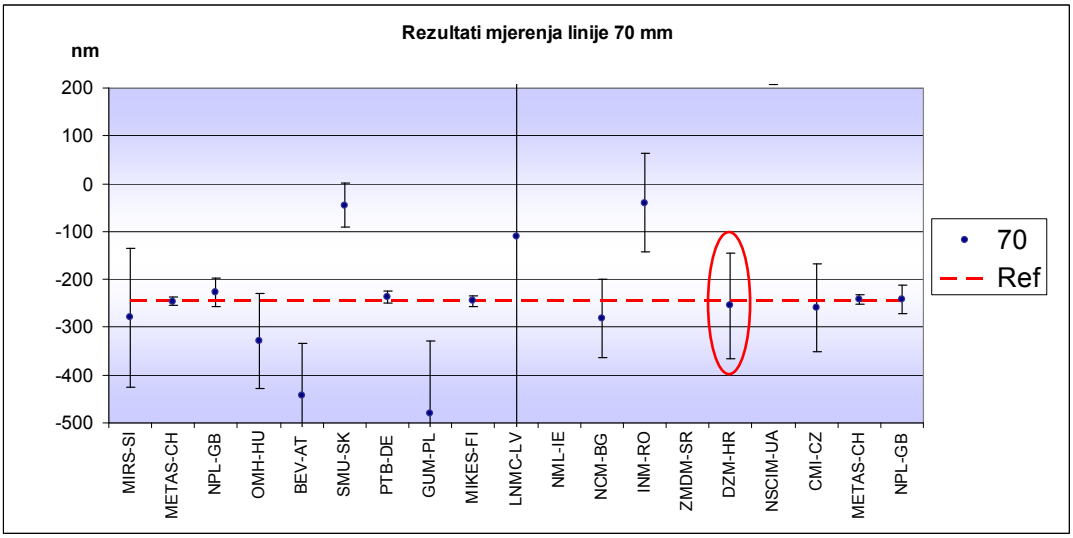
Slika 64. Usporedni rezultati mjerenja linije 55 mm



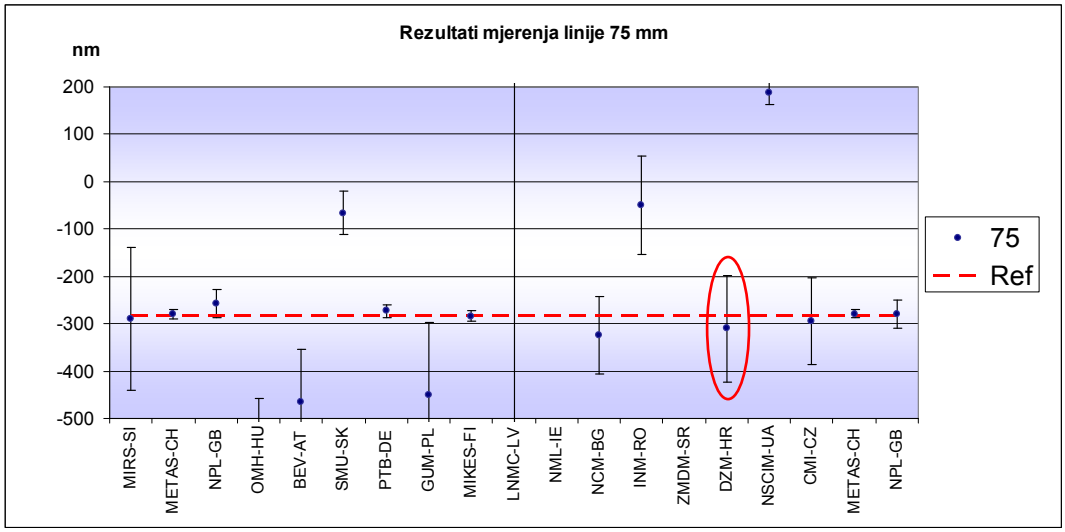
Slika 65. Usporedni rezultati mjerenja linije 60 mm



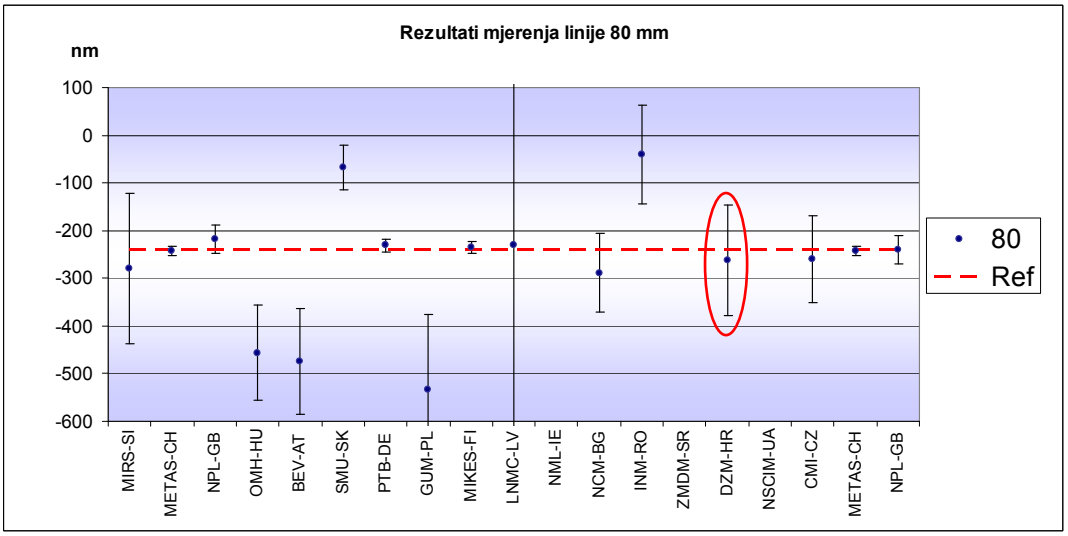
Slika 66. Usporedni rezultati mjerenja linije 65 mm



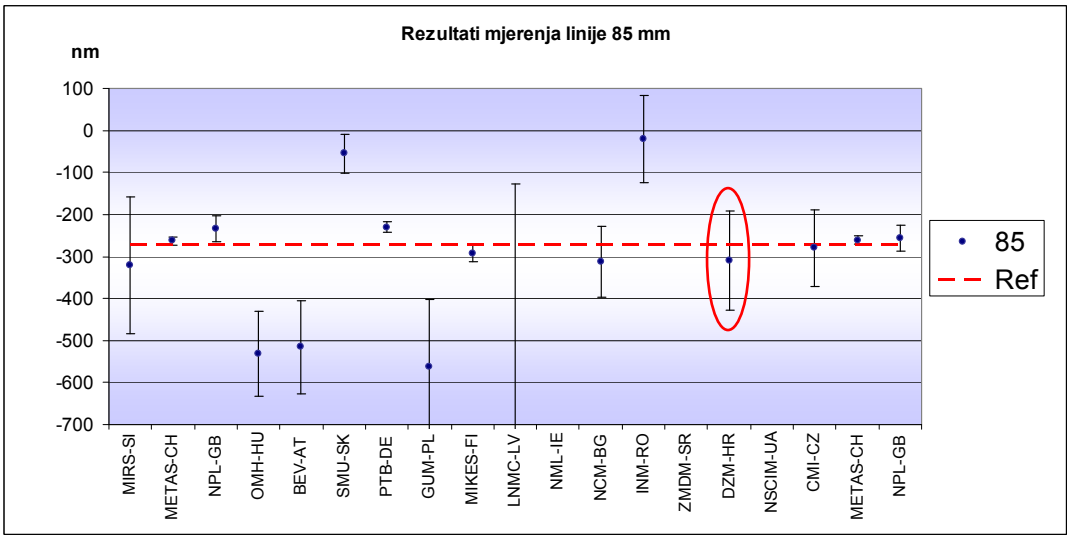
Slika 67. Usporedni rezultati mjerenja linije 70 mm



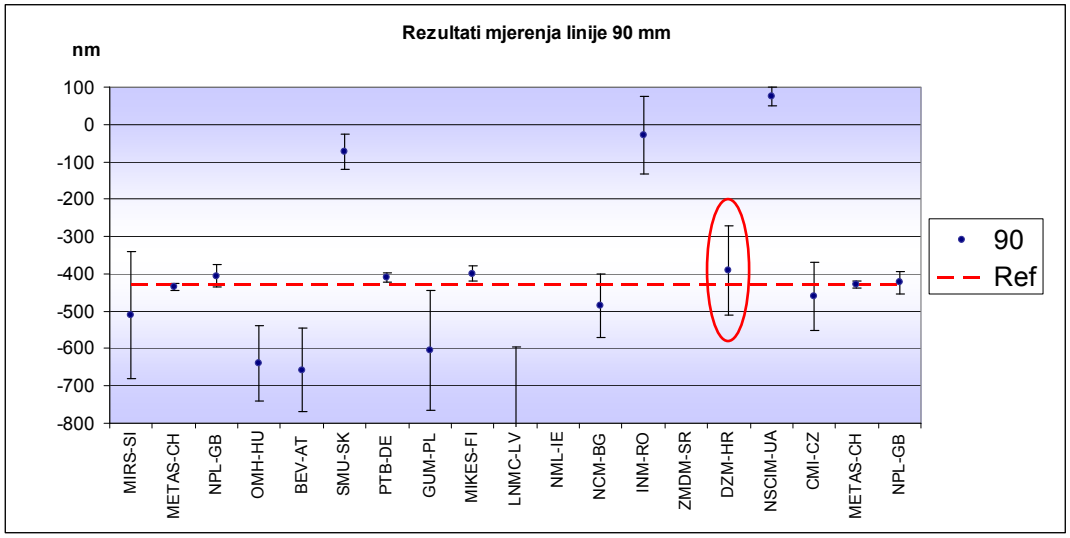
Slika 68. Usporedni rezultati mjerenja linije 75 mm



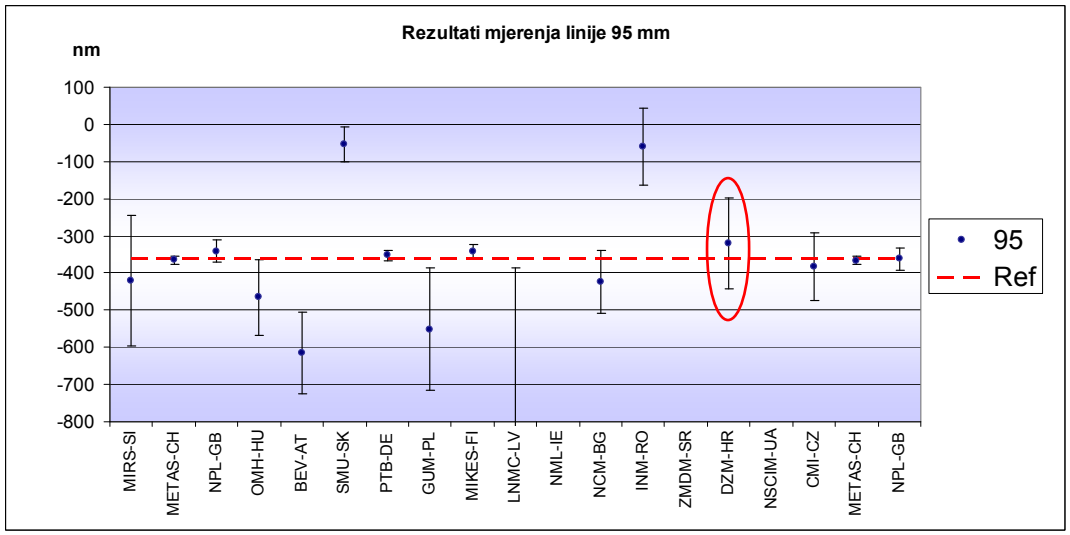
Slika 69. Usporedni rezultati mjerenja linije 80 mm



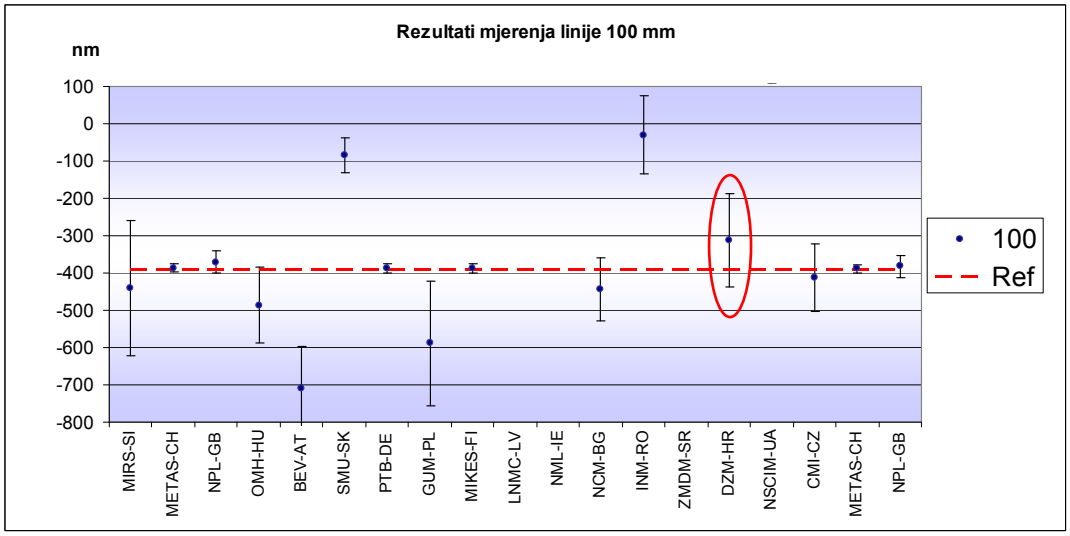
Slika 70. Usporedni rezultati mjerenja linije 85 mm



Slika 71. Usporedni rezultati mjerenja linije 90 mm



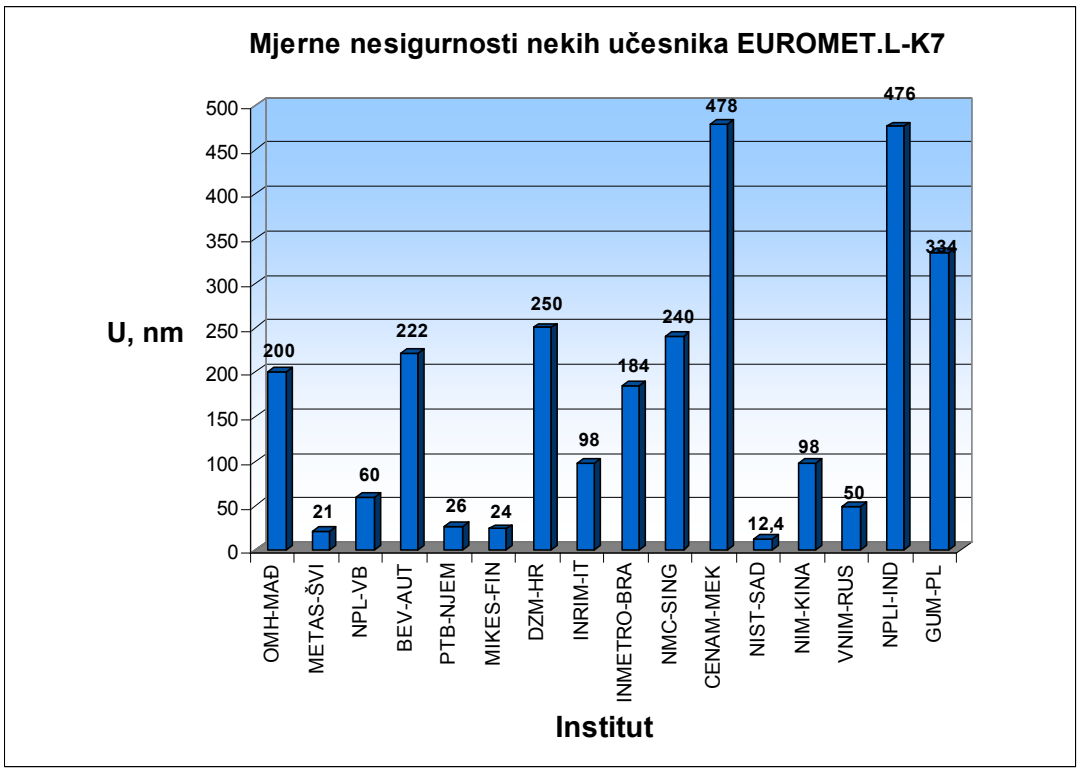
Slika 72. Usporedni rezultati mjerenja linije 95 mm



Slika 73. Usporedni rezultati mjerenja linije 100 mm

Zanimljivo je da mjeriteljski instituti iz nekih država koje su tehnološki mnogo razvijenije pa i veće od Republike Hrvatske, na određenim linijama imaju puno veća odstupanja od referentnih vrijednosti nego LFSB, a na nekim linijama uopće nisu kompatibilni s referentnim vrijednostima. To je najbolje uočljivo za rezultate mjerenja linija od 70 mm do 100 mm (slika 67. do slika 73.). Sa slika je vidljivo da LFSB ima potpuno kompatibilne rezultate s referentnim vrijednostima, dok neki drugi mjeriteljski instituti nisu kompatibilni s referentnom vrijednošću.

Slika 74. prikazuje deklarirane mjerne nesigurnosti nekih mjeriteljskih instituta u usporedbenom mjerenju EUROMET.L-K7.2006 - Key Comparison: Calibration of line scales za mjernu skalu duljine 100 mm. Sa slike 74. je vidljivo da samo tehnološki najrazvijenije države svijeta imaju nesigurnosti umjeravanja mjernih skala ispod razine od 100 nm. Isto tako je vidljivo da je deklarirana mjerna nesigurnost Laboratorija (DZM-HR) u iznosu od 250 nm puno manja od deklariranih mjernih nesigurnosti nekih mnogo razvijenijih i mnogoljudnijih država svijeta. Taj se podatak može zahvaliti i istraživanjima koja su provedena u ovom radu.



Slika 74. Usporedba mjernih nesigurnosti nekih mjeriteljskih instituta iskazanih u usporedbenom mjerenju EUROMET.L-K7.2006 - Key Comparison: Calibration of line scales za duljinu mjerne skale 100 mm

Kako bi se nedvosmisleno ocijenila kompatibilnost rezultata mjerenja LFSB-a, u nastavku rada prikazat će se vrijednosti faktora slaganja E_n koji nam najbolje daje odgovor je li rezultat mjerenja kompatibilan ili ne.

7.1.1 Vrijednosti E_n provedenog usporedbenog mjerenja

Faktor slaganja E_n računa se u svrhu ocjene kompatibilnosti rezultata mjerenja laboratorija koji sudjeluje u usporedbenom mjerenju prema referentnom rezultatu. Faktor slaganja E_n računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{k \cdot \sqrt{u^2(x_{lab}) - u^2(x_{ref})}}; \; k = 2 \tag{7.1}$$

gdje su:

x_{lab} -rezultat laboratorija

x_{ref} -referentna vrijednost izračunata prema izrazu $x_{ref} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} u^{-2}(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{n} u^{-2}(x_i)}$ (7.2)

$u(x_{lab})$ - standardna nesigurnost laboratorija

$u(x_{ref})$ -referentna standardna nesigurnost izračunata prema izrazu

$$u(x_{ref}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} u^{-2}(x_i)}} \tag{7.3}$$

Vrijednost E_n treba biti manja od 1 da bi se rezultat mogao smatrati kompatibilnim, odnosno što je vrijednost E_n bliža nuli, to je kompatibilnost tog rezultata bolja.

Vrijednost E_n je valjano izračunata ukoliko je zadovoljen Birgeov kriterij. Ukoliko nije zadovoljen Birgeov kriterij, rezultati Laboratorija s najvećom vrijednošću E_n izbacuju se iz proračuna jedan po jedan krenuvši od Laboratorija s najvećim E_n sve dok se ne zadovolji Biregeov kriterij. Birgeov kriterij računa se prema izrazu :

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{\text{int}}} \tag{7.4}$$

gdje su:

$$u_{ext} = \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{ref}) / u(x_i)\right]^2}{(n-1)\sum_{i=1}^{n} u^{-2}(x_i)}} \tag{7.5}$$

$$u_{\text{int}} = 1/\sqrt{\sum_{i=1}^{n} u^{-2}(x_i)} \tag{7.6}$$

Birgeov kriterij glasi:

$$R_B < \sqrt{1+\sqrt{\frac{8}{n-1}}} \tag{7.7}$$

U tablici 5. prikazane su vrijednosti x_{ref}, $u_c(x_{ref})$, R_B, $R_{B,krit}$ grupe 1 te odstupanje rezultata mjerenja LFSB-a od referentne vrijednosti i E_n vrijednosti za LFSB [15].

Tablica 5. Prikaz vrijednosti E_n za rezultate mjerenja LFSB-a (grupa 1)

Linija skale, mm	x_{ref}, nm	$u_c(x_{ref})$, nm	R_B	$R_{B,dop}$	x_i-x_{ref},nm	$\lvert E_n \rvert$
0,1	24,3	5,3	0,52	1,31	-21,29	0,14
0,2	1,8	5,2	0,42	1,31	-2,76	0,02
0,3	-1,2	4,9	0,32	1,31	4,16	0,03
0,4	9,8	5,7	0,63	1,31	4,21	0,03
0,5	6,6	5,2	0,40	1,31	19,38	0,13
0,6	1,7	5,0	0,32	1,32	6,28	0,04
0,7	0,5	5,2	0,48	1,31	27,51	0,18
0,8	22,7	4,9	0,53	1,31	10,29	0,07
0,9	-4,4	4,9	0,60	1,31	65,43	0,43
1	23,3	4,9	0,73	1,31	47,66	0,32
5	2,0	5,0	0,98	1,32	34,00	0,22
10	2,5	5,0	1,28	1,32	22,52	0,14
15	-7,0	5,2	0,78	1,33	-0,03	0,00
20	-2,7	5,2	0,40	1,33	16,71	0,10
25	-147,5	5,3	0,83	1,33	-90,60	0,52
30	-167,7	5,3	0,92	1,33	-108,26	0,60
35	-159,2	5,4	0,85	1,33	-139,75	0,76
40	-159,0	5,4	0,92	1,33	-8,02	0,04
45	-214,2	5,5	1,01	1,33	14,19	0,07
50	-193,4	5,5	0,96	1,33	25,42	0,13
55	-211,5	5,6	0,91	1,34	-11,78	0,06
60	-258,0	5,7	1,21	1,34	-9,67	0,05
65	-214,8	5,8	1,10	1,34	12,72	0,06
70	-245,4	5,9	1,21	1,34	-10,86	0,05
75	-282,3	5,9	1,23	1,35	-29,20	0,13
80	-240,8	6,0	1,24	1,35	-21,87	0,10
85	-269,4	8,0	1,30	1,38	-42,70	0,18
90	-429,1	6,9	1,27	1,36	38,07	0,16
95	-362,0	7,0	1,28	1,35	40,97	0,17
100	-391,0	6,3	1,17	1,36	78,99	0,32

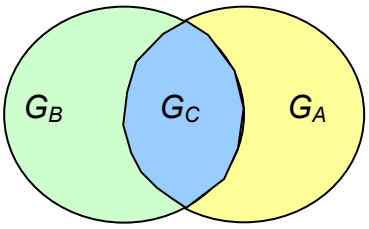
Na osnovu prikazanih vrijednosti u tablici 5. može se govoriti o ostvarenoj visokoj kompatibilnosti rezultata mjerenja LFSB-a koja su provedena na sustavu za umjeravanje mjernih skala. Iz tablice 5. vidljivo je da su vrijednosti faktora slaganja E_n za sve mjerene linije daleko manje od 1, a u većini slučajeva su jako blizu nuli. Najveća utvrđena vrijednost faktora slaganja E_n iznosi 0,76 za liniju duljine 35 mm, dok su ostale vrijednosti faktora slaganja E_n daleko manje.

Ukoliko se pogledaju vrijednosti Birgeovog kriterija može se zaključiti da su sve izračunate vrijednosti Birgeovog omjera manje od dopuštenih što potvrđuje da su deklarirani rezultati svih laboratorija međusobno usporedivi. Kako bi se ocijenila kompatibilnost rezultata mjerenja svih laboratorija potrebno je povezati rezultate mjerenja obiju grupa.

7.1.2 Povezivanje rezultata mjerenja obje grupe laboratorija

Prikazani rezultati mjerenja u poglavlju 7.1 i prikazane vrijednosti faktora slaganja E_n u poglavlju 7.1.1 odnose se samo na grupu 1 u kojoj je sudjelovao i LFSB. Kako bi se povezali rezultati mjerenja obje grupe, upotrijebit će se Bayesian statistika [19].

Kako bi statističke formule bile što jednostavnije, grupa 1 će se imenovati kao grupa A, a grupa 2 kao grupa B. Indeks "C" podrazumijeva presjek rezultata mjerenja obiju grupa i sačinjavaju ga rezultati dvaju Laboratorija koji su bili u obje grupe (METAS i NPL).



Referentne vrijednosti izračunate su prema sljedećim izrazima:

$$y_A = \frac{bS_1 + cS_2}{ab - c^2} \tag{7.8}$$

$$y_B = \frac{cS_1 + aS_2}{ab - c^2} \tag{7.9}$$

Standardne nesigurnosti referentnih vrijednosti izračunate su prema sljedećim izrazima:

$$u(y_A) = \sqrt{\frac{b}{ab - c^2}} \tag{7.10}$$

$$u(y_B) = \sqrt{\frac{a}{ab - c^2}} \tag{7.11}$$

Kovarijanca je izračunata prema sljedećem izrazu:

$$u(y_A, y_B) = \frac{c}{ab - c^2} \tag{7.12}$$

Gdje su:

$$a = \sum_{i \in (G_A / G_B)} \frac{1}{u^2(x_{A,i})} + \sum_{i \in (G_A \cap G_B)} \frac{u^2(x_{B,i})}{u^2(x_{A,i}) \cdot u^2(x_{B,i}) - u^2(x_{A,i}, x_{B,i})} \tag{7.13}$$

$$b = \sum_{i \in (G_A / G_B)} \frac{1}{u^2(x_{B,i})} + \sum_{i \in (G_A \cap G_B)} \frac{u^2(x_{A,i})}{u^2(x_{A,i}) \cdot u^2(x_{B,i}) - u^2(x_{A,i}, x_{B,i})} \tag{7.14}$$

$$c = \sum_{i \in (G_A \cap G_B)} \frac{u(x_{A,i}, x_{B,i})}{u^2(x_{A,i}) \cdot u^2(x_{B,i}) - u^2(x_{A,i}, x_{B,i})} \tag{7.15}$$

$$S_1 = \sum_{i \in (G_A / G_B)} \frac{x_{A,i}}{u^2(x_{A,i})} + \sum_{i \in (G_A \cap G_B)} \frac{u^2(x_{B,i}) \cdot x_{A,i} - u(x_{a,i}, x_{B,i}) \cdot x_{B,i}}{u^2(x_{A,i}) \cdot u^2(x_{B,i}) - u^2(x_{A,i}, x_{B,i})} \tag{7.16}$$

$$S_2 = \sum_{i \in (G_A / G_B)} \frac{x_{B,i}}{u^2(x_{B,i})} + \sum_{i \in (G_A \cap G_B)} \frac{u^2(x_{A,i}) \cdot x_{B,i} - u(x_{a,i}, x_{B,i}) \cdot x_{A,i}}{u^2(x_{A,i}) \cdot u^2(x_{B,i}) - u^2(x_{A,i}, x_{B,i})} \tag{7.17}$$

Vrijednosti $x_{A,i}$ su iskazani rezultati mjerenja laboratorija koji su sudjelovali u usporedbenom mjerenju u grupi 1, vrijednosti $x_{B,i}$ iskazani su rezultati mjerenja laboratorija iz grupe 2, a vrijednosti $u(x_i)$ iskazane su standardne mjerne nesigurnosti. U

tablici 6. su prikazane vrijednosti $x_{ref\ grupa\ 1}$, $x_{ref\ grupa\ 2}$, $u_c(x_{ref})_{grupa\ 1}$, $u_c(x_{ref})_{grupa\ 2}$ te odstupanje rezultata mjerenja LFSB-a od referentne vrijednosti i E_n vrijednosti za LFSB.

Tablica 6. Prikaz referentnih vrijednosti i vrijednosti faktora slaganja E_n za rezultate mjerenja LFSB

Linija skale, mm	$x_{ref\ grupa\ 1.}$ nm	$x_{ref\ grupa\ 2.}$ nm	$u_c(x_{ref})$ grupa 1, nm	$u_c(x_{ref})$ grupa 2, nm	x_i-$x_{ref,}$nm	$\lvert E_n \rvert$
0,1	24,3	33,8	5,3	2,7	-21,3	0,14
0,2	1,8	-1,5	5,2	2,7	-2,8	0,02
0,3	-1,2	15,7	4,9	2,7	4,2	0,03
0,4	9,8	3,3	5,7	2,7	4,2	0,03
0,5	6,6	-11,4	5,2	2,7	19,4	0,13
0,6	1,7	3,3	5,0	2,7	6,3	0,04
0,7	-0,3	-17,0	5,0	2,7	28,3	0,19
0,8	22,6	16,7	4,9	2,7	10,4	0,07
0,9	-4,4	-13,0	4,9	2,7	65,4	0,43
1	23,5	29,2	4,8	2,7	47,5	0,32
5	2,0	19,7	5,0	3,1	34,00	0,22
10	2,7	22,2	5,0	3,1	22,3	0,14
15	-5,9	-22,4	5,1	3,1	-1,1	0,01
20	-2,0	23,5	5,2	3,2	16,0	0,09
25	-144,8	-119,5	5,0	3,2	-93,2	0,53
30	-166,2	-148,9	5,2	3,3	-109,8	0,61
35	-157,7	-123,1	5,3	3,4	-141,3	0,76
40	-155,6	-124,7	5,3	3,5	-11,4	0,06
45	-213,4	-184,2	5,4	3,6	13,4	0,07
50	-192,1	-112,9	5,5	3,7	24,1	0,12
55	-209,3	-135,4	5,6	3,8	-12,7	0,06
60	-255,4	-155,7	5,6	3,9	-10,6	0,05
65	-212,9	-115,1	5,7	4,0	11,9	0,06
70	-240,9	-135,0	5,7	4,1	-14,1	0,06
75	-280,5	-151,2	5,9	4,3	-29,5	0,13
80	-238,8	-127,5	5,9	4,4	-23,2	0,10
85	-251,2	-133,2	6,4	4,4	-58,8	0,25
90	-420,7	-318,7	6,0	4,5	29,7	0,12
95	-359,9	-269,0	6,9	4,8	38,9	0,16
100	-384,0	-257,3	6,1	4,9	72,0	0,29

Prema vrijednostima prikazanim u tablici 6. vidljivo je da su rezultati LFSB-a visoko kompatibilni s referentnim vrijednostima svih mjerenja. Najveća vrijednost faktora slaganja E_n iznosi 0,76 za liniju duljine 35 mm. Sve ostale vrijednosti E_n daleko su niže.

U provedenom usporedbenom mjerenju deklarirana mjerna nesigurnost LFSB-a iznosila je U=(150+L) nm, L u mm, k=2, P=95%. Rezultati provedenog usporedbenog mjerenja EURAMET projekt 882, EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7, "Calibration of line scales" potvrdili su da je sustav za umjeravanje mjernih skala potpuno sposoban za umjeravanje mjernih skala duljine 100 mm na razini mjerne nesigurnosti koja je izračunata u ovom radu te iznosi U=(130+0,66·L) nm, L u mm, k=2, P = 95%. Kako ne bi bilo nedoumica oko umjeravanja dužih mjernih skala, nakon što je provedena modifikacija uređaja (poglavlje 10.) i analiza svih utjecajnih parametara mjerne nesigurnosti (poglavlje 11.), provedeno je i usporedbeno mjerenje mjerne skale duljine 300 mm (poglavlje 12.).

8. VALIDACIJA SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA

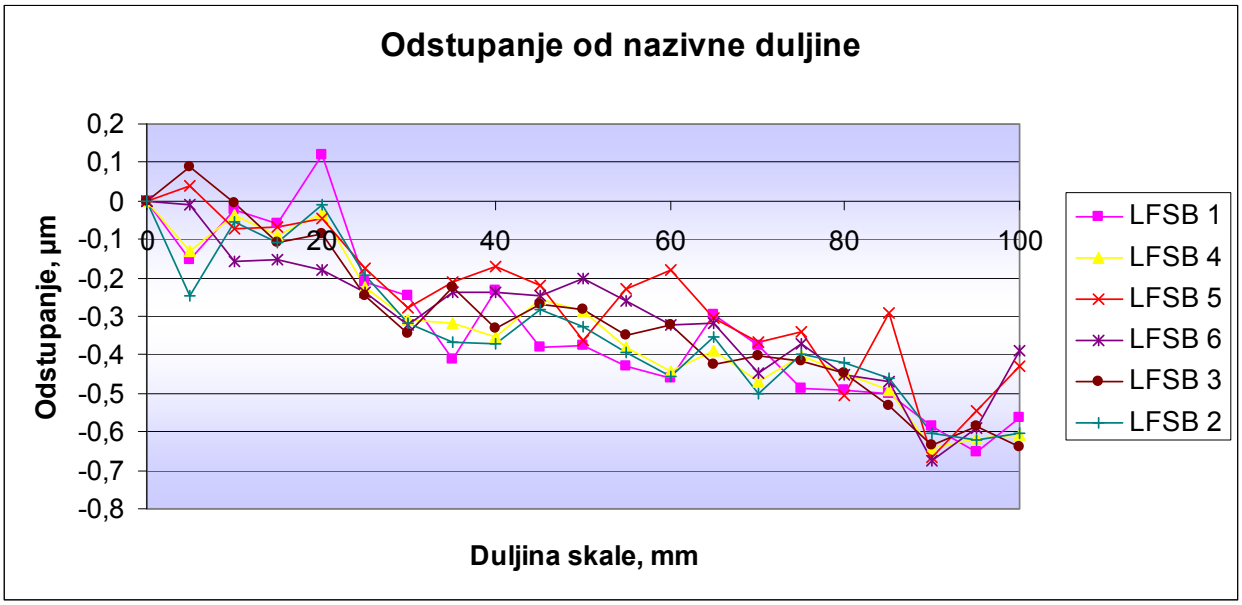
Prije početka upotrebe mjernog sustava i sudjelovanja LFSB-a u međunarodnim usporedbenim mjerenjima iz područja mjernih skala neophodno je provesti validaciju mjernog sustava.

Kako bi se provela uspješna validacija mjernog sustava neophodno je imati određene fiksne točke koje će se koristiti kao referentne vrijednosti. U ovom slučaju, referentna vrijednost je već prije opisana NPL-ova mjerna skala duljine 100 mm koja je umjerena od strane dva europska mjeriteljska instituta: NPL-a pri nabavci mjerne skale i od strane PTB-a tijekom studijskog boravka autora ovog rada u PTB-u na uređaju [3].

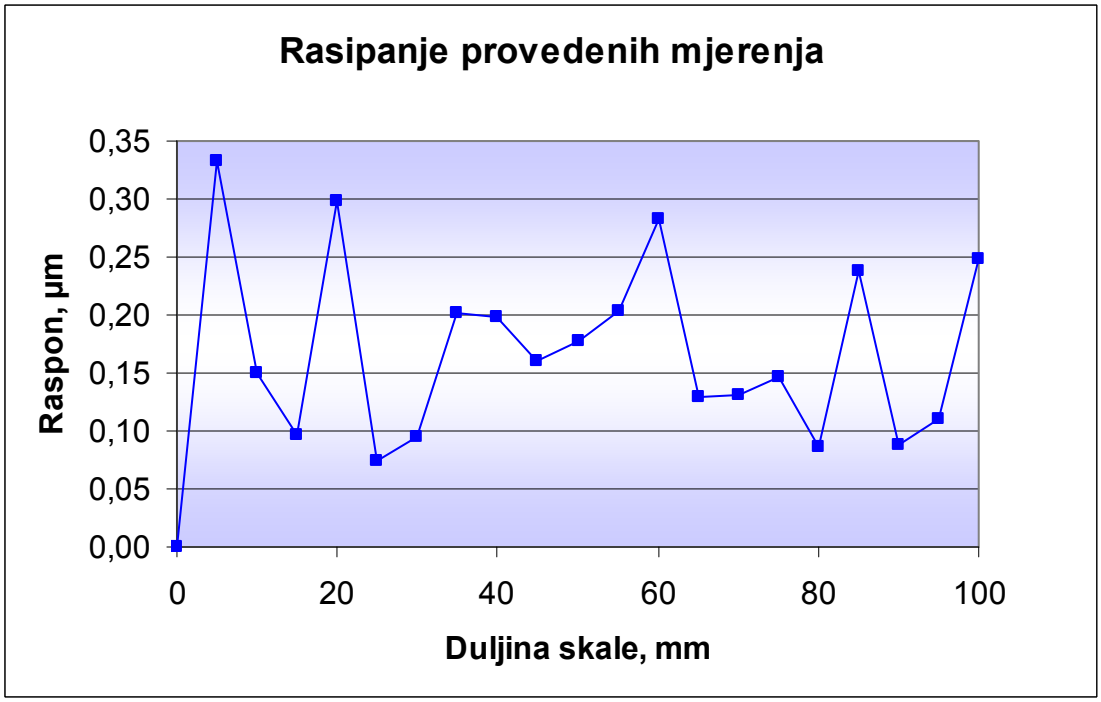
8.1 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE S POSTAVKOM LASERA S LIJEVE STRANE

Tijekom postupka validacije uređaja provedeno je šest neovisnih mjerenja NPL-ove mjerne skale. Svaka linija mjerne skale mjerena je sedam puta što znači da su za svaku mjerenu liniju skale dobivena 42 rezultata mjerenja. Linije su mjerene uz korak od 5 mm, što znači da je prva mjerena linija 0 mm, pa redom 5 mm, 10 mm, 15 mm i tako do 100 mm.

