Razrada metode umjeravanja stepeničastih etalona UT sustava

Momčilović, Saša

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:167145

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Saša Momčilović

Zagreb, 2019/2020

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Razrada metode umjeravanja stepeničastih etalona UT sustava

Mentori:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić.

Student:

Saša Momčilović

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici, **doc. dr. sc. Gorani Baršić** na suradnji i susretljivosti prilikom pisanja ovog rada.

Tomislavu Habaku se zahvaljujem na pomoći prilikom provedbe mjerenja u Laboratoriju.

Posebna zahvala mojoj obitelji na pruženom strpljenju i povjerenju koje su mi pružili tijekom studija.

Saša Momčilović

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Saša Momčilović** Mat. br.: 0035205566

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razrada metode umjeravanja stepeničastih etalona UT sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of calibration method of step wedge steel blocks**

Opis zadatka:

Značajke stepeničastih radnih etalona ultrazvučnog sustava (UT) propisane su normom ISO 16946:2015. Dimenzionalne značajke stepeničastih radnih etalona utječu na radne karakteristike UT sustava stoga je nužno utvrditi njihove pouzdane vrijednosti.
S obzirom na propisana dopuštena odstupanja dimenzionalnih značajki stepeničastih radnih etalona i temeljem raspoložive mjerne opreme u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina u radu je potrebno:

1. Navesti dimenzionalne značajke stepeničastih radnih etalona prema zahtjevima norme ISO 16946:2015.
2. Razraditi i provesti umjeravanje stepeničastog radnog etalona korištenjem različitih mjernih metoda.
3. Provesti usporedbu rezultata mjerenja ostvarenih različitim mjernim metodama i komentirati ostvarene rezultate.
4. Donijeti zaključak o izboru prikladne metode za provedbu umjeravanja stepeničastih etalona UT sustava.

Zadatak zadan:
11. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. ETALON 2
2.1. Ultrazvučni etaloni 3
3. PROVEDBA UMJERAVANJA STEPENIČASTOG ETALONA 7
3.1. Rezultati umjeravanja stepeničastog etalona 9
4. MJERENJE KORIŠTENJEM VISINOMJERA 10
4.1. Procjena mjerne nesigurnosti (visinomjer) 11
5. MJERENJE KORIŠTENJEM MJERNE URE 18
5.1. Procjena mjerne nesigurnosti (mjerna ura) 19
6. MJERENJE KORIŠTENJEM JEDNOOSNOG UNIVERZALNOG UREĐAJA 24
6.1. Procjena mjerne nesigurnosti (jednoosni mjerni uređaj) 25
7. USPOREDBA I ANALIZA OSTVARENIH REZULTATA 29
7.1. Analiza mjernih rezultata 29
8. ZAKLJUČAK 36
LITERATURA 37
PRILOZI 38

POPIS SLIKA

Slika 1. Etalon tipa V1. 3
Slika 2. Etalon tipa V2 4
Slika 3. Nazivne mjere stepeničastog etalona 4
Slika 4. Stepeničasti etalon 9
Slika 5. Visinomjer 10
Slika 6. Provedba mjerenja 10
Slika 7. Linearizacija (visinomjer) 16
Slika 8. Mjerna ura 18
Slika 9. Linearizacija (mjerna ura) 23
Slika 10. Jednoosni univerzalni mjerni uređaj 24
Slika 11. Provedba mjerenja jednoosnim mjernim uređajem 24
Slika 12. Linearizacija (jednoosni mjerni uređaj) 28
Slika 13. Usporedba rezultata (1 mm) 31
Slika 14. Usporedba rezultata (2 mm) 31
Slika 15 Usporedba rezultata (3mm) 32
Slika 16. Usporedba rezultata (4 mm) 32
Slika 17. Usporedba rezultata (5mm) 33
Slika 18. Usporedba rezultata (6 mm) 33
Slika 19. Usporedba rezultata (7 mm) 34
Slika 20. Usporedba rezultata (8 mm) 34
Slika 21. Usporedba rezultata (9 mm) 35
Slika 22. Usporedba rezultata (10 mm) 35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz i opis stepeničastih etalona [6] 5
Tablica 2. Rezultati mjerenja korištenjem visinomjera 12
Tablica 3. Standardna odstupanja (visinomjer) 13
Tablica 4. Prekretne točke (visinomjer) 14
Tablica 5. Sastavnica standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja (visinomjer) 16
Tablica 6. Rezultati mjerenja korištenjem mjerne ure 20
Tablica 7. Standardno odstupanje (mjerna ura) 20
Tablica 8. Prekretna točka (mjerna ura) 21
Tablica 9. Sastavnica standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja (mjerna ura) 23
Tablica 10. Rezultati mjerenja jednoosnim mjernim uređajem 26
Tablica 11. Standardno odstupanje (jednoosni mjerni uređaj) 26
Tablica 12. Sastavnica standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja 28
Tablica 13. Usporedba rezultata (1 mm) 31
Tablica 14. Usporedba rezultata (2 mm) 31
Tablica 15. Usporedba rezultata (3 mm) 32
Tablica 16. Usporedba rezultata (4 mm) 32
Tablica 17. Usporedba rezultata (5 mm) 33
Tablica 18. Usporedba rezultata (6 mm) 33
Tablica 19. Usporedba rezultata (7 mm) 34
Tablica 20. Usporedba rezultata (8 mm) 34
Tablica 21. Usporedba rezultata (9 mm) 35
Tablica 22. Usporedba rezultata (10 mm) 35

POPIS OZNAKA

s	–	procijenjeno standardno odstupanje
s_p	–	zbirno procijenjeno standardno odstupanje
u	–	standardna nesigurnost
u_c	–	sastavljena mjerna nesigurnost
U	–	proširena mjerna nesigurnost
k	–	faktor proširenja
w_i	–	normirana težinska vrijednost
C	–	težinski faktor
x_{ref}	–	težinska srednja vrijednost usporedbe
E_n	–	faktor slaganja
R_B	–	Birgov kriterij

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je provedba umjeravanja ultrazvučnog stepeničastog etalona propisanog normom ISO 16946:2015 koristeći tri mjerne metode. Laboratorij za precizna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje akreditiran je za 35 metoda umjeravanja, ali nema akreditiranu metodu za ultrazvučne stepeničaste etalone. Dimenzionalne značajke stepeničastih radnih etalona utječu na karakteristike samog ultrazvučnog sustava te je stoga potrebno utvrditi njihove vrijednosti. U radu je razrađen postupak umjeravanja stepeničastog radnog etalona korištenjem tri mjerna uređaja: jednoosni mjerni uređaj, visinomjer i mjerna ura.
Za sva tri postupka umjeravanja procijenjene su mjerene nesigurnosti. Provedena je i usporedba rezultata umjeravanja ostvarenih sa sva tri mjerena uređaja kako bi se moglo zaključiti o izboru prikladnog mjernog uređaja za buduća umjeravanja ultrazvučnog stepeničastog etalona u Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Ključne riječi: ultrazvučni stepeničasti etalon, umjeravanje, mjerna nesigurnost, usporedba rezultata

SUMMARY

The topic of this final thesis is the development of the calibration procedure of step wedge calibration block prescribed by ISO 16946: 2015, using three measurement methods. The Laboratory for Precision Measurements of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture is accredited for 35 calibration methods, but does not have an accredited method for calibration of step wedge block. The dimensional characteristics of step wedge calibration block influence the characteristics of the ultrasonic system itself and it is therefore necessary to determine their values. The paper elaborates the procedure for calibrating step wedge block using three measuring devices: a uniaxial measuring device, a height gage and a dial gauge. Measurement uncertainties were estimated for all three calibration procedures. A comparison of the calibration results obtained with all three measured devices was made to conclude on the selection of a suitable measuring device for future calibrations of the step wedge calibration block in the Laboratory for Precision Length Measurements of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Key terms: ultrasonic step wedge calibration block, calibration, measurement uncetraunty i, comparison of results

1. UVOD

Ispitivanje ultrazvukom jedna je od metoda ispitivanja proizvoda bez razaranja. Sustav za ultrazvučno ispitivanje sastoji se od nekoliko funkcionalnih cjelina: ultrazvučni uređaj, ultrazvučne sonde, etaloni i referentni uzorci te druga pomoćna oprema.

Kako bi se osigurala pouzdana i sljediva mjerenja mjernu opremu je potrebno redovito umjeravati. Umjeravanje etalona ultrazvučnih sustava uključuje i provjeru kritičnih dimenzija. U području dimenzionalnih mjerenja potrebno je ostvariti sljedivost do SI definicije metra: Jedan metar jednak je putu koji svjetlost prijeđe u vakuumu za 1/299 792 458 dio sekunde.

Rezultat umjeravanja bez iskazane mjerne nesigurnosti ne predstavlja cjelovitu mjeriteljsku informaciju. Stoga je potrebno provesti procjenu mjerne nesigurnosti rezultata umjeravanja kako bi se utvrdio interval unutar kojeg se, uz određenu vjerojatnost, rezultat mjerenja može naći.

Nadalje, umjeravanje etalona može biti provedeno korištenjem različitih mjernih metoda, odnosno uređaja, dok god su isti prikladni za uporabu. Valja naglasiti da umjeravanje predstavlja i određeni trošak, a koji je u prvom redu u funkciji korištene mjere opreme koja isto tako mora biti umjerena. Stoga bi valjalo odabrati onu metodu umjeravanja koja je, s jedne strane, prikladna za zahtijevane mjerne veličine, a s druge strane ne iziskuje velike troškove umjeravanja i održavanja.

2. ETALON

Etalon je po definiciji ostvarenje definicije dane veličine, s iskazanom vrijednošću veličine i mjernom nesigurnošću, a koja se upotrebljava kao referencija. Etaloni se koriste kao mjera, referentna tvar ili mjerni sustav za dodjelu mjernih rezultata druge veličine iste vrste, uspostavljajući tako mjernu sljedivost umjeravanjem drugih etalona, mjerila ili mjernih sustava. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednost kojeg etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene nesigurnosti. [1]
Kako bi se osigurala mjerna sljedivost potrebno je osigurati mjeriteljsku infrastrukturu.
Hrvatsku mjeriteljsku infrastrukturu čine: [1]

- Državni zavod za mjeriteljstvo
- Nacionalni mjeriteljski laboratorij
- Hrvatska akreditacijska agencija
- Hrvatski zavod za norme

Eksperimentalni dio ovog završnog rada proveo se u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (LFSB) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB) koji predstavlja nacionalni laboratorij za duljinu u Republici Hrvatskoj.
S obzirom na njihovu svrhu etalone dijelimo na:
1. Međunarodni etalon - etalon priznat međunarodnim sporazumom za međunarodnu osnovu za utvrđivanje vrijednosti svih drugih etalona odnosne veličine.
2. Primarni etalon - etalon jedinice određene veličine koji ima najbolje mjerne osobine koje se provjeravaju usporedbom s međunarodnim etalonom, a služi za utvrđivanje mjeriteljskih osobina sekundarnih etalona.
3. Nacionalni etalon - etalon priznat službenom nacionalnom odlukom za osnovu za utvrđivanje vrijednosti svih drugih etalona odnosne veličine u jednoj zemlji. Uobičajeno je da je nacionalni etalon - primarni etalon.
4. Sekundarni etalon - etalon jedinice određene veličine čije su mjeriteljske osobine utvrđene usporedbom s primarnim etalonom, a služi za utvrđivanje mjeriteljskih osobina radnih etalona.
5. Radni etalon - etalon jedinice određene veličine čije su mjeriteljske osobine utvrđene usporedbom sa sekundarnim etalonom, a služi za utvrđivanje mjeriteljskih osobina mjerila. [2]
Radni etaloni mogu također biti istodobno referentni etaloni. To je posebno slučaj za radne etalone koji se izravno umjeravanju prema etalonima nacionalnih mjeriteljskih instituta. Svaki

etalon ima određenu nesigurnost, a u hijerarhiji umjeravanja više rangirani etalon ima manju nesigurnost. Svaka niža razina dovodi do povećanja mjerne nesigurnosti. Prilikom provjere vrijednosti etalona postupak mjerenja je potrebno provesti za mjernim uređajem koji ima dvostruko veću točnost mjerenja. [1]

