

Razrada nove metode umjeravanja etalona debljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu

Lukač, Sandro

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:687487>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Sandro Lukač

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić, dipl. ing.

Student:

Sandro Lukač

Zagreb, 2016. godina.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici, **doc. dr. sc. Gorani Baršić** na stručnoj pomoći i savjetima koji su mi omogućili da uspješno završim ovaj rad.

Josipu Smoljiću zahvaljujem na pomoći oko projektiranja prihvata i provedbe mjerenja u Laboratoriju.

Htio bih se zahvaliti i kolegama s Katedre za alatne strojeve na pomoći oko izrade prihvata.

Zahvaljujem se obitelji na pruženom strpljenju i povjerenju koje su mi pružili tijekom studija i tijekom pisanja ovog rada.

Sandro Lukač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske 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:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Sandro Lukač**

Mat. br.: 0035186580

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Razrada nove metode umjeravanja etalona debljine u Nacionalnom
laboratoriju za duljinu**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Development of new method for calibration of feeler gauges in National
Laboratory for Length**

Opis zadatka:

Umjeravanje etalona debljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu jedan je od 35 akreditiranih postupaka. Postojeća metoda umjeravanja etalona debljine provodi se na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju. S obzirom na propisana dopuštena odstupanja mjernih listića provedba umjeravanja na uređaju visokih mjeriteljskih značajki kao što je jednoosni univerzalni mjerni uređaj nije potrebna. Temeljem raspoložive opreme u Nacionalnom laboratoriju za duljinu razraditi će se nova metoda za umjeravanje etalona debljine. U okviru diplomskog zadatka student ima sljedeće zadatke:

1. Opisati sustav rada Nacionalnog laboratorija za duljinu na području umjeravanja etalona debljine.
2. S obzirom na zahtijevane točnosti i temeljem raspoložive opreme u Nacionalnom laboratoriju za duljinu razraditi novu metodu za provedbu umjeravanja etalona debljine, s uključenom procjenom mjerne nesigurnosti.
3. Provesti umjeravanje etalona debljine prema postojećoj, akreditiranoj metodi i prema predloženoj mjernoj metodi.
4. Provesti usporedbu rezultata mjerenja ostvarenih s obje metode te donijeti zaključke o prikladnosti nove metode za umjeravanje etalona debljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

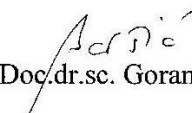
Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.


Predviđeni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
1. UVOD	1
2. ETALONI DEBLJINE	5
3. AKREDITIRANI POSTUPAK UMJERAVANJA	11
4. EKSPERIMENTALNI DIO	15
5. UMJERAVANJE ETALONA DEBLJINE PREMA PREDLOŽENOM POSTUPKU	22
6. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI	27
7. USPOREDBA I ANALIZA OSTVARENIH REZULTATA	36
8. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA	42
PRILOZI	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Rašljasti kalibar	2
Slika 2.	Kalibar za kontrolu unutarnjih mjera	2
Slika 3.	Granična mjerila za navoje.....	3
Slika 4.	Granična mjerila za navoje.....	4
Slika 5.	Etaloni debljine.....	5
Slika 6.	Provjera zazora [11]	6
Slika 7.	Garnitura etalona debljine prema DIN 2275 [6]	7
Slika 8.	Minimalne potrebne dimenzije prema DIN 2275 [6].....	7
Slika 9.	Mjerna mjesta	11
Slika 10.	Dijagram toka postupka umjeravanja.....	12
Slika 11.	Način mjerenja	13
Slika 12.	Potvrda o akreditaciji.....	14
Slika 13.	Visinomjer	17
Slika 14.	Radionički crtež.....	20
Slika 15.	Sferno ticalo prihvata	21
Slika 16.	Prihvat spreman za mjerenje	21
Slika 17.	Korišteni etaloni debljine	22
Slika 18.	Element za umjeravanje ticala visinomjera.....	23
Slika 19.	Funkcija maksimalne vrijednosti.....	24
Slika 20.	Etalon debljine u prvom mjernom mjestu	25
Slika 21.	Linearizacija	34