Mjerenja su izvršena u roku od dva tjedna. Provedena su uz korištenje automatske kompenzacije temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka.



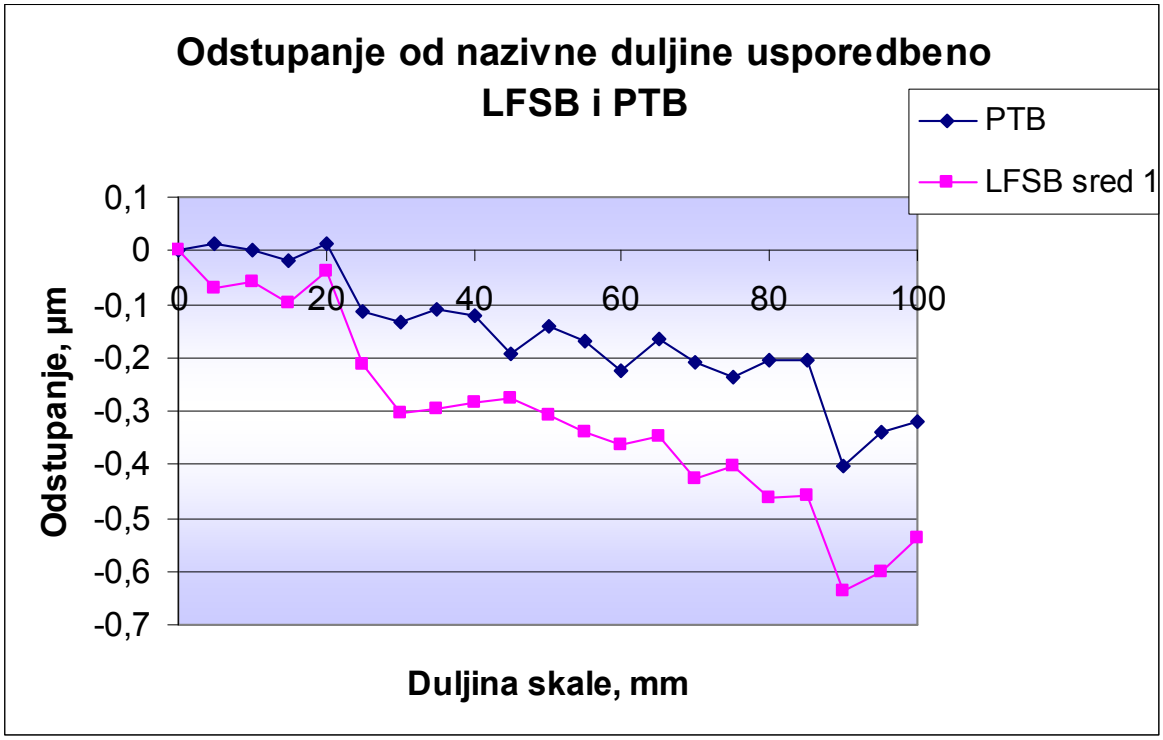
Slika 75. Rezultati provedenih mjerenja (odstupanje od nazivne duljine)



Slika 76. Rasponi provedenih mjerenja

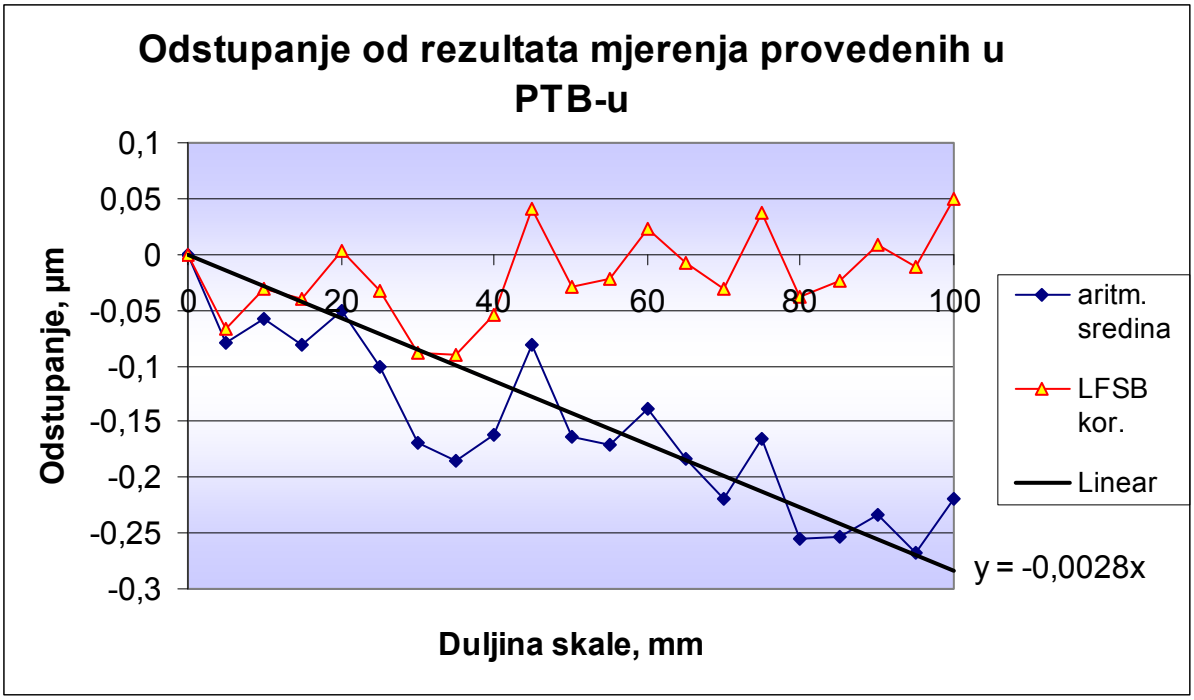
Dobiveni rezultati umjeravanja NPL-ove mjerne skale prikazani su na slici 75. Slika 75. prikazuje odstupanje od nazivne vrijednosti svih šest setova mjerenja iz kojeg je vidljivo da mjerenja nemaju značajnih odstupanja u odnosu jedan na drugi te tako sva

provedena mjerenja imaju isti trend. Slika 76. prikazuje raspone provedenih mjerenja za svaku mjerenu liniju. Sa slike 76. vidljivo je da se rasponi provedenih mjerenja kreću u području od 100 nm do 300 nm. Rasponi nemaju neki specifičan trend nego su slučajno raspoređeni. Da bi se mogli donositi zaključci o kvaliteti provedenih mjerenja, rezultati provedenih mjerenja usporedit će se s rezultatima umjeravanja mjerne skale provedenim u PTB-u. Slika 77. prikazuje odstupanje od nazivne vrijednosti aritmetičke sredine svih provedenih mjerenja u LFSB-u i rezultata mjerenja provedenih u PTB-u. Sa slike 3. je vidljivo da postoji određeno odstupanje rezultata mjerenja te da se odstupanje povećava s povećanjem duljine.



Slika 77. Usporedba rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u i PTB-u (odstupanje od nazivne vrijednosti)

Kako bi se bolje mogli donositi zaključci, rezultati mjerenja prikazat će se kao odstupanje od rezultata provedenih u PTB-u što je prikazano na slici 78. Sa slike 78. je vidljivo da maksimalno odstupanje u odnosu na rezultate PTB-a iznosi 275 nm i to za liniju od 95 mm.



Slika 78. Odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u

Sa slike 78. također je vidljivo da dobiveni rezultati imaju linearno padajući trend u odnosu na rezultate umjeravanja PTB-a. Ukoliko se provede korekcija dobivenih rezultata za koeficijent nagiba pravca sa slike 78., vidljivo je da je onda odstupanje rezultata mjerenja u odnosu na PTB u rasponu do 100 nm.

Pošto dobiveni rezultati imaju linearno padajući trend i podsjećaju na kosinus pogrešku zbog postavljanja suosnosti mjerne skale ili laserskog sustava odlučeno je da se mjerenja ponove s novim postavljanjem skale i laserskog sustava kako bi se izbjegli utjecaji postavljanja koji bi mogli uzrokovati ovakvu pogrešku.

Bitno je napomenuti da su ova mjerenja provedena na način da se izvor svjetlosti (laser) nalazio s lijeve strane pokretnog stola te je zbog nedostatka prostora udaljenost izvora svjetlosti od pomičnog retroreflektora manja od pola metra što otežava postavljanje sousnosti laserskog interferometra i pokretnog stola. Naime, kod postavljanja suosnosti povratni signal se mora vratiti točno u sredinu kružne mete na laseru. Ukoliko su odstupanja od sredine mete ista za različite udaljenosti izvora svjetla od reflektora, naravno da je manja pogreška postavljanja suosnosti kod postavke u kojoj je izvor svjetla što dalje od reflektora. Isto tako, u ovoj postavci lasera s lijeve strane pokretnog

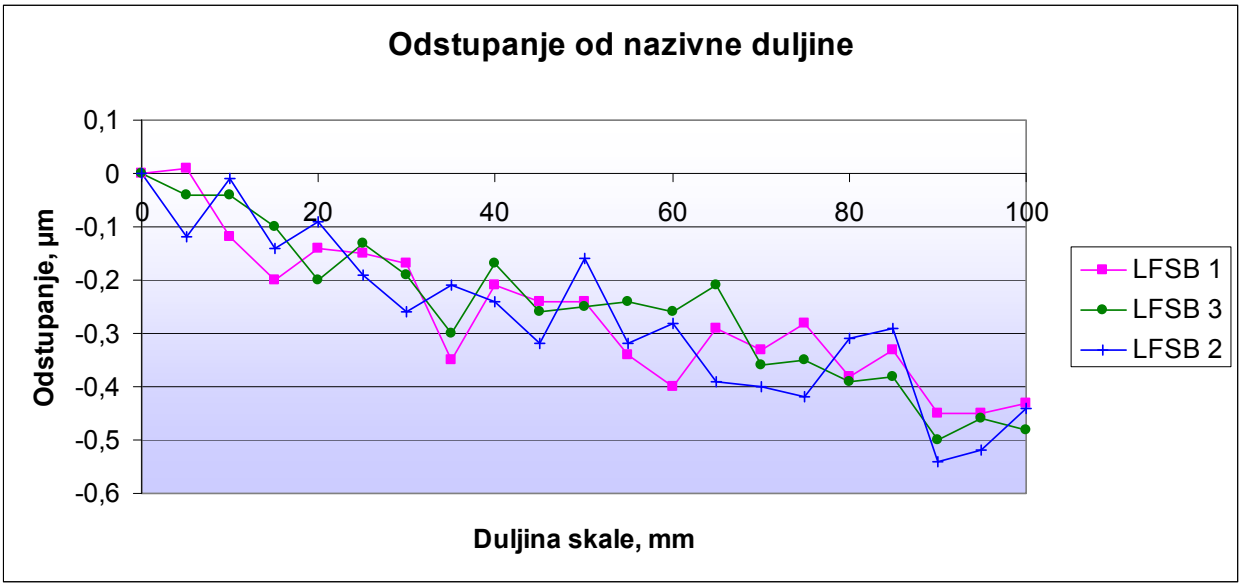
stola, mjerenja se provode tako da se pomični reflektor približava interferometru te na taj način nikako ne možemo umanjiti pogrešku mrtvog hoda.

8.2 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE S POSTAVKOM LASERA S DESNE STRANE

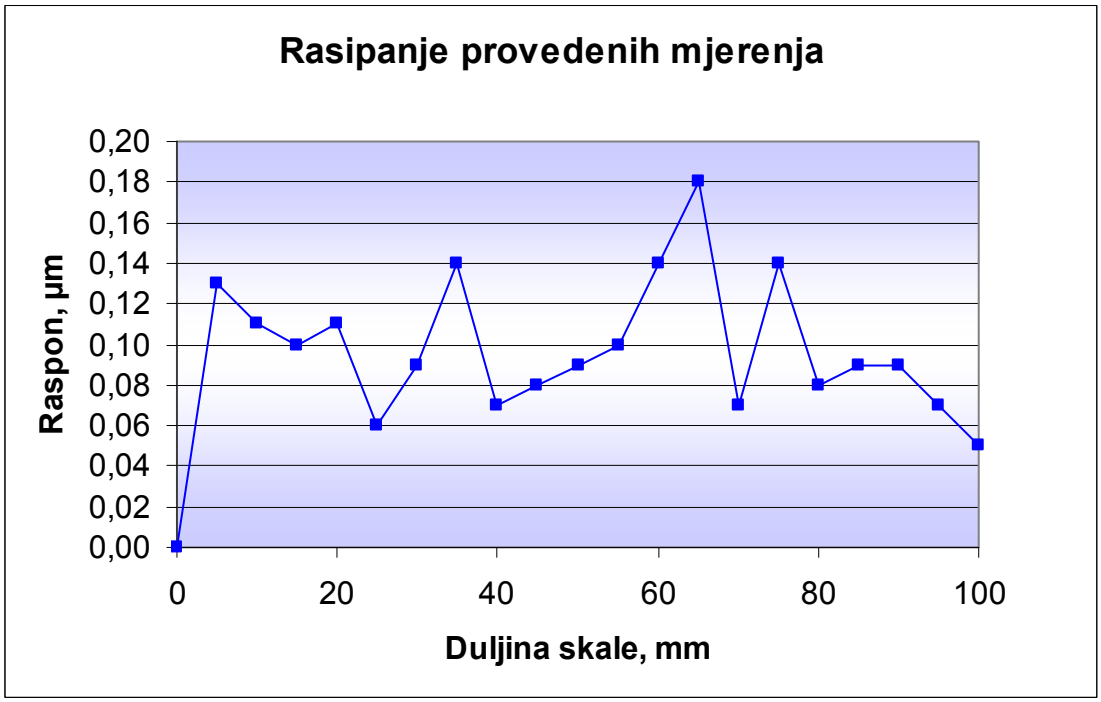
Pošto su dobiveni rezultati mjerenja skale s postavkom lasera s lijeve strane pokazali određeni linearno padajući trend, provedena su nova mjerenja s novim postavljanjem suosnosti skale i laserskog sustava kako bi se izbjegli utjecaji postavljanja koji bi mogli uzrokovat ovakvu pogrešku. Naime, izvor svjetla (laser) postavljen je s desne strane pokretnog stola, te je na taj način dobivena mogućnost za bolje postavljanje suosnosti laserskog snopa i pokretnog stola. Na ovaj je način udaljenost izvora svjetlosti od pomičnog retroreflektora skoro 1,5 metar što je za cijeli metar dalje u odnosu na postavljanje lasera s lijeve strane koje je opisano u poglavlju 4.3.2. Isto tako, u ovoj postavci lasera s desne strane pokretnog stola mjerenja se provode na način da se pomični reflektor udaljava od interferometra te tako umanjujemo pogrešku mrtvog hoda, tj. pomični interferometar se postavlja u početnoj poziciji svega nekoliko milimetara od interferometra.

S ovom postavkom lasera i optičkih komponenti provedena su tri neovisna mjerenja NPL-ove mjerne skale. Svaka linija mjerne skale mjerena je pet puta što znači da je za svaku mjerenu liniju skale dobiveno 15 rezultata mjerenja. Linije su također mjerene uz korak od 5 mm, što znači da je prva mjerena linija 0 mm, pa redom 5 mm, 10 mm, 15 mm i tako do 100 mm.

Mjerenja su izvršena u jednom danu. Provedena su uz korištenje automatske kompenzacije temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka. Rezultati provedenih mjerenja prikazani su na slici 79. Sa slike je vidljivo da sva tri seta mjerenja imaju isti trend i da nema značajnijeg rasipanja među mjerenjima. Sa slike 80. vidljivo je da je raspon unutar 200 nm, što je nešto manje rasipanje nego s postavkom lasera s lijeve strane, ali je kod te postavke bilo izvršeno i više mjerenja pa se ovo manje rasipanje može pripisati manjem broju provedenih mjerenja.



Slika 79. Rezultati provedenih mjerenja (odstupanje od nazivne duljine)

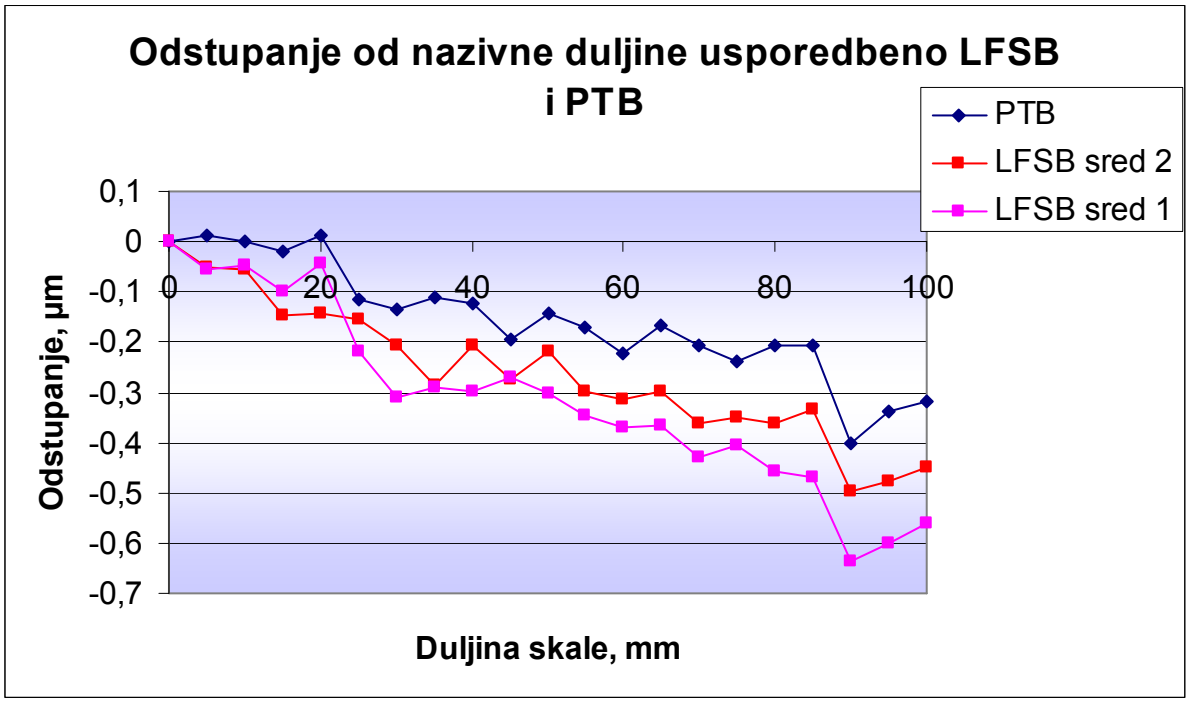


Slika 80. Rasponi provedenih mjerenja

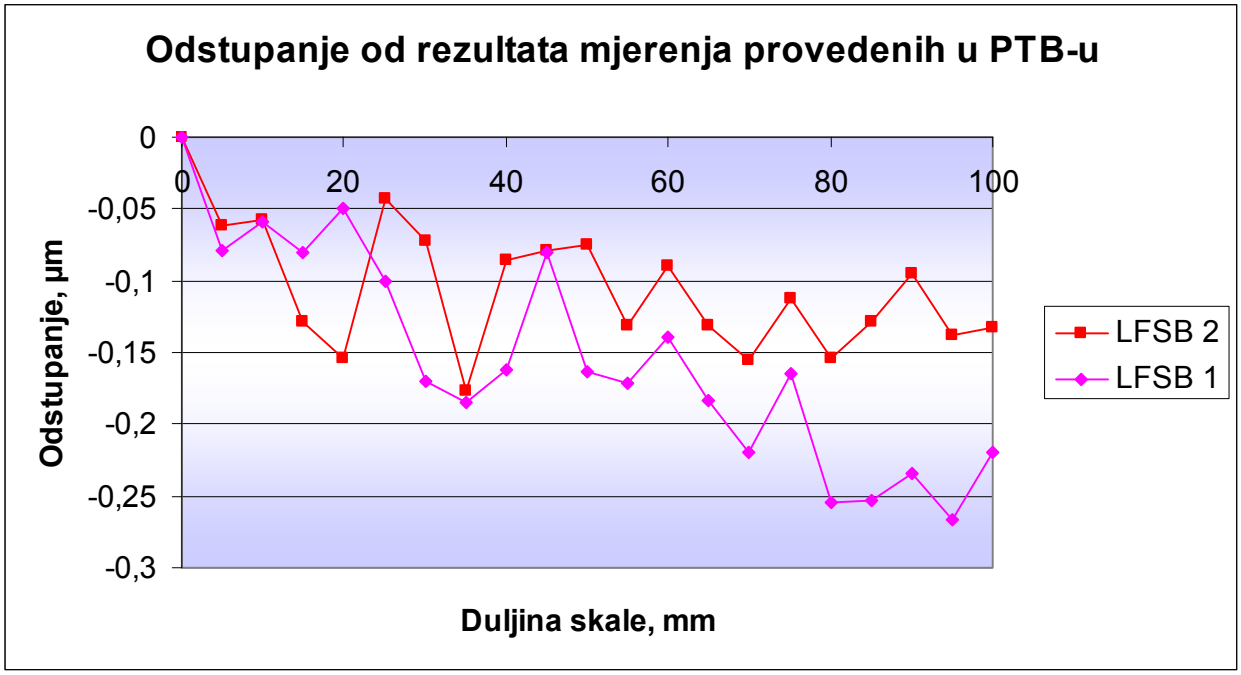
Slika 81. prikazuje usporedni prikaz rezultata mjerenja provedenih u PTB-u i LFSB-u. LFSB 2 su rezultati s postavljanjem lasera s desne strane, a LFSB 1 su rezultati s postavljanjem lasera s lijeve strane. Sa slike je vidljivo da rezultati s postavljanjem lasera s desne strane imaju manje odstupanje od rezultata mjerenja provedenih s

laserom s lijeve strane što se može pripisati boljem postavljanju suosnosti zbog veće udaljenosti lasera od pomičnog reflektora te minimiziranju pogreške mrtvog hoda jer je pomični reflektor u nultom položaju svega nekoliko milimetara od djelitelja snopa.

Slika 82. prikazuje odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u u odnosu na rezultate mjerenja provedenih u PTB-u. Sa slike je vidljivo da odstupanja rezultata mjerenja s postavljanjem lasera s desne strane (LFSB 2) nemaju linearan trend nego se odstupanja nalaze u granici od nekih 150 nm u odnosu na rezultate mjerenja provedene u PTB-u.



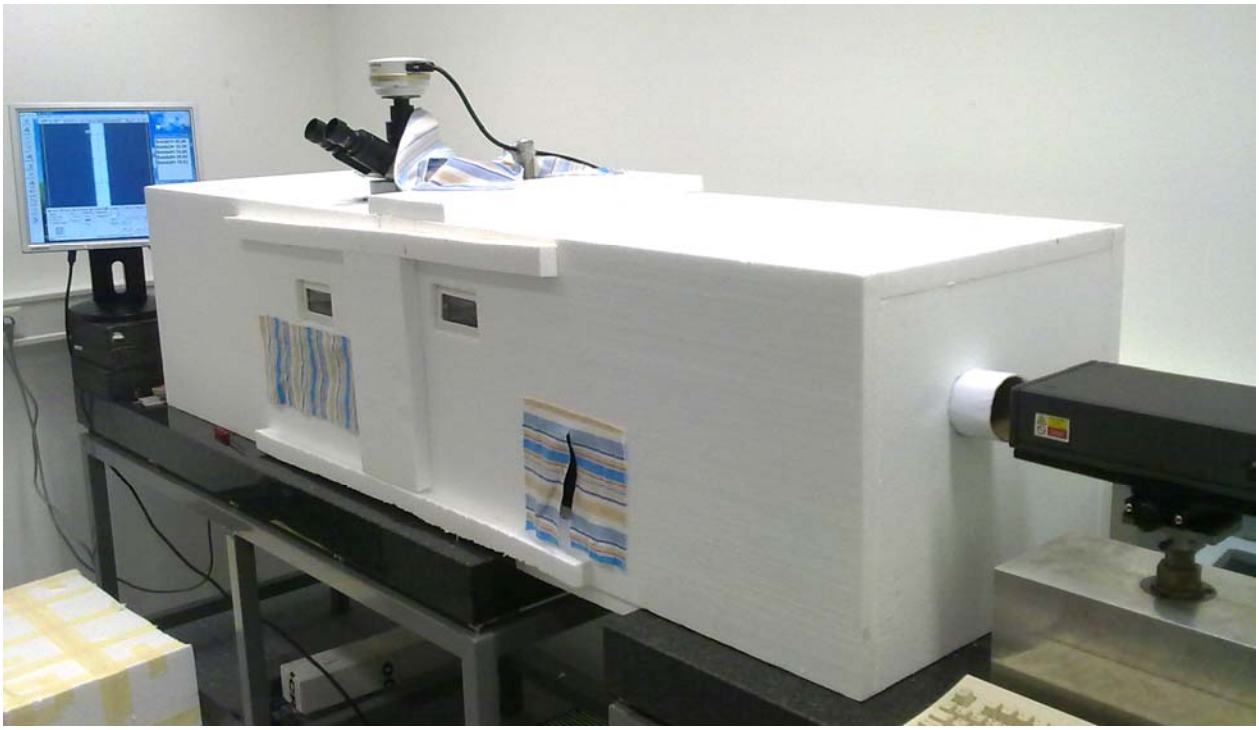
Slika 81. Usporedba rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u i PTB-u (odstupanje od nazivne vrijednosti)



Slika 82. Odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u

8.3 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE SA ZAŠTITOM UREĐAJA OD TEMPERATURNIH UTJECAJA

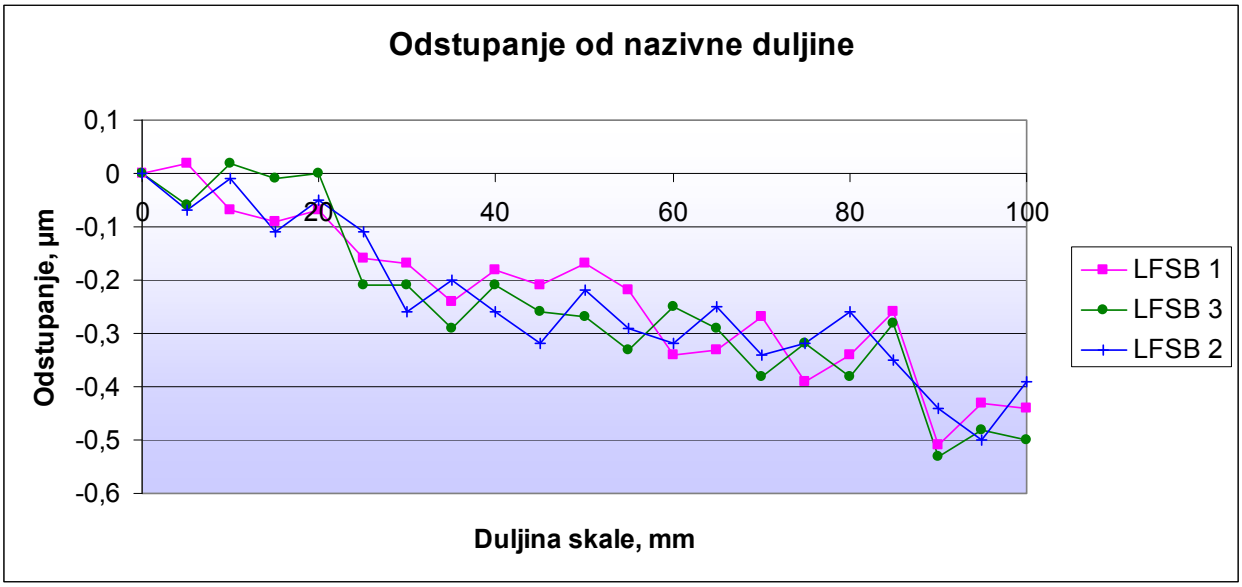
Kako bi se pokušao smanjiti utjecaj temperature na geometriju uređaja i valnu duljinu laserskog snopa, izrađena je posebna toplinska zaštita mjernog sustava. Toplinska zaštita izrađena je od stiropora debljine 20 mm, te su ostavljeni neophodni otvori koji služe za upravljanje uređajem. Izgled toplinske zaštite prikazan je na slici 83.



Slika 83. Toplinska zaštita mjernog sustava

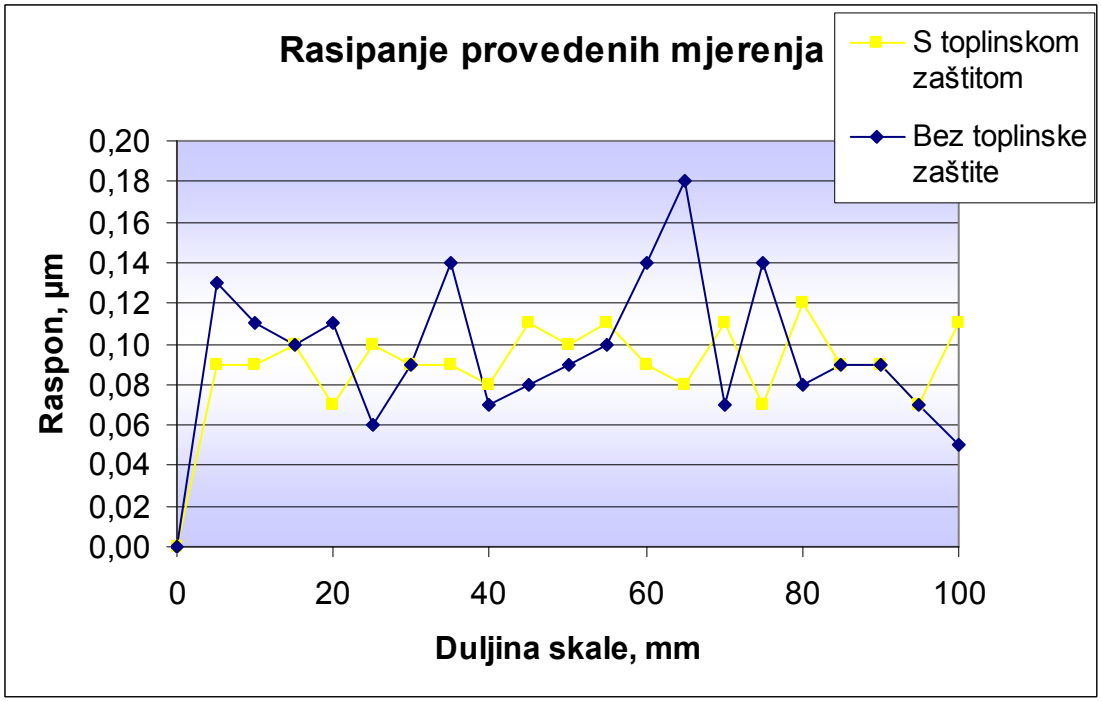
S ovom toplinskom izolacijom provedena su tri neovisna mjerenja NPL-ove mjerne skale. Svaka linija mjerne skale mjerena je pet puta što znači da je za svaku mjerenu liniju skale dobiveno 15 rezultata mjerenja. Linije su kao i kod prije provedenih mjerenja mjerene uz korak od 5 mm, što znači da je najprije mjerena linija 0 mm, pa redom 5 mm, 10 mm, 15 mm i tako do 100 mm.

Mjerenja su provedena uz upotrebu automatske kompenzacije temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka. Rezultati provedenih mjerenja prikazani su na slici 84. Sa slike je vidljivo da sva tri seta mjerenja imaju isti trend te da nema značajnijeg rasipanja među mjerenjima.



Slika 84. Rezultati provedenih mjerenja s toplinskom zaštitom uređaja (odstupanje od nazivne duljine)

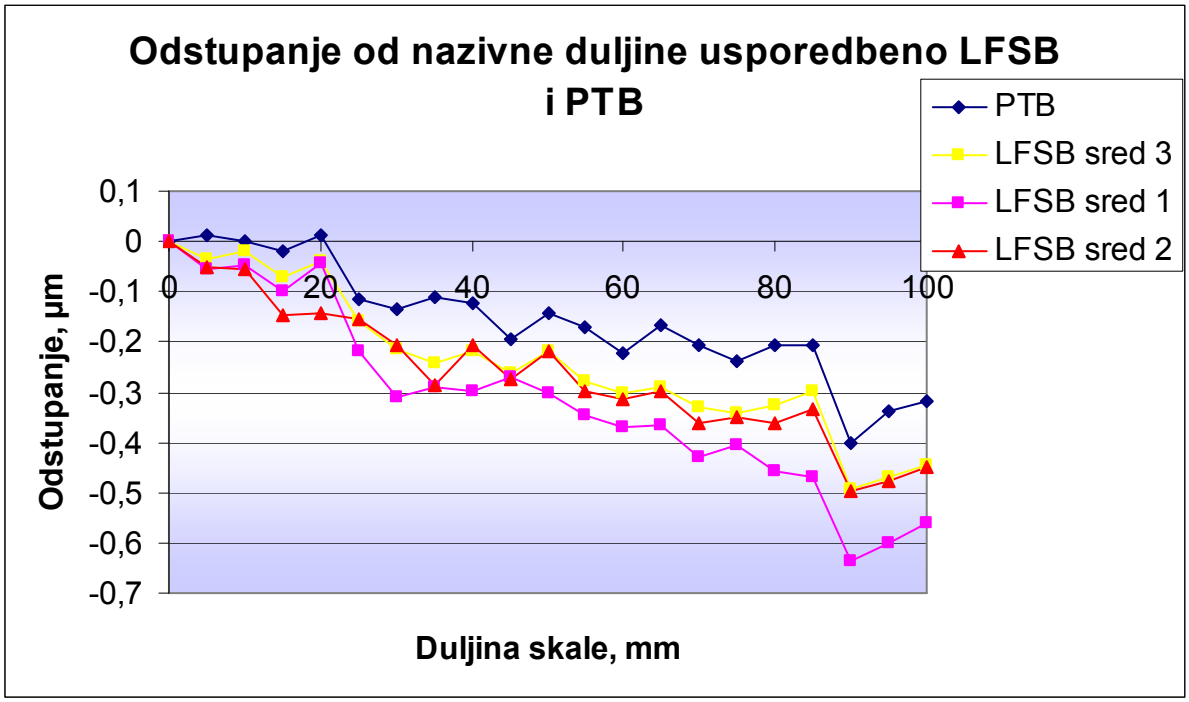
Sa slike 85. vidljivo je da je raspon unutar 120 nm, što je nešto manje rasipanje nego s postavkom lasera s lijeve strane gdje je rasipanje iznosilo 180 nm.



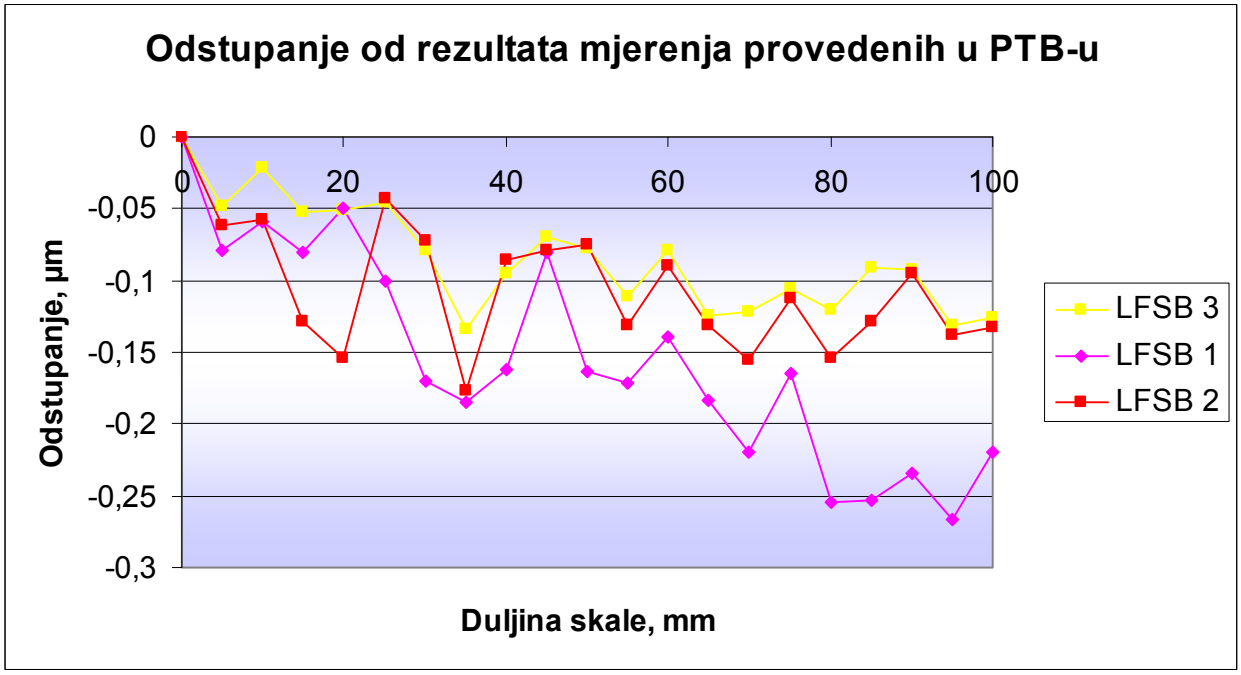
Slika 85. Rasponi provedenih mjerenja s toplinskom zaštitom i bez toplinske zaštite

Slika 86. prikazuje usporedni prikaz rezultata mjerenja provedenih u PTB-u i LFSB-u. LFSB 3 su rezultati s toplinskom zaštitom uređaja i prikazani su žutom bojom, LFSB 2

su rezultati s postavljanjem lasera s desne strane, a LFSB 1 su rezultati s postavljanjem lasera s lijeve strane.