2.1. Ultrazvučni etaloni

Etaloni za ultrazvuk dolaze u raznim oblicima i veličinama. Materijal etalona treba biti isti kao i materijal predmeta ispitivanja i umjetno stvorene anomalije trebaju što vjernije predstavljati stvarne anomalije. Repliciranje anomalija na etalon predstavlja najveći problem izrade uzorka. Većina je izvedena bušenim provrtima i zarezima koji ne predstavljaju stvarne pogreške. Umjetno stvorene anomalije bolje reflektiraju zvučne valove (zbog ravnijih i finije izrađenih površina) i prenaglašavaju anomalije više nego što bi one u stvarnosti bile. Proizvodnja vjernijih anomalija je neekonomična u većini slučajeva i može se izvesti samo procjena anomalije (defekta). Cilj je postići da se pomoću računalnih programa grafički obrade i simuliraju anomalije. [3]

Postoji više vrsta ultrazvučnih etalona čije su karakteristike definirane odgovarajućim tehničkim normama. Najčešće se koriste etaloni tipa V1, V2 i stepeničasti etalon.

Etalon tipa V1

Značajke etalona Tipa V1 [Slika 1] definirane su normom ISO 2400-2012: *Nerazorno ispitivanje-Ispitivanje ultrazvukom* koja propisuje zahtijevane dimenzije, materijal i sam postupak proizvodnje čeličnog etalona za umjeravanje ultrazvučne opreme koja se koristi u ispitivanju. [4]



Slika 1. Etalon tipa V1.

Etalon tipa V2

Značajke etalona Tipa V2 [Slika 2] definirane su normom ISO 7963:2010: *Nerazorno ispitivanje- Ispitivanje ultrazvukom* koja propisuje dimenzije, materijal, proizvodnju i metode uporabe etalona V2 radi umjeravanja i provjere ultrazvučnih ispitnih uređaja. Etalon je mnogo manji i lakši od opisanog u normi ISO 2400-2012, te jednostavnije geometrije.



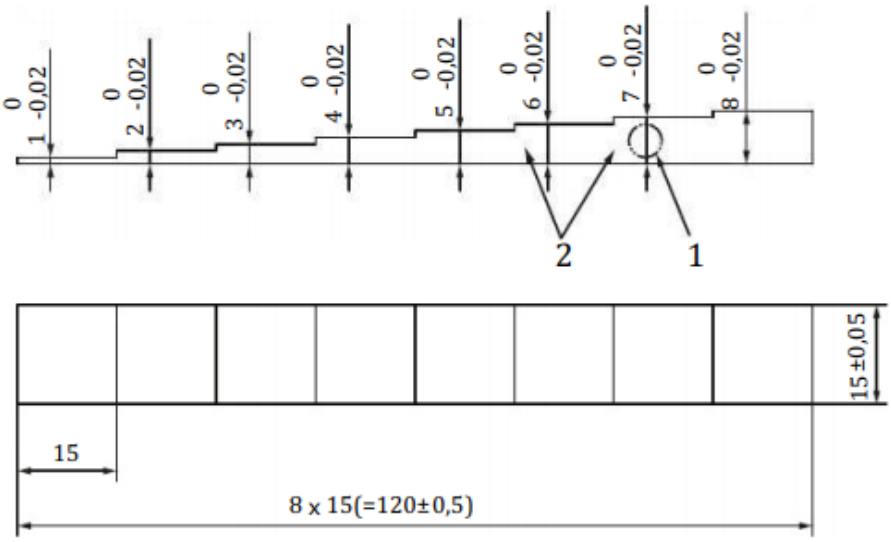
Slika 2. Etalon tipa V2

Stepeničasti etalon

Značajke stepeničastog etalona definirane su normom BS EN ISO 16946:2015 *Nerazorno ispitivanje – Ultrazvučno testiranje – Specifikacija za stepenaste blokove.* [5]

Normom su definirane dimenzije, materijal i proizvodnju stepeničastih etalona za umjerevanje ultrazvučnih instrumenata.

Na Slika 3 prikazuje dimenzije stepeničastog etalona prema normi BS EN ISO 16946:2015.



Slika 3. Nazivne mjere stepeničastog etalona

Tolerancija duljine i širine bloka je ± 0,1 mm i - 0,02 mm za debljinu koraka stepenice. Sve vanjske površine ne smiju imati vrijednost parametra hrapavosti *Ra* iznad 0,8 µm.
Stepenasti etalon bio trebao biti izrađen od čelika S355J0 sukladno EN 10025-2 ili sličnog tipa čelika.

Tablica 1. Prikaz i opis stepeničastih etalona [6]

Etalon	Opis	Norma	Dimenzije (inč : " ; mm)
Stepeničasti etalon sa 4 stepenice 	Umjeravanje debljine i linearnosti	PH tool reference standards-katalog 2013god. (ASTM E797)	(250 ", 500 ", 750 " ", 1000 ") x 750 " x 750 "
Stepeničasti etalon sa 5 stepenica 	Umjeravanje debljine i linearnosti	PH tool reference standards-katalog 2013god. (ASTM E797)	(100 ", 200 ", 300 " ", 400 ") x 750 " x 750 "
Zakrivljeni stepeničasti etalon za 90 ° sa 5 stepenica 	Etalon za umjeravanje debljine i linearnosti zakrivljenih površina	PH tool reference standards-katalog 2013god.	Debljina: (100 ", 200 ", 300 " ", 400 " i 500") ID radius 0,5"
VW Stepeničasti etalon sa 8 stepenica 	Umjeravanje linearnosti	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8,0) mm x15mm x 15mm

Tanki stepeničasti etalon 	Umjeravanje debljine i linearnosti tankih materijala	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(0.040", 0.060", 0.080", 0.100") x 0,750" x 0,750"
„Magna“ tanki stepeničasti etalon 	Specijalni etalon sa 5 stepenica za debljinu i umjeravanje linearnosti tankih materijala	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(0.020 ", 0.040", 0.060 ", 0.080") x 0,750" x 0,750"
Stepeničasti etalon sa 10 stepenica 	Specijalan etalon za umjeravanje debljine i linearnosti	PH tool reference standards-katalog 2013god.	Od 2mm do 20 mm sa stepenicam po 2 mm x 20mm x 20mm
„Tipsy“ stepeničasti etalon 	Sadrži 8 stepenica i služi za umjeravanje debljine i linearnosti	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(25,0, 37,5, 50,0, 62,5, 75,0, 87,5, 100,0 i 112,5) mm x 25mm x 25mm

3. PROVEDBA UMJERAVANJA STEPENIČASTOG ETALONA

Umjeravanje

Umjeravanje je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina koje pokazuje neko mjerilo, neka stvarna mjera, neka usporedbena tvar ili neki mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Svaka valjanost mjernih rezultata u velikoj je mjeri ovisna o mjeriteljskim svojstvima mjerila kako je određeno njihovim umjeravanjem. Postupkom umjeravanja zaključuje se o vrijednosti mjerene veličine na osnovu poznatih vrijednosti referentnih etalona. Svaki mjerni uređaj mora biti umjeren. Ako mjerni uređaj nije umjeren tada niti rezultat ostvaren tim mjernim uređajem neće biti sljediv.[1]

Sljedivost mjerenja

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti nekog etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti.

Mjerna nesigurnost

Općenito mjerenje nije idealno. Greške se javljaju prilikom svakog mjerenja pa i u najpreciznijim mjerenjima koji se provode na etalonima. Procjena se vrši sa svrhom uspoređivanja mjernih rezultata dobivenih u različitim mjeriteljskim laboratorijima. Procjena mjerne nesigurnosti je neophodna da bi se mogla donijeti odluka o tome da li je rezultat prikladan za predviđenu upotrebu i da je rezultat u usporediv s drugim rezultatima. [6]

Mjerna nesigurnost je parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti mjerenja. Ona se pripisuje mjernoj veličini uz određenu vjerojatnost. Taj parametar može biti bilo kakvo odstupanje ili poluširina intervala s navedenom razinom povjerenja. Koliko god parametara i utjecaja uzimali u obzir prilikom provedbe mjerenja i proračuna uzorka mogućih odstupanja od mjerene veličine još uvijek je mjerni rezultat samo procjena mjerne veličine.

Raznolikost djelovanja slučajnih utjecaja utječu na nemogućnost dobivanja savršenog mjerenja. To mogu biti slučajni utjecaji (trenutne promjene tlaka, temperature i vlage ili neiskustvo mjeritelja, nesavršenost uređaja i osjetila, vibracije) i ograničene mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenta između dva umjeravanja, utjecaj mjeritelja pri očitavanju analogne skale, nesigurnost referentnog etalona itd.).

Djelovanje slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja upravo dovodi do pojave mjerne nesigurnosti.

U praksi postoje mnogi izvori nesigurnosti u mjerenju: [8]

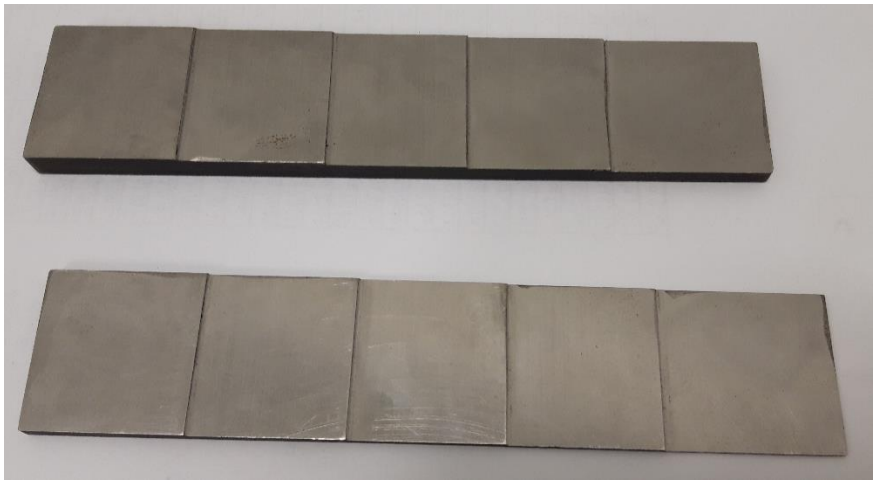
- Nepotpuno određivanje mjerne veličine
- Nesavršen ostvarenje određivanja mjerne veličine
- Osobna pristranost u očitavanju analognim instrumentima
- Nesavršenost okoline u kojoj se provodi mjerenje
- Nereprezentativni uzorci s mehaničkim oštećenjima
- Pretpostavke i približne procjene u mjernoj metodi i postupku
- Svojstva materijala etalona
- Netočnost podataka dobivenih iz vanjskih izvora ili specifikacija
- Promjene rezultata ponovljenih mjerenja u istovjetnim uvjetima