POPIS TABLICA

Tablica 1. Nazivne mjere i pripadajuća dopuštena odstupanja prema DIN 2275	8
Tablica 2. Komercijalno dostupne garniture etalona debljine.....	10
Tablica 3. Odabrani etaloni debljine	15
Tablica 4. Rezultati mjerenja na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju.....	16
Tablica 5. Rezultati mjerenja na visinomjeru.....	26
Tablica 6. Rezultati prve garniture mjerenja na visinomjeru	29
Tablica 7. Standardna odstupanja za svaki etalon debljine	30
Tablica 8. Prekretne točke	31
Tablica 9. Točke pravca	34
Tablica 10. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja.....	35
Tablica 11. Faktor slaganja	37
Tablica 12. Odstupanje izmjerenih vrijednosti prvog mjerenja	38
Tablica 13. Odstupanje izmjerenih vrijednosti drugog mjerenja	38

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1. Assem60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
s	mm	Nazivna mjera etalona debljine
L_S	mm	Debljina etalona
L_{Si}	mm	Izmjerena duljina etalona debljine
δL_{Si}	μm	Utjecaj mjernog uređaja
δL_N	μm	Utjecaj nesuosnosti mjernih kapica
Δt	$^{\circ}\text{C}$	Utjecaj razlike temperatura
δL_M	μm	Mehanički utjecaj
u	μm	Mjerna nesigurnost
U	μm	Proširena mjerna nesigurnost
s_i	μm	Procijenjeno standardno odstupanje
s_p	μm	Zbirno procijenjeno standardno odstupanje
n	-	Broj ponovljenih mjerenja
k	-	Faktor pokrivanja
E	N/m^2	Modul elastičnosti
ν	-	Poissonov koeficijent
F	N	Mjerna sila
d	mm	Promjer kuglice ticala visinomjera
Δ	mm	Elongacija
u_c	μm	Sastavljena mjerna nesigurnost
E_n	-	Faktor slaganja
x_i	mm	Rezultat mjerenja na visinomjeru
x_{ref}	mm	Rezultat referentnog postupka
\bar{x}	mm	Aritmetička sredina rezultata
c_i	-	Koeficijent osjetljivosti
$\bar{\alpha}$	K^{-1}	Koeficijent temperaturnog rastezanja
P	%	Razina povjerenja

SAŽETAK

Tema ovog rada je razrada novog postupka umjeravanja etalona debljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu. Umjeravanje etalona debljine jedan je od 35 akreditiranih postupaka. Postojeći postupak umjeravanja etalona debljine provodi se na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju. S obzirom na dopuštena odstupanja etalona debljine, umjeravanje direktnim postupkom na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju visoke rezolucije nije potrebno te se radi rasterećenja navedenog uređaja predlaže novi postupak umjeravanja visinomjerom.

Za predložen novi postupak umjeravanja konstruiran je prihvat s ticalom koji je izrađen na Katedri za alatne strojeve. Da bi predložen postupak umjeravanja etalona debljine bio potpun, proveden je detaljan proračun procjene mjerne nesigurnosti. Ocjena prikladnosti predloženog postupka umjeravanja etalona debljine provedena je usporedbom rezultata umjeravanja etalona ostvarenih s predloženim postupkom i prema standardnom akreditiranom postupku. S obzirom na ostvarene rezultate usporedbe i propisanih dopuštenih odstupanja doneseni su zaključci o mogućoj primjeni predloženog postupka umjeravanja etalona debljine.

Ključne riječi: Umjeravanje etalona debljine, akreditirani postupak, jednoosni univerzalni mjerni uređaj, visinomjer, prihvat s ticalom, mjerna nesigurnost, faktor slaganja.

1. UVOD

Svakodnevno se u industriji koristi mjerna oprema različitih mjeriteljskih značajki, posebice s aspekta mjerne točnosti i preciznosti. Sva mjerna oprema izrađuje se s jednim ciljem, a to je da izmjerena vrijednost bude što bliža stvarnoj vrijednosti i sa što manjom mogućnošću za pogrešku.

Utvrđivati točnost mjera, oblika i položaja površina pri obradi materijala nužno je da bi se ostvarile zadane tolerancije i točnost.