Slika 86. Usporedba rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u i PTB-u (odstupanje od nazivne vrijednosti)



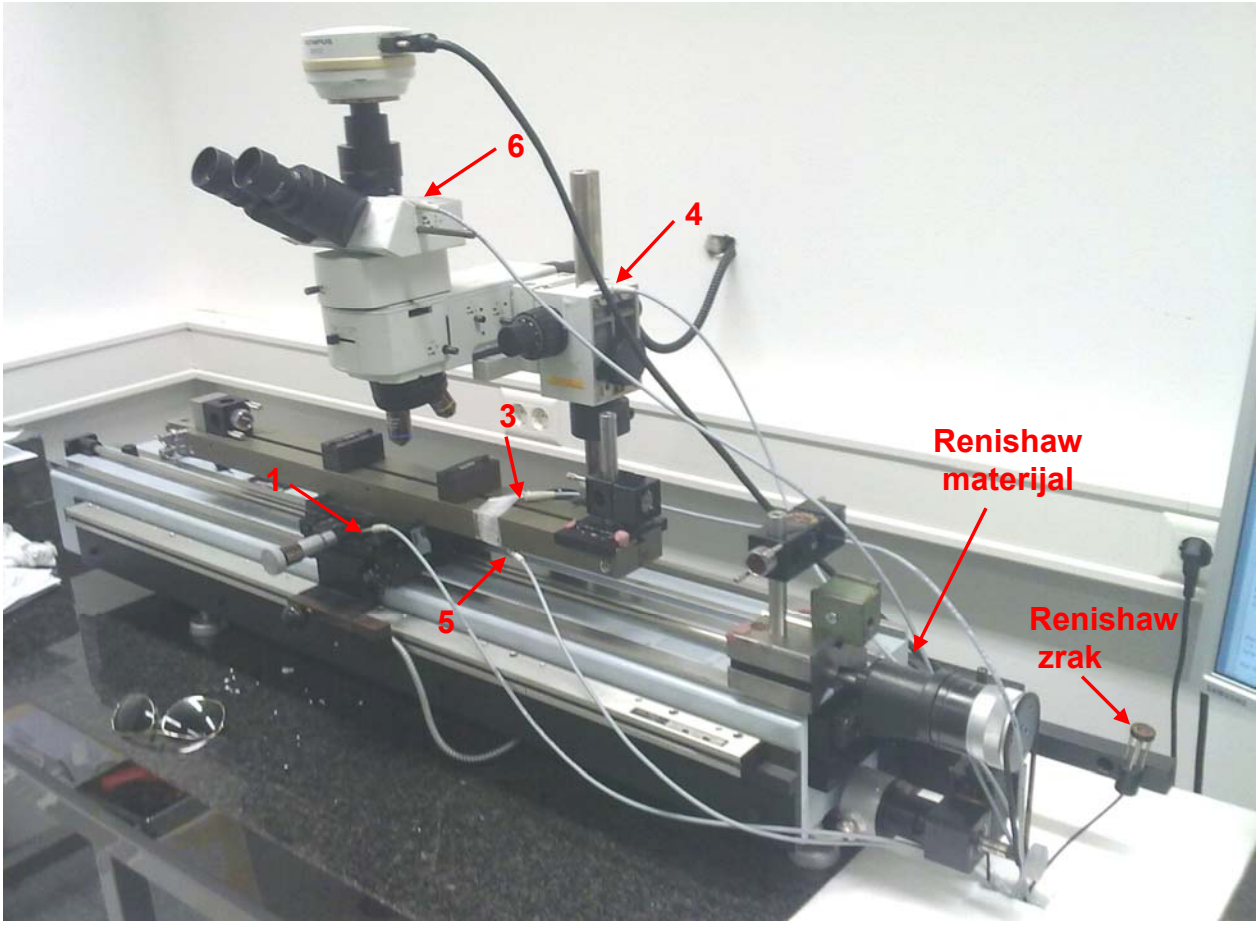
Slika 87. Odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u

Slika 87. prikazuje odstupanje rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u u odnosu na rezultate mjerenja provedenih u PTB-u.

Sa slike je vidljivo da odstupanja rezultata mjerenja s toplinskom zaštitom (LFSB 3) nemaju linearan trend kao rezultati mjerenja LFSB 1 (laser s lijeve strane) te su odstupanja još manja od rezultata mjerenja LFSB 2 (bez toplinske zaštite) i nalaze se unutar 140 nm u odnosu na rezultate mjerenja provedene u PTB-u.

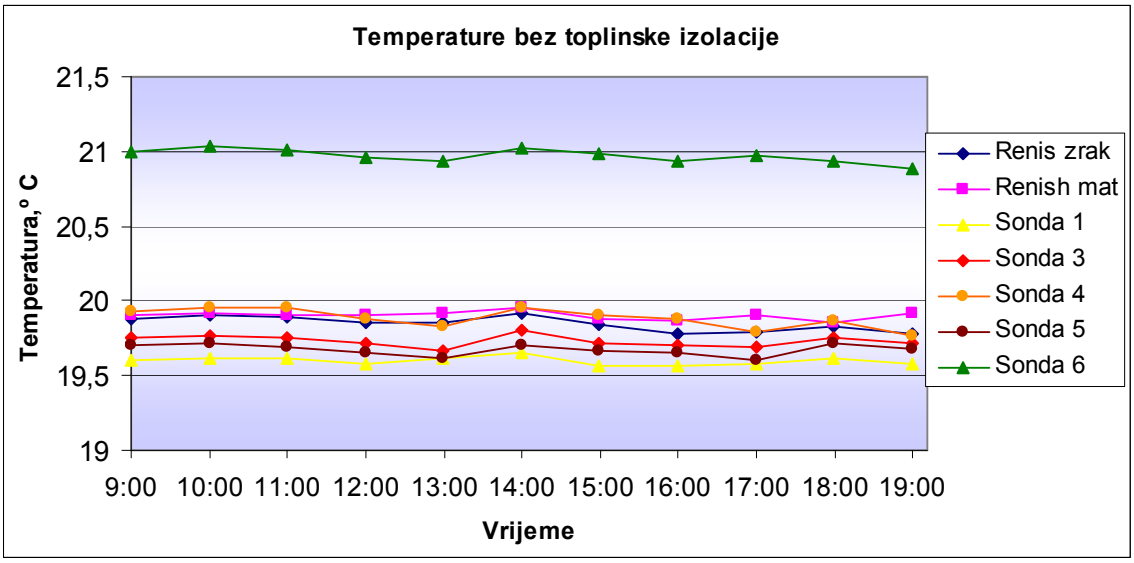
9. ISTRAŽIVANJE TEMPERATURNIH UTJECAJA NA UREĐAJ

Kako je već prikazano na slici 83., uređaj je toplinski izoliran u svrhu smanjenja utjecaja temperature na geometriju uređaja i valnu duljinu lasera. Uređaj je opremljen i temperaturnim sondama koje omogućuju mjerenje temperature na više odabranih mjesta na uređaju. Kako bi se provjerili temperaturni gradijenti na uređaju, odabrano je pet pozicija na uređaju gdje su mjerene temperature pomoću temperaturnih sondi, te dvije pozicije gdje je mjerena temperatura zraka i materijala uz pomoć Renishaw sondi kojima je opremljen laserski interferometar. Pozicije temperaturnih sondi su prikazane na slici 88.

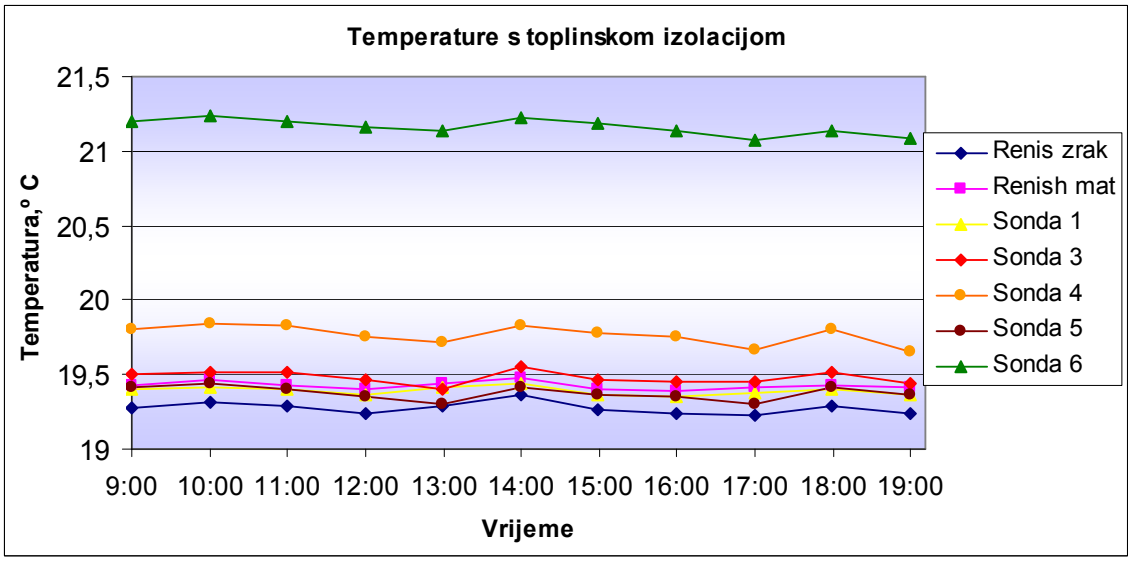


Slika 88. Pozicije postavljenih temperaturnih sondi

Slika 89. prikazuje kretanje temperatura uređaja tijekom jednog dana bez toplinske izolacije i bez ulazaka u laboratorij. Sa slike je vidljivo da temperature imaju isti trend i nema značajnijih odstupanja. Temperatura sonde 6 značajno je viša od ostalih temperatura jer je to sonda koja je postavljena blizu CCD kamere koja ima jako toplinsko zračenje.



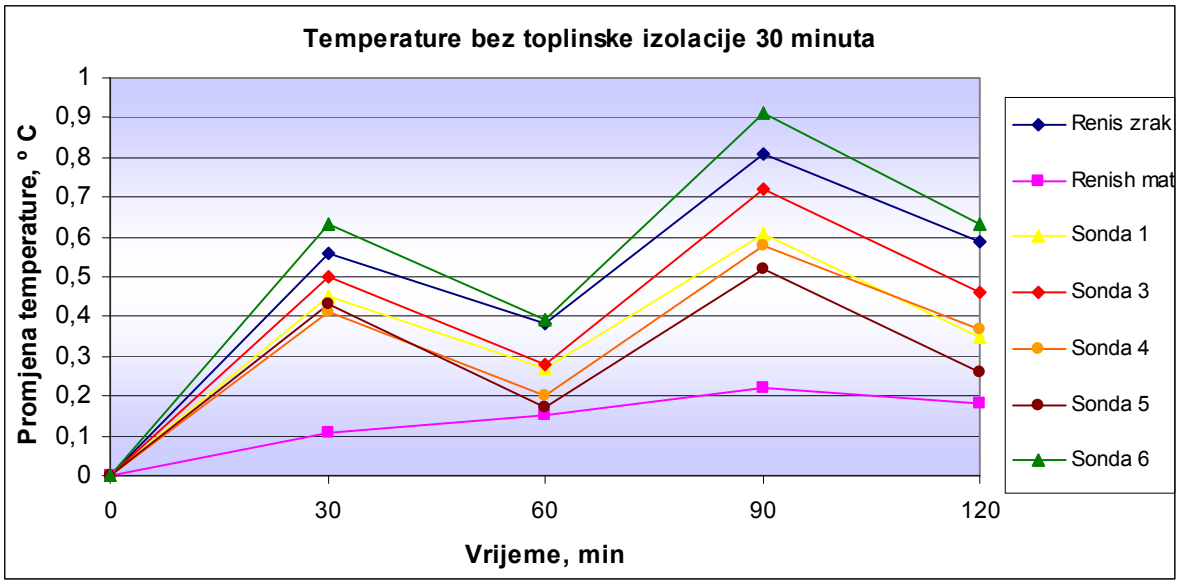
Slika 89. Rezultati mjerenja temperature bez toplinske izolacije



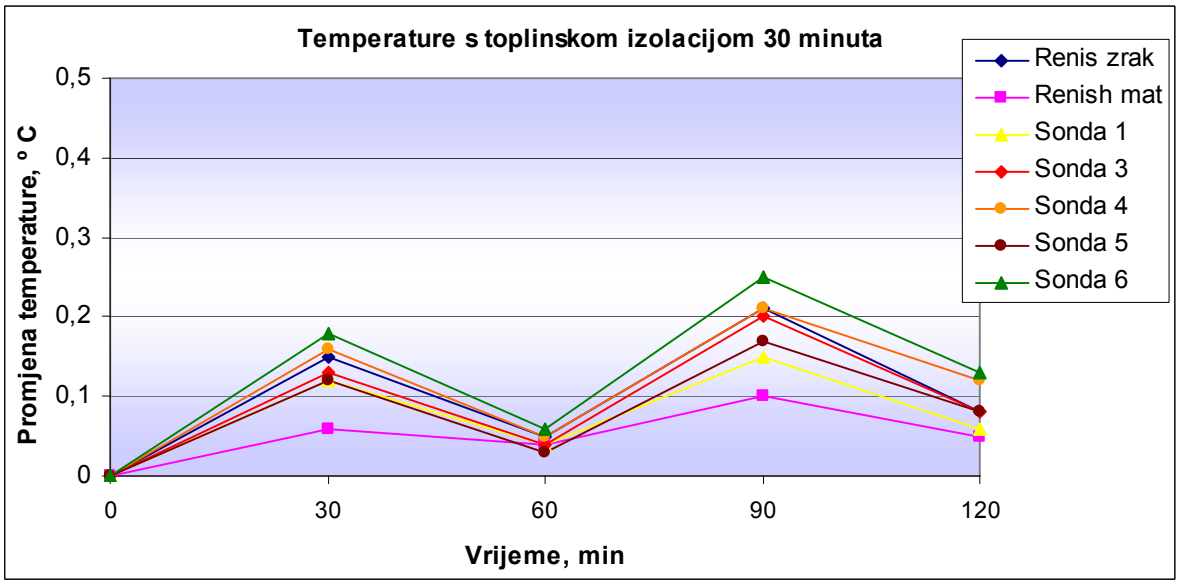
Slika 90. Rezultati mjerenja temperature s toplinskom izolacijom

Slika 90. prikazuje kretanje temperatura uređaja tijekom jednog dana s toplinskom izolacijom i bez narušavanja utjecaja okoliša. Temperature imaju sličan trend kao i u slučaju bez toplinske izolacije, a temperatura sonde 6 je opet značajno viša od ostalih

temperatura. CCD kamera nalazi se van toplinske izolacije kao što se vidi na slici 83. te toplina kamere ne utječe značajno na ostale dijelove uređaja. Slika 91. i slika 92. prikazuju promjene temperature sustava s toplinskom izolacijom i bez izolacije dok se sustav upotrebljava. Prvih trideset minuta sustav se upotrebljava, a onda sljedećih trideset minuta nema utjecaja na okoliš jer je sustav ostavljen da se temperatura stabilizira. Nakon toga, od 60. do 90. minute, sustav se ponovo upotrebljava, a od 90. minute sljedećih se 60 minuta ponovo temperaturno stabilizira.

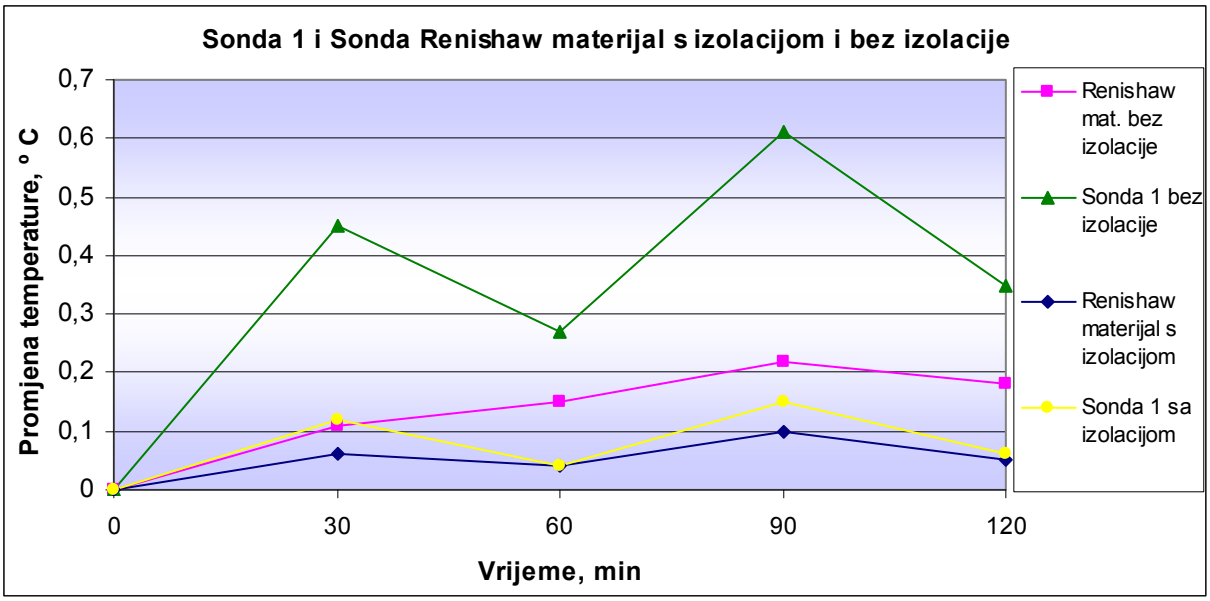


Slika 91. Rezultati mjerenja temperature bez toplinske zaštite dok se radi na uređaju



Slika 92. Rezultati mjerenja temperature s toplinskom zaštitom dok se radi na uređaju

Sa slika je jasno vidljivo da toplinska izolacija uređaja značajno smanjuje promjenu (povećanje) temperature uređaja tijekom njegove upotrebe i to od 0,3 ºC do 0,4 ºC u vremenu od 30 minuta. Sonda Renishaw materijal nema tako značajnu promjenu temperature, pošto se ta sonda nalazi sa stražnje strane kućišta uređaja koje ima velike gabarite i zbog toga je na tu sondu utjecaj mjeritelja daleko najmanji.



Slika 93. Usporedbeni rezultati mjerenja temperature s toplinskom zaštitom i bez nje

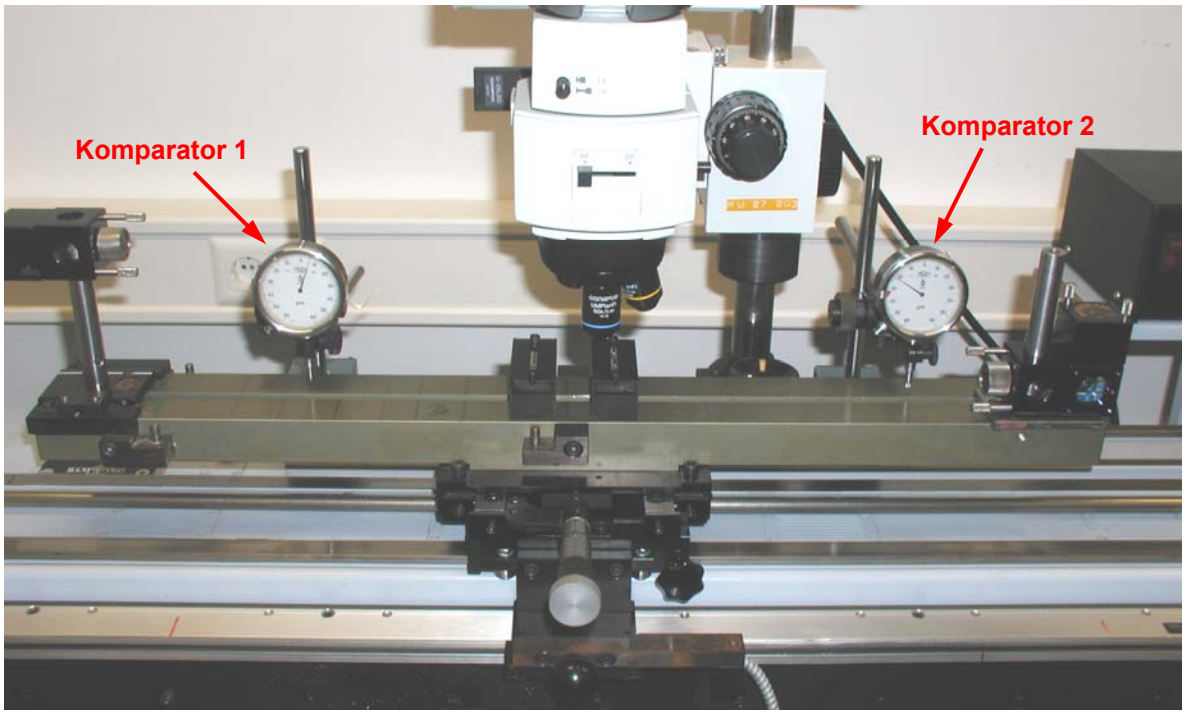
Slika 93. prikazuje usporedbene rezultate mjerenja temperature s toplinskom izolacijom i bez izolacije za sondu 1 i sondu Renishaw materijal. Jasno je vidljivo da je s toplinskom zaštitom porast temperature za sondu 1 manji za 0,4 ºC u odnosu na rezultat bez toplinske zaštite. Kao što je već rečeno, sonda Renishaw materijal mjeri temperaturu kućišta uređaja te smanjenje temperature s toplinskom zaštitom iznosi oko 0,1 ºC.

Iz provedenih mjerenja temperature je jasno vidljivo da toplinska zaštita značajno smanjuje utjecaj mjeritelja na temperaturu sustava za umjeravanje mjernih skala.

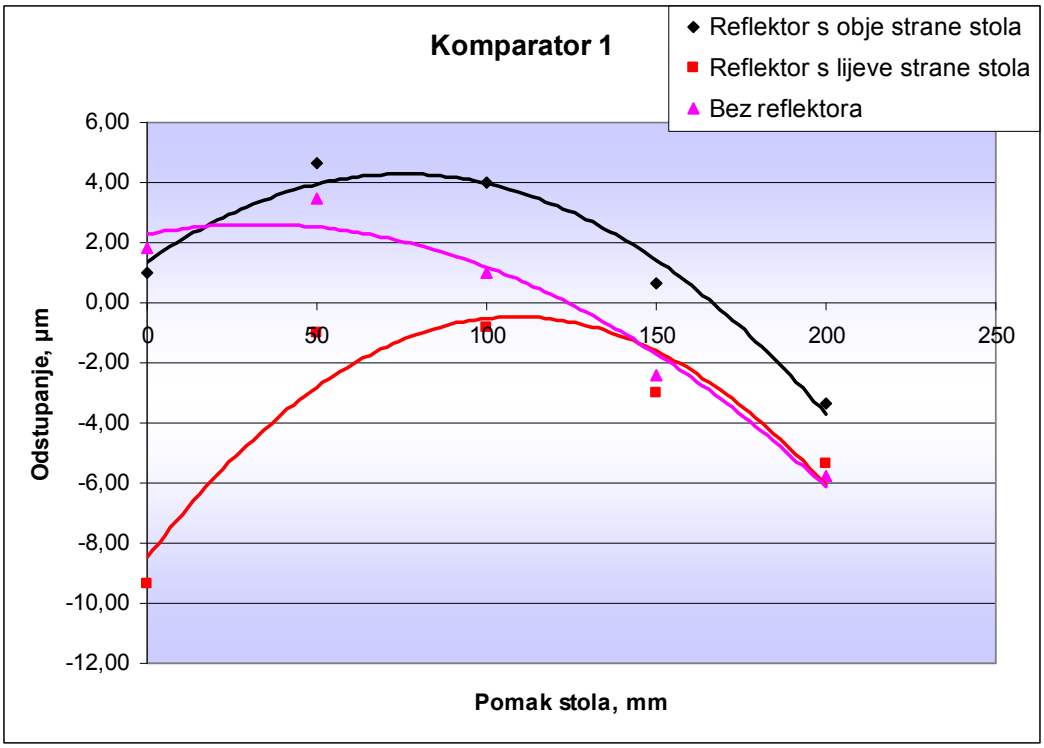
10. MODIFIKACIJA SUSTAVA ZA UMJERAVANJE MJERNIH SKALA

Tijekom provedbe postavljanja suosnosti pokretnog stola i laserskog interferometra primijećeno je da je vrlo teško postići vraćanje laserskog snopa u jednu točku. Isto tako, prilikom postavljanja suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini, primijećeno je da se linije mjerne skale mogu postaviti u fokus na cijeloj duljini mjerne skale ali se tijekom provedbe mjerenja fokus počinje gubiti što uvelike utječe na mjernu nesigurnost umjeravanja. Rezultati mjerenja zakreta stola mogli bi dati odgovore na problem postavljanje suosnosti stola i laserskog interferometra te na gubljenje fokusa.

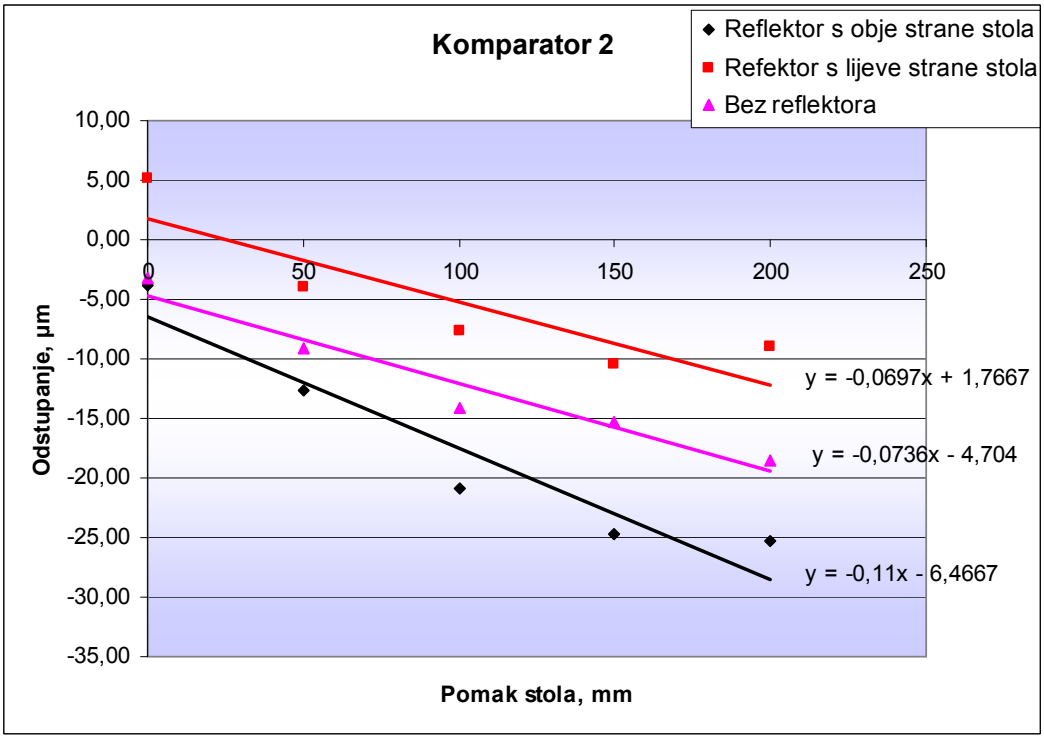
Stoga je provedeno mjerenje zakreta stola koje nastaje tijekom pomicanja pokretnog stola. Mjerenje zakreta stola izvršeno je upotrebom dvaju komparatora rezolucije 1 μm i to tako da je jedan komparator postavljen s lijeve strane, a drugi s desne strane pokretnog stola (slika 94.). Mjerenja su provedena u pet točaka na svakom komparatoru te su rezultati mjerenja prikazani na slikama 95. i 96.



Slika 94. Mjerenja zakreta stola provedeno s dva komparatora



Slika 95. Rezultati mjerenja zakreta stola komparator 1

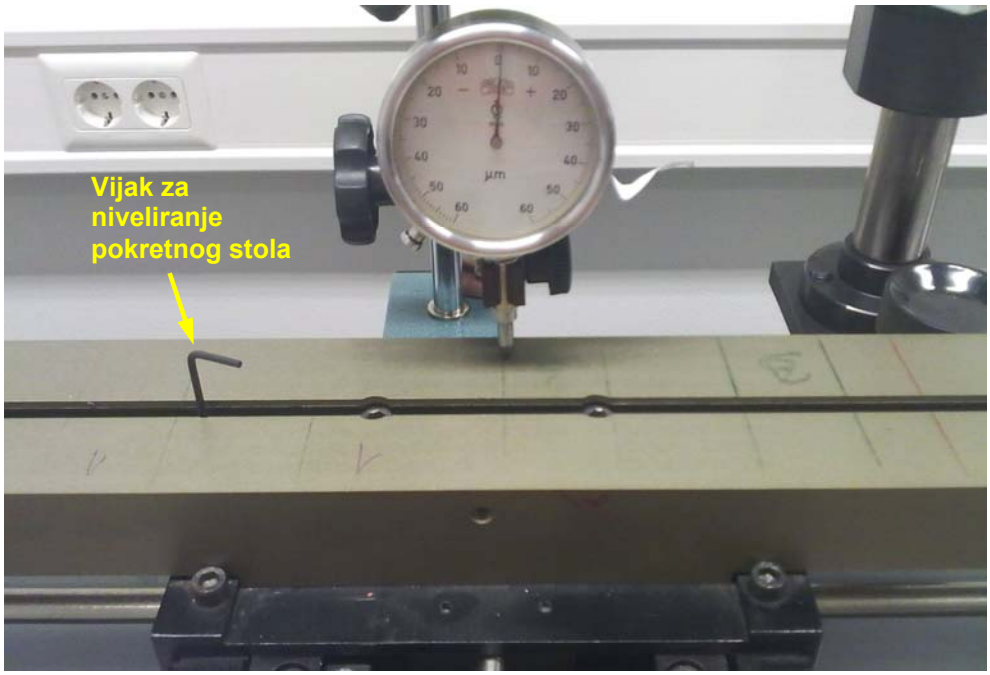


Slika 96. Rezultati mjerenja zakreta stola komparator 2

Ukoliko se pogledaju rezultati mjerenja, vidljivo je da i sami pokretni stol bez opterećenja reflektora ima negativne deformacije prema krajevima stola uzrokovane vlastitom težinom. Isto tako je vidljivo da lijeva strana stola i bez reflektora ima veću deformaciju nego desna strana stola. To je još bolje uočljivo kada se reflektori postave na obje strane stola (crna krivulja na slici 95), gdje lijeva strana stola opet ima veći progib, odnosno veću deformaciju.

S obje se slike se vidi da pokretni stol nije dobro niveliran, nego je nagnut na desnu stranu.

Stoga je odlučeno da se ponovi mjerenje zakreta stola uz prethodno niveliranje stola i upotrebu samo jednog komparatora. Niveliranje stola provodi se uz pomoć dva vijka (prikazano na slici 97.) koji se nalaze unutar pokretnog stola te, čijim se odvijanjem, odnosno uvijanjem, kontrolira zakret stola u vertikalnoj ravnini



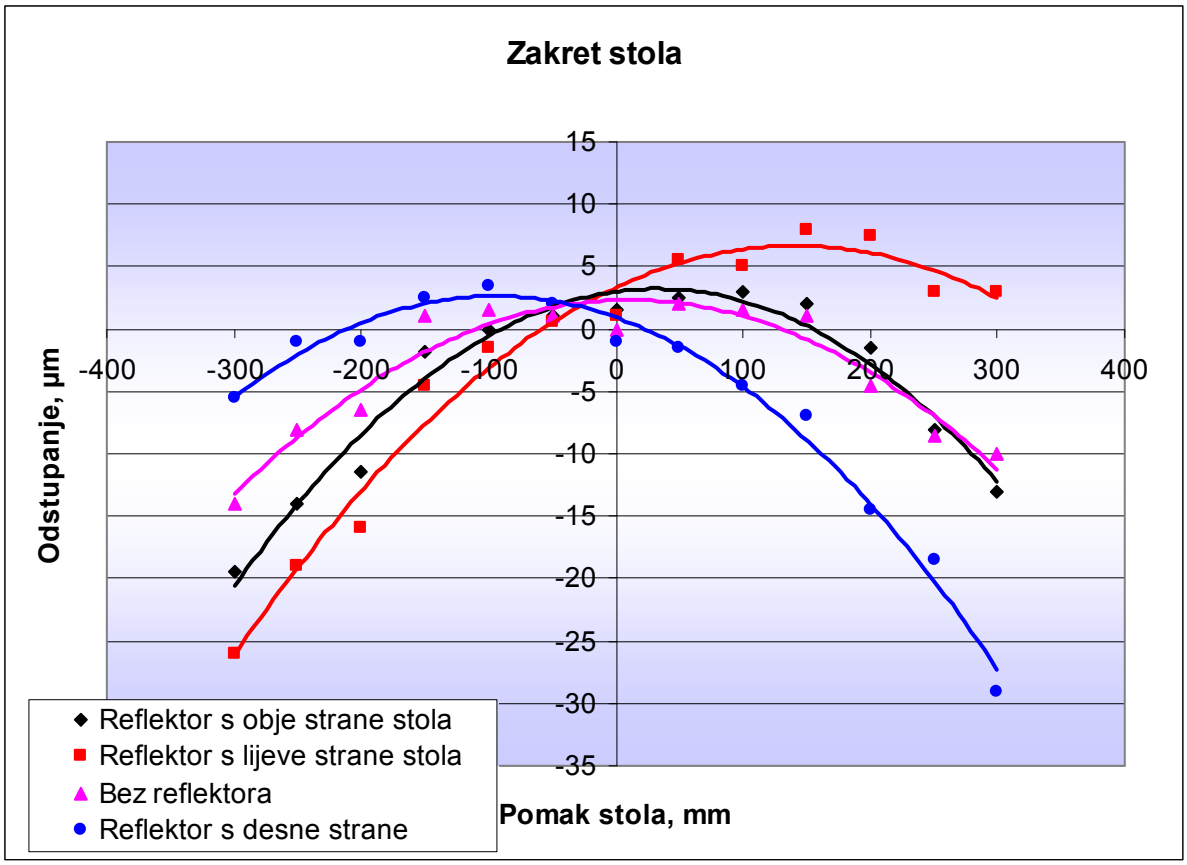
Slika 97. Niveliranje pokretnog stola

Nulta vrijednost postavljena je na sredinu pokretnog stola točno ispod objektiva mikroskopa kao što je prikazano na slici 98, odnosno na sredini mjerne skale jer se mjerna skala uvijek postavlja na način da se sredina mjerne skale poklapa sa sredinom pokretnog stola kako bi bio što manji utjecaj zakreta stola na zakret mjerne skale. Mjerenja zakreta stola provedena su u 13 točaka s korakom 50 mm, i to na način da je

nulta vrijednost na sredini pokretnog stola, te su mjerenja provedena za pomak stola od 300 mm na obje strane od sredine stola.