Izvori nesigurnosti nisu nužno neovisni jedan o drugome te svaki prinosu pojavi nesigurnosti. Zbog toga se vrši procjena same mjerne nesigurnosti i izračun iste kako bi se spriječila pojava nedvosmislenih iskazivanja i usporedba mjernih rezultata.. Mjerna nesigurnost sastoji se općenito od mnogo sastavnica. Neke od tih sastavnica mogu se odrediti određivanjem mjerne nesigurnosti A-vrste iz statističke razdiobe vrijednosti veličine iz niza mjerenja te se mogu opisati eksperimentalnim standardnim odstupanjima. Druge sastavnice, koje se mogu odrediti iz određivanja mjerne nesigurnosti B vrste, mogu se također opisati standardnim odstupanjima koja se određuju iz razdioba vjerojatnosti koje se temelje na iskustvu ili drugim podatcima. [1] Tip A standardne nesigurnosti dobiven je iz postupka ponovljenih mjerenja i jednak je kvadratnom korijenu statističke procjene varijance i zove se standardno odstupanje. Nesigurnost se dobiva statističkom analizom serije promatranja. U većini slučajeva rezultati ponovljenih mjerenja su raspodijeljeni oko srednje vrijednosti u zvonastom obliku krivulje ili normalno raspodijeljeni (Gauss-ova krivulja). Vjerojatnost vrijednosti koje se nalaze bliže procijenjenoj srednjoj vrijednosti je veća nego vrijednostima koji se nalaze u blizini ekstrema. Vrijednost veličine može biti određena i putem iskustva baziranog na dostupnim informacijama. Takva procjena naziva se metoda procjene tipa B i izvedena nesigurnost označava se kao standardna nesigurnost tipa B. Baza podataka sadrži podatke prethodnih mjerenja, znanja o opremi i iskustva u mjerenju, priručnik itd. Standardna nesigurnost tipa B je izračunata iz pretpostavljene funkcije. Tip B standardne nesigurnosti ne mora imati normalnu raspodjelu podataka. Tada se primjenjuju postupci drugih raspodjela pravokutna, trokutasta, U-oblik i drugi.

3.1. Rezultati umjeravanja stepeničastog etalona

Mjerenja debljina stepenica na stepeničastom etalonu [Slika 4] provedena su u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina. Prilog potvrdi o akreditaciji Laboratorija za precizna mjerenja dužina broji 35 postupaka umjeravanja, ali nema akreditiranu metodu za umjeravanje stepeničastog etalona.

S ciljem izbora prikladnog mjernog sredstva u ovom završnom radu provedena su mjerenja debljina stepenica stepeničastog etalona korištenjem mjerne ure, visinomjera i jednoosnog univerzalnog mjernog uređaja.



Slika 4. Stepeničasti etalon

Prije početka mjerenja, površine stepeničastog etalona očistile su se medicinskim benzinom i pamučnom krpicom kako bi se uklonile sve masnoće i nečistoće koje bi mogle utjecati na rezultate mjerenja.

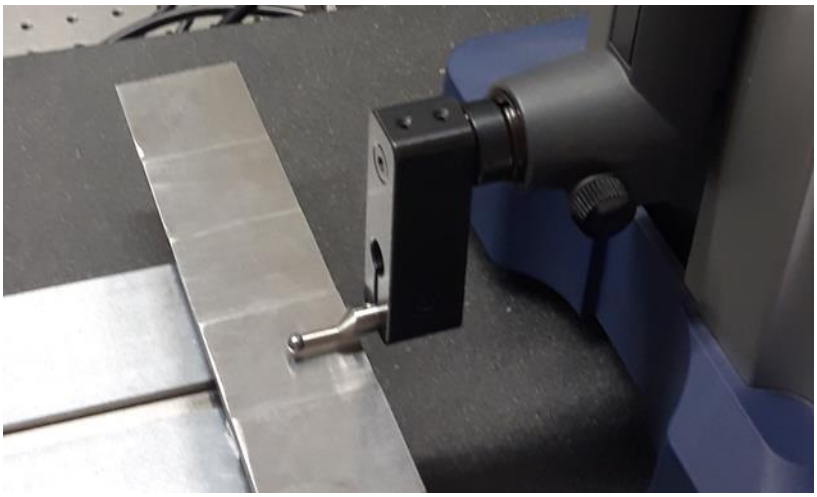
4. MJERENJE KORIŠTENJEM VISINOMJERA

Mjerenja su provedena na digitalnom mjernom visinomjeru proizvođača Mitutoyo, laboratorijske oznake MU 45-422 [Slika 5]. Mjerenje se izvodi na način da uređaj pomiče prihvat ticala duž vertikalne osi (z os) i ticalom ostvaruje mjerne rezultate [Slika 6].



Slika 5. Visinomjer

- Mjerno područje: (0-600) mm
- Rezolucija očitanja: 0,1 µm
- Promjer mjerne kapice: 4 mm
- Mjerna sila: 1 N



Slika 6. Provedba mjerenja

4.1. Procjena mjerne nesigurnosti (visinomjer)

Nakon analize mogućih utjecaja na rezultate mjerenja visina stepenica stepeničastog etalona, izvedena je jednadžba matematičkog modela (1).

$$L_S = L_{Si} + \delta L_{Si} + \delta L_N + L_s \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t + \delta L_M \quad (1)$$

gdje je:

- L_S – visina etalona
- L_{Si} – izmjerena visina etalona debljine
- δL_{Si} – utjecaj mjernog uređaja
- δL_N – utjecaj nesuosnosti mjernih kapica
- Δt – utjecaj razlike temperatura
- δL_M – mehanički utjecaj

4.1.1. Nesigurnost mjerenja duljina etalona

Nesigurnost mjerenja visina stepeničastog etalona procijenjena je na osnovu mjerenja tri stepenice nazivnih duljina 1 mm, 5 mm i 10 mm. Mjerenja su provedena u uvjetima ponovljivosti koji uključuju: isti etalon, isti mjeritelj, konstantne uvjete okoline, isti instrument i višestruko mjerenje u kratkom vremenskom intervalu.

Rezultati mjerenja provedenih na visinomjeru nalaze se u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati mjerenja korištenjem visinomjera

Nazivne visine stepeničastog etalona			
Mjerenje	1 mm	5 mm	10 mm
1.	0,8712	0,0487	0,2410
2.	0,8713	0,0484	0,2408
3.	0,8712	0,0484	0,2404
4.	0,8713	0,0479	0,2405
5.	0,8711	0,0478	0,2404
6.	0,8712	0,0473	0,2402
7.	0,8714	0,0472	0,2402
8.	0,8712	0,0473	0,2401
9.	0,8714	0,0469	0,2402
10.	0,8710	0,0470	0,2403
11.	0,8712	0,0467	0,2401
12.	0,8712	0,0470	0,2402
13.	0,8711	0,0469	0,2402
14.	0,8712	0,0469	0,2403
15.	0,8709	0,0469	0,2405
16.	0,8711	0,0468	0,2404
17.	0,8710	0,0470	0,2403
18.	0,8708	0,0468	0,2403
19.	0,8708	0,0468	0,2404
20.	0,8705	0,0467	0,2404
21.	0,8706	0,0470	0,2404
22.	0,8705	0,0470	0,2402
23.	0,8704	0,0468	0,2402
24.	0,8701	0,0469	0,2403
25.	0,8700	0,0467	0,2404
26.	0,8699	0,0469	0,2403
27.	0,8699	0,0469	0,2402
28.	0,8700	0,0468	0,2404
29.	0,8699	0,0470	0,2402
30.	0,8700	0,0468	0,2404

Procijenjeno standardno odstupanje je mjera koja nam govori koliko su vrijednosti skupa raspršene od aritmetičke sredine skupa podataka:

$$s_i{}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \tag{2}$$

Zbirno procijenjeno standardno odstupanje, prema jednadžbi (3), iznosi:

$$s_p = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}{3}} \tag{3}$$

gdje su:

- $s_1..s_3$ – procijenjena standardna odstupanja svake od stepenica na etalonu, gdje s_1 pripada stepenici najmanje nazivne mjere 1 mm, a s_3 stepenici najveće nazivne mjere od 10 mm.

Procijenjena standardna odstupanja, izračunata korištenjem programskog paketa MS Excel i funkcije „STDEV“, dana su u tablici 3.

Tablica 3. Standardna odstupanja (visinomjer)

Standardno odstupanje	Iznos (µm)
s_1	0,522
s_2	0,54
s_3	0,189

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti u jednadžbu (3) dobiva se vrijednost zbirno procijenjenog standardnog odstupanja s_p te daljnjim uvrštavanjem u jednadžbu (4) dobiva se standardna nesigurnost za tri ponovljena mjerenja, $u(L_{Si})$:

$$u(L_{Si}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}4448}{\sqrt{3}} = 0{,}258 \text{ µm} \tag{4}$$

Veličina *n* poprima vrijednost 3 jer je to broj ponovljenih mjerenja koja će se provoditi prilikom provedbe postupka umjeravanja stepeničastog etalona.

4.1.2. Nesigurnost umjeravanja visinomjera

Nesigurnost mjerne pogreške mjernog uređaja $u(\delta L_{Si})$ proizlazi iz potvrde o umjeravanju digitalnog visinomjera: $U(\delta L_{Si})$ = (5+4,5·L) µm, L u m; k = 2; P = 95 %.

$$u(\delta L_{Si}) = \frac{U(\delta L_{Si})}{k} = \frac{5 + 4{,}5 \cdot L}{2} = (2{,}5 + 2{,}25 \cdot L) \text{ µm} \tag{5}$$

4.1.3. Nesigurnost nesuosnosti ticala

Prilikom pozicioniranja prihvata može doći do pojave nesuosnosti ticala visinomjera i sfernog ticala prihvata. Zbog toga će se u procjenu mjerne nesigurnosti uzeti u obzir utjecaj nesuosnosti. Nesuosnost se utvrđuje kroz mjeru raspona izmjerenih vrijednosti prekretnih točaka. Prekretna točka je ona u kojoj se sfere približno savršeno tangiraju u vertikalnoj (z osi) što se postiže laganim pomicanjem prihvata na granitnoj ploči u x pa u y smjeru. U cilju utvrđivanja utjecaja nesuosnosti mjernih ticala provedeno je pet mjerenja pozicije prekretne točke [Tablica 4].