U mjernu opremu ubrajamo mjerne uređaje, kontrolnike, etalone i pomoćna sredstva.

Mjerni uređaji (pomično mjerilo, mikrometar, mjerna ura) služe objektivnom mjerenju veličina s mogućnošću pokazivanja trenutnog, relativnog ili kumulativnog rezultata mjerenja.[1]

Pomoćna sredstva su prizme, stalci, podloge i razni držači.

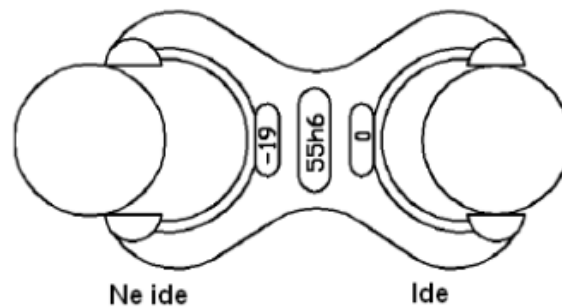
U ovom radu najviše će se dati osvrt na kontrolnike. Kontrolnici su predmeti sa određenom mjerom ili oblikom ispitnog predmeta koji služe za provjeru točnosti izrade. Njihov najveći značaj predstavlja brzu metodu kontrole grešaka koje najčešće nastaju korištenjem neprikladnog mjerila u pogledu točnosti mjerenja ili istrošenog mjerila kojem je potrebno umjeravanje ili zamjena [2].

1.1. Kontrolnici

Za kontrolnike kažemo da su čvrsta ili stalna mjerila jer su napravljeni sa jednom mjerom ili oblikom i služe za kontrolu točno te mjere ili oblika. Namijenjeni su serijskoj i masovnoj proizvodnji gdje mnogo jednakih dijelova zahtjeva uvijek istu, brzu i točnu kontrolu pojedinih dijelova.

1.1.1. Kalibri za kontrolu vanjskih mjera – račve, rašlje

Rašljasti kalibri služe za brzu kontrolu osovina s otvorima na oba kraja i tolerancijskim poljem za upisanu mjeru, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Rašljasti kalibar

Desna strana kalibra znači da stvarna mjera osovine nije veća od gornje dopuštene mjere, a lijeva strana da je stvarna mjera osovine jednaka ili veća od donje dopuštene mjere.

1.1.2. Kalibri za kontrolu unutarnjih mjera – mjerni trnovi

Služe za brzu kontrolu provrta s oznakama odstupanja od upisane mjere, kako je prikazano na slici 2.



Slika 2. Kalibar za kontrolu unutarnjih mjera

Lijeva strana kalibra na slici znači da stvarna mjera provrta nije manja od donje dopuštene mjere, a desna da stvarna mjera provrta nije veća od gornje dopuštene mjere.

Oba kalibra vrlo su jednostavna za rukovanje i primjenu te omogućuju točnu i brzu kontrolu u industriji.

1.1.3. Granična mjerila za navoje

Granična mjerila služe za kontrolu promjera navoja, te razlikujemo granična mjerila za kontrolu malog, srednjeg i velikog promjera. Takva mjerila prilikom korištenja moraju odgovarati navoju koji se kontrolira te sadrže stranu „ide“ i „ne ide“. Prilikom kontrole pojedinog navoja u slučaju njegove ispravnosti spoj će ostvariti strana „ide“, pri čemu strana „ne ide“ ne smije ostvariti spoj kako bi mogli reći da je navoj valjan. Granična mjerila imaju propisane tolerancije srednjeg promjera, kuta i koraka navoja.

Granična mjerila za srednji promjer navoja najčešće su u obliku navojnih prstena za provjeru vanjskih navoja i u obliku navojnih čepova za provjeru unutarnjih navoja, (slika 3. i slika 4.).



Slika 3. Granična mjerila za navoje



Slika 4. Granična mjerila za navoje

1.1.4. Etaloni debljine

Napravljeni su kao garnitura listića različitih mjera za brzu kontrolu zazora. Vrlo često se koristi i izraz mjerni listići. Opširnije o etalonima debljine objašnjeno je u sljedećem poglavlju.