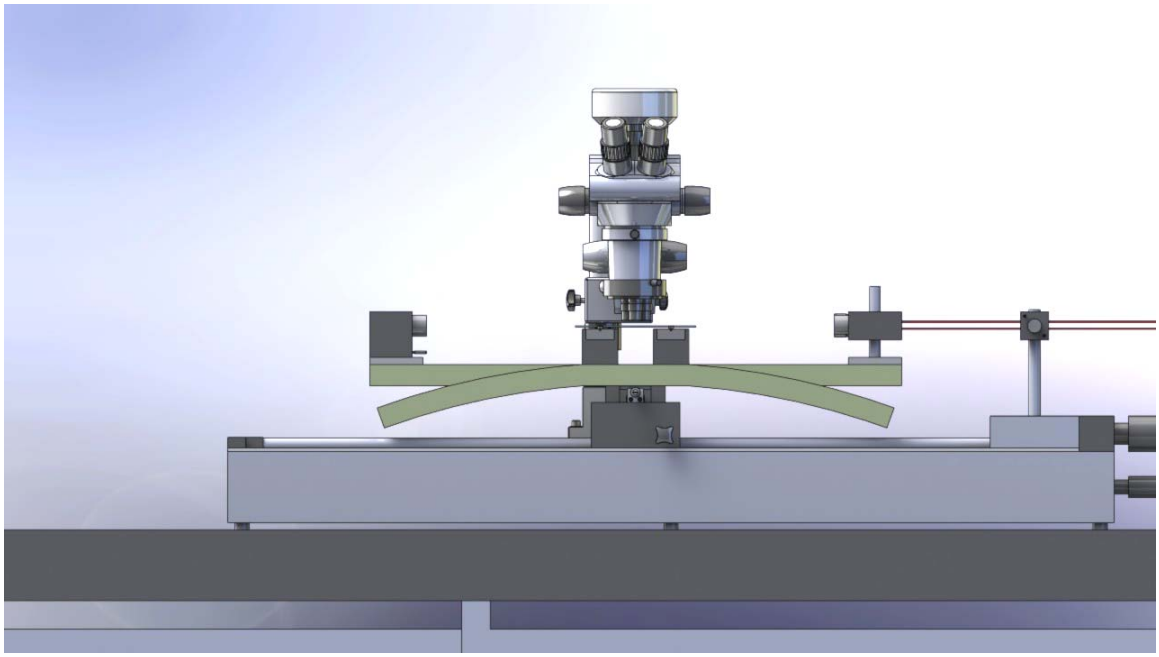
Slika 98. Postavljanje komparatora

Izmjereni rezultati zakreta stola prikazani su na slici 99. Mjerenja su provedena bez reflektora, s reflektorom lijevo, s reflektorom desno i s reflektorima na obje strane stola.



Slika 99. Rezultati mjerenja zakreta stola s jednim komparatorom i uz niveliranje stola

Sa slike 99. još je bolje uočljivo da pokretni stol uslijed vlastite težine ima elastične deformacije prema krajevima stola i to u iznosu od cca. 15 μm na duljini 300 mm od sredine stola. S reflektorom samo na lijevoj, odnosno samo na desnoj strani, povećava se deformacije one strane stola gdje se nalazi reflektor te progib tada iznosi cca. 25 μm na duljini 300 mm od sredine stola. Ukoliko se reflektor postavi na obje strane stola, deformacije su ujednačene na obje strane stola i iznose od 15 μm do 20 μm.
Iz svega navedenog jasno je da pokretni stol nema zadovoljavajuću krutost pa se deformira kako prikazuje slika 100.

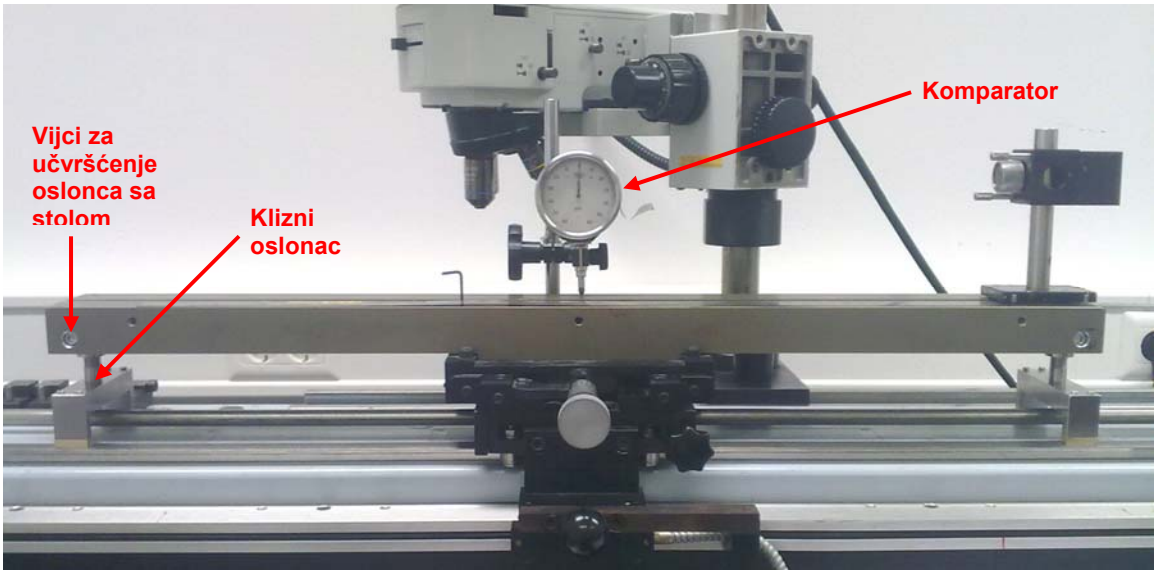


Slika 100. Deformiranje pokretnog stola

Kako bi se smanjio utjecaj deformacija stola uzrokovanih vlastitom težinom i težinom reflektora potrebno je provesti određene modifikacije uređaja. Najjednostavnije rješenje je skraćivanje pokretnog stola te na taj način i smanjenje kraka odnosno deformacija samog stola. Međutim, tako se uvelike smanjuje i mjerno područje uređaja pa se stoga nameće jedino rješenje kojim se smanjuju deformacije stola a ne smanjuje mjerno područje uređaja, a to je postavljanje posebnih kliznih oslonaca na krajeve pokretnog stola. Takvi klizni oslonci omogućili bi kontrolu visine krajeva stola te na taj način i smanjenje deformacija pokretnog stola. Slika 101. prikazuje izrađeni klizni oslonac za kontrolu deformacija pokretnog stola.

Slika 101. Klizni oslonac pokretnog stola

Klizni oslonac sastoji se od dviju nožica s brončanim podlogama koje klize po vodilicama uređaja, vijka M 12 koraka 1 mm i matice M 12 s ručicom. Vijak ulazi u provrt napravljen s donje strane pokretnog stola, a onda se kontrola visine stola obavlja odvijanjem odnosno uvijanjem matice.

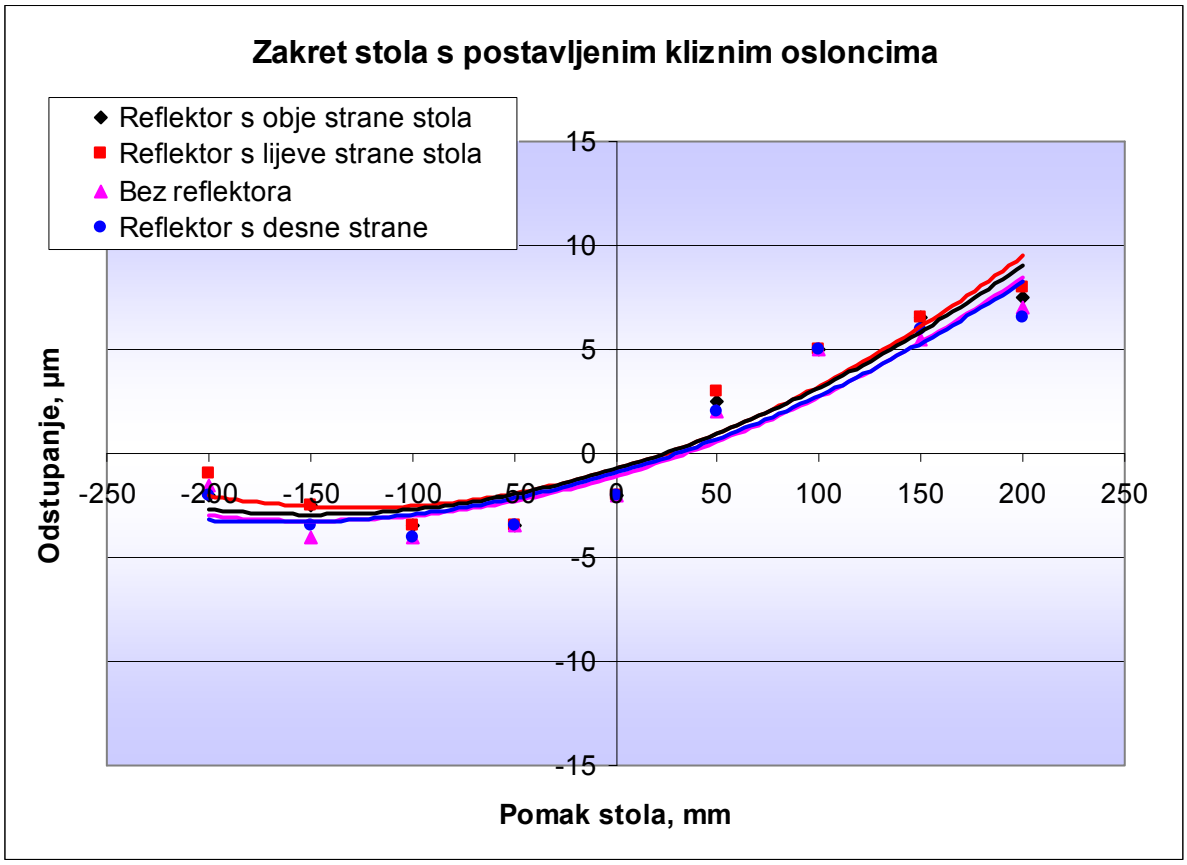


Slika 102. Klizni oslonci postavljeni na pokretni stol

Kada je postignuta zahtijevana visina koja se kontrolira komparatorom, vijak se učvršćuje za stol s dva horizontalna vijka koji se nalaze u pokretnom stolu s obje strane (slika 102).

10.1 MJERENJE DEFORMACIJA STOLA S POSTAVLJENIM KLIZNIM OSLONCIMA

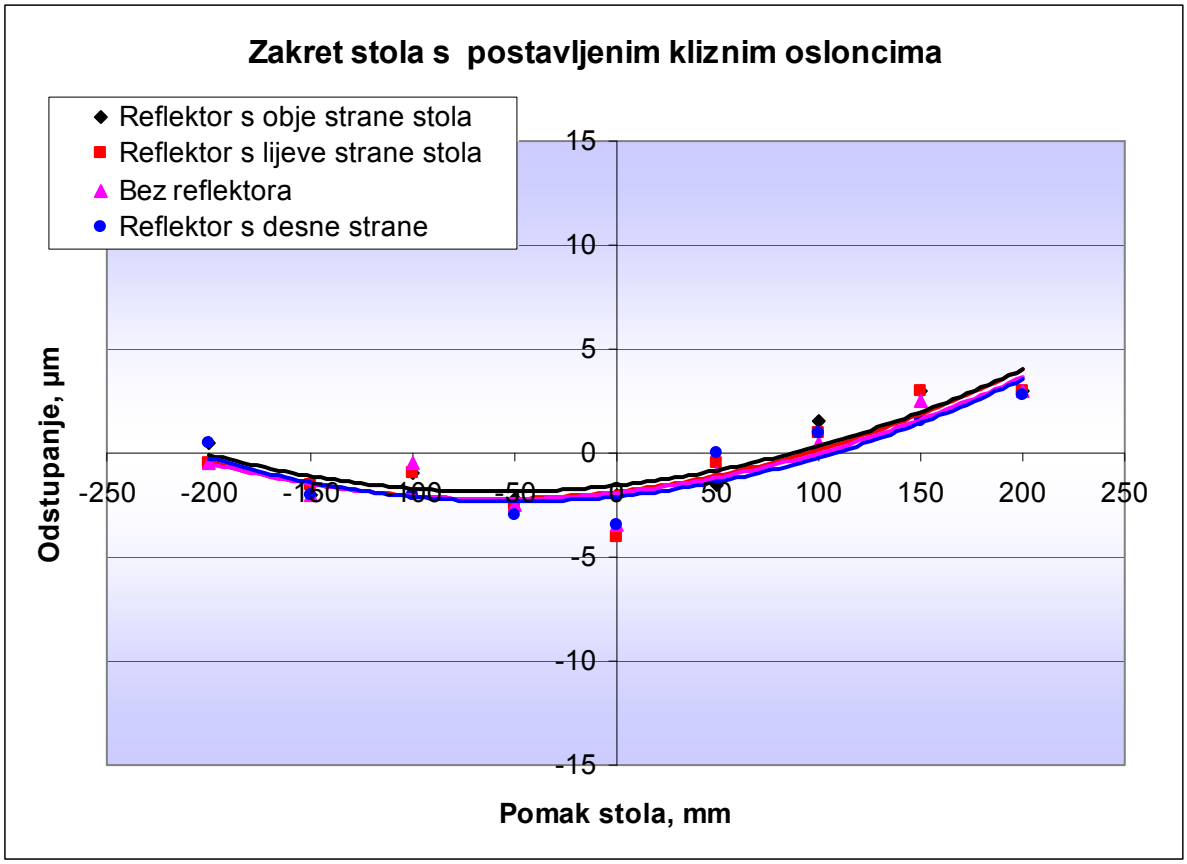
Nakon što su postavljeni klizni oslonci s obje strane stola te provedeno niveliranje pokretnog stola, provedena su ponovna mjerenje zakreta stola. Mjerenja zakreta stola provedena su također s korakom 50 mm, i to na način da je nulta vrijednost na sredini pokretnog stola te su mjerenja provedena za pomak stola od 200 mm na obje strane od sredine stola. Pošto su postavljeni klizni oslonci na krajeve stola, smanjeno je mjerno područje za 100 mm sa svake strane u odnosu na mjerenja zakreta stola bez kliznih oslonaca. Izmjereni rezultati zakreta pokretnog stola s kliznim osloncima stola prikazani su na slici 103. Mjerenja su također provedena bez reflektora, s reflektorom lijevo, s reflektorom desno i s reflektorima na obje strane stola.



Slika 103. Rezultati mjerenja zakreta stola s postavljenim kliznim osloncima

Sa slike 103. je uočljivo da su postavljanjem kliznih oslonaca deformacije pokretnog stola uslijed vlastite težine potpuno zanemarive. Isto tako je vidljivo da i s daljnjim opterećivanjem stola s reflektorima nema značajnijih deformacija stola. Vidljivo je da stol ima zakret od cca. 12 μm na 400 mm koji bi se mogao smanjiti boljim niveliranjem stola, odnosno kontrolom visine kliznih oslonaca.

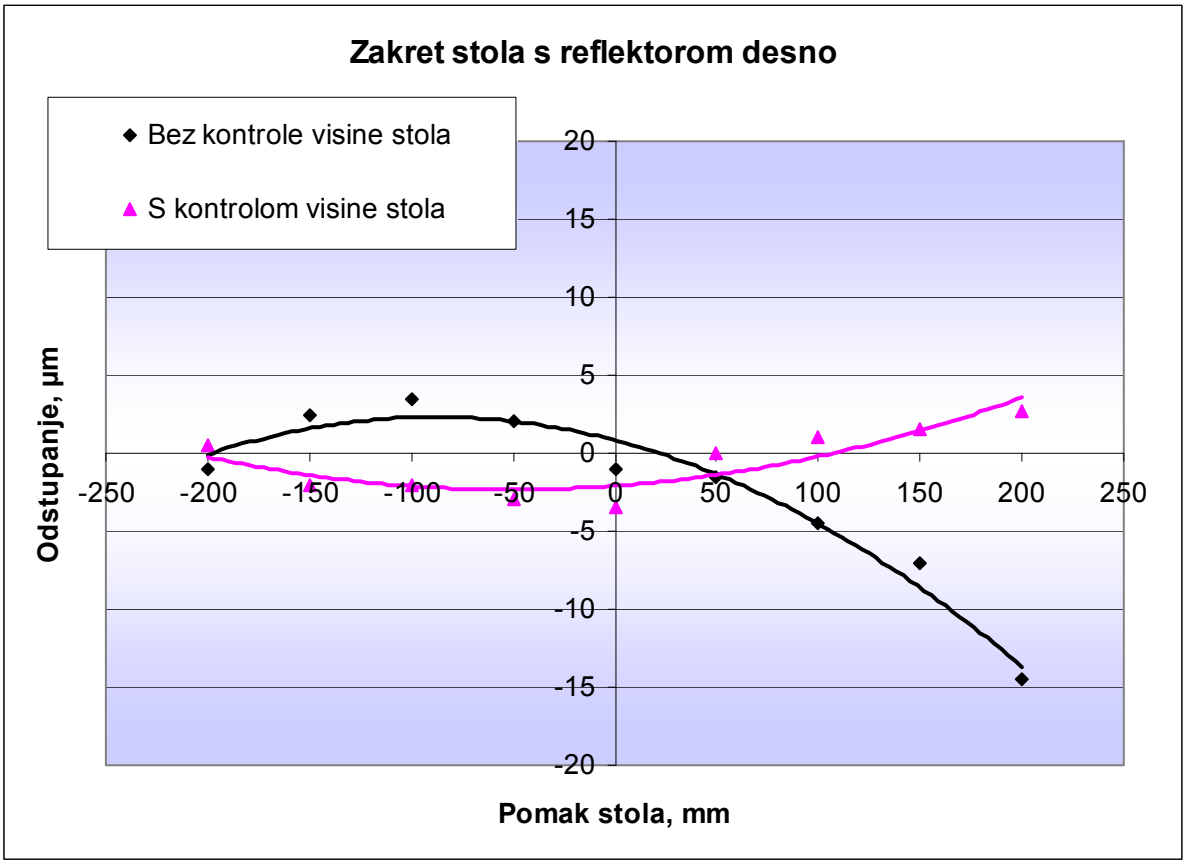
Stoga je provedeno ponovno niveliranje stola kako bi se pokušao minimizirati zakret stola.



Slika 104. Ponovljeni rezultati mjerenja zakreta stola s postavljenim kliznim osloncima

Ponovljena mjerenja (slika 104.) pokazala su da je zakret i deformacije stola s postavljenim kliznim osloncima moguće svesti u granice od 6 μm bez obzira na težinu reflektora koji se postavljaju na krajevima pokretnog stola. Slika 105. prikazuje usporedne rezultate mjerenja deformacije pokretnog stola s kliznim osloncima i bez kliznih oslonaca s postavljenim reflektorom na desnoj strani pokretnog stola. Sa slike 105. je vidljivo da deformacije stola s postavljenim kliznim osloncima skoro pa da ni nema. Pošto se radi o vrlo finim vertikalnim pomacima na razini mikrometra, vrlo je teško

očekivati potpunu nulu pa je u ovom slučaju deformacija stola malo pozitivna i iznosi 3 µm. Bez kliznih oslonaca deformacija stola je negativna i iznosi oko 15 µm.



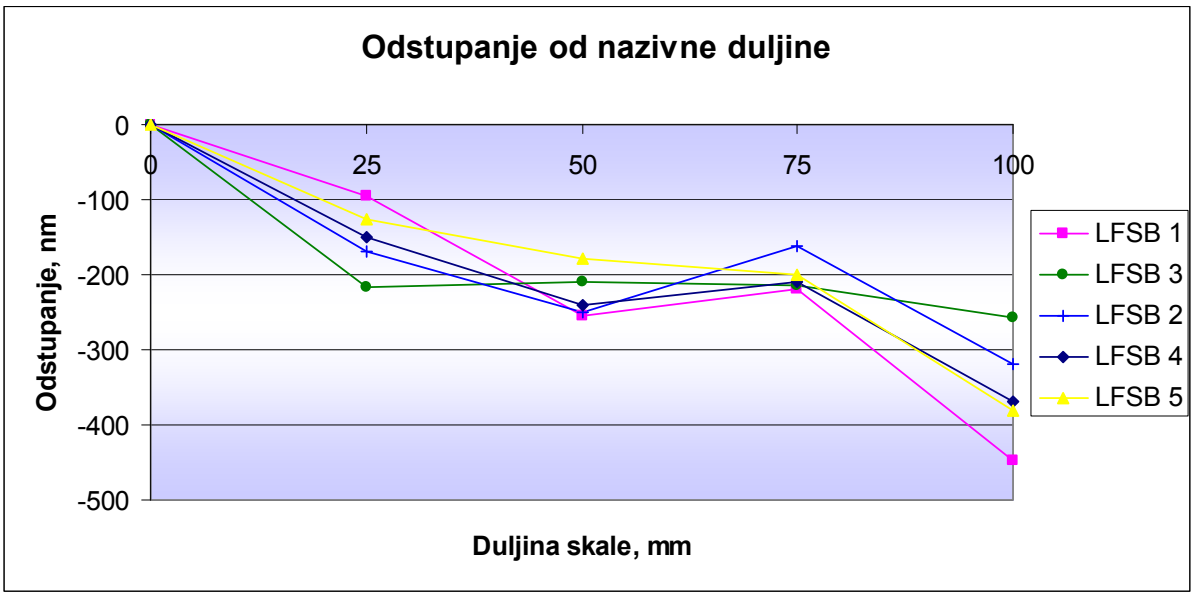
Slika 105. Rezultati mjerenja zakreta stola sa i bez kliznim osloncima s postavljenim reflektorom s desne strane pokretnog stola

Iz provedenih mjerenja zakreta stola zaključuje se da su provedene modifikacije uređaja u potpunosti ispunile očekivanja i doprinijele osnovnom cilju, povećanju krutosti stola i potpunom minimiziranju deformacija stola uslijed vlastite težine i težine postavljenih reflektora. Kako bi se provjerio doprinos smanjenja deformacija pokretnog stola na rezultate mjerenja sustava, provest će se mjerenje NPL-ove mjerne skale.

10.2 REZULTATI MJERENJA MJERNE SKALE S POSTAVLJENIM KLIZNIM OSLONCIMA

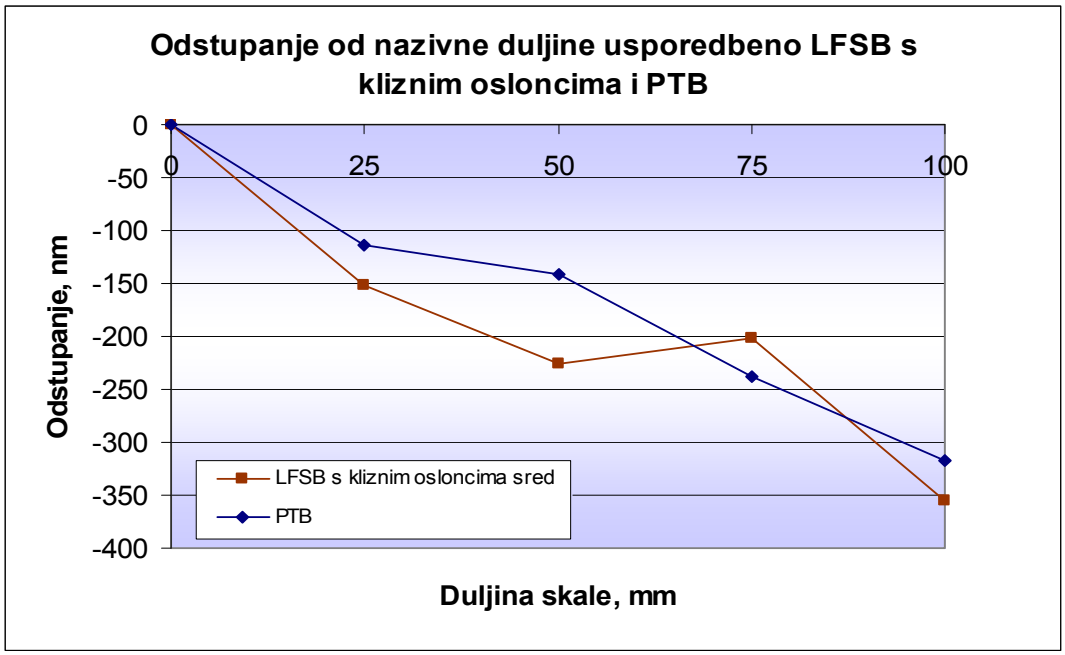
S postavljenim kliznim osloncima provedeno je pet neovisnih mjerenja NPL-ove mjerne skale s tim da su mjerene četiri linije mjerne skale i to: 25 mm, 50 mm, 75 mm, 150 mm. Svaka linija je mjerena tri puta. Odabrane su četiri mjerne linije kako bi se smanjio utjecaj temperature na rezultate mjerenja koji bi došao do izražaja da se mjerilo više linija pa bi to produžilo vremenski period umjeravanja. Na ovaj su način mjerenja provedena u roku od jednog sata.

Mjerenja su kao i prije provedena uz upotrebu automatske kompenzacije temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka. Rezultati provedenih mjerenja prikazani su na slici 106. Sa slike je vidljivo da svih pet setova mjerenja imaju isti trend te da nema značajnijeg rasipanja među mjerenjima.



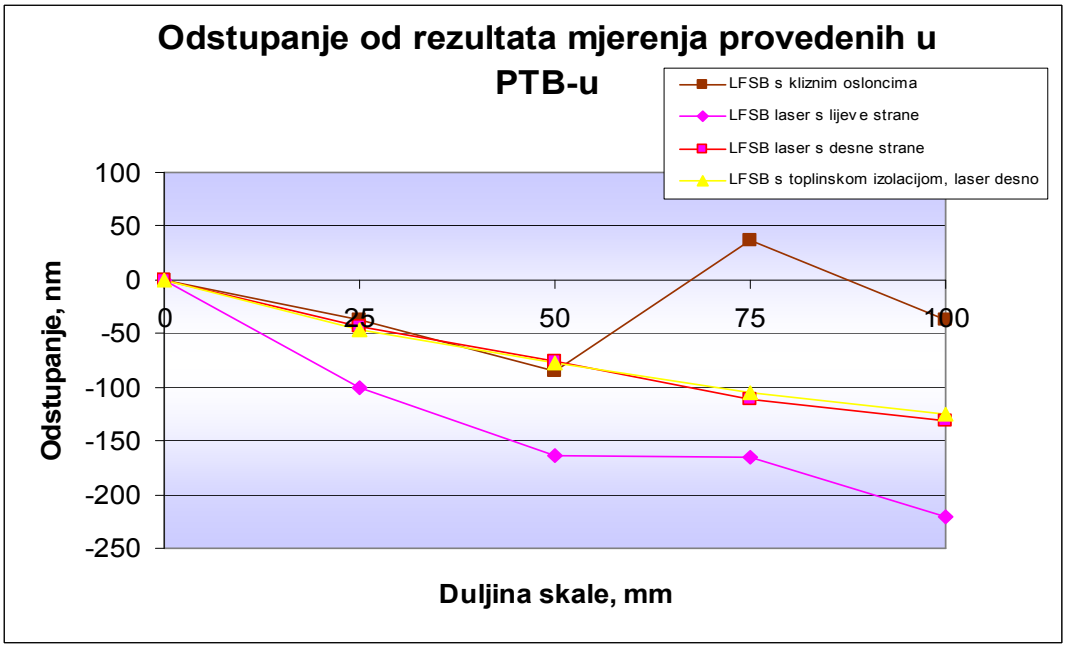
Slika 106. Rezultati provedenih mjerenja s kliznim osloncima (odstupanje od nazivne duljine)

Kako bi se prikazao usporedni prikaz provedenih mjerenja s kliznim osloncima i mjerenja provedenih u PTB-u, pronaći će se aritmetička sredina pet setova provedenih mjerenja. Usporedni prikaz odstupanja od nazivne duljine prikazan je na slici 107.



Slika 107. Usporedni rezultati mjerenja provedenih u LFSB-u s kliznim osloncima i PTB-u

Sa slike 107. je vidljivo da maksimalno odstupanje od rezultata provedenih u PTB-u iznosi oko 80 nm na liniji 50 mm, a na ostale tri mjerene linije odstupanja su manja od 50 nm. Zanimljivo je da je odstupanje na liniji od 75 mm pozitivno, što do sada nije bio slučaj jer su odstupanja uvijek bila negativna.



Slika 108. Usporedni prikaz odstupanja rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u

Kako bi se dobiveni rezultati mjerenja s kliznim osloncima mogli usporediti s dosadašnjim rezultatima mjerenja NPL-ove mjerne skale, svi rezultati prikazat će se na istom dijagramu.

Slika 108. daje usporedan prikaz odstupanja rezultata mjerenja provedenih u LFSB-u odnosu na rezultate mjerenja provedenih u PTB-u.

Sa slike 108. je vidljivo da rezultati mjerenja s kliznim osloncima imaju najmanja odstupanja i nemaju linearno padajući trend te se nalaze unutar 100 nm u odnosu na rezultate mjerenja provedene u PTB-u.

Iz provedenih rezultata mjerenja može se zaključiti da su provedene modifikacije uređaja doprinijele smanjenju odstupanja od rezultata mjerenja provedenih u PTB-u.

Nakon provedenih modifikacija uređaja, a u svrhu validacije sustava, provedeno je i usporedbeno mjerenje mjerne skale duljine 300 mm.

11. NESIGURNOST UMJERAVANJA MJERNIH SKALA UZ UPOTREBU MODIFICIRANOG SUSTAVA

U poglavlju 6.6 na slici 41. prikazani su utjecajni faktori mjerne nesigurnosti umjeravanja mjernih skala. U poglavlju 6.6 dana je procjena mjerne nesigurnosti za rezultate mjerenja tek izrađenog uređaja bez detaljne analize utjecajnih veličina, a sve u svrhu sudjelovanja u međunarodnom usporedbenom mjerenju. Stoga će se u nastavku rada prikazati detaljna analiza parametara mjerne nesigurnosti modificiranog uređaja.
Kako bi se mjerna nesigurnost mogla što bolje procijeniti, prvo je potrebno postaviti matematički model mjerenja.

11.1 MATEMATIČKI MODEL MJERENJA

Kako bi se pouzdano mogla procijeniti mjerna nesigurnost, potrebno je postavljanje pravilnog matematičkog modela mjerenja, odnosno povezivanja svih parametara koji utječu na duljinu mjerne skale. Izmjerena duljina mjerne skale jednaka je:

$$L_{MS} = (N_2 - N_1)\frac{\lambda}{2n_{air}} - (\delta l_{n2} - \delta l_{n1}) + \delta l_{DP} + \delta l_{li} + \delta l_{Az} + \delta l_{Ay} + L \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s + \delta l_{sh} + \delta l_{sv} + \\ + \delta l_{ai} + \delta E_{alg} + \delta e_{fok} + \delta l_{opt} + \delta l_{sE} \tag{11.1}$$

gdje su:

N_i - Očitanje interferometra

λ - Valna duljina izvora svjetlosti

n_{air} - Indeks loma zraka

δl_{ni} - Nelinearnost optike u položajima 1 i 2

δl_{DP} - Utjecaj mrtvog hoda

δl_{li} - Utjecaj kosinus pogreške interferometra

δl_{Az} - Abbeov odmak u Z i zakret stola

δl_{Ay} - Abbeov odmak u Y i skretanje stola

L - Nazivna duljina mjerne skale

α_s - Linearni koeficijent temperaturnog rastezanja mjerne skale

Δt_s - Odstupanje temperature mjerne skale od 20 ºC

δl_{sh} - Utjecaj suosnosti skale u horizontalnoj ravnini

δl_{sv} - Utjecaj suosnosti skale u vertikalnoj ravnini

δl_{ai} - Utjecaj savijanja skale

δE_{alg} - Utjecaj kvalitete ruba linije

δe_{fok} - Utjecaj gubitka fokusa

δl_{opt} - Nesigurnost mjerne optike uslijed promjene temperature

δl_{sE} - Obnovljivost viziranja sredine linije

11.2 STANDARDNE NESIGURNOSTI UTJECAJNIH VELIČINA

11.2.1 Nesigurnost očitanja interferometra $u(N_i)$

Prema [11] očitanje laserskog interferometra N_i ovisi o graničnim decimalama na pokaznoj jedinici pri očitanju određene duljine, odnosno određene pozicije *i* pomičnog reflektora. Prema ISO-GUM, ukoliko zadnja značajna znamenka odgovara 0,01, maksimalna razlika između izmjerene i očitane vrijednosti iznosit će polovinu vrijednosti, pa stoga nesigurnost očitanja uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi :

$$u(N_i) = \frac{0{,}01}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}003 \tag{11.2}$$

Koeficijenti osjetljivosti c_{N1} i c_{N2} računaju se prema sljedećim izrazima:

$$c_{N1} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial N_1} = -\frac{\lambda}{2 \cdot n_{air}} \approx -\frac{\lambda}{2} \tag{11.3}$$

$$c_{N1} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial N_2} = \frac{\lambda}{2 \cdot n_{air}} \approx \frac{\lambda}{2} \tag{11.4}$$

11.2.2 Nesigurnost valne duljine He-Ne Renishaw lasera *u(λ)*

U sustavu za umjeravanja mjernih skala kao izvor svjetlosti koristi se He-Ne Renishaw laser ML-10 čija je nazivna frekvencija i njena stabilnost određena u Laboratoriju usporedbom s referentnim laserom (He-Ne Iodno stabilizirani NPL laser) metodom "Beet frequency". Prema primijenjenoj metodi, standardna mjerna nesigurnost umjeravanja lasera iznosi $0{,}0005 \cdot 10^{-6}\lambda$. Jednogodišnji odmak frekvencije lasera je prosječno 5 Mhz ili $0{,}01 \cdot 10^{-6}\lambda$. Sastavljena mjerna nesigurnost stoga iznosi :

$$u_c^2(\lambda) = c_{\lambda um}^2 \cdot u_{\lambda um}^2 + c_{\lambda odm}^2 \cdot u_{\lambda odm}^2 \tag{11.5}$$

gdje su:

$$c_{\lambda um}^2 = 1,\ c_{\lambda odm}^2 = 1 \tag{11.6}$$

pa je:

$$u_c(\lambda) = \sqrt{(0{,}005 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda)^2 + (0{,}01 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda)^2} = 0{,}011 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda \tag{11.7}$$

Koeficijent osjetljivosti c_λ računa se prema sljedećem izrazu:

$$c_\lambda = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \lambda} = \frac{N_2 - N_1}{2 \cdot n_{air}} \approx \frac{L}{\lambda} \tag{11.8}$$

11.2.3 Nesigurnost indeksa loma zraka $u(n_{air})$

Kako je metar definiran kao duljina koju svjetlost prijeđe u vakuumu, a umjeravanje mjernih skala provodi se u zraku, potrebno je korigirati valnu duljinu. Naime, valna duljina u zraku ovisi o valnoj duljini u vakuumu i indeksu loma zraka, odnosno $\lambda = n_{air} \cdot \lambda_{air}$. Indeks loma zraka određen je okolišnim parametrima koji utječu na gustoću zraka (temperatura, tlak i relativna vlažnost zraka), te računanjem izmijenjenom verzijom Edlenove jednadžbe [20]. Dakle utjecaj indeksa loma zraka na mjerenu duljinu mjerne skale utvrđuje se analizom nesigurnosti utjecajnih faktora, i to temperature zraka t_{air}, tlaka zraka p_{air}, relativne vlažnosti zraka RH_{air} i nesigurnosti Edlenove jednadžbe. Edlenova jednadžba za računanje indeksa loma zraka dana je izrazom:

$$n_{air} = 1 + \frac{p(n_1 - 1)_s (1 + 10^{-8}(0{,}601 - 0{,}00972t)p)}{96095{,}43(1 + 0{,}0036610t)} - f_V (3{,}7345 - 0{,}0401\sigma^2)10^{-10} \quad (11.9)$$

gdje je:

$$(n_{air} - 1)_s = (8342{,}54 + \frac{2406147}{130 - \sigma^2} + \frac{15998}{38{,}9 - \sigma^2})10^{-8}$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}$$

$(n_{air} - 1)_s$ - tzv. formula disperzije zraka koja povezuje vrijednost indeksa loma s promjenom valne duljine

gdje je:

σ - valni broj u vakuumu u μm^{-1}

f_V – vlažnost zraka izražena u parcijalnom tlaku vodene pare u Pa

Za λ=0,632991, slijedi $(n_{air}-1)_s = 27653 \cdot 10^{-8}$ pa jednadžba za indeks loma glasi:

$$n_{air} = 1 + \frac{2{,}878 \cdot 10^{-9} p(1 + 10^{-8}(0{,}601 - 0{,}00972t)p)}{1 + 0{,}0036610t} - 3{,}634 \cdot 10^{-10} f_V \quad (11.10)$$

U izrazu 11.10 vlažnost je izražena u obliku parcijalnog tlaka vodene pare f_V , a u našem slučaju mjeri se relativna vlažnost h. Prema [17] h je jednak:

$$h = \frac{f_v}{f_{VS}(t)}, \text{ odnosno } f = h \cdot f_{VS}(t) \quad (11.11)$$

gdje je:

$$f_{VS} = 1 \text{ Pa } e^{AT^2+BT+C+DT^{-1}} \tag{11.12}$$

gdje su:

A = $1{,}2811805 \cdot 10^{-5} K^{-2}$

B = $-1{,}9509874 \cdot 10^{-2} K^{-1}$

C = 34,04926034

D = $-6{,}3536311 \cdot 10^{3}$ K

T = t+273,15 K

Standardne mjerne nesigurnosti ulaznih veličina dobivaju se iz odgovarajućih potvrda o umjeravanju barometra, termometra i higrometra te iznose:

$u(p_{air}) = 13$ Pa

$u(t_{air}) = 0{,}12$ ºC

$u(RH_{air}) = 6$ %

Nesigurnost Edlenove jednadžbe iznosi:

$u(\delta n_{air}) = 2 \cdot 10^{-8}$

Koeficijent osjetljivosti $c_{n_{air}}$ računa se prema jednadžbi:

$$c_{n_{air}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial n_{air}} = \frac{-(N_2 - N_1) \cdot \lambda}{2 \cdot n_{air}} \approx -\frac{L}{n_{air}} \approx -L \tag{11.13}$$

Koeficijenti osjetljivosti redom iznose:

$$\frac{\partial n_{air}}{\partial p_{air}} = 2{,}7 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} \tag{11.14}$$

$$\frac{\partial n_{air}}{\partial t_{air}} = -9{,}3 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1} \tag{11.15}$$

$$\frac{\partial n_{air}}{\partial RH_{air}} = \frac{\partial n_{air}}{\partial f_V} \cdot \frac{\partial f_V}{\partial RH_{air}} = -3{,}6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \cdot 2339 \text{ Pa} = -8{,}4 \cdot 10^{-7} \tag{11.16}$$

11.2.4 Nesigurnost uslijed nelinearnosti $u(\delta L_{ni})$

Renishaw ML 10 mjerni sustav provodi mjerenja usporedbom faza referentnog i mjernog signala. Nelinearnost nastaje uslijed gubitka polarizacije optike, te orijentacije optike u odnosu na glavu lasera, odnosno zbog nemogućnosti jako dobrog odvajanja dviju komponenti laserskog snopa (vertikalne i horizontalne polarizacije) [12].