Tablica 4. Prekretne točke (visinomjer)

Mjerenje br.	Rezultati (mm)
1.	8,7624
2.	8,7618
3.	8,7627
4.	8,7616
5.	8,7609
Raspon	0,0018

Na temelju dobivenih rezultata raspon prekretnih točaka iznosi 1,8 μm. Nesuosnost ticala mjernog sustava slijedi pravokutnu razdiobu širine intervala ± 0,9 μm. Standardna nesigurnost utjecaja nesuosnosti ticala iznosi:

$$u(L_N) = \frac{0{,}9}{\sqrt{3}} = 0{,}519\ \mu\text{m} \tag{6}$$

4.1.4. Nesigurnost razlike temperature

Pretpostavlja se da su nakon adekvatnog vremena stabilizacije etalon i mjerni uređaj na istoj temperaturi, ali bi razlika temperature mogla ležati s istom vjerojatnošću bilo gdje u procijenjenom intervalu unutar 0,5 °C. Stoga standardna nesigurnost razlike temperatura iznosi:

$$u(\Delta t) = \frac{0{,}5}{\sqrt{3}} = 0{,}289\ ^\circ\text{C} \tag{7}$$

4.1.5. Nesigurnost zbog mehaničkih utjecaja

Mjerna sila digitalnog visinomjera iznosi 1 N. To je sila kojom ticalo visinomjera pritišće etalon debljine na ticalo na prihvatu za mjerenje. Elongaciju zbog utjecaja mjerne sile računamo korištenjem Hertz-ove jednadžbe:

$$\Delta = \sqrt[3]{\frac{9}{2}\frac{F^2}{d}\left(\frac{1-\upsilon^2}{E}\right)^2} \tag{8}$$

gdje je:

- E – modul elastičnosti, $2 \cdot 10^{11}$ N/m^2
- υ – Poissonov koeficijent, 0,28
- F – mjerna sila, 1 N
- d – promjer kuglice ticala visinomjera, 0,004 m

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti u jednadžbu (8) elongacija Δ iznosi:

$$\Delta = 2{,}88 \cdot 10^{-7}\text{m} = 0{,}288\ \mu\text{m} \tag{9}$$

Kako je utvrđeni iznos elongacije relativno mali, korekcija rezultata mjerenja debljine etalona neće se provoditi, a utjecaj elongacije na mjernu nesigurnost etalona biti će $u(\Delta) = 0{,}288\ \mu\text{m}$

4.1.6. Sastavljena mjerna nesigurnost u_c

U izračunu mjerne nesigurnosti, sastavljena mjerna nesigurnost u_c predstavlja zajednički doprinos svih izvora nesigurnosti i računa se prema izrazu:

$$u_c = \sqrt{u(L_{Si})^2 \cdot {c_{Lsi}}^2 + u(\delta L_{Si})^2 \cdot {c_{\delta Lsi}}^2 + u(\delta L_N)^2 \cdot {c_{\delta L_N}}^2 + u(\Delta t)^2 \cdot {c_{\Delta t}}^2 + u(\delta L_M)^2 \cdot {c_{\delta L_M}}^2} \tag{10}$$

Svaki faktor utječe na svoj način na mjernu nesigurnost prilikom mjerenja. Mjerna nesigurnost predstavlja umnožak iznosa standardne nesigurnosti i koeficijenta osjetljivosti. Radi članova koji zavise o veličini L (duljini odnosno visini stepenice etalona) potrebno je napraviti linearizaciju kroz točke početka i kraja mjernog područja, dakle 1 mm i 10 mm

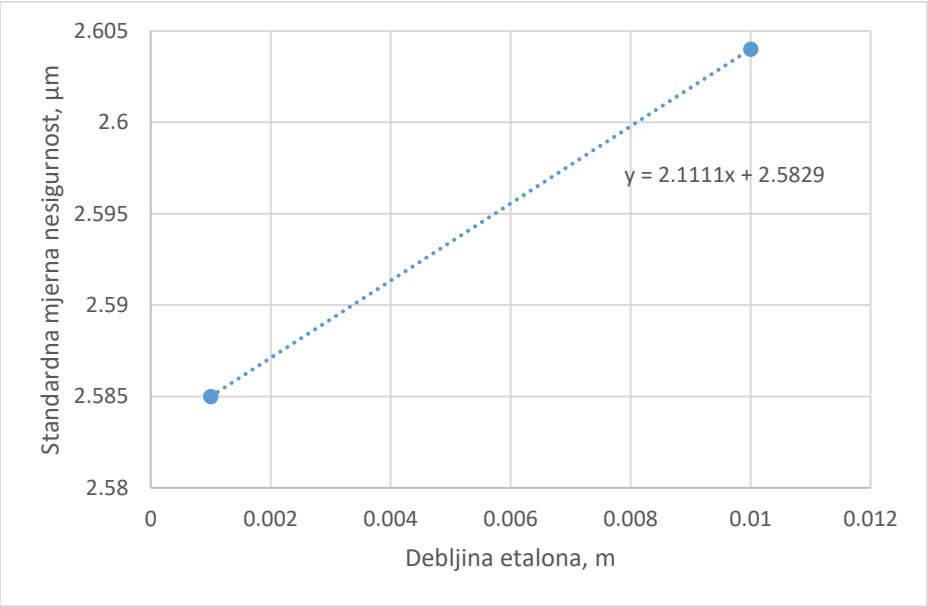
4.1.7. Linearizirana proširena mjerna nesigurnost

Sastavnice mjerne nesigurnosti [Tablica 5] su izračunati i uvršteni u izraz (10) kako bi se procjenila standardna nesigurnost početka i kraja mjernog područja.

Tablica 5. Sastavnica standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja (visinomjer)

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti µm	Koeficijent osjetljivosti c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, µm, L u m
$u(L_{Si})$	Ponovljivost	0,258	1	Normalna	0,258
$u(\delta L_{Si})$	Umjeravanje visinomjera	2,5+2,25·L	1	Normalna	2,5+2,25·L
$u(\delta L_N)$	Nesuosnost	0,519	1	Pravokutna	0,519
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura	0,289 °C	$L_s \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	3,323·L
$u(\delta L_M)$	Mehanički utjecaji	0,288	1	Pravokutna	0,288
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c			$u_c = (2{,}58 + 2{,}1 \cdot L)$ µm		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U *za* P *= 95 %,* k *= 2*			$U = 5{,}202$ µm		

Linearizacijom [Slika 7] dobivamo ovisnost standardne mjerne nesigurnosti s obzirom na mjerno područje, odnosno nazivnu duljinu stepenice ultrazvučnog stepeničastog etalona.



Slika 7. Linearizacija (visinomjer)

Iz linearizacije se dobiva:

$$u_c = (2{,}58 + 2{,}1 \cdot L)\ \mu\text{m} \tag{11}$$

S obzirom da linearni član izraza sastavljene standardne nesigurnosti ima mali doprinos jer kraj mjernog područja iznosi 10 mm, taj član se može zanemariti. Konačno, proširena mjerna nesigurnost za k = 2 i P = 95 % iznosi:

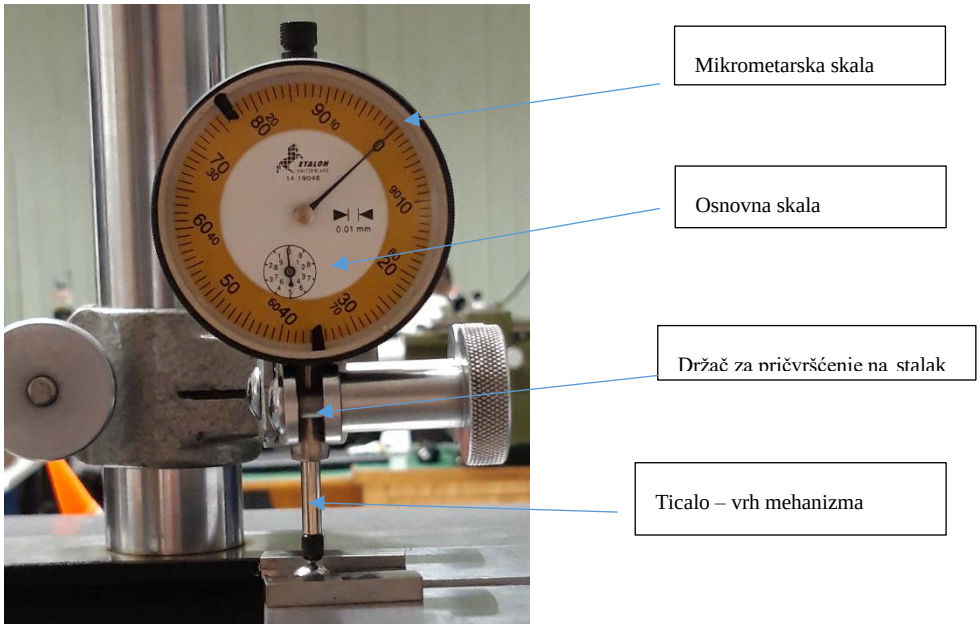
$$U = 5{,}2\ \mu m \tag{12}$$

5. MJERENJE KORIŠTENJEM MJERNE URE

Mjerna ura je često korišteno ručno mjerilo duljine u realnim proizvodnim uvjetima, ali i u laboratorijima koji se bave dimenzionalnim mjerenjima.

U ovom radu je bila korištena mjerna ura proizvođača Mitutoyo sljedećih značajki:

- Mjerno područje (0-10) mm
- Rezolucija očitanja 0,01 µm
- Promjer mjerne kapice 2,5 mm
- Mjerna sila 1 N



Slika 8. Mjerna ura

Prilikom provedbe mjerenja korištenjem mjerne ure za osiguravanje mjerenja debljina stepeničastog etalona u dvije točke koristio se isti prihvat kao u poglavlju 4. Isto tako, proveden je jednak broj ponovljenih mjerenja u istim okolišnim uvjetima, te je mjerenja proveo isti mjeritelj.

5.1. Procjena mjerne nesigurnosti (mjerna ura)

Jedinu razliku u mjernom sustavu u odnosu na sustav opisan u poglavlju 4. čini korišten mjerni instrument. Stoga su i sastavnice u matematičkom modelu procjene mjerne nesigurnosti iste kao u izrazu (1).

5.1.1. Nesigurnost mjerenja duljina etalona

Mjerenja su provedena na stepenicama nazivnih duljina 1 mm, 5 mm i 10 mm korištenjem mjerne ure proizvođača Mitutoyo, laboratorijske oznake URA 14-533 [Slika 8].
Rezultati mjerenja provedeni mjernom urom prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati mjerenja korištenjem mjerne ure

Nazivne visine stepeničastog etalona			
Mjerenje	1mm	5mm	10mm
1.	0,85800	5,03500	10,23900
2.	0,86000	5,03800	10,24100
3.	0,86200	5,04200	10,24200
4.	0,86200	5,04600	10,24700
5.	0,86300	5,04600	10,24200
6.	0,86300	5,04100	10,24200
7.	0,86100	5,04700	10,24100
8.	0,86100	5,04800	10,24200
9.	0,86100	5,04500	10,23900
10.	0,86300	5,03800	10,24000
11.	0,86100	5,04200	10,23900
12.	0,86200	5,03800	10,23900
13.	0,86200	5,03800	10,23900
14.	0,86110	5,04000	10,24000
15.	0,86100	5,03800	10,24200
16.	0,86300	5,03900	10,24200
17.	0,86100	5,03800	10,24100
18.	0,86300	5,04100	10,24100
19.	0,86800	5,04200	10,24300
20.	0,86500	5,03800	10,24000
21.	0,86100	5,04100	10,23800
22.	0,86500	5,03600	10,23900
23.	0,86100	5,03700	10,23900
24.	0,86200	5,04000	10,23800
25.	0,86000	5,04100	10,23800
26.	0,86700	5,03900	10,23900
27.	0,86100	5,04200	10,23900
28.	0,86100	5,03800	10,24200
29.	0,86600	5,04100	10,24500
30.	0,86100	5,04100	10,24000

Temeljem rezultata iz Tablica 6. izračunate su vrijednosti procijenjenih standardnih odstupanja:

Tablica 7. Standardno odstupanje (mjerna ura)

Standardno odstupanje	Iznos (μm)
s_1	2,154
s_2	3,256
s_3	2,078

Standardna nesigurnost ponovljenih mjerenja stoga iznosi:

$$u(L_{Si}) = \frac{s_p}{\sqrt{3}} = \frac{2{,}553}{\sqrt{3}} = 1{,}474 \text{ µm} \tag{13}$$

5.1.2. Nesigurnost umjeravanja mjerne ure

Nesigurnost mjerne pogreške korištene mjerne ure $u(\delta L_{Si})$ proizlazi iz potvrde o umjeravanju: $U(\delta L_{Si})$ = 3 µm, L u m; k = 2; P = 95 %

$$u(\delta L_{Si}) = \frac{U(\delta L_{Si})}{k} = \frac{3}{2} = 1{,}5 \text{ µm} \tag{14}$$

5.1.3. Nesigurnost nesuosnosti ticala

U cilju utvrđivanja utjecaja nesuosnosti mjernih ticala pet puta se mjerila pozicija prekretne točke. Ostvareni rezultati mjerenja prikazani su u Tablica 8.

Tablica 8. Prekretna točka (mjerna ura)

Mjerenje br.	Rezultati (mm)
1.	0,000
2.	0,003
3.	0,001
4.	0,002
5.	0,004
Raspon	0,004

Na temelju dobivenih rezultata, raspon prekretnih točaka iznosi 4 µm. Nesuosnost ticala mjernog sustava slijedi pravokutnu razdiobu sa širinom intervala ± 2 µm. Standardna nesigurnost utjecaja nesuosnosti ticala stoga iznosi:

$$u(L_N) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}15 \text{ µm} \tag{15}$$

5.1.4. Nesigurnost razlike temperature

Mjerenja provedena mjernom urom su provodila su se u istim okolišnim uvjetima kao što je to bio slučaj s mjerenjima provedenim korištenjem visinomjera. Standardna nesigurnost razlike temperatura stoga iznosi:

$$u(\Delta t) = \frac{0{,}5}{\sqrt{3}} = 0{,}289 \text{ °C} \tag{16}$$

5.1.5. Nesigurnost zbog mehaničkog utjecaja

Mjerna sila korištene mjerne ure iznosi 1 N. To je sila kojom ticalo mjerne ure pritišće etalon debljine na ticalo na prihvatu za mjerenje. Elongaciju zbog utjecaja mjerne sile računamo korištenjem Hertz-ove jednadžbe:

$$\Delta = \sqrt[3]{\frac{9}{2}\frac{F^2}{d}\left(\frac{1-\upsilon^2}{E}\right)^2} \tag{17}$$

gdje je:

- E – modul elastičnosti , $2 \cdot 10^{11}$ N/m^2
- υ – Poissonov koeficijent, 0,28
- F – mjerna sila, 1 N
- d – promjer kuglice ticala mjerne ure, 0,0025 m

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti iznos elongacije Δ:

$$\Delta = 3{,}368 \cdot 10^{-7}\text{m} = 0{,}3368\ \mu\text{m} \tag{18}$$

Kako je utvrđeni iznos elongacije relativno mali, korekcija rezultata mjerenja visina stepeničastog etalona neće se provoditi, a utjecaj elongacije na mjernu nesigurnost etalona biti će $u(\Delta) = 0{,}3368\ \mu\text{m}$

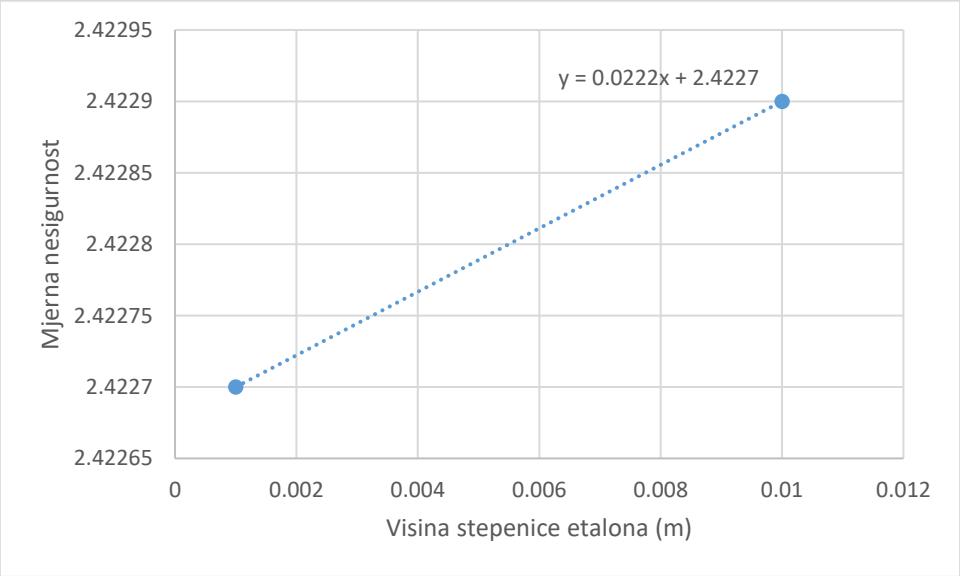
5.1.6. Linearizirana proširena mjerna nesigurnost

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost računa se prema izrazu (10).

Zbog sastavnica ovisnih o duljini provodi se linearizacija rezultata uvrštavanjem vrijednosti početka i kraja mjernog područja (1 mm i 10 mm) u izraze za doprinos mjernoj nesigurnosti [Slika 9]. Svi mjerni utjecaji prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Sastavnica standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja (mjerna ura)

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti µm	Koeficijent osjetljivosti c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti µm, L u m
$u(L_{Si})$	Ponovljivost	1,474	1	Normalna	1,474
$u(\delta L_{Si})$	Umjeravanje mjerne ure	1,5	1	Normalna	1,5
$u(\delta L_N)$	Nesuosnost	1,1547	1	Pravokutna	1,1547
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura	0,289 °C	$L_s \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	3,323·L
$u(\delta L_M)$	Mehanički utjecaji	0,3368	1	Pravokutna	0,3368
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c			$u_c = (2{,}42 + 0{,}02 \cdot L)$ µm		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost *U za P = 95 %, k = 2*			$U = 4{,}84$ µm		



Slika 9. Linearizacija (mjerna ura)

Iz linearizacije se dobiva:

$$u_c = (2{,}42 + 0{,}02 \cdot L)\ \mu\text{m} \tag{19}$$

S obzirom da linearni član izraza sastavljene standardne nesigurnosti ima mali doprinos jer kraj mjernog područja iznosi 1 mm, taj član se može zanemariti. Konačno, proširena mjerna nesigurnost za $k = 2$ i $P = 95$ % iznosi:

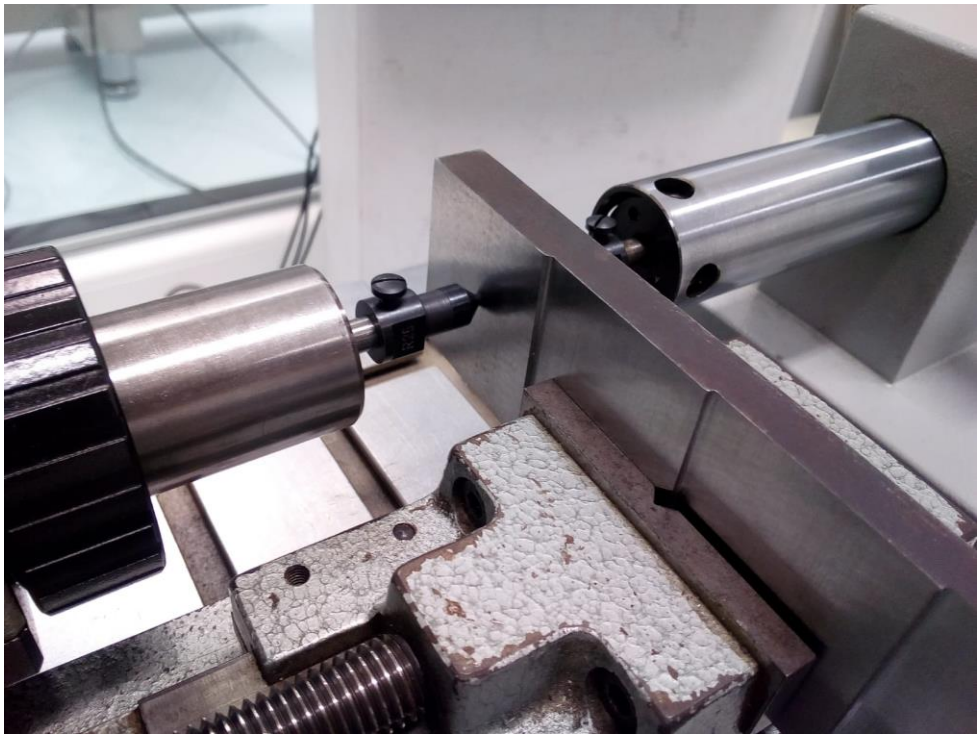
$$U = 5{,}2\ \mu\text{m} \tag{20}$$

6. MJERENJE KORIŠTENJEM JEDNOOSNOG UNIVERZALNOG UREĐAJA

Mjerenja su izvršena na jednoosnom univerzalnom uređaju, proizvođača JOINT, laboratorijske oznake MU 44-421. Na slici 11 prikazan je korišteni mjerni uređaj koji se nalazi u laboratorijskoj prostoriji s mogućnošću regulacije okolišne temperature u rasponu ±0,5 °C.



Slika 10. Jednoosni univerzalni mjerni uređaj



Slika 11. Provedba mjerenja jednoosnim mjernim uređajem

Značajke korištenog jednoosnog mjernog uređaja:

- Mjerno područje: (0-600) mm
- Rezolucija očitanja: 0,01 µm
- Promjer mjerne kuglice: 2,5 mm
- Mjerna sila: 2,3 N

Korišteni jednoosni (x os) mjerni uređaj uključuje i prihvatni stol na koji se smješta predmet mjerenja, a kojeg je moguće pomicati u smjeru z i y osi.

6.1. Procjena mjerne nesigurnosti (jednoosni mjerni uređaj)

Za razliku od matematičkih modela procjena mjernih nesigurnosti iz poglavlja 4.1 i 5.1, u procjenu nesigurnosti rezultata ostvarenih jednoosnim uređajem nije uzet u obzir utjecaj nesuosnosti mjernih kapica, zbog same konstrukcijske izvedbe mjernog uređaja. Stoga se matematički model procjene nesigurnosti rezultata ostvarenih jednoosnim uređajem određuje temeljem izraza:

$$L_S = L_{Si} + \delta L_{Si} + L_s \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t + \delta L_M \tag{21}$$

gdje je:

- L_S – visina etalona
- L_{Si} – izmjerena visina etalona debljine
- δL_{Si} – utjecaj mjernog uređaja
- Δt – utjecaj razlike temperatura
- δL_M – mehanički utjecaj

6.1.1. Nesigurnost mjerenja duljina etalona

Kao i u prethodnim proračunima mjernih nesigurnosti provedeno je 30 ponovljenih mjerenja na stepenicama nazivnih duljina 1 mm, 5 mm i 10 mm.

Tablica 10. Rezultati mjerenja jednoosnim mjernim uređajem

Nazivne visine stepeničastog etalona			
Mjerenje	1mm	5mm	10mm
1.	0,86610	0,04850	0,23990
2.	0,86600	0,04860	0,23980
3.	0,86590	0,04850	0,23980
4.	0,86570	0,04840	0,23970
5.	0,86600	0,04860	0,23990
6.	0,86610	0,04870	0,23970
7.	0,86570	0,04850	0,23970
8.	0,86600	0,04860	0,23980
9.	0,86590	0,04850	0,23980
10.	0,86580	0,04860	0,23970
11.	0,86570	0,04840	0,24000
12.	0,86570	0,04850	0,23990
13.	0,86590	0,04860	0,23970
14.	0,86600	0,04850	0,24000
15.	0,86590	0,04840	0,24000
16.	0,86580	0,04850	0,23970
17.	0,86600	0,04860	0,23970
18.	0,86610	0,04850	0,23980
19.	0,86590	0,04860	0,23990
20.	0,86590	0,04850	0,24000
21.	0,86600	0,04840	0,24000
22.	0,86610	0,04840	0,23970
23.	0,86600	0,04850	0,23980
24.	0,86600	0,04870	0,23970
25.	0,86580	0,04870	0,23990
26.	0,86590	0,04860	0,23990
27.	0,86600	0,04850	0,24000
28.	0,86590	0,04840	0,23970
29.	0,86600	0,04860	0,23980
30.	0,86590	0,04850	0,23970

Procijenjena standardna odstupanja rezultata računata su prema (2), te je potom izračunata vrijednost zbirnog procijenjenog standardnog odstupanja prema (3).