Naime, svjetlost koja izlazi iz bilo kojeg laserskog izvora svjetlosti nije potpuno linearno polarizirana već je djelomično eliptična. Pogreška nelinearnosti optike je periodička s periodom jedne valne duljine za pomak faze od 360º između referentne i mjerne frekvencije laserskog snopa. Pogreška nelinearnosti interferometra ovisi o vrsti interferometra. Kako je pogreška nelinearnosti jako mala, gotovo ju je nemoguće direktno izmjeriti pa se razvija model koji uključuje eliptičnu polarizaciju, nesuosnost optike te nesavršenost optičkih komponenti. Prema takvom modelu, za ovaj tip laserskog interferometra pogreška u fazi iznosi 5,4º što odgovara udaljenosti od 4,8 nm [13].

Upotrebom statističkog modela (metoda najmanjih kvadrata) za prikaz mjerenja na monitoru, udaljenost iznosi 4,2 nm. Kako je pogreška nelinearnosti periodička (sinusiodalna), pretpostavlja se "U" razdioba [14] te nesigurnost uslijed nelinearnosti iznosi:

$$u(\delta l_{ni}) = \frac{4{,}2}{\sqrt{2}} = 2{,}98 \approx 3 \text{ nm} \tag{11.17}$$

Koeficijenti osjetljivosti iznose:

$$c_{\delta lN2} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{N2}} = -1 \tag{11.18}$$

$$c_{\delta lN1} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{N1}} = 1 \tag{11.19}$$

11.2.5 Nesigurnost uslijed mrtvog hoda $u(\delta L_{DP})$

Objašnjenje mrtvog hoda detaljno je objašnjeno u poglavlju 4.3.2. Naime, pogreška mrtvog hoda definirana je kao razlika optičkih putova između mjerne i referentne grane kod postavljanja interferometra na nulu. Po toj definiciji duljina mrtvog hoda jednaka je $L_{mh}=L_i-L_R$. Kako je referentni reflektor direktno postavljen na djelitelj snopa što je vidljivo sa slike 20. (stranica 24), onda je L_R približno jednak nuli, pa duljina mrtvog hoda iznosi $L_{mh}=L_i$. Kod postavke lasera s lijeve strane, duljina L_i je minimalno jednaka duljini mjerne skale pošto se pomični reflektor približava interferometru (slika 21.), a kod standardne postavke mjernog sustava s laserom s desne strane duljina L_i iznosi cca. 10 mm (slika 20.).

Ukoliko se tijekom provedbe mjerenja pojavi varijacija indeksa loma zraka uslijed promjene uvjeta okoliša, potrebno je korigirati mrtvi hod prema izrazu:

$$\delta l_{DP} = \Delta n_{air} \cdot L_i \tag{11.20}$$

gdje je:

δl_{DP} - korekcija mrtvog hoda

Δn_{air} - promjena indeksa loma zraka tijekom provođenja mjerenja

L_i - duljina mrtvog hoda

Utvrđeno je da nesigurnost indeksa loma zraka iznosi $12{,}9\cdot10^{-8}$. Ukoliko se pretpostavi da je na početku i na kraju mjerenja ista nesigurnost indeksa loma zraka, nesigurnost razlike indeksa loma zraka iznosi :

$$u(\Delta n_{air}) = \sqrt{u(n_{air1})^2 + u(n_{air2})^2} = \sqrt{2\cdot(12{,}9\cdot10^{-8})^2} = 18{,}2\cdot10^{-8} \tag{11.21}$$

Tada je nesigurnost uslijed korekcije mrtvog hoda jednaka:

$$u(\delta l_{DP}) = u(\Delta n_{air})\cdot L_i = 0{,}182\cdot L_i \text{ nm} \tag{11.22}$$

Odnosno za postav lasera s desne strane:

$$u(\delta l_{DP}) = 0{,}182\cdot L_i = 0{,}182\cdot 10 = 1{,}8 \text{ nm} \tag{11.23}$$

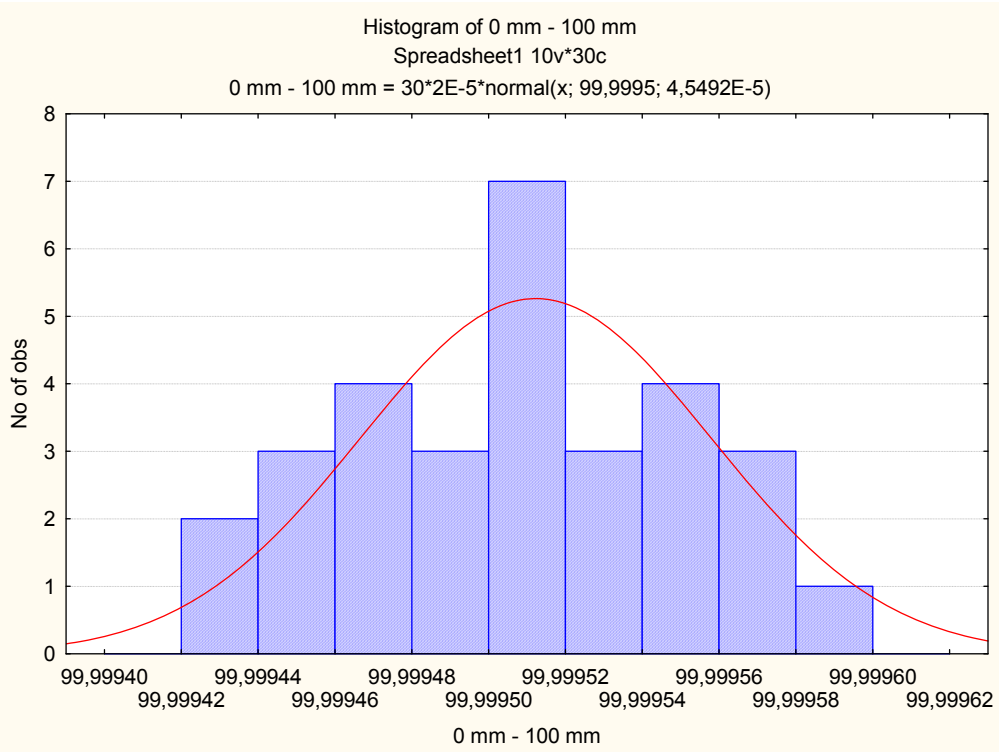
Za postav lasera s lijeve strane, za mjernu skalu duljine 100 mm nesigurnost uslijed korekcije mrtvog hoda iznosi:

$$u(\delta l_{DP}) = 0{,}182 \cdot L_i = 0{,}182 \cdot 100 = 18{,}2 \tag{11.24}$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\delta l_{DP}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{DP}} = 1 \tag{11.25}$$

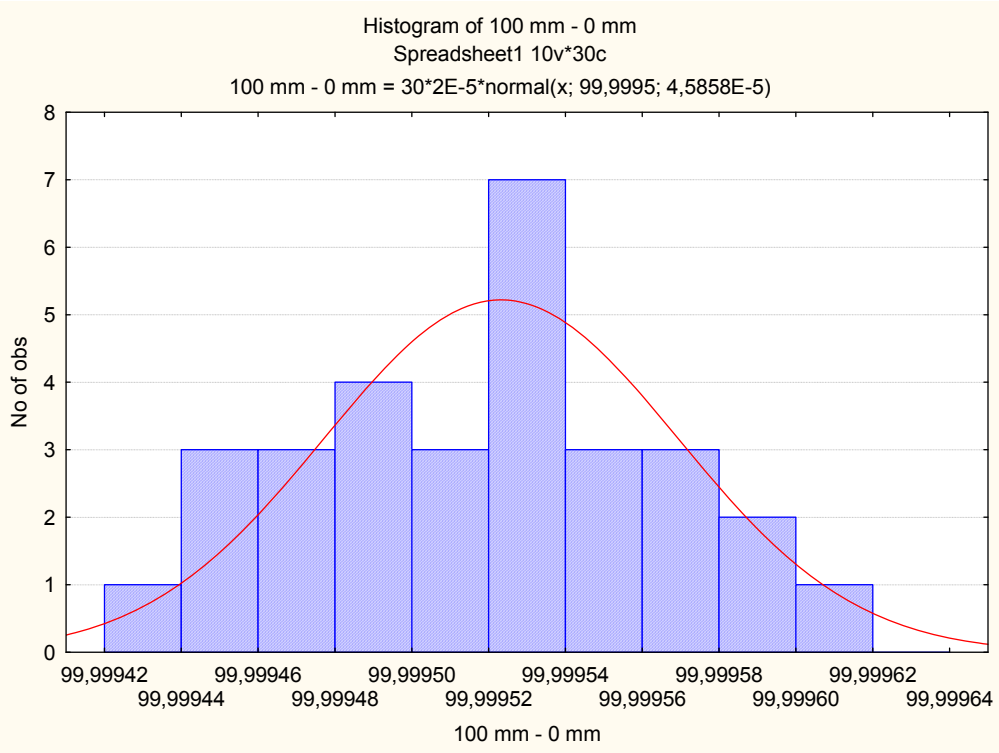
Provedena su i mjerenja mjerne skale od 100 mm na način da je mjerena mjerna linija od 100 mm i to u dva smjera, prvo od 0 do 100 pa od 100 do 0, a sve u svrhu kako bi se utvrdilo je li dobro provedena procjena mjerne nesigurnosti uslijed korekcije mrtvog hoda. Mjerenja su ponovljena 30 puta u oba smjera i rezultati su prikazani na slikama 109. i 110.



Slika 109. Rezultati mjerenja od 0 do 100 mm

Aritmetička sredina mjerenja od 0 mm do 100 mm iznosi 99,999512 mm, a aritmetička sredina mjerenja od 100 mm do 0 mm iznosi 99,999523 što je razlika od svega 11 nm. Iako je prema procjeni mjerne nesigurnosti uslijed korekcije mrtvog hoda razlika trebala biti malo veća, tj. 16 nm, može se konstatirati da su provedena mjerenja potvrdila

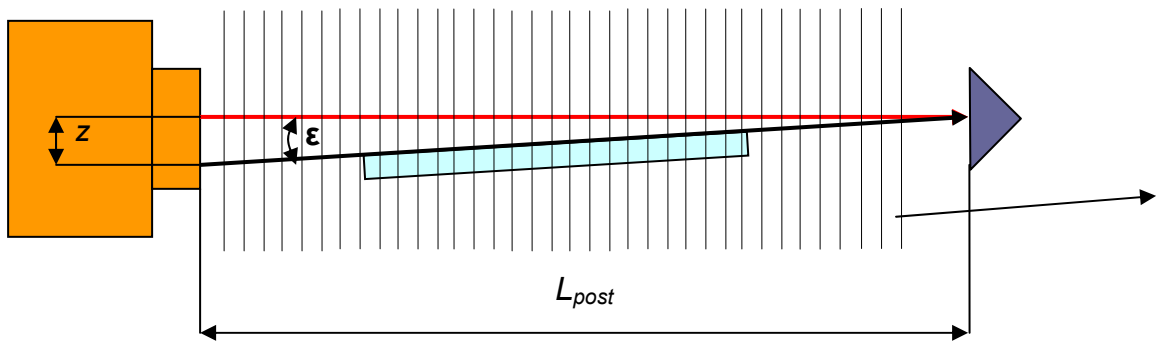
procjenu mjerne nesigurnosti jer su razlike na razini nekoliko nanometara što je jako teško utvrditi.



Slika 110. Rezultati mjerenja od 100 do 0 mm

11.2.6 Nesigurnost uslijed kosinus pogreške $u(\delta L_{li})$

U poglavlju 4.3.1 detaljno je objašnjen postupak postavljanja suosnosti laserskog interferometra i pravca kretanja pokretnog stola, odnosno pomičnog reflektora. Sama kosinus pogreška nastaje zbog neporavnatosti laserskog snopa s pravcem kretanja pomičnog reflektora. Pošto je iznos pogreške proporcionalan kosinusu kuta između pravca laserskog snopa i pravca kretanja reflektora, ova vrsta pogreške naziva se kosinus pogreška.



Slika 111. Kosinus pogreška

Sa slike 111. jasno je vidljivo da je izmjerena udaljenost (mjerni snop crvene boje) manja od stvarno pređene udaljenosti reflektora. Odnosno, ukoliko postoji kosinus pogreška, izmjerena vrijednost uvijek će biti manja od stvarne duljine koja se mjeri. Kut ε između pravca mjernog snopa i pravca kretanja pomičnog reflektora može se izračunati prema izrazu:

$$tg\varepsilon = \frac{z}{L_{post}} \tag{11.26}$$

Gdje je:

z - razmak između točkica referentnog i mjernog snopa na glavi lasera

L_{post} - duljina postavljanja laserskog interferometra od glave lasera do najdalje točke pomičnog reflektora

Udaljenost između glave lasera do najdalje točke pomičnog reflektora iznosi 1500 mm za standardnu postavku lasera s desne strane pokretnog stola. Kada se vrši postavljanje interferometra, prisutnost kosinus pogreške izaziva razmak među točkicama na glavi lasera koji se vidi golim okom. Uz jako dobro postavljanje suosnosti interferometra i pravca kretanja pokretnog stola, razmak među točkicama maksimalno bi mogao iznositi 2 mm. Onda *tg* kuta *ε* između pravca mjernog snopa i pravca kretanja pomičnog reflektora iznosi:

$$tg\varepsilon = \frac{z}{L_{post}} = \frac{2}{1500} = 0{,}0013 \qquad (11.27)$$

Odnosno, tada je

$$\varepsilon = 0{,}074\,^{\circ} \approx 4'\ 26''$$

Kako je vidljivo sa slike 111., izmjerena duljina bit će manja od mjerene duljine skale *L* i iznosi $L\cos\varepsilon$, odnosno pogreška koja nastaje u mjerenju mjerne skale zbog neporavnatosti laserskog snopa s pravcem kretanja pomičnog reflektora iznosi:

$$\delta L_{li} = L - L\cos\varepsilon = L\cdot(1-\cos\varepsilon) = L\cdot(1-0{,}999999166) = 0{,}83\cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \qquad (11.28)$$

Uz pretpostavku pravokutne razdiobe nesigurnost kosinus pogreške iznosi:

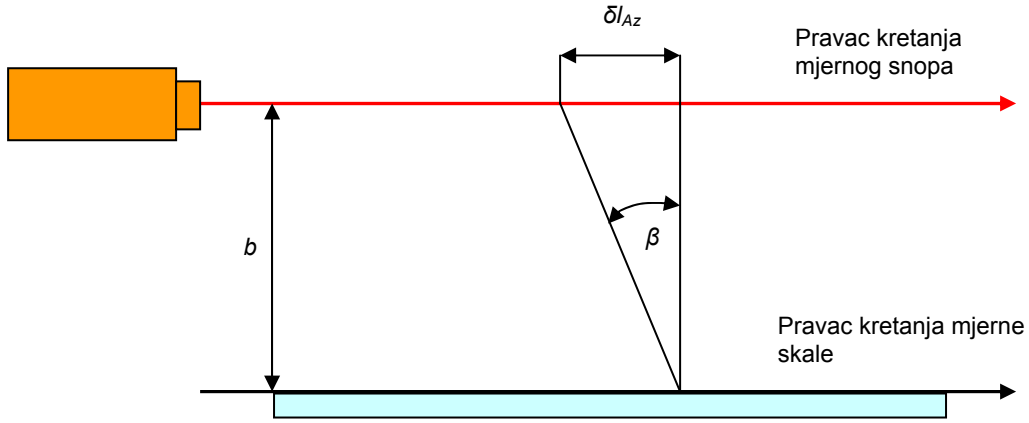
$$u(\delta L_{li}) = \frac{0{,}83\cdot L}{\sqrt{3}} = 0{,}48\cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \qquad (11.29)$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\delta L_{li}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{li}} = 1 \qquad (11.30)$$

11.2.7 Nesigurnost zakreta stola i Abbeovog odmaka u Z $u(\delta l_{Az})$

Abbeov princip definira da se mjerna skala nalazi na pravcu mjerenja. U suprotnom dolazi do pogreške prvog reda (Abbeova pogreška) uzrokovane geometrijskim nesavršenostima gibanja stola. Abbeova pogreška proporcionalna je udaljenosti između mjerne skale i mjernog snopa (*b*) te zakretu pokretnog stola (*β*) duž njegovog pomicanja (slika 112.).

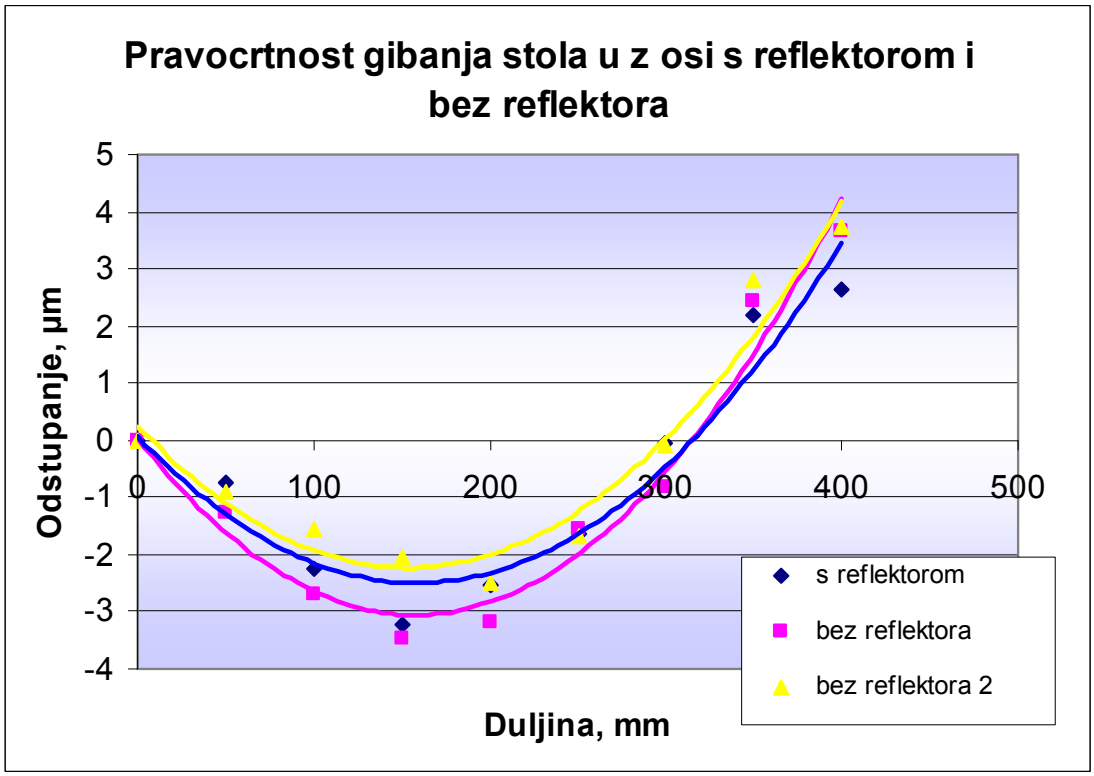


Slika 112. Abbeova pogreška u z osi

Udaljenost između mjernog snopa i mjerne skale ovisi o postavljanju mjerne skale. Mjerna skala postavlja se na način da su linije mjerne skale u ravnini s mjernim snopom. Pri postavljanju mjerne skale može se pojaviti određeno odstupanje udaljenosti između mjerne skale i mjernog snopa. Maksimalno odstupanje udaljenosti između mjerne skale i mjernog snopa može iznositi *b*=1 mm. Kako bi se izračunao zakret stola, provedeno je mjerenje pravocrtnosti gibanja pokretnog stola upotrebom autokolimatora.

Reflektor autokolimatora postavljen je točno na sredinu pokretnog stola gdje se postavlja i mjerna skala, tj. na kolica pokretnog stola koja se gibaju po vodilicama uređaja kako je prikazano na slici 113. Mjerenja pravocrtnosti gibanja stola provedena su s postavljenim reflektorom i bez reflektora laserskog interferometra. Rezultati provedenih mjerenja pravocrtnosti gibanja stola u z osi prikazani su na slici 114.

Slika 113. Postavljanje reflektora autokolimatora



Slika 114. Pravocrtnost gibanja stola u z osi

Sa slike 114. je vidljivo da nema značajnih odstupanja u pravocrtnosti gibanja stola ukoliko je pokretni stol opremljen pomičnim reflektorom ili je bez njega.

Sa slike 114. je također vidljivo da maksimalno odstupanje pravocrtnosti gibanja stola u z osi iznosi 7,5 μm i to na udaljenosti od 250 mm, stoga je maksimalni zakret stola jednak:

$$tg\beta = \frac{0{,}0075}{250} = 0{,}00003 \tag{11.31}$$

odnosno,

$$\beta = 0{,}0017\,^{\circ} \approx 6\,''$$

Stoga nesigurnost zakreta stola i Abbeovog odmaka u z, uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi:

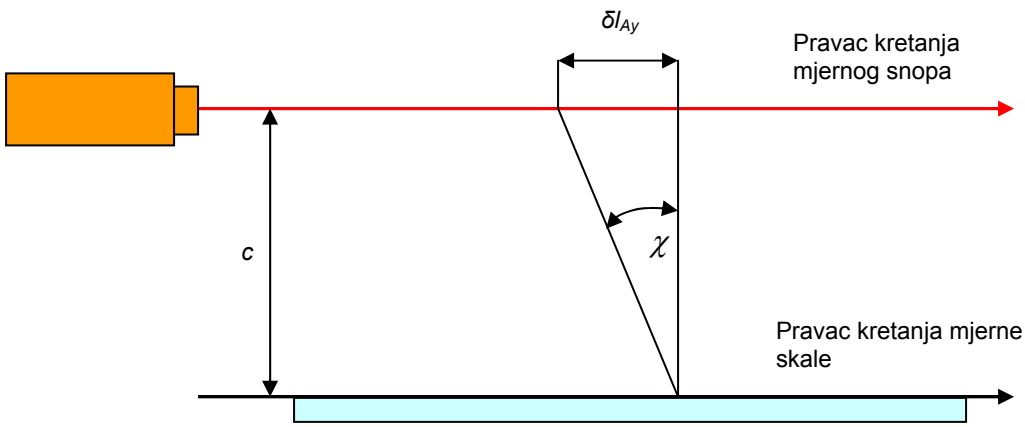
$$u(\delta l_{Az}) = \frac{b \cdot tg(\beta)}{\sqrt{3}} = \frac{1mm \cdot tg(6'')}{\sqrt{3}} = 16{,}8 \cdot 10^{-6}\,\text{mm} = 16{,}8\ \text{nm} \tag{11.32}$$

Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\delta l_{Az}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{Az}} = 1 \tag{11.33}$$

11.2.8 Nesigurnost skretanja stola i Abbeovog odmaka u Y $u(\delta l_{Ay})$

Kako je već objašnjeno kod Abbeovog odmaka u z, Abbeova pogreška u y proporcionalna je udaljenosti između mjerne skale i mjernog snopa (*c*) te skretanju pokretnog stola (χ) duž njegovog pomicanja (slika 115.).



Slika 115. Abbeova pogreška u y osi

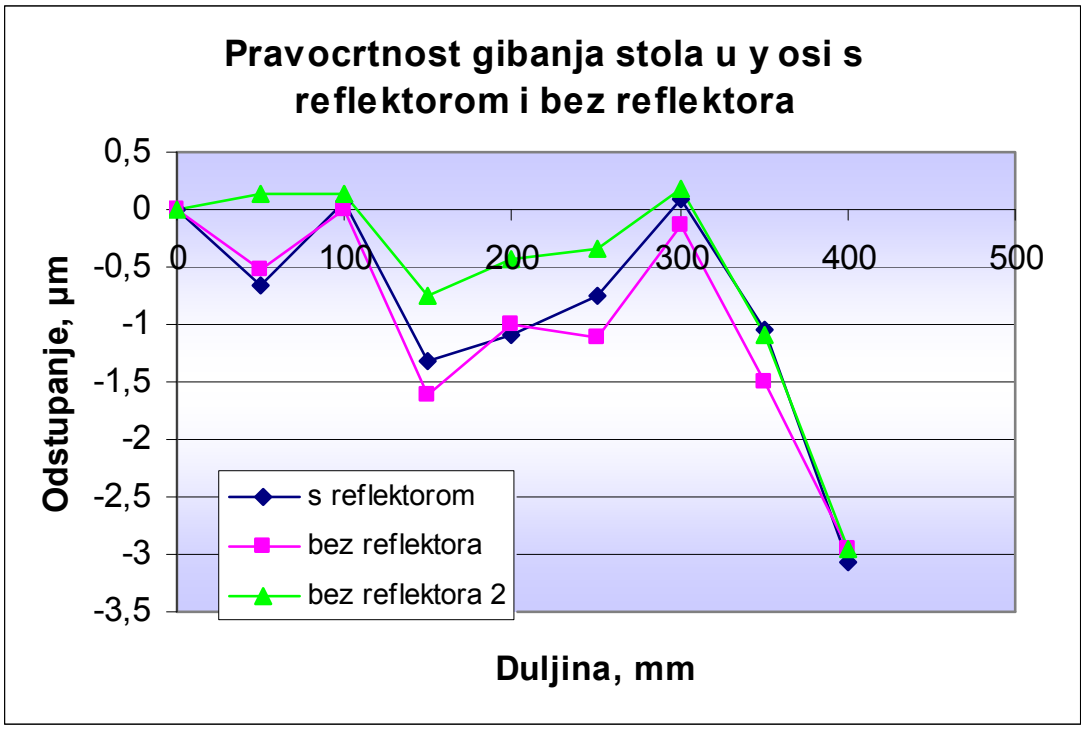
Kako bi se izračunalo skretanje stola, izvršena su mjerenja pravocrtnosti gibanja pokretnog stola u y osi uz korištenje autokolimatora. Reflektor autokolimatora postavljen je točno na sredinu pokretnog stola gdje se postavlja i mjerna skala tj. na kolica pokretnog stola koja se gibaju po vodilicama uređaja. Mjerenja pravocrtnosti gibanja stola provedena su s postavljenim reflektorom i bez reflektora laserskog interferometra. Rezultati provedenih mjerenja pravocrtnosti gibanja stola u y osi prikazani su na slici 116.

Sa slike 116. je vidljivo da maksimalno odstupanje pravocrtnosti gibanja stola u y osi iznosi 3 µm, i to na udaljenosti od 400 mm, stoga je maksimalno skretanje stola jednako:

$$tg\chi = \frac{0{,}003}{400} = 0{,}0000075 \tag{11.34}$$

odnosno,

$$\chi = 0{,}00043\,^{\circ} \approx 1{,}5\,''$$



Slika 116. Pravocrtnost gibanja stola u y osi

Prema tome nesigurnost zakreta stola i Abbeovog odmaka u z, uz pretpostavku pravokutne razdiobe, iznosi:

$$u(\delta l_{Ay}) = \frac{c \cdot tg(\chi)}{\sqrt{3}} = \frac{1mm \cdot tg(1{,}5'')}{\sqrt{3}} = 4{,}3 \cdot 10^{-6}\,\text{mm} = 4{,}3\ \text{nm} \qquad (11.35)$$

Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\delta l_{Ay}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{Ay}} = 1 \qquad (11.36)$$

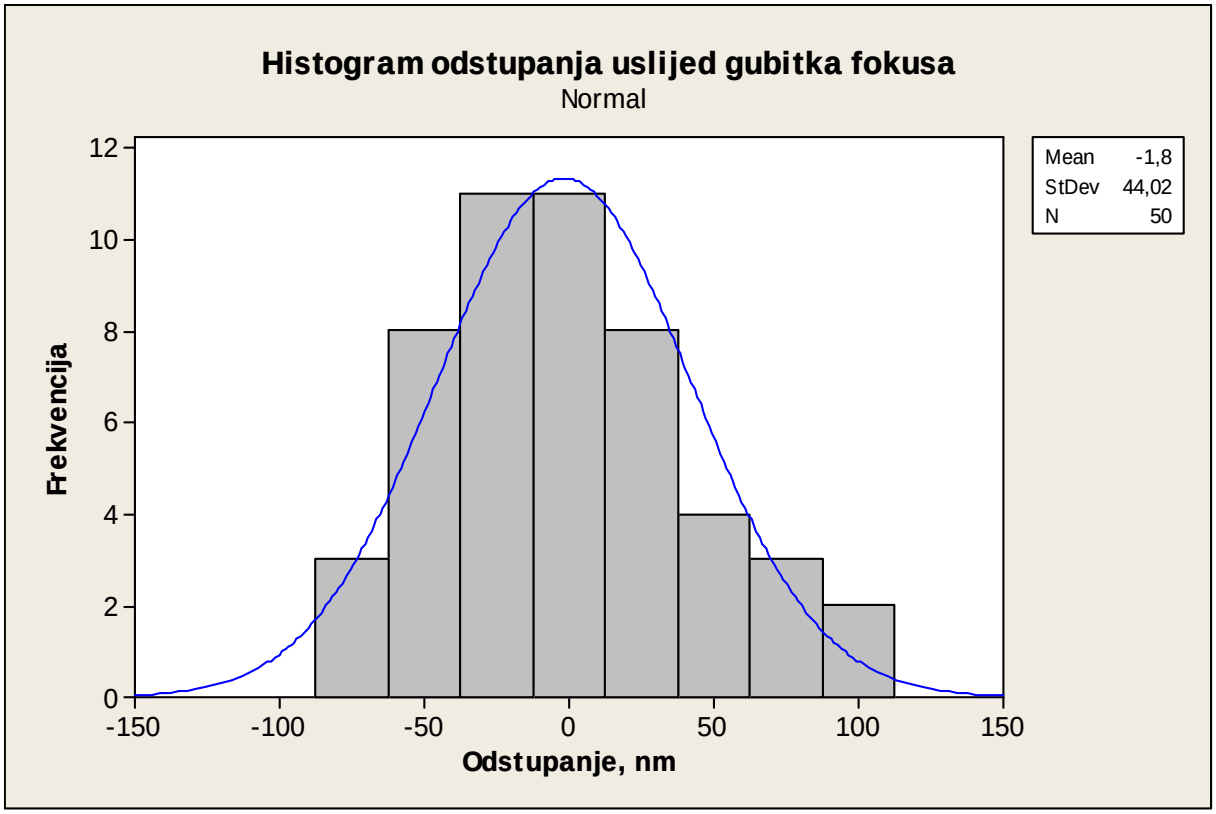
11.2.9 Nesigurnost uslijed gubitka fokusa $u(\delta e_{fok})$

Kako je već opisano u poglavlju 4.4.1, fokus linije mjerne skale postavlja se na lijevoj i desnoj Airy točki, odnosno linije mjerne skale u fokusu su na osloncima. Uslijed savijanja mjerne skale te pogreški pravca gibanja stola u vertikalnoj ravnini, ostale linije mjerne skale ne moraju biti u fokusu. Naime, fokus objektiva 50 puta nalazi se u svega nekoliko mikrometara, pa odstupanje od pravocrtnosti gibanja stola koje iznosi 7 µm najviše utječe na gubitak fokusa tijekom viziranja linija. Kako bi se pouzdano odredila sredina linije mjerne skale potrebno je pomakom mikroskopa u z osi postaviti viziranu liniju u fokus. Prilikom dobivanja fokusa vizirane linije dolazi do malih pomaka objektiva u smjeru osi x. Kako bi se utvrdili pomaci objektiva mikroskopa u smjeru osi x prilikom postavljanja vizirane linije u fokus, provedena su mjerenja uz upotrebu elektronskog komparatora kako je prikazano na slici 117.

Slika 117. Mjerenje pomaka objektiva pomoću elektronskog komparatora

Elektronski komparator može mjeriti pomake od 0,01 µm te je oslonjen na objektiv mikroskopa. Mjerenja su provedena na način da se linija mjerne skale postavlja u fokus te se očitava vrijednost koju pokazuje komparator. Nakon toga se pomakom mikroskopa u z osi vizirana linija pomiče iz fokusa i ponovo vraća u fokus. Ponovno se očitava

vrijednost koju pokazuje komparator, a pomak objektiva u x osi uslijed dovođenja linije u fokus jednak je razlici ta dva očitanja elektronskog komparatora. Rezultati pomaka u x osi uslijed postavljanja linije u fokus prikazani su na slici 118.



Slika 118. Rezultati mjerenja pomaka objektiva u osi x uslijed gubitka fokusa

Provedeno je 50 mjerenja te je sa slike 118. vidljivo da su rezultati raspoređeni prema normalnoj razdiobi te da aritmetička sredina pomaka u osi x uslijed gubitka fokusa iznosi gotovo 0, odnosno točno -1,8 nm.

Procijenjeno standardno odstupanje iznosi s = 44 nm te onda mjerna nesigurnost uslijed gubitka fokusa iznosi :

$$u(\delta e_{fok}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{11.37}$$

Uz minimalno 6 ponovljenih mjerenja linije mjerne skale mjerna nesigurnost iznosi:

$$u(\delta e_{fok}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{44nm}{\sqrt{6}} = 18\,\text{nm} \tag{11.38}$$

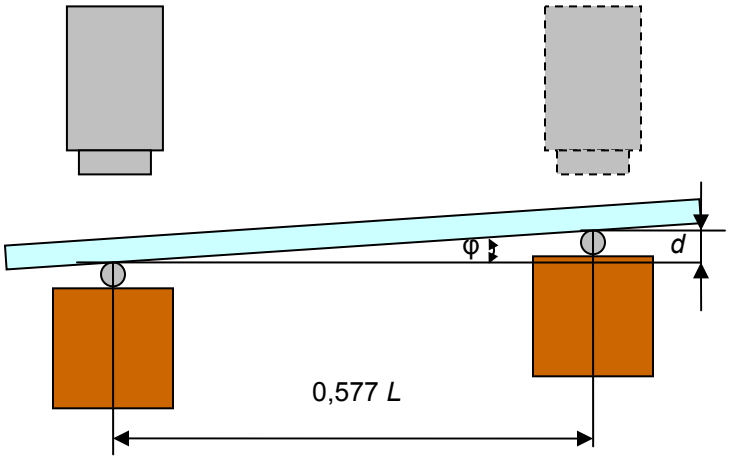
Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\delta e_{fok}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta e_{fok}} = 1 \tag{11.39}$$

11.2.10 Nesigurnost uslijed nesuosnosti mjerne skale i pravca kretanja pokretnog stola u vertikalnoj ravnini $u(\delta l_{sv})$

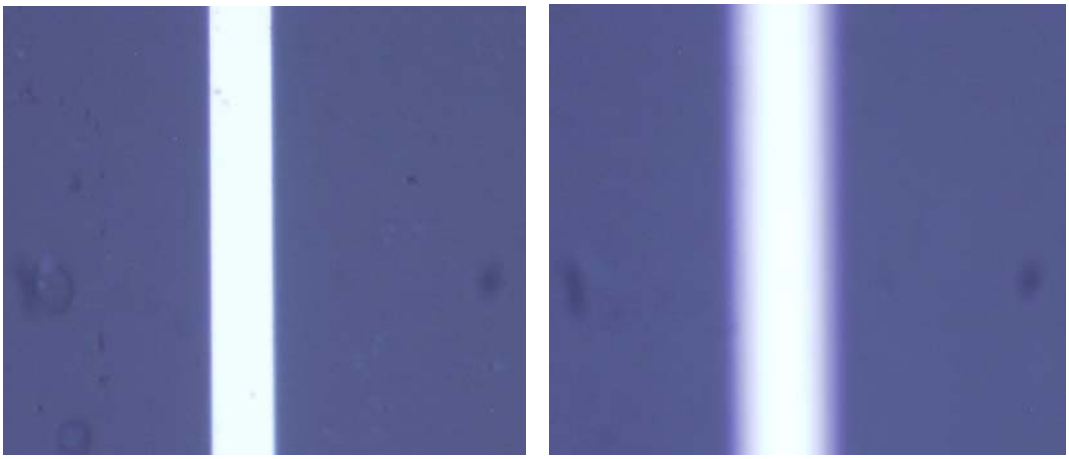
Postavljanje suosnosti mjerne skale provodi se kontrolom fokusa mikroskopa na linijama koje se nalaze na Airy točkama mjerne skale. Sama mjerna skala oslonjena je na valjčiće koji se nalaze na posebnim prihvatima. Prihvati i sam postupak postavljanja suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini detaljno su opisani u poglavlju 4.4.1.