Tablica 11. Standardno odstupanje (jednoosni mjerni uređaj)

Standardno odstupanje	Iznos (μm)
s_1	0,122
s_2	0,0915
s_3	0,0117

Standardna nesigurnost ponovljivosti iznosi:

$$u(L_{Si}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}111}{\sqrt{3}} = 0{,}06\ \mu\text{m} \tag{22}$$

6.1.2. Nesigurnost umjeravanja jednoosnog mjernog uređaja

Nesigurnost mjerne pogreške korištenog jednoosnog mjernog uređaja $u(\delta L_{Si})$ proizlazi iz potvrde o umjeravanju: $U(\delta L_{Si})$ = (0,32+3,4·L) µm, L u m; k = 2; P = 95 %

$$u(\delta L_{Si}) = \frac{U(\delta L_{Si})}{k} = \frac{(0{,}32 + 3{,}4L)}{2} = (0{,}16 + 1{,}7 \cdot L)\ \mu\text{m} \tag{23}$$

6.1.3. Nesigurnost razlike temperature

Etalon i mjerni uređaj su duže vremena stajali u prostoriji mjerenja te se može pretpostaviti da se nalazi u intervalu unutar 0,25 °C. standardna nesigurnost razlike temperatura je prema (7):

$$u(\Delta t) = \frac{0{,}25}{\sqrt{3}} = 0{,}145\ ^\circ\text{C} \tag{24}$$

6.1.4. Nesigurnost uslijed mehaničkog utjecaja

Mjerna sila na jednoosnom mjernom uređaju iznosila je 2,3 N te prema jednadžbi (8) elongacija Δ iznosi:

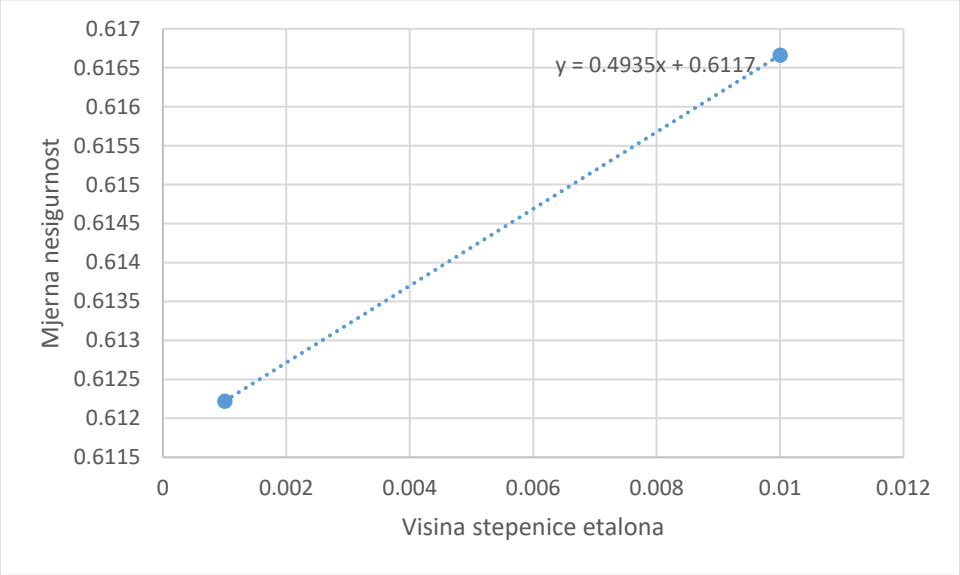
$$\Delta = 5{,}87 \cdot 10^{-7}\text{m} = 0{,}58\ \mu\text{m} \tag{25}$$

6.1.5. Linearizirana proširena mjerna nesigrunost

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost računa se prema izrazu (10). U Tablica 12 navedene su vrijednosti doprinosa mjernoj nesigurnosti, a grafički prikaz provedene linearizacije prikazan je Slika 12.

Tablica 12. Sastavnica standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja (jednoosni mjerni uređaj)

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti µm	Koeficijent osjetljivosti c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti µm, L u m
$u(L_{Si})$	Ponovljivost	0,064	1	Normalna	0,064
$u(\delta L_{Si})$	Umjeravanje mjerne ure	0,16+1,7·L	1	Normalna	0,16+1,7·L
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura	0,145 °C	$L_s \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	1,662·L
$u(\delta L_M)$	Mehanički utjecaji	0,587	1	Pravokutna	0,587
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c			$u_c = (0{,}61 + 0{,}49 \cdot L)$ µm		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost *U za P = 95 %, k = 2*			$U = 1{,}23$ µm		



Slika 12. Linearizacija (jednoosni mjerni uređaj)

Iz linearizacije se dobiva:

$$u_c = (0{,}61 + 0{,}49 \cdot L)\ \mu\text{m} \tag{26}$$

S obzirom da linearni član izraza sastavljene standardne nesigurnosti ima mali doprinos jer kraj mjernog područja iznosi 10 mm, taj član se može zanemariti. Konačno, proširena mjerna nesigurnost za $k = 2$ i $P = 95$ % iznosi:

$$U = 1{,}23\ \mu m \tag{27}$$

7. USPOREDBA I ANALIZA OSTVARENIH REZULTATA

Analizom izmjerenih vrijednosti i procijenjenih mjernih nesigurnosti može se izvesti usporedba rezultata mjerenja etalona ostvarenih korištenjem tri različita mjerna uređaja. Iako jednoosni mjerni uređaj ima bitno bolje mjeriteljske značajke, odlučeno je provesti analizu usporedbe rezultata temeljem računa težinska srednja vrijednost usporedbe. Razlog tomu je što niti jedna metoda (mjerni uređaj) nije akreditirana, odnosno potvrđena kroz rezultate međulaboratorijske usporedbe. Ako se potvrdi usporedivost rezultata temeljem izraza od (28) do (35) može se zaključiti da je bilo kojim, od tri korištena mjerna uređaja, moguće provesti umjeravanje ultrazvučnog stepeničastog etalona.

7.1. Analiza mjernih rezultata

Za svaki mjerni rezultat (*i*) računa se normirana težinska vrijednost w_i prema izrazu:

$$w_i = C \cdot \frac{1}{u^2(x_i)} \tag{28}$$

gdje je $u(x_i)$ standardna nesigurnost rezultata "*i*" a *C* je težinski faktor koji se računa prema izrazu:

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u^2(x_i)}} \tag{29}$$

Težinska srednja vrijednost usporedbe (referentna vrijednost) računa se kao:

$$x_{ref} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i \tag{30}$$

Dok se standardna nesigurnost referentne vrijednosti računa se kao:

$$u(x_{ref}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} u^{-2}(x_i)}} \tag{31}$$

Kako bi se donijela ocjena da li je mjerni rezultat usporediv potrebno je izračunati faktor slaganja *En* prema izrazu:

$$E_n = \frac{x_i - x_{ref}}{2 \cdot \sqrt{u^2(x_i) - {u_{int}}^2(x_{ref})}} \tag{32}$$

Ukoliko je apsolutna vrijednost faktor slaganja *En* manja od 1 smatra se da je rezultat usporediv s referentnom vrijednošću.

Pri tome mora biti zadovoljen i Birgov kriterij dan izrazom:

$$R_B < \sqrt{1 + \sqrt{\frac{8}{n-1}}} \tag{33}$$

gdje je:

$$R_B = \frac{u_{ext}(x_{ref})}{u_{int}(x_{ref})} \tag{34}$$

Birgov kriterij govori dali ima statistički značajne razlike između rezultata mjerenja.

Iznos standardne devijacije u_{int} računa se temeljem procijenjenih standardnih devijacija rezultata mjerenja:

$$u_{int}(x_{ref}) = \sqrt{C} \tag{35}$$

Dok se standardna devijacija $u_{ext}(x_{ref})$ računa prema sljedećem izrazu:

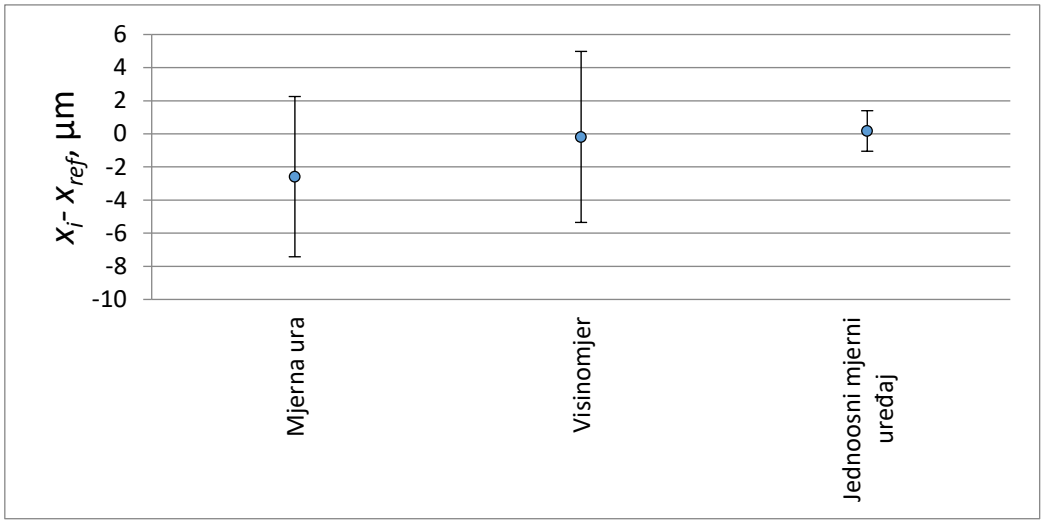
$$u_{ext}(x_{ref}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - x_{ref})^2}{u^2(x_i)}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u^2(x_i)}}} \tag{36}$$

U slučaju da kriterij iz izraza *(19)* nije zadovoljen, iz analize se izbacuje rezultat s najvećom vrijednošću faktora slaganja *En.* Taj se postupak ponavlja dok se ne zadovolji kriterij dan izrazom *(19).*

Temeljem gore navedenih izraza provedena je usporedba rezultata za svaku od 10 mjerenih debljina stepenica stepeničastog ultrazvučnog etalona. Rezultati analize prikazani su tablično (Tablica 16. do Tablica 26.) i grafički (Slika 14. do Slika 24.).

Tablica 13. Usporedba rezultata (1 mm)

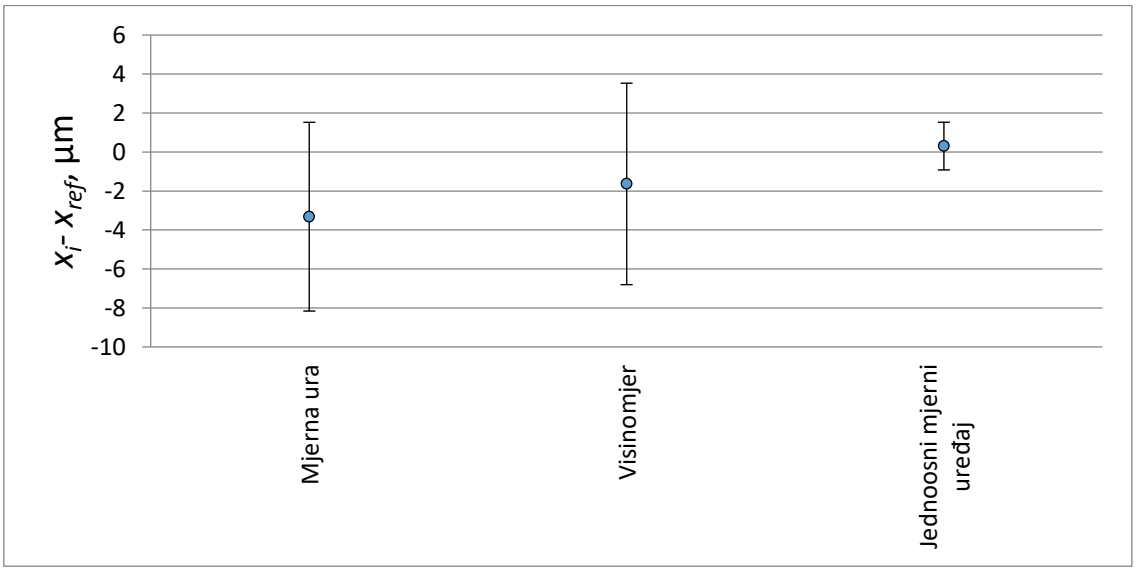
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	0,864200	4,84	-0,55	☑	-2,58	4,70
Visinomjer	0,866600	5,16	-0,04	☑	-0,18	5,03
Jednoosni mjerni uređaj	0,866960	1,22	0,44	☑	0,18	0,40



Slika 13. Usporedba rezultata (1 mm)

Tablica 14. Usporedba rezultata (2 mm)

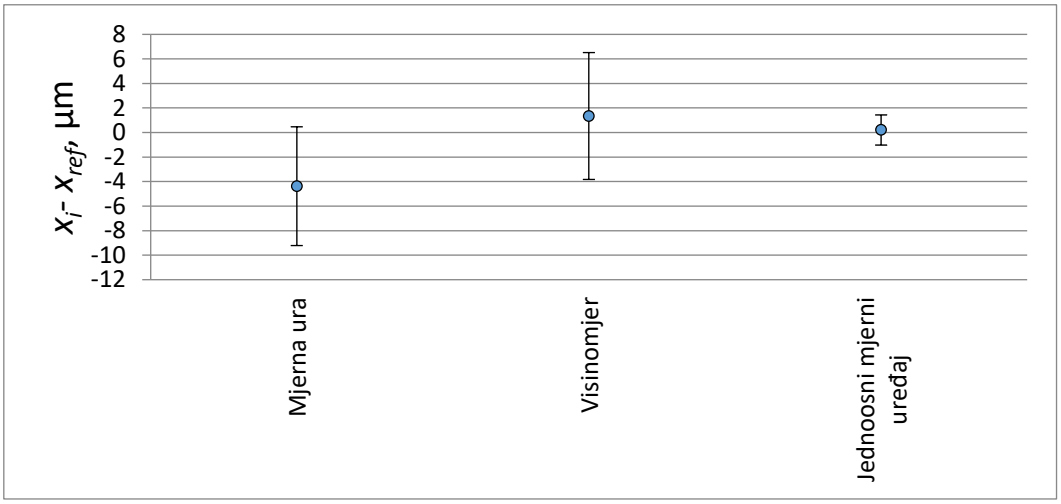
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	1,902000	4,84	-0,71	☑	-3,32	4,70
Visinomjer	1,903680	5,17	-0,32	☑	-1,64	5,04
Jednoosni mjerni uređaj	1,905620	1,22	0,76	☑	0,30	0,40



Slika 14. Usporedba rezultata (2 mm)

Tablica 15. Usporedba rezultata (3 mm)

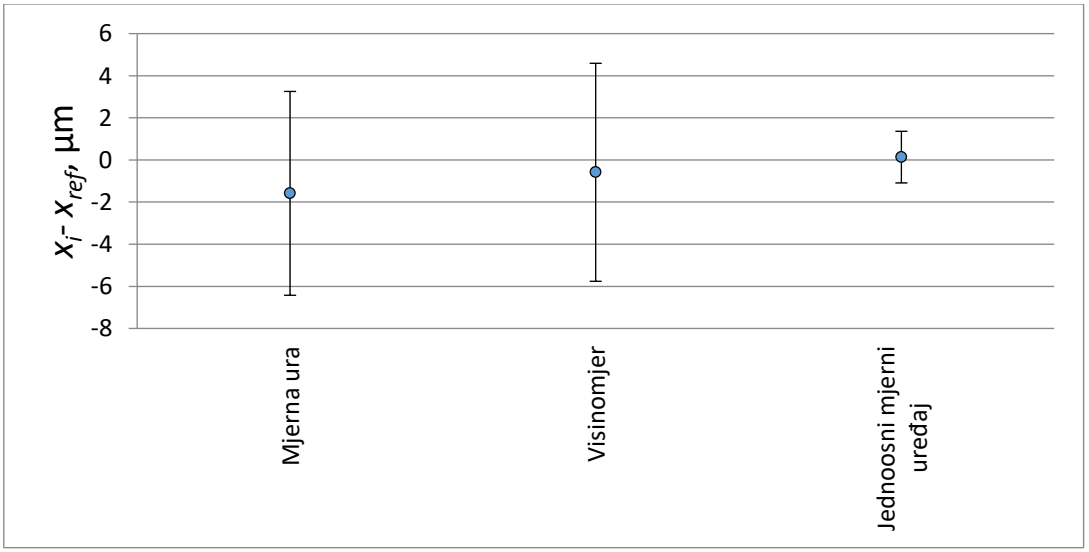
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	2,922000	4,84	-0,93	☑	-4,37	4,70
Visinomjer	2,927720	5,17	0,27	☑	1,35	5,04
Jednoosni mjerni uređaj	2,926580	1,23	0,51	☑	0,21	0,40



Slika 15 Usporedba rezultata (3 mm)

Tablica 16. Usporedba rezultata (4 mm)

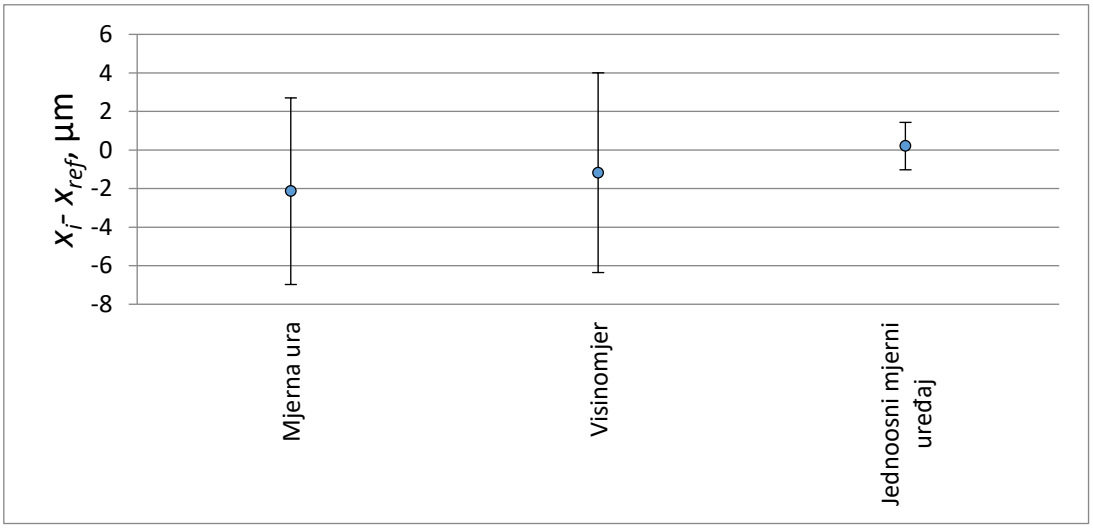
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	4,014000	4,84	-0,34	☑	-1,59	4,70
Visinomjer	4,015000	5,18	-0,12	☑	-0,59	5,05
Jednoosni mjerni uređaj	4,015720	1,23	0,33	☑	0,13	0,40



Slika 16. Usporedba rezultata (4 mm)

Tablica 17. Usporedba rezultata (5 mm)

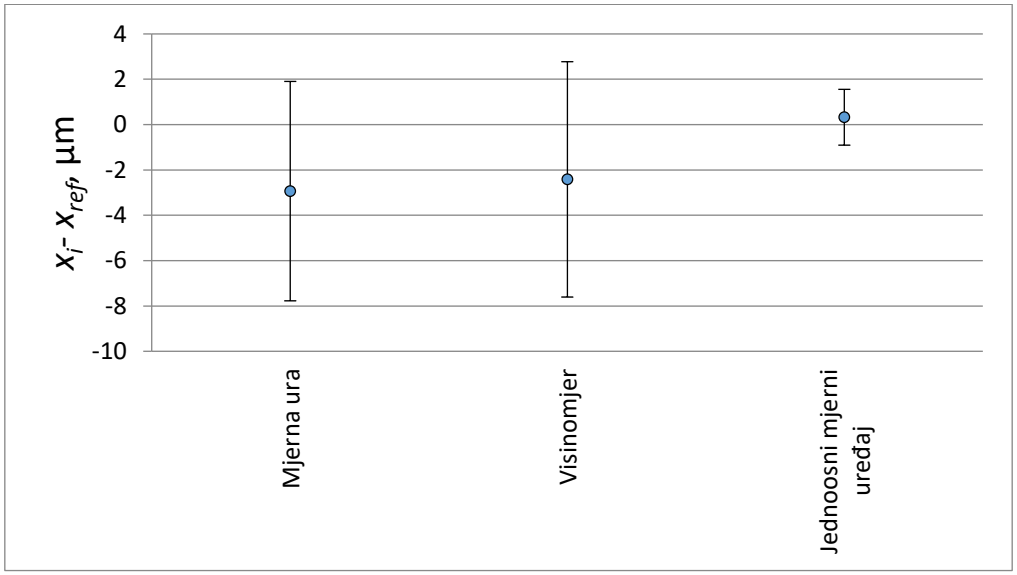
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	5,044800	4,84	-0,45	☑	-2,14	4,70
Visinomjer	5,045760	5,18	-0,23	☑	-1,18	5,05
Jednoosni mjerni uređaj	5,047140	1,23	0,51	☑	0,20	0,40



Slika 17. Usporedba rezultata (5 mm)

Tablica 18. Usporedba rezultata (6 mm)