Naime, fokus objektiva 50 puta koji se upotrebljava za postavljanje suosnosti u vertikalnoj ravnini nalazi se u svega nekoliko mikrometara pa je samom kontrolom fokusa mikroskopa moguće provesti postavljanje suosnosti mjerne skale. Kada su obje vizirane linije (linije koje se nalaze na Airy točkama mjerne skale) u fokusu, postavljena je suosnost mjerne skale u vertikalnoj ravnini. Slika 119. prikazuje postavljanje suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini.



Slika 119. Postavljanje suosnosti mjrne skale u vertikalnoj ravnini

Kako se podešavanje fokusa provodi odvijanjem i uvijanjem vijaka na prihvatu, nikada se ne može postići isti fokus na obje vizirane linije. Slika 120. prikazuje gubitak fokusa uzrokovan odstupanjem suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini u iznosu od 5 μm.



Slika 120. Gubitak fokusa mikroskopa za različite pomake u osi Z (a - bez pomaka, tj. u fokusu, b – pomak od 5 μm)

Pretpostavlja se da bi maksimalno odstupanje fokusa moglo biti uzrokovano razlikom duljine od 5 μm u smjeru osi Z na promatranoj liniji te uz tu pretpostavku tangens kuta φ iznosi :

$$tg\varphi = \frac{0{,}005}{0{,}577 \cdot L_{MS}} \tag{11.40}$$

Odnosno za mjernu skalu duljine 100 mm, kut φ iznosi:

$$\varphi = 0{,}005^{\circ} = 18''$$

Kako je vidljivo sa slike 119. , izmjerena duljina će bit će kraća od mjerene duljine skale L i iznosi $L\cos\varphi$, odnosno pogreška koja nastaje pri mjerenju mjerne skale zbog nesuosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini iznosi:

$$\delta L_{sv} = L - L\cos\varphi = L \cdot (1 - \cos\varphi) = L \cdot (1 - 0{,}999999961) = 0{,}004 \cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{11.41}$$

Uz pretpostavku pravokutne razdiobe nesigurnost kosinus pogreške iznosi:

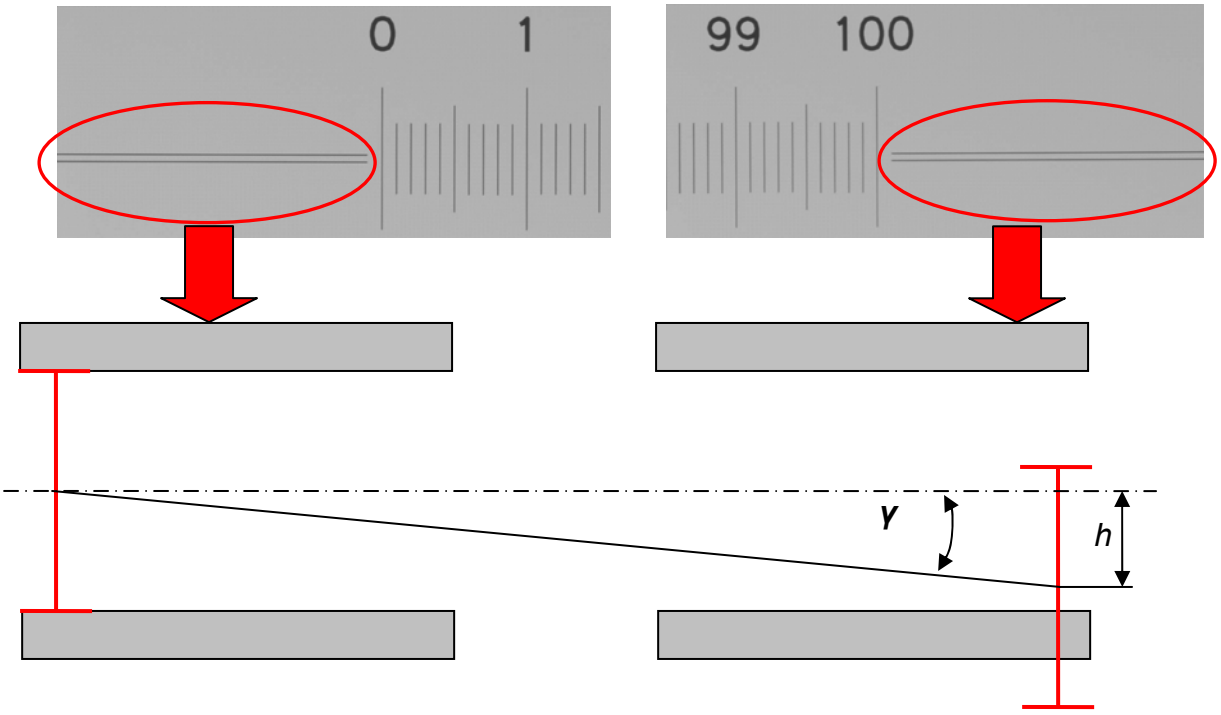
$$u(\delta L_{sv}) = \frac{0{,}004 \cdot L}{\sqrt{3}} = 0{,}0023 \cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{11.42}$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\delta L_{li}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{sv}} = 1 \tag{11.43}$$

11.2.11 Nesigurnost uslijed nesuosnosti mjerne skale i pravca kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini $u(\delta l_{sh})$

Postavljanje suosnosti mjerne skale s pravcem kretanja pokretnog stola u horizontalnoj ravnini provodi se uz pomoć mikroskopa odnosno markera koji služi kao referenca. Detaljan postupak postavljanja suosnosti mjerne skale u horizontalnoj ravnini detaljno je opisan u poglavlju 4.4.2. Naime kako je opisano u navedenom poglavlju, mjerne skale uobičajeno imaju dvije horizontalno paralelne linije na početku i na kraju mjerne skale koje služe za postavljanje suosnosti mjerne skale u horizontalnoj (XY) ravnini. Kod NPL-ove mjerne skale udaljenost među linijama iznosi 50 µm. Na ekran se postavlja marker duljine jednake razmaku među paralelnim linijama i služi kao referenca.



Slika 121. Postavljanje suosnosti mjerne skale u horizontalnoj ravnini

Postavljanje suosnosti mjerne skale u horizontalnoj ravnini obavljeno je kad je crveni marker i na početku i na kraju mjerne skale točno između horizontalnih linija. U praksi marker skoro nikada nije točno između horizontalnih linija i taj odmak može se procijeniti

na 5 μm pošto je udaljenost između horizontalnih linija oko 50 μm, pa uz tu pretpostavku tangens kuta γ iznosi:

$$tg\gamma = \frac{h}{L_{MS}} = \frac{0{,}005}{L_{MS}} \tag{11.44}$$

Odnosno za mjernu skalu duljine 100 mm, kut γ iznosi:

$$\gamma = 0{,}003\,^{\circ} = 10''$$

Kako je vidljivo sa slike 121., izmjerena duljina bit će manja od mjerene duljine skale *L* i iznosi *L·cosγ*, odnosno pogreška koja nastaje u mjerenju mjerne skale zbog nesuosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini iznosi:

$$\delta L_{sh} = L - L\cos\gamma = L\cdot(1-\cos\gamma) = L\cdot(1-0{,}999999998) = 0{,}0014\cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{11.45}$$

Uz pretpostavku pravokutne razdiobe nesigurnost kosinus pogreške iznosi:

$$u(\delta L_{sh}) = \frac{0{,}0014\cdot L}{\sqrt{3}} = 0{,}0008\cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{11.46}$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\delta L_{sh}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{sh}} = 1 \tag{11.47}$$

11.2.12 Nesigurnost mjerne optike uslijed promjene temperature $u(\delta L_{opt})$

Promjena temperature optičkih komponenti laserskog interferometra tijekom provođenja mjerenja može uzrokovati nesigurnost mjerenja mjerne skale. Ovaj efekt očituje se na mjernoj optici u obliku promjene optičke duljine s temperaturom. Ova promjena optičke duljine nastaje zbog činjenice da dvije komponente laserskog snopa (horizontalno i vertikalno polarizirana) prolaze kroz različite duljine stakla.

Naime, mjerna komponenta laserskog snopa f_A prolazi kroz puno više stakla od referentne komponente laserskog snopa f_B. Kako se mijenja temperatura optičkih komponenti tako se mijenja i sama veličina optičkih komponenti. S promjenom veličine dolazi do promjene i indeksa loma svjetlosti same optičke komponente. Ovaj tip laserskog interferometra ima tipičnu promjenu duljine uslijed temperature u iznosu od k_{opt} = 0,5 µm/ºC [17]. Nesigurnost mjerne optike fiksna je vrijednost i nije ovisna o mjerenoj duljini već je samo ovisna o promjeni temperature tijekom provođenja mjerenja. Za maksimalnu promjenu temperature u iznosu od 0,2 ºC tijekom provođenja mjerenja i uz pretpostavku pravokutne razdiobe, nesigurnost mjerne optike uslijed promjene temperature u tom slučaju iznosi:

$$u(\delta l_{opt}) = \frac{0{,}2}{\sqrt{3}} \cdot k_{opt} = \frac{0{,}2^{\circ}C}{\sqrt{3}} \cdot 0{,}5\mu m/^{\circ}C = 0{,}058\ \mu m = 58\ \text{nm} \tag{11.48}$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\delta L_{opt}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta l_{opt}} = 1 \tag{11.49}$$

11.2.13 Nesigurnost temperature mjerne skale $u(\Delta t_s)$

Ukoliko se temperatura umjeravanja mjerne skale razlikuje od 20 ºC, u tom je slučaju potrebno provođenje temperaturne korekcije. Temperaturna korekcija provodi se direktno u Renishaw softverskom paketu za mjerenje i ima određenu mjernu nesigurnost koju je potrebno odrediti. Mjerna skala slobodno leži oslonjena na osloncima prihvata za mjernu skalu. Pošto mjerna skala slobodno leži na osloncima, nije moguće direktno mjerenje temperature mjerne skale već se provodi mjerenje temperature oslonca na kojemu leži mjerna skala.

Nesigurnost razlike temperature mjerne skale od 20 ºC uključuje dvije komponente i to nesigurnost očitanja temperature $u(t_{oč})$ i nesigurnost umjeravanja termometra $u(t_{umj})$.

Stoga nesigurnost temperature mjerne skale iznosi:

$$u_c(\Delta t_s) = \sqrt{u(t_{oč})^2 + u(t_{umj})^2} \tag{11.50}$$

Renishaw EC 10 jednica za mjerenje temperature ima rezoluciju od 0,01 ºC. Ukoliko se pretpostavi pravokutna razdioba, nesigurnost očitanja temperature iznosi:

$$u(t_{oč}) = \frac{0{,}01}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}0029 \text{ ºC} \tag{11.51}$$

Iz potvrde o umjeravanju Renishaw No: G112343/20011220 standardna nesigurnost umjeravanja termometra iznosi 0,12 ºC , k=1 pa je nesigurnost temperature mjerne skale jednaka:

$$u_c(\Delta t_s) = \sqrt{0{,}0029^2 + 0{,}12^2} = 0{,}12 \text{ ºC} \tag{11.52}$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\Delta t_s} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \Delta t_s} = L \cdot \alpha_s \tag{11.53}$$

11.2.14 Nesigurnost linearnog koeficijenta temperaturnog rastezanja $u(\alpha_s)$

Mjerne skale su uglavnom izrađene od stakla i staklokeramike koji imaju jako nizak linearni koeficijent temperaturnog rastezanja α_s. Linearni koeficijent temperaturnog rastezanja mjerne skale dobije se od proizvođača mjerne skale. Za upotrebljavanu NPL-ovu mjernu skalu linearni koeficijent temperaturnog rastezanja iznosi $\alpha_s = 5 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}. Za mjernu skalu ovako niske razine linearnog koeficijenta temperaturnog rastezanja procjenjuje se da linearni koeficijent temperaturnog rastezanja leži s istom vjerojatnošću u intervalu $\pm 0{,}5 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}[2]. Stoga standardna nesigurnost linearnog koeficijenta temperaturnog rastezanja $u(\alpha_s)$ iznosi:

$$u(\alpha_s) = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 0{,}289 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1} \tag{11.54}$$

Koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_{\alpha_s} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \alpha_s} = L \cdot \Delta t \tag{11.55}$$

Mjerenje se provode ukoliko odstupanje temperature od 20 ºC iznosi maksimalno $\pm 0{,}5$ ºC pa tada koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\alpha_s} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \alpha_s} = L \cdot 0{,}5 \text{ K} \tag{11.56}$$

11.2.15 Nesigurnost obnovljivosti viziranja sredine linije $u(\delta L_{sE})$

Viziranje linije mjerne skale, odnosno pronalazak sredine linije mjerne skale provodi se uz pomoć softvera koji je opisan u poglavlju 4.2. Kako softver za obradu slike dobivenu sliku sa CCD kamere prebacuje u sivu sliku s 256 nivoa, te se kroz takvu sliku linije provlači srednja razdioba intenziteta na kojoj se uzimaju referentne linije koje se nalaze na 50 % intenziteta, potrebno je istražiti koliko iznosi obnovljivost pronalaska sredine linije uz pomoć ovog softvera. Softver daje udaljenost sredine linije u pikselima od srednje linije ekrana. Kako bi se udaljenost u pikselima prebacila u duljinske vrijednosti neophodno je provođenje kalibracije veličine piksela, odnosno uspostavljanje veze između broja piksela i vrijednosti duljine. Iz navedenog proizlazi da je mjerna nesigurnost obnovljivosti viziranja sredine linije jednaka:

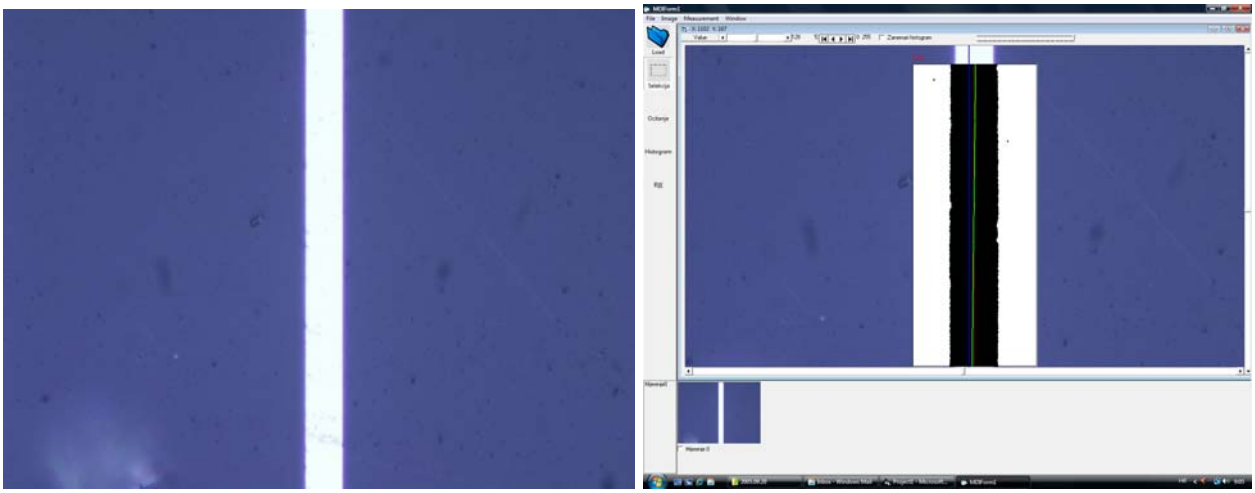
$$u(\delta L_{sE}) = \sqrt{u(\delta l_{viz})^2 + u(\delta L_{sredpix})^2} \tag{11.57}$$

Gdje su:

δl_{viz} - obnovljivost pronalaska sredine linije

$\delta L_{sredpix}$ - nesigurnost udaljenosti sredine linije od sredine ekrana

Kako bi se pronašao utjecaj pronalaska sredine mjerne linije na mjernu nesigurnost, uz pomoć softvera je provedeno istraživanje na način da je slučajno odabrana jedna linija NPL mjerne skale (slika 122.), te je vizirana s objektivom 50 puta koji se upotrebljava u postupku umjeravanja navedene mjerne skale. Kada je linija u fokusu, slika se sprema te se pristupa pronalasku sredine linije uz pomoć softvera.



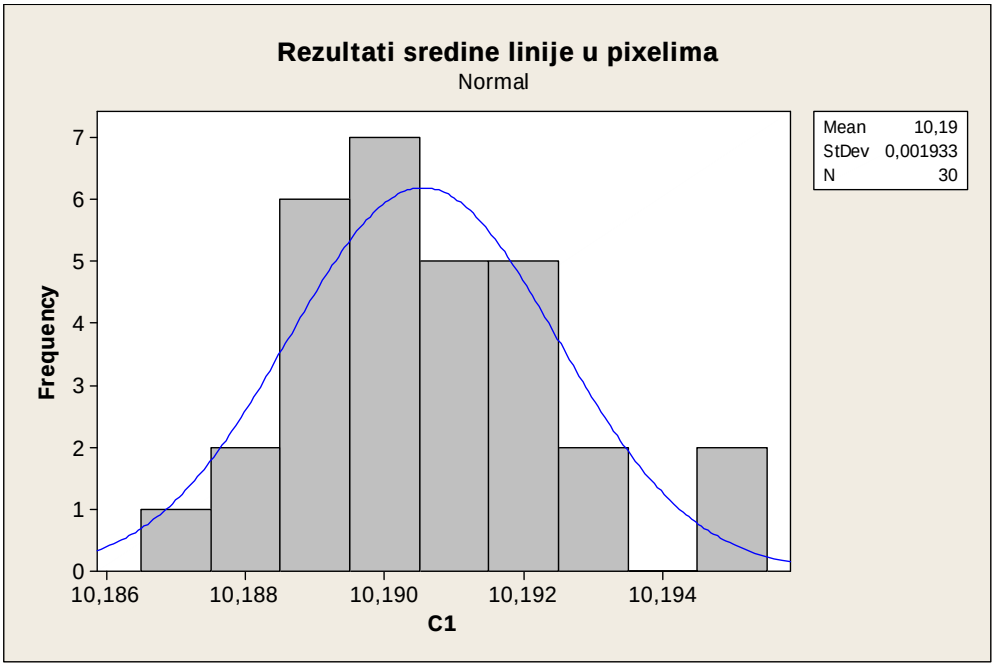
Slika 122. a) Detalj vizirane linije, b) vizirana linija u softveru za pronalazak sredine linije

U svrhu istraživanja obnovljivosti pronalaska sredine linije, provedeno je 30 očitavanja pronalaska sredine linije spremljene slike. Iznosi očitanja su izraženi u pikselima.
U provedenih 30 očitavanja sredine linije dobiveni su rezultati prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati očitanja sredine linije

Redni broj	Očitanje	Redni broj	Očitanje	Redni broj	Očitanje
1.	10,1929	11.	10,1895	21.	10,1892
2.	10,1953	12.	10,1892	22.	10,1913
3.	10,1914	13.	10,1895	23.	10,1911
4.	10,1919	14.	10,1890	24.	10,1915
5.	10,1895	15.	10,1887	25.	10,1950
6.	10,1917	16.	10,1892	26.	10,1914
7.	10,1901	17.	10,1892	27.	10,1917
8.	10,1898	18.	10,1881	28.	10,1931
9.	10,1898	19.	10,1872	29.	10,1908
10.	10,1895	20.	10,1878	30.	10,1922

Slika 123. prikazuje dobivene rezultate u obliku histograma. Sa slike 123. je vidljivo da su rezultati donekle raspoređeni prema normalnoj razdiobi te da aritmetička sredina dobivenih rezultata iznosi 10,1905 piksela, a procijenjeno standardno odstupanje iznosi s_{viz}=0,00193 piksela.



Slika 123. Dobiveni rezultati sredine vizirane linije

Za objektiv povećanja 50 puta, duljinska vrijednost jednog piksela iznosi 128 nm, s obnovljivošću od s_{pix} = 0,2 nm.

Mjerna nesigurnost pronalaska sredine linije iznosi :

$$u(\delta L_{viz}) = \frac{s_{viz}}{\sqrt{n}} = 0{,}00193 \text{ pixela} \tag{11.58}$$

Kako za objektiv povećanja 50 puta duljinska vrijednost jednog piksela iznosi 128 nm, mjerna nesigurnost pronalaska sredine linije uz pomoć softvera onda iznosi $u(\delta L_{viz}) = 0{,}25$ nm.

Kako se udaljenost sredine linije od sredine ekrana dodaje ili oduzima od vrijednosti očitane na interferometru, pri izvođenju mjerenja potrebno je što bliže postavljanje sredine linije mjerne skale sredini ekrana kako bi korekcija koja se provodi bila što manja.

Pri provođenju mjerenja procjenjuje se da bi maksimalno odstupanje sredine linije od sredine ekrana moglo iznositi 100 piksela. Tada je mjerna nesigurnost udaljenosti sredine linije od sredine ekrana uz pretpostavku pravokutne razdiobe jednaka:

$$u(\delta L_{sredpix}) = \frac{100}{\sqrt{3}} = 57{,}8 \text{ piksela} \tag{11.59}$$

Odnosno kako je obnovljivost duljinske vrijednosti piksela jednaka 0,2 nm, onda mjerna nesigurnost udaljenosti sredine linije od sredine ekrana iznosi

$$u(\delta L_{sredpix}) = 57{,}8 \cdot 0{,}2 = 11{,}55 \text{ nm} \tag{11.60}$$

Mjerna nesigurnost obnovljivosti viziranja sredine linije sada je jednaka:

$$u(\delta L_{sE}) = \sqrt{u(\delta l_{viz})^2 + u(\delta L_{sredpix})^2} = \sqrt{0{,}25^2 + 11{,}55^2} = 11{,}55 \text{ nm} \tag{11.61}$$

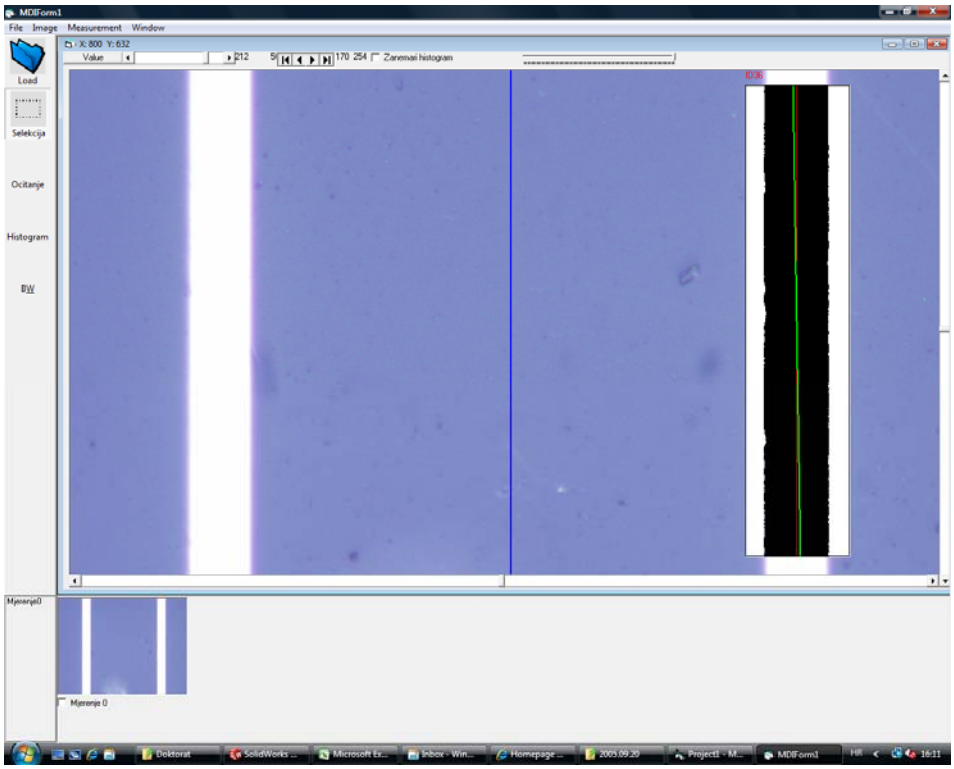
Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\delta e_{fok}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta L_{sE}} = 1 \tag{11.62}$$

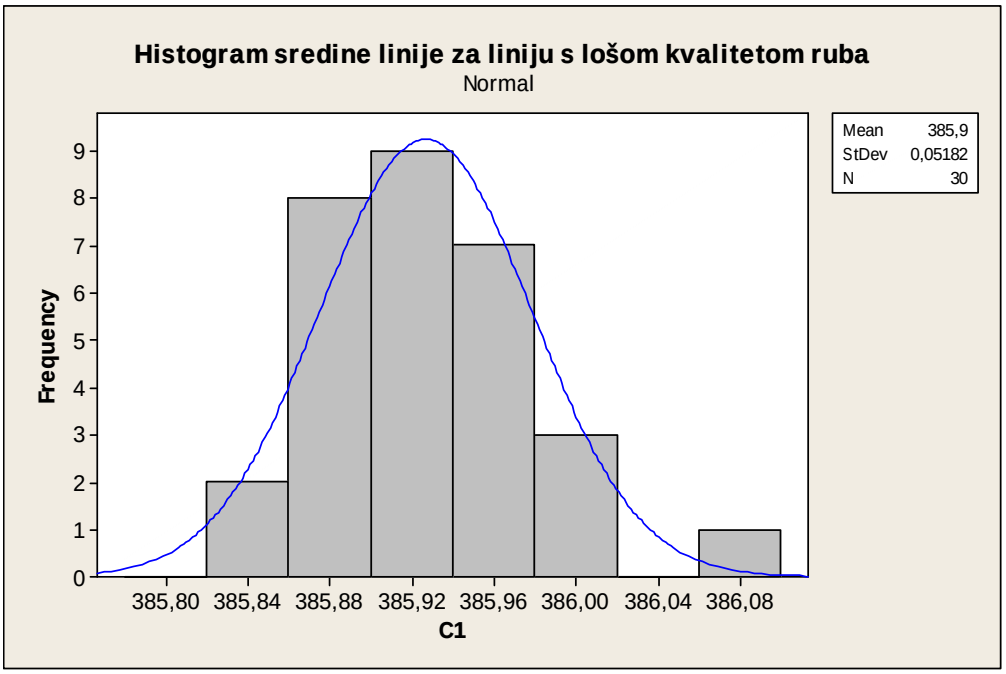
11.2.16 Nesigurnost zbog utjecaja kvalitete ruba linije $u(\delta E_{alg})$

Kako je već opisano, softver za pronalazak sredine linije mjerne skale kroz svaku liniju provlači srednju razdiobu inteziteta na kojoj se uzimaju referentne linije koje se nalaze na 50% inteziteta. Zbog samog načina pronalaska sredine linije mjerne skale, implicira da će sredina linije lošijeg ruba imati veću varijabilnost, odnosno pronađena sredina linije će zbog lošije kvalitete ruba varirati lijevo i desno oko srednje vrijednosti.

Kako bi se procijenila varijabilnost sredine linije zbog lošije kvalitete ruba same linije, izabrana je linija s naočigled lošijim rubom te je provedeno trideset očitavanja pronalaska sredine linije uz pomoć softvera. Iznosi očitanja su izraženi u pikselima i prikazani su na slici 124.



Slika 124. Vizirana linija s lošijom kvalitetom ruba u softveru za pronalazak sredine linije



Slika 125. Rezultati sredine vizirane linije s lošijom kvalitetom ruba

Sa slike 125. je vidljivo da je rasipanje rezultata sredine linije s lošom kvalitetom ruba puno veće nego kod linije s dobrom kvalitetom ruba te je jasno da kvaliteta ruba linije utječe na pronalazak sredine linije. Procijenjeno standardno odstupanje dobivenih rezultata sredine linije iznosi s_{viz}=0,05 pixela. Kako za objektiv povećanja 50 puta, duljinska vrijednost jednog piksela iznosi 128 nm, onda mjerna nesigurnost zbog utjecaja kvalitete ruba linije iznosi :

$$u(\delta E_{alg}) = \frac{s_{viz}}{\sqrt{n}} = 0{,}05 \cdot 128 = 6{,}4 \ \text{nm} \tag{11.63}$$

Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\delta e_{fok}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta E_{alg}} = 1 \tag{11.64}$$

11.2.17 Nesigurnost uslijed utjecaja oslonaca na savijanje mjerne skale $u(\delta L_{ai})$

Britanski znanstvenik H. Kater još je davne 1826. godine istraživao utjecaj gravitacije na promjenu duljine novog "yard" standarda. Njemački znanstvenik Bessel je 1839. godine objavio kompletnu analizu utjecaja gravitacije pri implementaciji novog pruskog standarda duljine. Kako se navodi u [6], u tim izračunima Bessel radi distinkciju između slučajeva kada se linije nalaze na površini mjerne skale i slučaja kada su linije na neutralnoj liniji. Za prvi slučaj kada su linije na površini skale, došao je do zaključka da će promjena duljine između dviju linija na krajevima skale biti najmanja ukoliko je odnos udaljenosti oslonaca od krajeva skale i duljine skale jednak 0,2113 i taj način oslanjanje se naziva oslanjanje u "Airy" točkama.

Za drugi slučaj, kada su linije na neutralnoj liniji taj odnos iznosi 0,22031 te se taj način oslanjanja mjerne skale naziva oslanjanje u Besselovim točkama.

Bitno je napomenuti da oslanjanje skale u "Airy" točkama vodi mnogo većem progibu skale nego kada je skala oslonjena u Besselovim točkama.

Maksimalni progib skale oslonjene u "Airy" točkama prema [6] iznosi:

$$w_{max} = \frac{(9-4\sqrt{3})\cdot g \cdot L^4 \cdot \rho}{288 \cdot E \cdot H^2} \tag{11.65}$$

Gdje su:

L - duljina mjerne skale, mm

g - gravitacija, m/s^2

H - visina skale, mm

ρ - gustoća skale, g/cm^3

E - Youngov modul elastičnosti, kN/mm^2

Za NPL-ovu mjernu skalu duljine 100 mm i visine 2,5 mm taj progib iznosi oko 40 nm.

Ukoliko je varijacija oslonca ± 1 mm, što se prostim okom lako može postaviti, promjena duljine za mjernu skalu oslonjenu u "Airy" točkama prema [6] iznosi 0,01L nm, gdje je L u mm. Prema tome mjerna nesigurnost uslijed utjecaja oslonaca na savijanje mjerne skale u tom slučaju iznosi:

$$u(\delta L_{ai}) = \frac{0{,}01 \cdot L}{\sqrt{3}} = 0{,}0058 \cdot L \text{ nm, L u mm} \tag{11.66}$$

Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\delta L_{ai}} = \frac{\partial L_{MS}}{\partial \delta L_{ai}} = 1 \tag{11.67}$$

11.2.18 Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(L_{MS})$ i proširena mjerna nesigurnost $U(L_{MS})$

Sastavnice mjerne nesigurnosti u postupku umjeravanja mjerne skale prikazane su u tablici 8. Sastavljena standardna mjerna nesigurnost $u_c(L_{MS})$ jednaka je drugom korijenu iz sume kvadrata navedenih utjecaja i iznosi:

$$u_c(L_{MS}) = \sqrt{65^2 + 0{,}5^2 \cdot L^2} \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{11.68}$$

Linearizacijom izraza s obzirom na duljinu od 300 mm, sastavljena standardna nesigurnost $u_c(L_{MS})$ može se napisati u obliku:

$$u_c(L_{MS}) = (65 + 0{,}33 \cdot L) \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{11.69}$$

Linearizirana proširena mjerna nesigurnost iznosi:

$$\boldsymbol{U(L_{MS}) = (130 + 0{,}66 \cdot L) \text{ nm, } L \text{ u mm; } k = 2, P = 95\%} \tag{11.70}$$

Iskazana mjerna nesigurnost je procijenjena za NPL mjernu skalu koja ima koeficijent temperaturnog rastezanja $\alpha = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}. Za mjerne skale s većim koeficijentom temperaturnog rastezanja potrebno je procijeniti mjernu nesigurnost s koeficijentom temperaturnog rastezanja te će tada i mjerna nesigurnost umjeravanja takove mjerne skale biti veća.

Tablica 8. Sastavnice standardne mjerne nesigurnosti modificiranog sustava

Sastavnica i izvor stand. nes. x_i	**Distr.**	**Iznos standardne nes. $u(x_i)$**	**Koeficijent osjetljivosti, $c_i = \partial dL / \partial x_i$**	**Doprinos mj. nesig., u_i (dL) / nm, L u mm**
Abbeov odmak u z i zakret stola, δl_{Az}	R	16,8	1	16,8
Abbeov odmak u y i skretanje stola, δl_{Ay}	R	4,3	1	4,3
Valna duljina interferometra, $\delta\lambda$	R	0,03	L	0,03L
Temperatura zraka, t_{air}	R	0,12 ° C	$9{,}5\cdot10^{-7}$ L/°C	0,112·L
Tlak zraka, p_{air}	R	13 Pa	$2{,}7\cdot10^{-7}$ L/Pa	0,035·L
Relativna vlažnost, RH_{air}	R	0,06	$8{,}5\cdot10^{-7}$ L	0,050·L
Nesigurnost Edlenove jednadžbe, δn_{air}	N	$2\cdot10^{-8}$	L	0,020·L
Utjecaj mrtvog hoda, δl_{DP}	R	1,8	1	1,8
Nelinearnost interferometra, δl_{NL}	U	3	1	3
Kosinus pogreška interferometra, δl_{li}	R	0,48L	1	0,48·L
Razlika temperature skale od 20 °C, Δt_s	N	0,12 ° C	$5\cdot10^{-7}L$/K	0,06·L
Koeficijent temperaturnog rastezanja, α_s, K^{-1}	R	$0{,}289\cdot10^{-7}$	L·0,5 K	0,0145·L
Suosnost skale u horiz. ravnini, δl_{Sh}	R	0,001L	1	0,001·L
Suosnost skale u vertik. ravnini, δl_{SV}	R	0,0023L	1	0,0023·L
Utjecaj oslonaca na duljinu mjerne skale, δl_{ai}	R	0,0058L	1	0,0058·L
Utjecaj kvalitete ruba linije, δ_{Ealg}	N	6,4	1	6,4
Gubitak fokusa, δe_{fok}	N	18	1	18
Nesigurnost mjerne optike, δl_{opt}	R	58	1	58
Očitanje interferometra, N	R	0,003	$\lambda/2$	1
Obnovljivost viziranja sredine linije, δl_{SE}	N	11,6	1	11,6
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost			**$u^2 = (65^2 + 0{,}5^2\cdot L^2)$ nm, L u mm**	
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, P=95%, k=2			**$U = (130 + 0{,}66\cdot L)$ nm, L u mm**	

11.3 PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI MONTE CARLO SIMULACIJAMA

Nakon što je postavljen matematički model mjerenja u poglavlju 18.2 i nakon što su detaljno analizirane sve sastavnice mjerne nesigurnosti u poglavlju 18.3, moguće je provesti proračun mjerne nesigurnosti Monte Carlo simulacijom, te odrediti najznačajnije doprinose mjernoj nesigurnosti umjeravanja mjernih skala. Kako bi se odredili najznačajniji doprinosi funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine L_{MS}, simulirat će se MCS metodom prema postavljenom matematičkom modelu u 11.1 koji glasi:

$$L_{MS} = L \cdot n_{air} + (N_2 - N_1)\frac{\lambda}{2} - (\delta l_{n2} - \delta l_{n1}) + \delta l_{DP} + \delta l_{li} + \delta l_{Az} + \delta l_{Ay} + L \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s + \delta l_{sh} + \delta l_{sv} +$$
$$+ \delta l_{ai} + \delta E_{alg} + \delta e_{fok} + \delta l_{opt} + \delta l_{sE}$$

Gdje su:

$$n_{air} = 1 - 3{,}634 \cdot 10^{-10} \cdot h \cdot e^{AT^2 + BT + C + DT^{-1}} + \delta_e + \frac{2{,}878 \cdot 10^{-9} \cdot p \cdot \left[1 + 10^{-8}(0{,}601 - 0{,}00972 \cdot t) \cdot p\right]}{1 + 0{,}0036610 \cdot t}$$

$$\delta l_{li} = L \cdot (1 - \cos\varepsilon) = L \cdot \left\{1 - \cos\left[\arctan\left(\frac{z}{L_{post}}\right)\right]\right\} = L \cdot \left\{1 - \cos\left[\arctan\left(\frac{z}{1500}\right)\right]\right\}$$

$$\delta l_{Az} = b \cdot \tan(\beta) = b \cdot 0{,}00003$$

$$\delta l_{Ay} = c \cdot \tan(\chi) = c \cdot 0{,}0000075$$

$$\delta l_{sh} = L \cdot (1 - \cos\gamma) = L \cdot \left\{1 - \cos\left[\arctan\left(\frac{h}{L_{MS}}\right)\right]\right\}$$

$$\delta l_{sv} = L \cdot (1 - \cos\varphi) = L \cdot \left\{1 - \cos\left[\arctan\left(\frac{d}{0{,}577 \cdot L_{MS}}\right)\right]\right\}$$

b – udaljenost između mjerne skale i snopa u Z

c – udaljenost između mjerne skale i snopa u Y

z – udaljenost među točkicama na laseru

h – odstupanje suosnosti mjerne skale u horizontalnoj ravnini

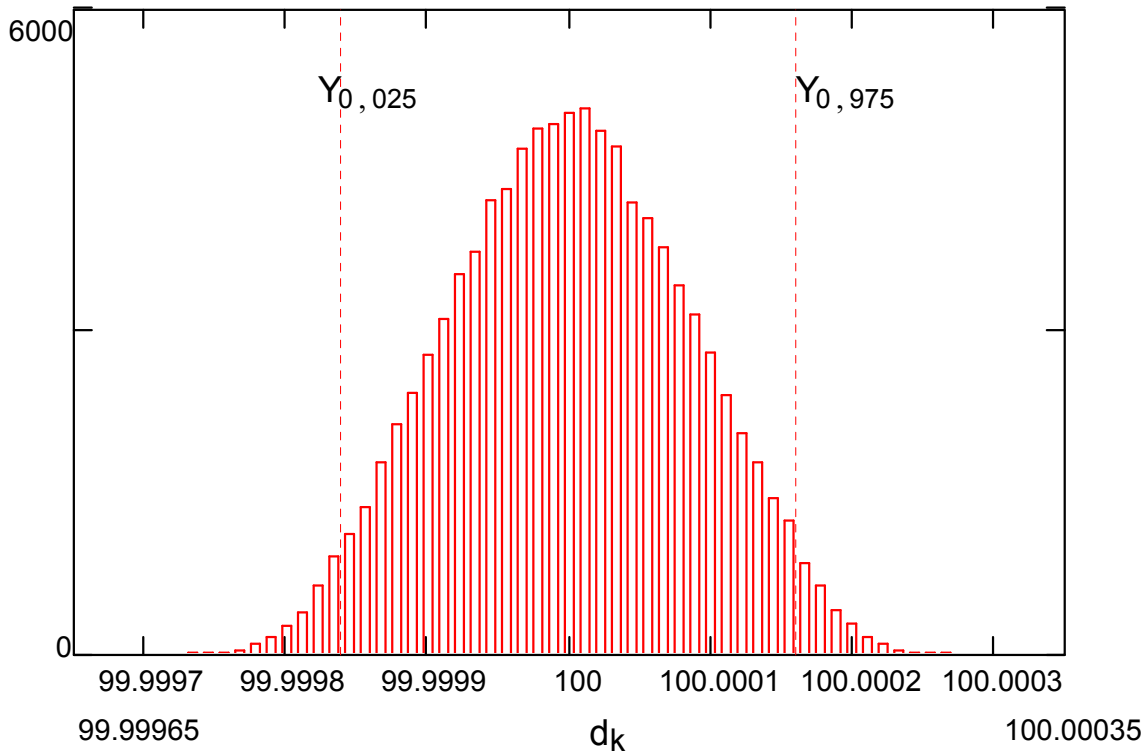
d – odstupanje suosnosti mjerne skale u vertikalnoj ravnini

Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 9.

Tablica 9. Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$

Ulazna veličina x_i		**Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$**
Indeks loma svjetlosti zraka	n_{air}	Normalna razdioba (M, 1, $1{,}26\cdot10^{-7}$)
Očitanje interferometra 2	N_2	Pravokutna razdioba (M, -0,005, 0,005)
Očitanje interferometra 1	N_1	Pravokutna razdioba (M, -0,005, 0,005)
Valna duljina izvora svjetlosti	λ	Normalna razdioba (M, $633\cdot10^{-6}$, $0.011\cdot633\cdot10^{-12}$)
Nelinearnost u poziciji 2	δl_{n2}	Arkussinus razdioba (M, $-3\cdot10^{-6}$, $3\cdot10^{-6}$)
Nelinearnost u poziciji 1	δl_{n1}	Arkussinus razdioba (M, $-3\cdot10^{-6}$, $3\cdot10^{-6}$)
Mrtvi hod	δl_{DP}	Pravokutna razdioba (M, $-1{,}8\cdot10^{-6}$, $1{,}8\cdot10^{-6}$)
Kosinus pogreška	δl_{li}	Pravokutna razdioba (M, $-L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{z}{1500})\right]\right\}$, $L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{z}{1500})\right]\right\}$)
Abbeov odmak u z i zakret stola	δl_{Az}	Pravokutna razdioba (M, $-b\cdot0{,}00003$, $b\cdot0{,}00003$)
Abbeov odmak u y i skretanje stola	δl_{Ay}	Pravokutna razdioba (M, $-c\cdot0{,}0000075$, $c\cdot0{,}0000075$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja	α_s	Pravokutna razdioba (M, 0,9·α, 1,1·α)
Razlika temperature skale od 20 °C	Δt_s	Normalna razdioba (M, 0 ° C, 0,12° C)
Suosnost skale u horizontalnoj ravnini	δl_{sh}	Pravokutna razdioba (M, $-L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{h}{L_{MS}})\right]\right\}$, $L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{h}{L_{MS}})\right]\right\}$)
Suosnost skale u vertikalnoj ravnini	δl_{sv}	Pravokutna razdioba (M, $-L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{d}{0{,}577\cdot L_{MS}})\right]\right\}$, $L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{d}{0{,}577\cdot L_{MS}})\right]\right\}$)
Utjecaj oslonaca na duljinu skale	δl_{ai}	Pravokutna razdioba (M, $-0{,}01\cdot L\cdot10^{-6}$, $0{,}01\cdot L\cdot10^{-6}$)
Utjecaj kvalitete ruba linije	δE_{alg}	Normalana razdioba (M, 0, $6{,}4\cdot10^{-6}$)
Gubitak fokusa	δe_{fok}	Normalana razdioba (M, 0, $18\cdot10^{-6}$)
Nesigurnost mjerne optike	δl_{opt}	Pravokutna razdioba (M, $-100\cdot10^{-6}$, $100\cdot10^{-6}$)
Obnovljivost viziranja sredine linije	δl_{sE}	Normalna razdioba (M, $0{,}11{,}6\cdot10^{-6}$)

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(L_{MS})$ dobivena je uz M = 100000 simulacija i sljedeće ulazne parametre z = 2 mm, b = 1 mm, c = 1 mm, h = 0,005 mm, d = 0,005 mm, $u(t)$ = 0,12 ºC, $u(p)$ = 13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i $\alpha_{MS} = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine L_{MS} za mjernu skalu duljine 100 mm prikazana je na slici 126.



Slika 126. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm

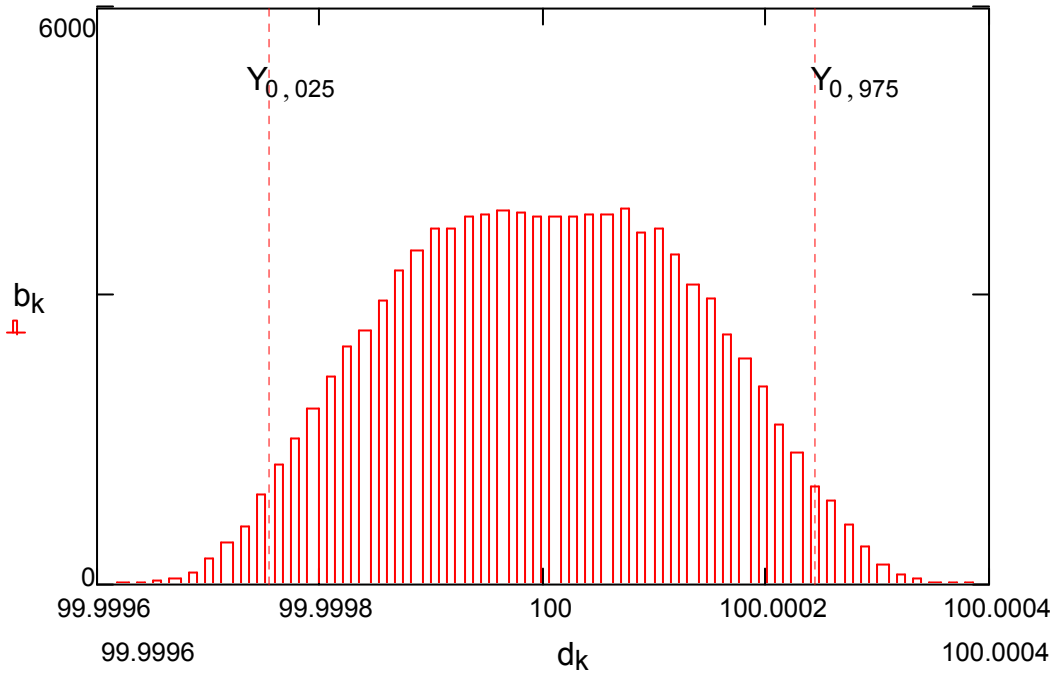
Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm iznosi 84 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 99{,}99983996 \text{ mm};\ Y_{0,975} = 100{,}000159942 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95\ \%.$$

Odnosno proširena mjerna nesigurnost iznosi U = 160 nm.

11.3.1 Određivanje najznačajnijih utjecaja mjerne nesigurnosti umjeravanja mjernih skala

Kako bi se odredili najznačajniji doprinosi funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine L_{MS} simulirat će se uz različite ulazne parametre. Za ulazne parametre z = 2 mm, b = 1 mm, c = 1 mm, h = 0,005 mm, d = 0,005 mm, $u(t)$ = 0,12 ºC, $u(p)$ = 13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i $\alpha_{MS} = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} simulacija je već provedena i prikazana je na slici 126. Ukoliko se promijeni udaljenost između točkica referentnog i mjernog snopa na glavi lasera sa z = 2 mm na z = 3 mm onda funkcija gustoće vjerojatnosti izgleda kako je prikazano na slici 127.



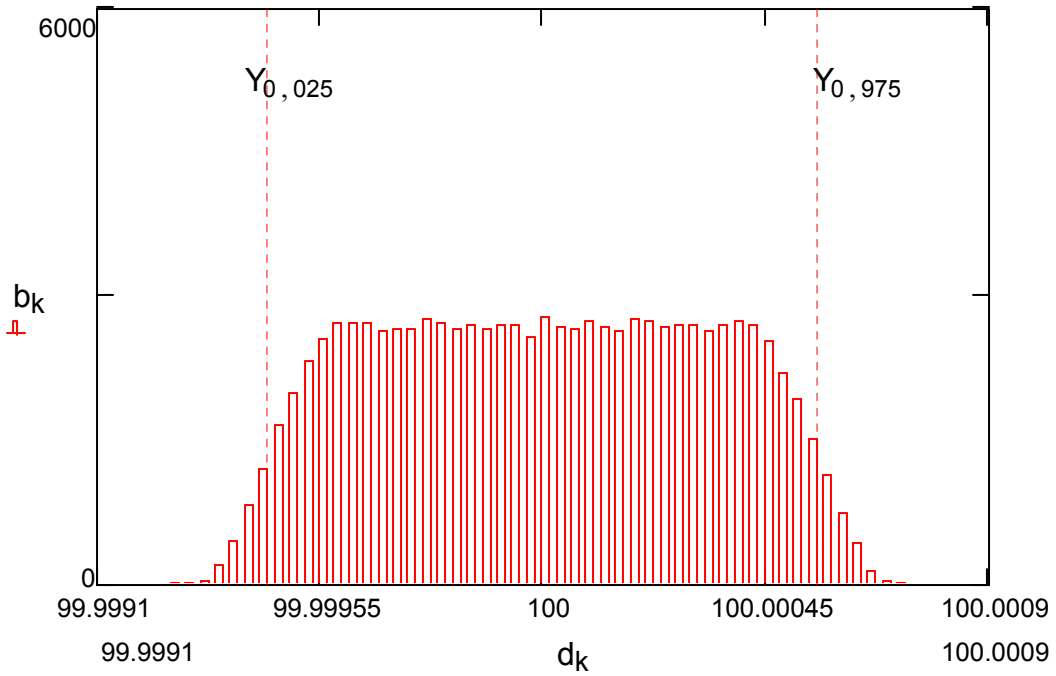
Slika 127. Funkcija gustoće vjerojatnosti g(L_{MS}) za mjernu skalu duljine 100 mm, z = 3 mm

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm i udaljenosti između točkica referentnog i mjernog snopa na glavi lasera z = 3 mm iznosi 133 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 99{,}99975539 \text{ mm};\ Y_{0,975} = 100{,}000245649 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95\ \%$$

koji je širi za 85 nm.

Ukoliko se udaljenost između točkica referentnog i mjernog snopa postavi na *z* = 5 mm što je maksimalna vrijednost jer je promjer povratne mete na laseru jednak 5 mm, onda funkcija gustoće vjerojatnosti izgleda kako je prikazano na slici 128. Sa slike je vidljivo da izlazna razdioba nije normalna već trapezna.



Slika 128. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, *z* = 5 mm

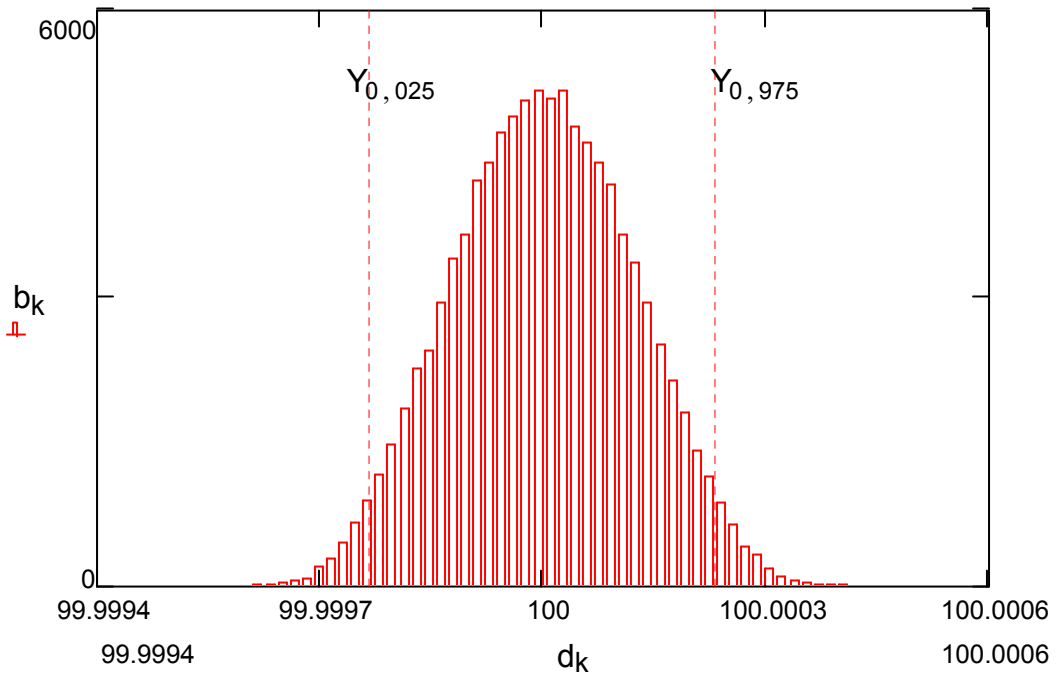
Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm i s = 5 mm iznosi 328 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 99{,}99944428 \text{ mm};\ Y_{0,975} = 100{,}000556157 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95\ \%$$

koji je gotovo širi 400 nm od intervala gdje je *z* = 2 mm.

Iz provedenih simulacija je vidljivo da kosinus greška značajno doprinosi mjernoj nesigurnosti te je potrebno provesti jako dobro postavljanje suosnosti laserskog snopa i pokretnog stola.

Ukoliko se poveća udaljenost između mjernog snopa i skale u obje ravnine s 1 mm na 5 mm, odnosno ukoliko se funkcija gustoće vjerojatnosti simulira uz sljedeće parametre z = 2 mm, b = 5 mm, c = 5 mm, h = 0,005 mm, d = 0,005 mm, $u(t)$ = 0,12 ºC, $u(p)$ =13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i α_{MS} = $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} onda funkcija gustoće vjerojatnosti izgleda kako je prikazano na slici 129.



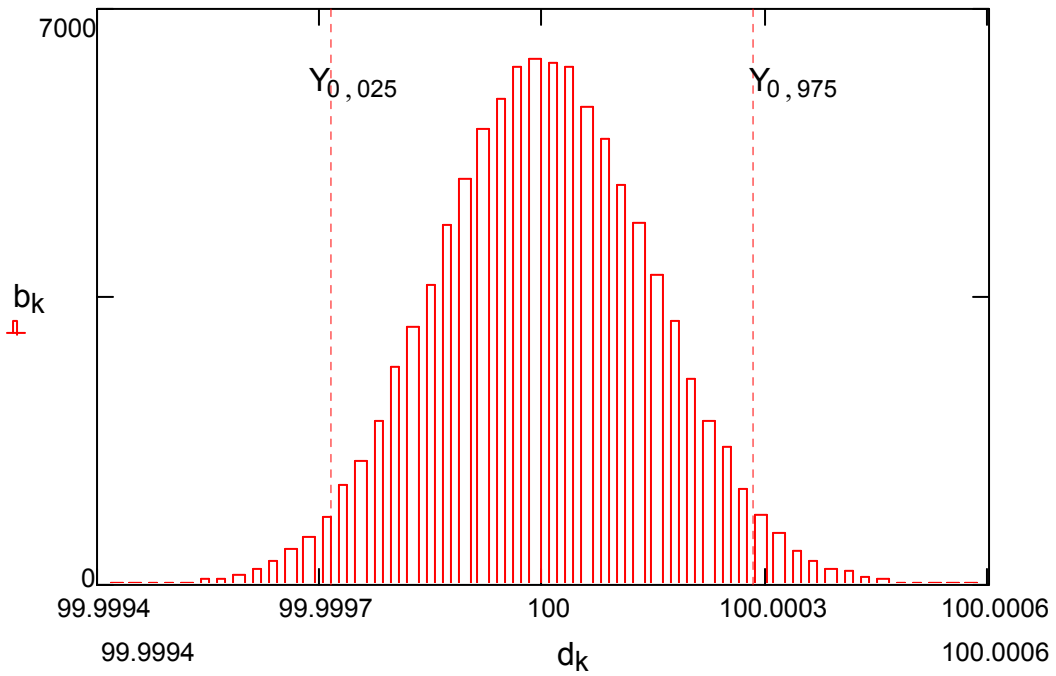
Slika 129. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, b = 5 mm, c = 5 mm

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm i z = 2 mm, b = 5 mm, c = 5 mm, h = 0,005 mm, d = 0,005 mm, $u(t)$ = 0,12 ºC, $u(p)$ = 13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i α_{MS} = $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} iznosi 120 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 99{,}99976855 \text{ mm}; Y_{0,975} = 100{,}00023162 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95\ \%$$

U ovom slučaju interval je širi za 70 nm te utjecaj Abbeovog odmaka u Y i Z ravnini nema značajan utjecaj kao kosinus pogreška.

Ukoliko se promjeni koeficijent temperaturnog rastezanja sa α_{MS} = 0,5·10^{-6} K^{-1} na α_{MS}=10·10^{-6} K^{-1} funkcija gustoće vjerojatnosti izgleda kako je prikazano na slici 130.



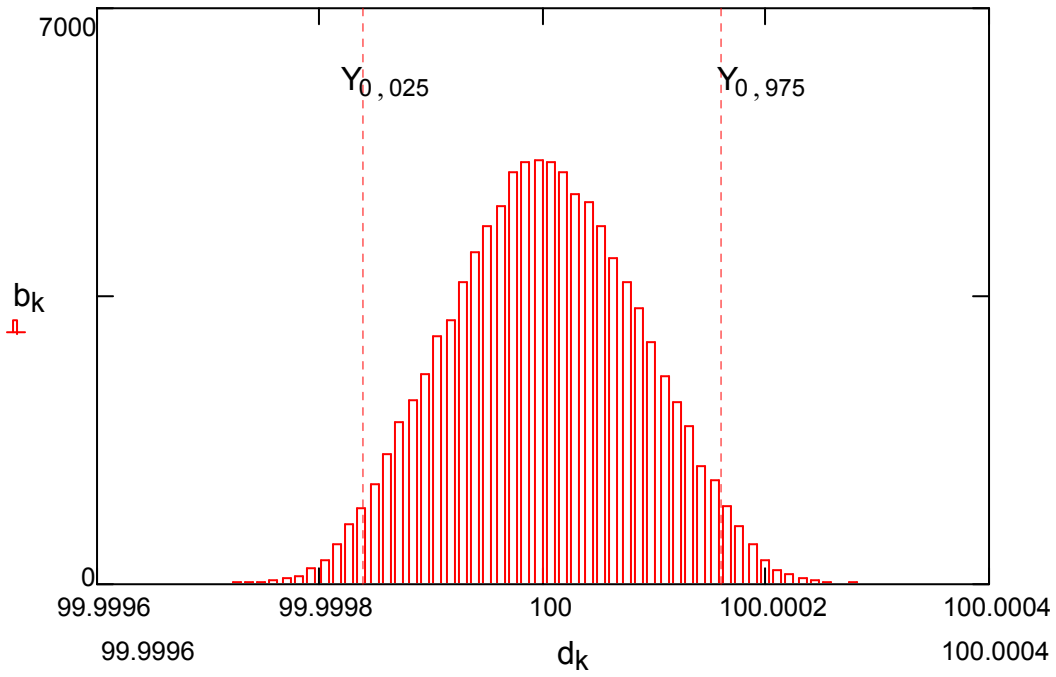
Slika 130. Funkcija gustoće vjerojatnosti g(L_{MS}) za mjernu skalu duljine 100 mm, α_{MS}=10·10^{-6} K^{-1}

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm i z = 2 mm, b = 1 mm, c = 1 mm, h = 0,005 mm, d = 0,005 mm, $u(t)$ =0,12 ºC, $u(p)$ = 13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i α_{MS} = 10·10^{-6} K^{-1} iznosi 145 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

($Y_{0,025}$ = 99,99971653 mm; $Y_{0,975}$ = 100,000284615 mm) uz P = 95%

Mjerna nesigurnost povećala se za 120 nm te je jasno da koeficijent temperaturnog rastezanja ima značajan utjecaj na mjernu nesigurnost naročito kod mjernih skala većih duljina.

Ukoliko se poveća odstupanje suosnosti mjerne skale u obje ravnine s 0,005 mm na 0,030 mm funkcija gustoće vjerojatnosti izgleda kako je prikazano na slici 131.



Slika 131. Funkcija gustoće vjerojatnosti g(L_{MS}) za mjernu skalu duljine 100 mm, h=0,03 mm, d=0,03 mm

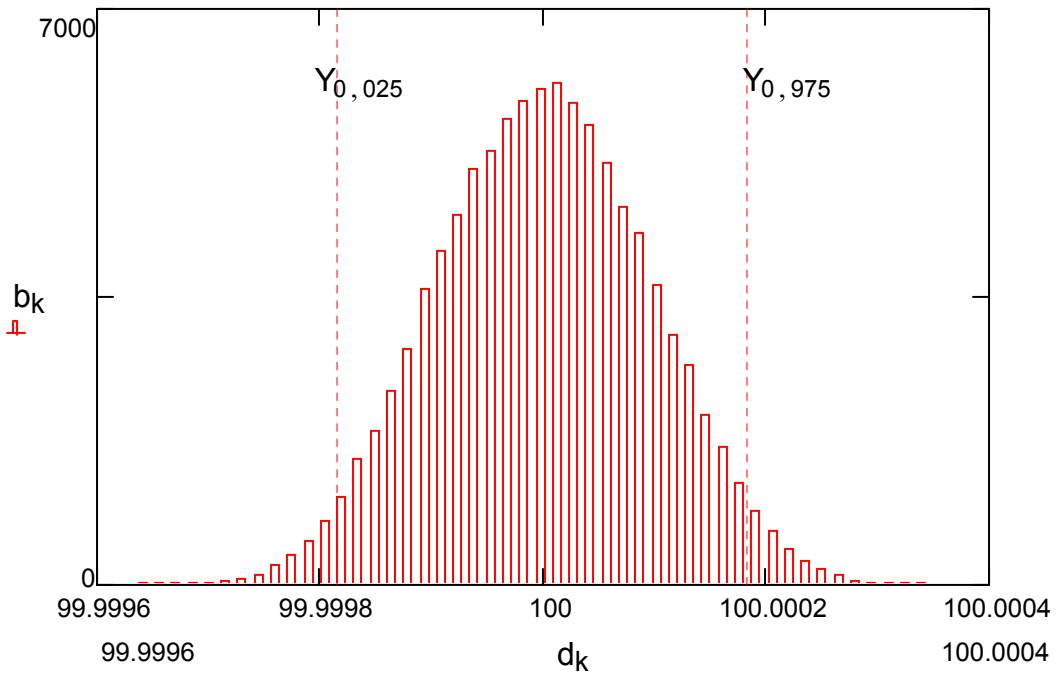
Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm i z = 2 mm, b = 1 mm, c = 1 mm, h = 0,03 mm, d = 0,03 mm, $u(t)$ = 0,12 ºC, $u(p)$ = 13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i $\alpha_{MS} = 10 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} iznosi 84 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 99{,}999839 \text{ mm}; Y_{0,975} = 100{,}000161 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95\ \%$$

Mjerna nesigurnost se nije promijenila i iznosi 160 nm te je sada jasno da suosnost mjerne skale ne doprinosi značajno mjernoj nesigurnosti kao kosinus pogreška ili koeficijent temperaturnog rastezanja skale.

Ukoliko se poveća nesigurnost mjerenja temperature sa $u(t)$ = 0,12 ºC na $u(t)$ = 0,5 ºC funkcija gustoće vjerojatnosti se značajno ne mijenja i izgleda kako je prikazano na slici 132. U tom slučaju procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 100 mm iznosi 95 nm, a izlazna veličina L_{MS} se nalazi unutar intervala:

($Y_{0,025}$ = 99,999817 mm; $Y_{0,975}$ = 100,000183 mm) uz P = 95 %



Slika 132. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 100 mm, u(t)=0,5 ºC

Mjerna nesigurnost se povećala za svega 23 nm, što implicira da nesigurnost mjerenja temperature nema značajan utjecaj na mjernu nesigurnost umjeravanja mjerne skale.

12. USPOREDBENO MJERENJE MJERNE SKALE DULJINE 300 mm

Nakon izvrsnih rezultata postignutih u usporedbenom mjerenju EURAMET projekt 882, EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7, "Calibration of line scales" gdje je mjerena mjerna skala duljine 100 mm, a kako bi se potvrdile sposobnosti sustava za umjeravanje mjernih skala pri umjeravanju duljih mjernih skala, provedeno je usporedbeno mjerenje mjerne skale duljine 300 mm. Prvotno je planirano usporedbeno mjerenje duljine 200 mm sa slovenskim mjeriteljskim institutom MIRS koji je u navedenom usporedbenom mjerenju također imao izvrsne rezultate i koji je također sam razvijao uređaj za umjeravanje mjernih skala. Kako ni LFSB ni MIRS ne posjeduju mjernu skalu dulju od 100 mm, jedan europski laboratorij izišao je u susret sa ustupanjem mjerne skale duljine 300 mm koju posjeduje. Kako MIRS posjeduje uređaj za umjeravanje mjernih skala mjernog područja do 200 mm, neformalno usporedbeno mjerenje je provedeno s europskim laboratorijem koji je i ustupio mjernu skalu i koji ima dugogodišnju tradiciju na području umjeravanja mjernih skala.

Slika 133. Mjerna skala duljine 300 mm

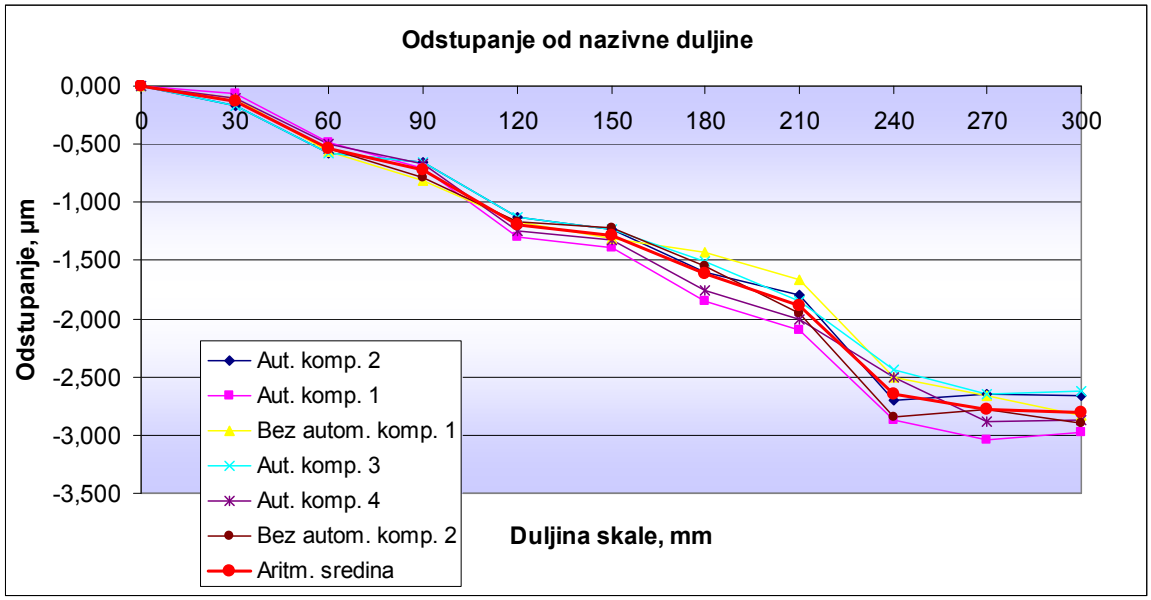
Pošto je usporedbeno mjerenje neformalnog karaktera, neće se navoditi ime tog europskog laboratorija koji je proveo mjerenja. Koeficijent temperaturnog rastezanja

mjerne skale jednak je $\alpha_{MS}=9\cdot10^{-6}$ K^{-1} što implicira da je duljina ove mjerne skale jako ovisno o temperaturi budući da se mjerne skale većinom proizvode od materijala čiji je koeficijent temperaturnog rastezanja blizak nuli. Mjerna skala je prikazana na slici 133. Zbog duljine od 300 mm, posebna pozornost je posvećena oslanjanju skale koja je oslonjena u "Airy" točkama te je potrebno jako dobro postavljanje suosnosti skale u vertikalnoj ravnini kako bi linije bile u fokusu na cijeloj duljini skale. Fokus je postavljen na linijama koje se nalaze na osloncima, te je tijekom provođenja mjerenja bio jako mali gubitak fokusa i to na sredini mjerne skale.

12.1.1 Rezultati mjerenja mjerne skale duljine 300 mm

Provedeno je šest neovisnih mjerenja s tim da je svaka linija mjerne skale mjerena deset puta što znači da je za svaku mjerenu liniju skale dobiveno 60 rezultata mjerenja. Linije su mjerene uz korak od 30 mm, što znači da je prva mjerena linija 0 mm, pa redom 30 mm, 60 mm, 90 mm i tako do 300 mm.

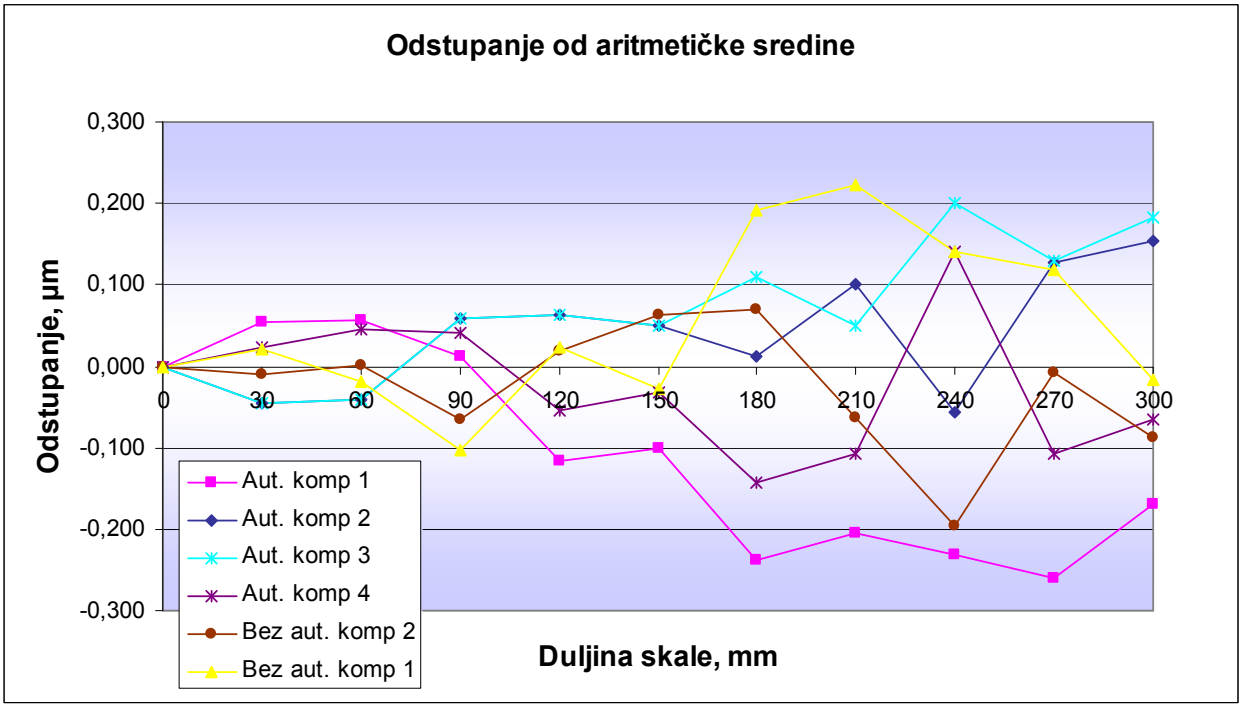
Mjerenja su provedena u roku dva tjedna. Četiri seta mjerenja provedena su uz upotrebu automatske kompenzacije temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka, a dva seta mjerenja provedena su s naknadnom temperaturnom korekcijom. Rezultati provedenih mjerenja prikazani su na slici 134.



Slika 134. Rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od nazivne duljine)

Rezultati mjerenja prikazani na slici 134. korigirani su s obzirom na pogrešku postavljanja laserskog interferometra i pokretnog stola koja se kontrolira pomoću NPL-ove mjerne skale. Stoga su rezultati na slici 134. linearno podignuti za iznos 0,0015·*L* koji je utvrđen mjerenjem NPL-ove mjerne skale jer kosinus pogreška uvijek uzrokuje negativna odstupanja, odnosno niže izmjerene vrijednosti od stvarnih.

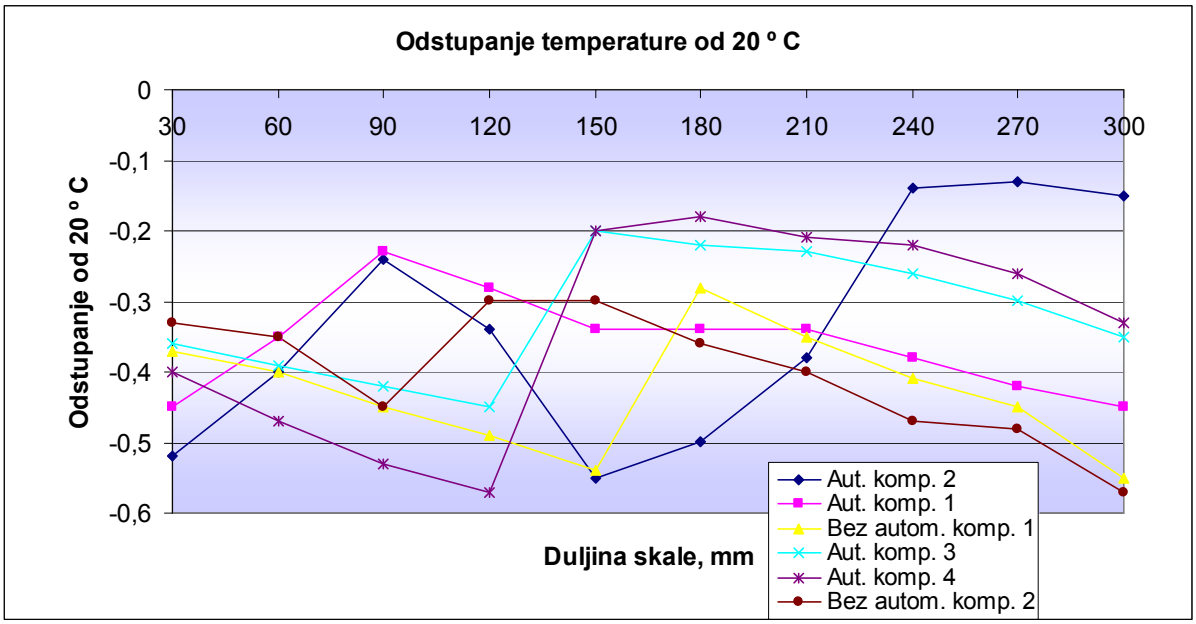
Sa slike 135. je vidljivo da svih šest setova mjerenja imaju isti trend i da nema značajnijeg rasipanja među mjerenjima. Rasipanje je u granicama od 0,5 µm i to na većim duljinama mjerne skale što se može razumno pripisati utjecaju temperature pošto je duljina ove mjerne skale jako ovisna o temperaturi.