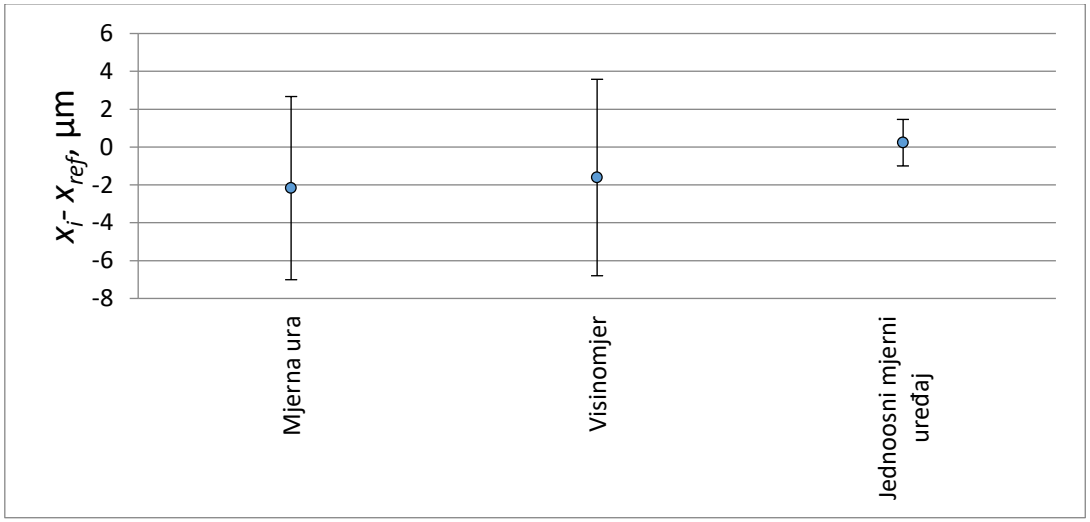
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	6,263000	4,84	-0,62	☑	-2,93	4,70
Visinomjer	6,263520	5,19	-0,48	☑	-2,41	5,06
Jednoosni mjerni uređaj	6,266260	1,23	0,81	☑	0,33	0,40



Slika 18. Usporedba rezultata (6 mm)

Tablica 19. Usporedba rezultata (7 mm)

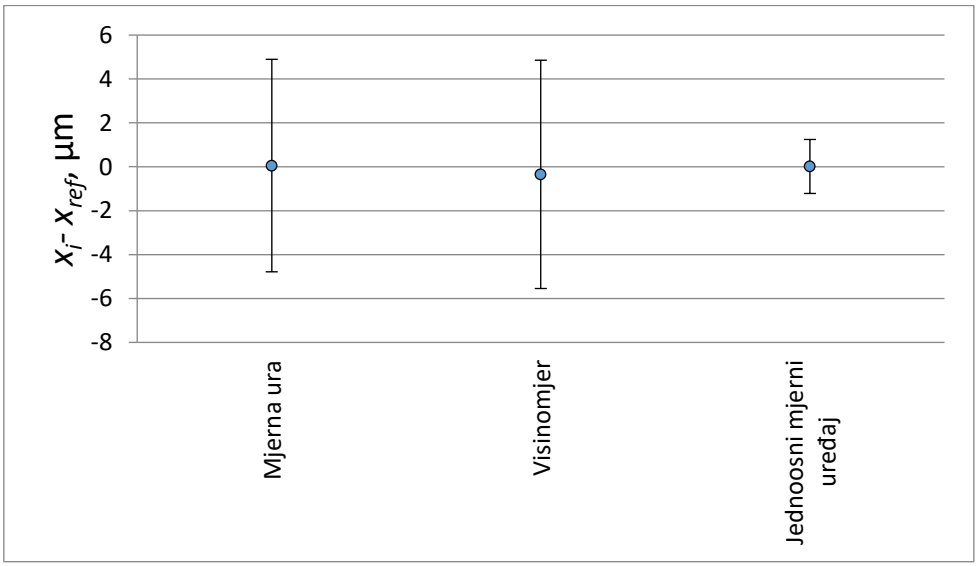
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	7,317400	4,84	-0,46	☑	-2,17	4,70
Visinomjer	7,317960	5,19	-0,32	☑	-1,61	5,06
Jednoosni mjerni uređaj	7,319800	1,23	0,57	☑	0,23	0,40



Slika 19. Usporedba rezultata (7 mm)

Tablica 20. Usporedba rezultata (8 mm)

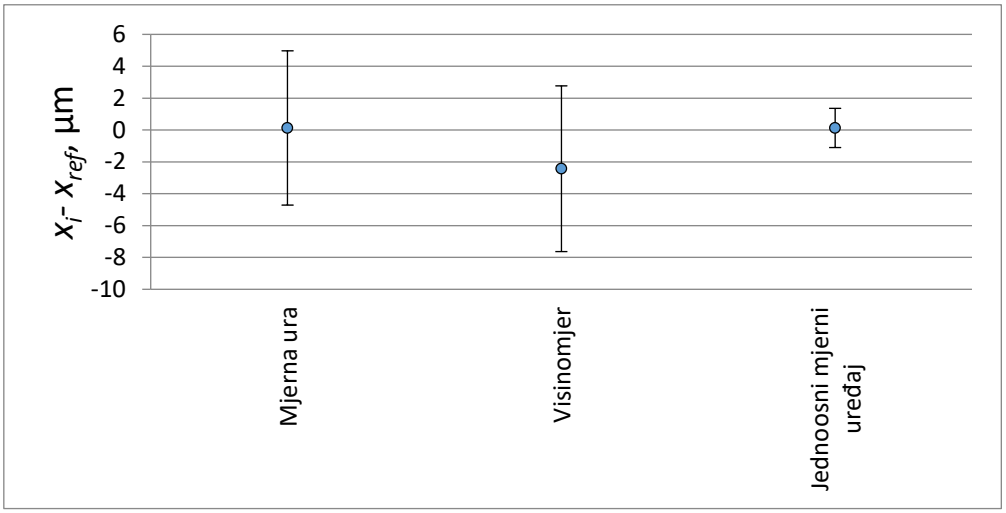
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	8,282600	4,84	0,01	☑	0,06	4,70
Visinomjer	8,282200	5,20	-0,07	☑	-0,34	5,07
Jednoosni mjerni uređaj	8,282560	1,23	0,04	☑	0,02	0,40



Slika 20. Usporedba rezultata (8 mm)

Tablica 21. Usporedba rezultata (9 mm)

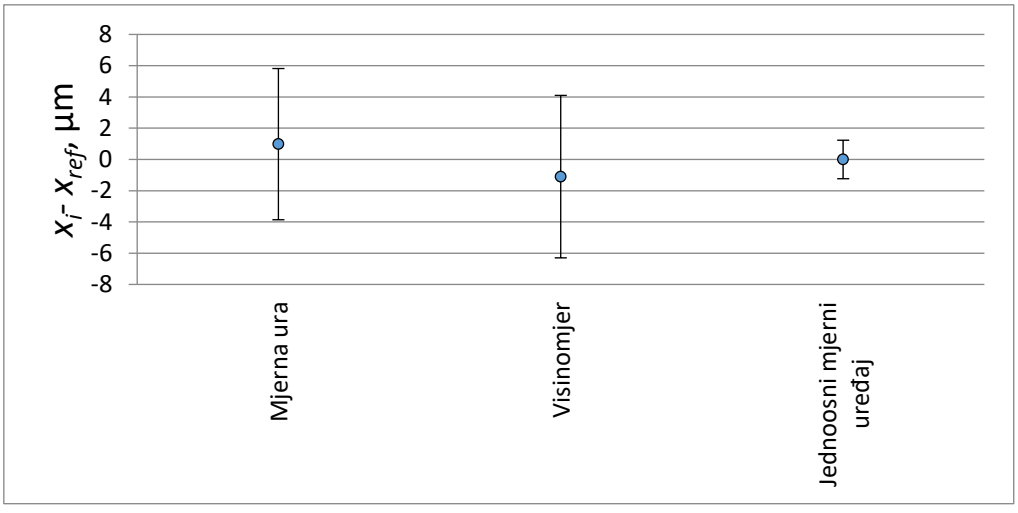
Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	9,328400	4,84	0,03	☑	0,13	4,70
Visinomjer	9,325840	5,20	-0,48	☑	-2,43	5,07
Jednoosni mjerni uređaj	9,328400	1,23	0,32	☑	0,13	0,40



Slika 21. Usporedba rezultata (9 mm)

Tablica 22. Usporedba rezultata (10 mm)

Sredstvo mjerenja	Izmjerena vrijednost mm	$U(x_i)$, $k = 2$ µm	*En*		$x_i - x_{ref}$ µm	$U(x_i - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Mjerna ura	10,242000	4,84	0,21	☑	0,98	4,70
Visinomjer	10,239920	5,20	-0,22	☑	-1,10	5,07
Jednoosni mjerni uređaj	10,241020	1,23	0,00	☑	0,00	0,41



Slika 22. Usporedba rezultata (10 mm)

8. ZAKLJUČAK

U cilju osiguravanja pouzdanih i sljedivih rezultata mjerenja mjernu je opremu potrebno redovito umjeravati. Jedna od sastavnica sustava za ultrazvučno ispitivanje jesu etaloni kojima se podešavaju radne karakteristike ultrazvučnih uređaja. Stepeničasti ultrazvučni etaloni široko su korišteni, a vrijednosti njihovih dimenzionalnih značajki bitno utječu na karakteristike samog ultrazvučnog sustava te je stoga potrebno pouzdano utvrditi njihove vrijednosti. U radu je razrađen postupak umjeravanja stepeničastog radnog etalona korištenjem tri mjerna uređaja: jednoosni mjerni uređaj, visinomjer i mjerna ura. Za sva tri postupka umjeravanja procijenjene su mjerene nesigurnosti.

Provedena je i usporedba rezultata umjeravanja ostvarenih sa sva tri mjerena uređaja kako bi se moglo zaključiti o izboru prikladnog mjernog uređaja za buduća umjeravanja ultrazvučnog stepeničastog etalona u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Rezultati provedene analize potvrdili su usporedivost rezultata ostvarenih sa sva tri mjerna uređaja. Očekivano, mjerne nesigurnosti rezultata ostvarenih korištenjem jednoosnog uređaja značajno su manje nego što je to slučaj s nesigurnostima rezultata ostvarenih korištenjem visinomjera i mjerne ure. Isto tako, nije uočen trend ostvarenim aritmetičkim sredinama rezultata mjerenja. Stoga se može zaključiti kako su sva tri mjerna uređaja prikladna za provedbu umjeravanja stepeničastih ultrazvučnih etalona.

Kako su troškovi održavanja i umjeravanja jednoosnog mjernog uređaja znatno viši no što je to slučaj s visinomjerom i mjernom urom, provedba umjeravanja stepeničastih ultrazvučnih etalona jednoosnim uređajem nije opravdana. Preporuka je da se buduća umjeravanja stepeničastih ultrazvučnih etalona provode korištenjem mjerne ure. Dva su razloga za takav zaključak. Kao prvo, Laboratorij za precizna mjerenja dužine raspolaže s većim brojem tih mjerila duljine, a samo s jednim visinomjerom. Nadalje, iako nema značajne razlike u trošku umjeravanja visinomjera i mjerne ure, sama provedba umjeravanja mjerne ure zahtjeva kraće vrijeme.

LITERATURA

[1] JCGM 200:2008, Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), Državni zavod za mjeriteljstvo

[2] Svijet kvalitete: https://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/548-mjerni-etaloni [04.12.2019]

[3] NDE Education : https://www.nde.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/CalibrationMeth/calibrationmethods.htm [6.12.2019.]

[4] ISO 2400:2012 (E): https://www.sis.se/api/document/preview/915286/ [10.12.2019.]

[5] BS EN ISO 16946:2015: https://kupdf.net/download/bs-en-iso-16946-2015_5b700536e2b6f51428bd6c00_pdf [11.2.2020.]

[6] Marković I.: Razrada metode umjeravanja etalona za ultrazvučno ispitivanje u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina, Diplomski rad, 2017.

[7] Zaimović-Uzunović N.,Mjerna tehnika:, Zenica; 2006.

[8] Runje B.,Autorizirana predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo; Zagreb 2014.

PRILOZI

I. CD-R disc