Slika 135. Rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od aritmetičke sredine)

Tijekom provedbe mjerenja nadzirana je temperatura mjernog sustava i temperatura zraka. Kretanje temperature mjernog sustava prikazano je na slici 136. za svih šest setova mjerenja. Sa slike 136. je vidljivo da temperature tijekom provedbe mjerenja imaju isti trend. Jedino je vidljivo odstupanje kod mjerenja "Autom komp 2" pošto je to mjerenje provedeno s početnom linijom mjerenja 30 mm pa prema duljim vrijednostima, dok je ostalih pet setova mjerenja provedeno s početnom linijom mjerenja 300 mm pa prema nižim vrijednostima.

Sa slike 136. je vidljivo da temperatura mjernog sustava ima određeni rast kako se provode mjerenja, da bi negdje na sredini mjerne skale oko 150-tog mm imala nagli pad pošto je tad prekidano mjerenje i ostavljeno je dovoljno vremena da se okolišni uvjeti normaliziraju bez utjecaja mjeritelja.



Slika 136. Odstupanje temperature od 20 º C tijekom provođenja mjerenja

12.1.2 Procjena mjerne nesigurnosti umjeravanja mjerne skale duljine 300 mm

Mjerna skala duljine 300 mm izrađena je od materijala koji ima koeficijent temperaturnog rastezanja $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$. Stoga su sastavnice mjerne nesigurnosti zbog koeficijenta temperaturnog rastezanja, te sastavnica uslijed razlike temperature mjerne skale od 20 º C, različite od sastavnica prikazanih u tablici 10. Sastavnice mjerne nesigurnosti u postupku umjeravanja mjerne skale duljine 300 mm prikazane su tablici 10.

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost $u_c(L_{MS})$ jednaka je drugom korijenu iz sume kvadrata navedenih utjecaja i iznosi:

$$u_c(L_{MS}) = \sqrt{65^2 + 1{,}2^2 \cdot L^2} \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{12.1}$$

Tablica 10. Sastavnice mjerne nesigurnosti pri umjeravanju mjerne skale duljine 300 mm

Sastavnica i izvor stand. nes. x_i	**Distr.**	**Iznos standardne nes. $u(x_i)$**	**Koeficijent osjetljivosti, $c_i = \partial dL / \partial x_i$**	**Doprinos mj. nesig., u_i (dL) / nm, L u mm**
Abbeov odmak u z i zakret stola, δl_{Az}	R	16,8	1	16,8
Abbeov odmak u y i skretanje stola, δl_{Ay}	R	4,3	1	4,3
Valna duljina interferometra, $\delta\lambda$	R	0,03	L	0,03L
Temperatura zraka, t_{air}	R	0,12 ° C	$9{,}5\cdot10^{-7}$ L/°C	0,112·L
Tlak zraka, p_{air}	R	13 Pa	$2{,}7\cdot10^{-7}$ L/Pa	0,035·L
Relativna vlažnost, RH_{air}	R	0,06	$8{,}5\cdot10^{-7}$ L	0,050·L
Nesigurnost Edlenove jednadžbe, δn_{air}	N	$2\cdot10^{-8}$	L	0,020·L
Utjecaj mrtvog hoda, δl_{DP}	R	1,8	1	1,8
Nelinearnost interferometra, δl_{NL}	U	3	1	3
Kosinus pogreška interferometra, δl_{li}	R	0,48L	1	0,48·L
Razlika temperature skale od 20 °C, Δt_s	N	0,12 ° C	$9\cdot10^{-6}L$/K	1,08·L
Koeficijent temperaturnog rastezanja, α_s, K^{-1}	R	$5{,}196\cdot10^{-7}$	L·0,5 K	0,26·L
Suosnost skale u horiz. ravnini, δl_{Sh}	R	0,001L	1	0,001·L
Suosnost skale u vertik. ravnini, δl_{SV}	R	0,0023L	1	0,0023·L
Utjecaj oslonaca na duljinu mjerne skale, δl_{ai}	R	0,0058L	1	0,0058·L
Utjecaj kvalitete ruba linije, δ_{Ealg}	N	6,4	1	6,4
Gubitak fokusa, δe_{fok}	N	18	1	18
Nesigurnost mjerne optike, δl_{opt}	R	58	1	58
Očitanje interferometra, N	R	0,003	$\lambda/2$	1
Obnovljivost viziranja sredine linije, δl_{SE}	N	11,6	1	11,6
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost			**$u^2 = (65^2 + 1{,}2^2\cdot L^2)$ nm, L u mm**	
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, P=95%, k=2			**$U = (130 + 2\cdot L)$ nm, L u mm**	

Linearizacijom izraza s obzirom na duljinu od 300 mm, sastavljena standardna nesigurnost $u_c(L_{MS})$ može se napisati u obliku:

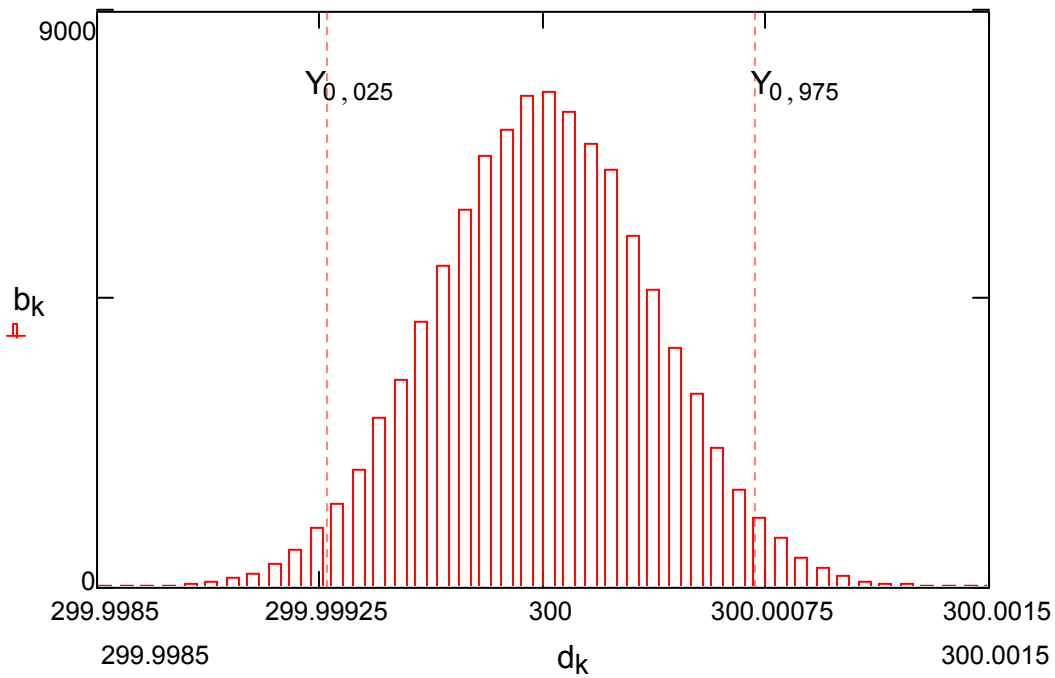
$$u_c(L_{MS}) = (65 + 1\cdot L) \text{ nm, } L \text{ u mm} \tag{12.2}$$

Linearizirana proširena mjerna nesigurnost iznosi:

$$U(L_{MS}) = (130 + 2 \cdot L)\ \text{nm},\ L \text{ u mm};\ k = 2,\ P = 95\% \qquad (12.3)$$

Proračun mjerne nesigurnosti provest će se i MCS metodom, te je funkcija gustoće vjerojatnosti simulirana prema matematičkom modelu koji je postavljen u 11.1.

Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 11. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(L_{MS})$ dobivena je uz M=100000 simulacija i sljedeće ulazne parametre z = 2 mm, b = 1 mm, c = 1 mm, h = 0,005 mm, d = 0,005 mm, $u(t)$ = 0,12 ºC, $u(p)$ = 13 Pa, $u(h)$ = 0,06 i $\alpha_{MS} = 9 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine L_{MS} za mjernu skalu duljine 300 mm prikazana je na slici 137.



Slika 137. Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(L_{MS})$ za mjernu skalu duljine 300 mm

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine L_{MS} za duljinu mjerne skale 300 mm iznosi 366 nm. Izlazna veličina L_{MS} nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 299{,}9992824 \text{ mm};\ Y_{0,975} = 300{,}0007172 \text{ mm}) \text{ uz } P = 95\%.$$

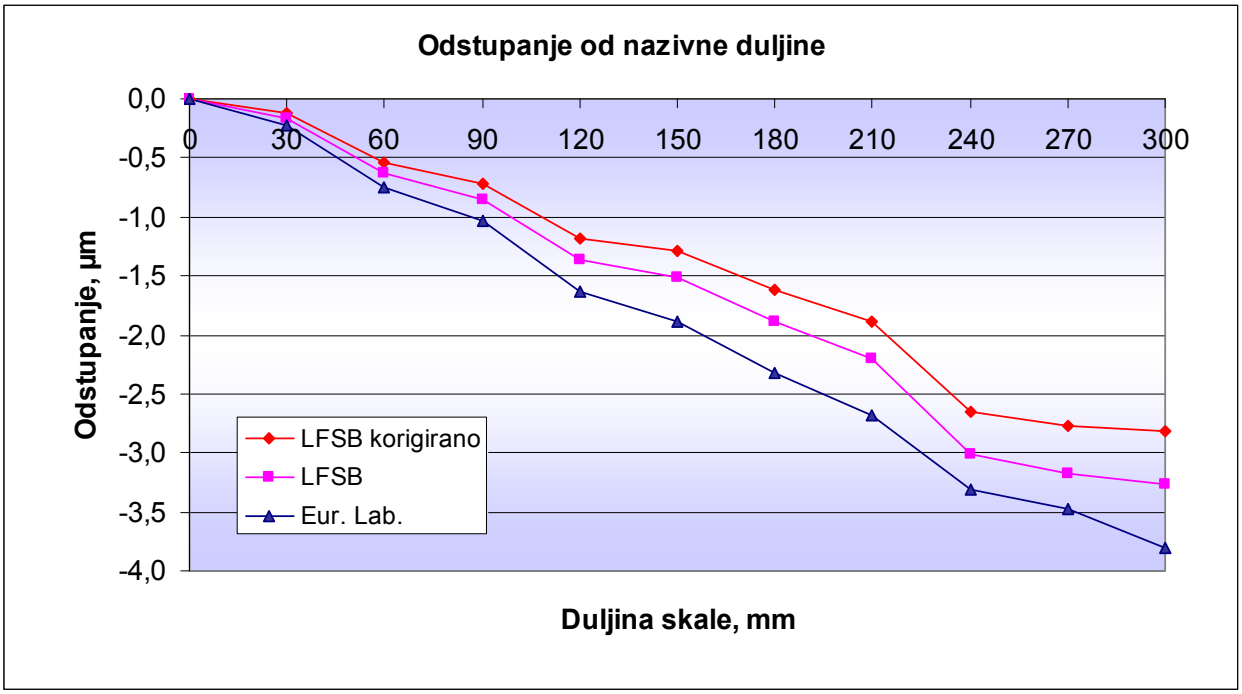
Odnosno proširena mjerna nesigurnost iznosi U = 717 nm.

Tablica 11. Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Indeks loma svjetlosti zraka	n_{air}	Normalna razdioba (M, 1, $1{,}26\cdot10^{-7}$)
Očitanje interferometra 2	N_2	Pravokutna razdioba (M, -0,005, 0,005)
Očitanje interferometra 1	N_1	Pravokutna razdioba (M, -0,005, 0,005)
Valna duljina izvora svjetlosti	λ	Normalna razdioba (M, $633\cdot10^{-6}$, $0.011\cdot633\cdot10^{-12}$)
Nelinearnost u poziciji 2	δl_{n2}	Arkussinus razdioba (M, $-3\cdot10^{-6}$, $3\cdot10^{-6}$)
Nelinearnost u poziciji 1	δl_{n1}	Arkussinus razdioba (M, $-3\cdot10^{-6}$, $3\cdot10^{-6}$)
Mrtvi hod	δl_{DP}	Pravokutna razdioba (M, $-1{,}8\cdot10^{-6}$, $1{,}8\cdot10^{-6}$)
Kosinus pogreška	δl_{li}	Pravokutna razdioba (M, $-L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{z}{1500})\right]\right\}$, $L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{z}{1500})\right]\right\}$)
Abbeov odmak u z i zakret stola	δl_{Az}	Pravokutna razdioba (M, $-b\cdot0{,}00003$, $b\cdot0{,}00003$)
Abbeov odmak u y i skretanje stola	δl_{Ay}	Pravokutna razdioba (M, $-c\cdot0{,}0000075$, $c\cdot0{,}0000075$)
Koeficijent temperaturnog rastezanja	α_s	Pravokutna razdioba (M, $0{,}9\cdot\alpha_{MS}$, $1{,}1\cdot\alpha_{MS}$)
Razlika temperature skale od 20 °C	Δt_s	Normalna razdioba (M, 0 ° C, 0,12° C)
Suosnost skale u horizontalnoj ravnini	δl_{sh}	Pravokutna razdioba (M, $-L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{h}{L_{MS}})\right]\right\}$, $L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{h}{L_{MS}})\right]\right\}$)
Suosnost skale u vertikalnoj ravnini	δl_{sv}	Pravokutna razdioba (M, $-L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{d}{0{,}577\cdot L_{MS}})\right]\right\}$, $L\cdot\left\{1-\cos\left[\arctan(\frac{d}{0{,}577\cdot L_{MS}})\right]\right\}$)
Utjecaj oslonaca na duljinu skale	δl_{ai}	Pravokutna razdioba (M, $-0{,}01\cdot L\cdot10^{-6}$, $0{,}01\cdot L\cdot10^{-6}$)
Utjecaj kvalitete ruba linije	δE_{alg}	Normalana razdioba (M, 0, $6{,}4\cdot10^{-6}$)
Gubitak fokusa	δe_{fok}	Normalana razdioba (M, 0, $18\cdot10^{-6}$)
Nesigurnost mjerne optike	δl_{opt}	Pravokutna razdioba (M, $-100\cdot10^{-6}$, $100\cdot10^{-6}$)
Obnovljivost viziranja sredine linije	δl_{sE}	Normalna razdioba (M, $0{,}11{,}6\cdot10^{-6}$)

12.1.3 Usporedbeni rezultati mjerenja mjerne skale duljine 300 mm

Kao što je već navedeno, neformalno usporedbeno mjerenje je provedeno s jednim europskim laboratorijem koji se zbog neformalnosti usporedbe neće navoditi u radu. Slika 138. daje usporedni prikaz rezultata mjerenja mjerne skale duljine 300 mm s provedenom korekcijom zbog postavljanja suosnosti interferometra i pravca kretanja pokretnog stola, bez provedene korekcije i europskog laboratorija koji je sudjelovao u ovoj neformalnoj usporedbi.

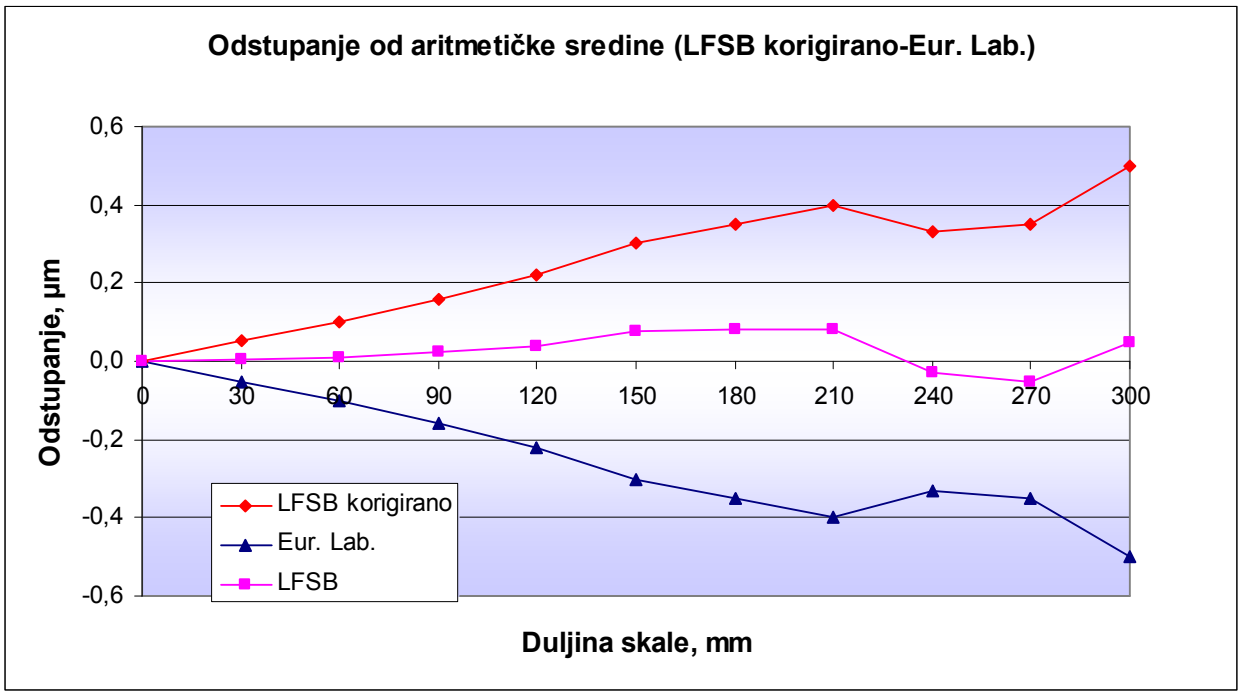


Slika 138. Usporedbeni rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od nazivne duljine)

Sa slike 138. je vidljivo da sva tri seta mjerenja imaju isti trend i da nema značajnijih odstupanja. LFSB-ov iskazani rezultat mjerenja u ovoj neformalnoj usporedbi označen je crvenom bojom i u plusu je za provedenu linearnu korekciju u odnosu na aritmetičku sredinu provedenih mjerenja koja je označena ljubičastom bojom. Rezultati mjerenja europskog laboratorija su u minusu u odnosu na rezultate mjerenja LFSB-a. Zanimljivo je da su u svim do sada provedenim mjerenjima na sustavu za umjeravanje mjernih skala rezultati mjerenja bez provedene korekcije imali određeni linearno padajući trend,

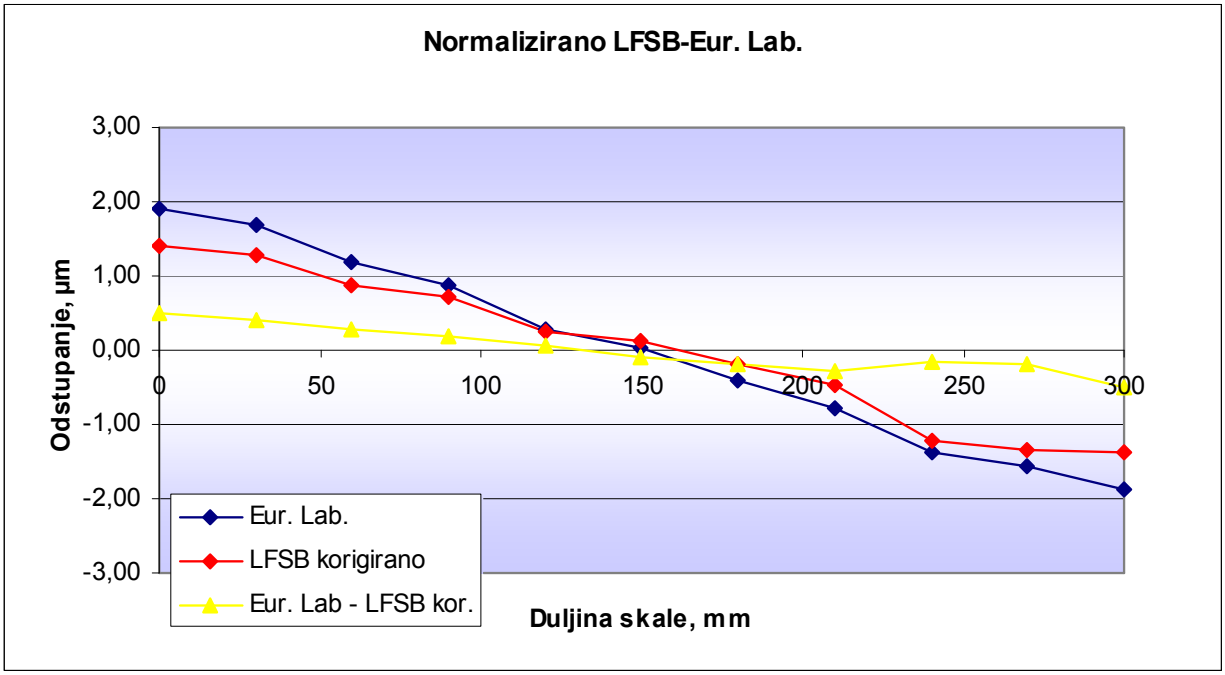
tj. uvijek su bili u minusu u odnosu na referentne rezultate mjerenja pa su stoga i ovdje dobiveni rezultati korigirani.

Sa slike 139. je vidljivo da su prikazani rezultati bez provedene korekcije u plusu u odnosu na rezultate mjerenje europskog laboratorija, te se nalaze jako blizu aritmetičke sredine rezultata mjerenja LFSB-a i europskog laboratorija.



Slika 139. Usporedbeni rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (odstupanje od aritmetičke sredine)

Slika 140. daje prikaz normaliziranih rezultata mjerenja s obzirom na aritmetičke sredine jednog odnosno drugog seta mjerenja. Normalizirani prikaz rezultata mjerenja pokazuju još bolje slaganje između iskazanih rezultata LFSB-a i europskog laboratorija.



Slika 140. Normalizirani rezultati provedenih mjerenja mjerne skale duljine 300 mm (LFSB korigirano-Eur. Lab.)

Pošto je ovo bilo neformalno usporedbeno mjerenje te europski laboratorij nije iskazao mjernu nesigurnost, kao referentna vrijednost upotrebljavat će se aritmetička sredina rezultata mjerenja LFSB-a i europskog laboratorija. Sa slike 139. je vidljivo da se odstupanja LFSB-a od aritmetičke sredine nalaze unutar iskazane mjerne nesigurnosti koja iznosi U = (0,130+2·L) µm, L u m, k=2, P=95%.

Provedena neformalna usporedba imala je za cilj provjeru sposobnosti sustava pri umjeravanju mjernih skala duljih od 100 mm. Iz navedenih rezultata ove neformalne usporedbe jasno je da je sustav za umjeravanje mjernih skala u potpunosti sposoban za provedbu mjerenja mjernih skala duljina od 300 mm pa i više, i to na zavidnoj razini, što je rijetkost i u svjetskim okvirima.

13. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada razvijen je i realiziran potpuno originalan sustav za umjeravanje mjernih skala mjernog područja do 300 mm koji omogućava mjerenja na svjetskim razinama mjernih nesigurnosti. Uređaj je fizički izrađen u okviru tehnologijskog projekta TP-02/0120-16 " Uređaj za umjeravanje mjernih skala" koji je započet 2003. godine. U sklopu Projekta, a u svrhu posjedovanja "fiksnih točaka" nabavljena je i NPL mjerna skala duljine 100 mm koja je upotrebljavana za istraživanja u ovom radu. Naime, tijekom izrade uređaja autor ovog rada boravio je u PTB-u gdje je provodio istraživanja i mjerio navedenu mjernu skalu na Nanometer komparatoru [3]. Kako su početni rezultati mjerenja na izrađenom uređaju imali određeni linearno padajući trend u odnosu na umjerene (referentne) vrijednosti, slijedom postavljene hipoteze u radu su istražene geometrijske pogreške izrađenog sustava za umjeravanje mjernih skala te je provedena eksperimentalna i simulacijska analiza svih parametara mjerne nesigurnosti.

Temeljem dobivene analize potvrđeno je da postavljanje suosnosti laserskog interferometra i pravca kretanja stola ima najznačajniji utjecaj na mjernu nesigurnost. Za mjernu skalu duljine 100 mm utjecaj suosnosti laserskog interferometra i pravca kretanja stola iznosi od 50 nm za jako dobro postavljanje suosnosti stola gdje je razmak među točkicama referentnog i mjernog snopa na povratnoj meti lasera jednak 2 mm, do 400 nm za najlošije moguće postavljanje suosnosti gdje je razmak među točkicama referentnog i mjernog snopa na povratnoj meti lasera jednak 5 mm što je ujedno i maksimalna vrijednost jer je promjer povratne mete na laseru jednak 5 mm. U tom slučaju funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine nije normalna već trapezna.

Sljedeći ključni izvor nesigurnosti je temperatura koja naročito ima značajan utjecaj kod mjerenja duljih mjernih skala i mjernih skala s većim koeficijentima temperaturnog rastezanja. Naročito veliki problem predstavljaju temperaturni gradijenti u vremenu i prostoru koji utječu na veću nesigurnost provođenja temperaturne korekcije. Održavanjem konstante temperature tijekom provođenja mjerenja temperaturna korekcija može se pouzdanije provesti te je tako i njen manji doprinos mjernoj nesigurnosti. Slijedom toga, sustav je izoliran posebnom toplinskom zaštitom koja

tijekom provedbe mjerenja smanjuje utjecaj mjeritelja na promjenu temperature uređaja. Poboljšanja su detaljno opisana u poglavlju 9.

Utjecaj Abbeovog odmaka u XY i XZ ravnini nema tako značajan utjecaj kao kosinus pogreška jer se interval funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine poveća za 70 nm ukoliko se udaljenost između mjernog snopa i mjerne skale u obje ravnine promijeni s 1 mm na 5 mm.

Postavljanje suosnosti mjerne skale i pravca kretanja stola u horizontalnoj ravnini nema značajan utjecaj na mjernu nesigurnost te iznosi manje od 1 nm za maksimalnu pogrešku koja se može pojaviti pri postavljanju suosnosti u iznosu od 5 μm.

Postavljanje suosnosti mjerne skale i pravca kretanja stola u vertikalnoj ravnini također značajno ne doprinosi mjernoj nesigurnosti te iznosi manje od 1 nm ali posredno ima značajan utjecaj na gubitak fokusa koji onda značajno doprinosi mjernoj nesigurnosti jer se linija mora dodatno postavljati u fokus što vodi varijaciji sredine linije u iznosu od 44 nm.

Eksperimentalna istraživanja su pokazala da se pokretni stol elastično deformira pod utjecajem vlastite mase i mase optičkih elemenata te deformacije na krajevima pokretnog stola iznose oko 30 μm na onoj strani stola gdje se nalaze optičke komponente. Kako bi se smanjile deformacije pokretnog stola, sustav je modificiran postavljanjem posebnih kliznih oslonaca pod krajeve pokretnog stola. Ponovljena mjerenja deformacija stola pokazala su značajno smanjenje deformacija koje nakon modifikacije uređaja iznose manje od 5 μm. Rezultati mjerenja NPL-ove mjerne skale prije modifikacije uređaja imali su linearno padajući trend i odstupanje od 200 nm na duljini od 100 mm. Ponovljena mjerenja NPL-ove mjerne skale nakon provedene modifikacije uređaja s kliznim osloncima imaju manja odstupanja i nemaju linearno padajući trend te se nalaze unutar 100 nm u odnosu na rezultate mjerenja provedene u PTB-u. Rezultati tih mjerenja potvrđuju da su provedene modifikacije uređaja doprinijele smanjenju odstupanja rezultata mjerenja u odnosu na mjerenja provedena u PTB-u.

Temeljem provedenih istraživanja i nakon modifikacije uređaja, iskazana je mjerna nesigurnost koja iznosi U=(130+0,66·L) nm, L u mm; k=2, P=95% i koja je potpuno u rangu očekivane mjerne nesigurnosti koja je postavljena u hipotezi ovog rada. Iskazana

mjerna nesigurnost je potvrđena i u međunarodnom usporedbenom mjerenju EURAMET Key Comparison, EURAMET.L-K7 "Calibration of line scales" gdje su postignuti potpuno kompatibilni rezultati s najpoznatijim svjetskim laboratorijima. U prilog tome idu i izračunate vrijednosti faktora slaganja E_n koje su za sve linije daleko manje od 1, a u većini slučajeva su jako blizu nule. Najveća utvrđena vrijednost faktora slaganja E_n iznosi 0,76 za liniju duljine 35 mm, gdje je utvrđeno maksimalno odstupanje od referentne vrijednosti koje iznosi 140 nm.

Kako bi se sustav provjerio pri umjeravanju duljih mjernih skala, provedeno je i neformalno usporedbeno mjerenje precizne mjerne skale duljine 300 mm s jednim od najpoznatijih svjetskih instituta koji ima dugogodišnje iskustvo na području umjeravanja mjernih skala. Iskazana mjerna nesigurnost pri umjeravanju mjerne skale duljine 300 mm i koeficijenta temperaturnog rastezanja $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ iznosi $U = (130+2 \cdot L)$ nm, L u mm, $k = 2$, $P = 95\%$. Iz rezultata prikazanih u radu nedvosmisleno je jasno da je sustav sposoban za umjeravanje mjernih skala duljina do 300 mm s gore navedenom mjernom nesigurnošću što je nedostižno za mnoge tehnološki razvijene države na svijetu.

S navedenim mjernim područjem i iskazanim mjernim nesigurnostima, LFSB se svrstava uz bok svjetskim institutima koji imaju dugogodišnje iskustvo i tradiciju na području mjerenja mjernih skala.

Ovim radom su ostvarena tri značajna znanstvena doprinosa, i to: originalna konstrukcija mjernog sustava, originalno softversko rješenje za viziranje linija mjerne skale te visoka razina točnosti koja je potvrđena u svjetskim usporedbama.

14. LITERATURA

[1] JCGM 100:2008 Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti

[2] WGDM -7: Preliminary comparison on nanometrology, Nano 3: Line Scale standards, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2003.

[3] Jens Flugge, Rainer Koning, Status of the nanometer comparator at the PTB Proc. SPIE 4401 275

[4] EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999.

[5] Jens Flugge, Rainer Koning, Harald Bosse: A method for the *in situ* determination of Abbe errors and their correction, measurement science and tehnology, 18, 2007, 476-481.

[6] R Koning, B Przebierala, C Weichert, J Flugge and H Bosse: A revised treatment of the influence of the sample support on the measurement of line scales and the consequnces for its use to disseminate the unit of length, Metrologia 46 (2009), 187-195.

[7] P. G. Luo, S. P. Pan, T. C. Chu, Application of computer vision and laser interferometer to the inspection of line scale, Optics and Lasers Engineering 42 (2004) 563-584

[8] M. Sawabe, F. Maeda, Y. Yamaryo, T. Simomura, Y. Saruki, T. Kubo, H. Sakai, S. Aoyagi: A new vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear encoders and scales, Precision Engineering 28 (2004), 320-328.

[9] Marjan Družovec, Bojan Ačko, Andrej Godina, Tatjana Welzer: Robust algorithm for determining line centre within a video positional measuring system, Optics and Laser sin Engineering 47 (2009), 1131-1138.

[10] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” —Propagation of distributions using a Monte Carlo method

[11] Biserka Runje: Doktorska disertacija -"Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine", Zagreb 2002.

[12] Steinmetz R.: Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry, Precision Engineering, vol. 12, n. 1, p. 12-24, January, 1990.

[13] Quenelle, R. C.: Nonlinearity in interferometer Measurements, Agilent Technologies Journal, p. 10, April 1983.

[14] Bendat, J. S.; Piersol, A. G.: Engineering applications of correlation and spectral analysis, California, John Wiley & Sons, 1980.

[15] Metrology institute of the Republic of Slovenia, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Laboratory for Production Mesurement: EUROMET Key Comparison, EUROMET.L-K7 (EUROMET Project 882), Calibration of line scales Draft B Report

[16] Heinrich Schwenke, Ulrich Neuschaefer-Rube, Tilo Pfeifer, Horst Kunzmann: Optical methods for Dimensional metrology in Production Engineering

[17] A. Balsamo: Utilizzo di techniche interferometriche nelle tarature dimensionali monoassiali, Corso di approfondimento su valutazione dell'incertezza nelle tarature dimensionali, Torino, 15-17 gennaio 1997.

[18] Ju-Ho Song: Reducing tilt errors in moire´ linear encoders using phase-modulated grating, Review of scientific instruments, Volume 71, Number 6, June 2000.

[19] M. Krystek, H. Bosse: A Bayesian approach to the linking of key comparisons

[20] K. P. Birch, M. J. Downs: An Updated Edlen Equation for the Refractive Index of Air, Metrologia 30, pp. 155-162, 1993.

[21] K. P. Birch, M. J. Downs: Corection to the Updated Edlen Equation for the Refractive Index of Air, Metrologia 31, pp. 315-316, 1994.

[22] B. Edlen: The refractive index of air, Metrologia 2, pp. 71-80, 1996.

[23] Akira Takahashi: Long-term dimensional stability and longitudinal uniformity of line scalesmade of glass ceramics, Measurement Science and Technology 21, 2010.

[24] S. Medić, V. Mudronja, B. Runje: CALIBRATION OF LINE SCALES AT LFSB // Proceedings 1 st Regional Metrology Organisations Symposium – RMO 2008 ; 20th International Metrology Symposium,Cavtat, 2008.

[25] S. Medić, V. Mudronja: USE OF OPTOELECTRONIC SYSTEM IN CALIBRATION OF PRECISE MEASURING SCALES AT LFSB // Computer integrated manufacturing and high speed machining / Abele, Udiljak, Ciglar (ur.).Zagreb, 2007. 219-223.

[26] A. Jakštas, S. Kaušinis, J. Flügge: Investigation of calibration facilities of precision line scales, ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2005. Nr.3 (53).

[27] S. Merino, A. Retolaza, I. Lizuain: Linear optical encoders manufactured by imprint lithography, Microelectronic Engineering 83 (2006) 897–901.

[28] S. Merino, A. Retolaza, A. Juarros, S. Landis: A new way of manufacturing high resolution optical encoders by nanoimprint lithography, Microelectronic Engineering 84 (2007) 848–852.

[29] J. S. Beers, W. B. Penzes, The NIST Length Scale Interferometer, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 104, 225 (1999).

[30] V. Mudronja, J. Stepanić, S. Medić: Inter-laboratory Measurements and Inter-laboratory Cooperation // 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production / A. Weckenmann (ur.) Erlangen: VDI/VDE-Gesellschaft Mess-und Automatisierungtechnik, 2004. 745-750

15. KRATKI ŽIVOTOPIS

Srđan Medić rođen je 16. 10. 1977. godine u Splitu gdje je završio Osnovnu školu "Skalice" s odličnim uspjehom. Tijekom osnovnoškolskog obrazovanja poseban je interes pokazao prema prirodnoslovno-matematičkim predmetima. Nakon završetka osnovne škole 1992. godine upisao je matematičko-prirodoslovnu gimnaziju u Splitu. Pošto je sve razrede završio s izvrsnim uspjehom, bio je oslobođen obrane mature te je tako maturirao 1996. godine s izvrsnim uspjehom.

Te iste 1996. godine upisao je studij zrakoplovstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Pošto je na razredbenom postupku bio među 10% najboljih kandidata, tijekom svih godina studija dobivao je državnu stipendiju. Diplomirao je u ožujku 2002. godine i stekao zvanje diplomirani inženjer zrakoplovstva. Tema diplomskog rada bila je strategija Six Sigma u zrakoplovstvu.

Te iste 2002. godine upisao je postdiplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i to smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment. Odmah nakon što je diplomirao zaposlio se kao asistent na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Zavodu za kvalitetu i to na Katedri za mjerenja i kontrolu. U sklopu nastave držao je vježbe iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Mjerni roboti te Mjeriteljstvo

U velikom broju tvrtki radio je kao konzultant na uvođenju sustava upravljanja kvalitetom sukladno normama ISO 9001, ISO 14001, ISO 17020 i ISO 17025, te je IRCA vodeći auditor za ISO 9001. Osim uvođenja sustava upravljanja, odradio je i više projekata kao konzultant pri ishođenju CE znaka.

U tri navrata boravio je u njemačkom saveznom mjeriteljskom institutu PTB na znanstvenom usavršavanju iz područja mjerenja duljine, posebice umjeravanja mjernih skala.

16. KRATKI ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU

Srđan Medić was born on 16.10.1977. in Split. Elementary school Skalice completed with exelent result. During elementary education special interest is demonstrated with mathematical, physical and tehnical subjects. Because of the interest in matematical, 1992. he enrolled Gimansium of matematics. Due to the excellent results he made during studying, he was exempt from doing the final exam and he finished high school with excellent result in 1996. The same year he entered the study of Aeronautical engineering at Faculty of Mechanical engineering and Naval architecture in Zagreb.

As one of 10% of the best students on the mentioned faculty, He received the stipendy of the Ministry of the science and education. He graduated in March 2002. and became a graduated engineer of aeronautical engineering. Title of the diploma work was a Six Sigma strategy in aeronautical industry.

In additional, he continued education in postgraduate study of Industrial engineering and Management at same Faculty.

After he made a degree, he has been employed as an assistant on Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in the department for Quality, section for Measurement and Control.

To add more, he has been a consultant in many companies in Croatia and Slovenia, which were engaged in taking ISO 9001, ISO 14001, ISO 17020, ISO 17025 standards and CE mark. He is also IRCA QMS lead auditor.

He was 3 times (2 months) in German National Physical Laboratory (PTB) on a training in the field of Calibration of line scales.