2. ETALONI DEBLJINE

Etaloni debljine su prilično jednostavni mjerni instrumenti za provjeru zazora. Često ih se naziva i „ide/ne ide“ („go/no-go“) etalonima u smislu da će etalon ili ući u neki zazor ili neće te će se smanjivanjem razlike između etalona dobiti vrijednost veličine zazora uz neku mjernu nesigurnost koja je pridružena izmjerenim vrijednostima debljine etalona.

Etaloni debljine spadaju u grupu kontrolnika tzv. čvrstih ili stalnih mjerila. Namijenjeni su za brzu i točnu kontrolu u serijskoj i masovnoj proizvodnji. Izrađuju se vrlo precizno da tolerancija izrade njihovih mjera ne bi utjecala na rezultate mjerenja. [2]

Obično se nalaze u garnituri, prikazano na slici 5., s označenim nazivnim debljinama za mjerenje zazora.



Slika 5. Etaloni debljine

2.1. Primjena

Općenita svrha etalona debljine je da pomoću njih precizno odredimo zračnost između dva elementa koji su pozicionirani vrlo blizu jedan drugom. Najčešće se koriste kada se želi utvrditi da pokretni mehanički dijelovi rade propisno prema tehničkoj dokumentaciji kako ne bi došlo do oštećenja dijelova i uništenja stroja ili komponente stroja, koji bi pritom mogao

ozlijediti radnika u blizini. Učestalu upotrebu nalaze i u automobilskoj industriji kod provjera zazora ventila, svjećica i ležaja, slika 6., [3].

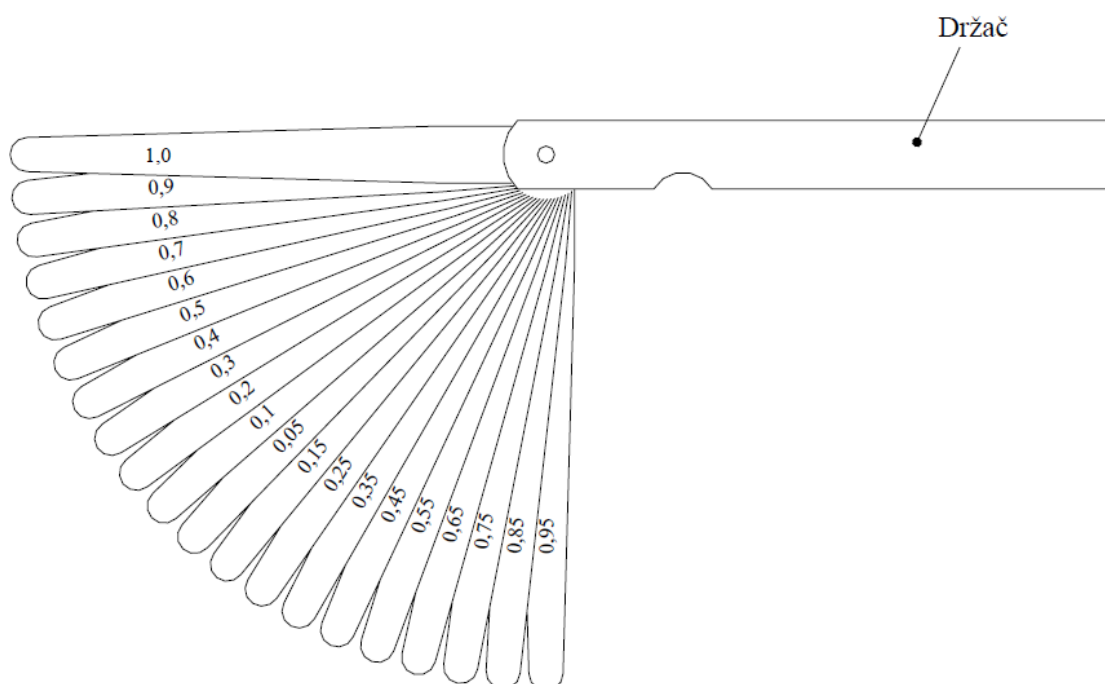


Slika 6. Provjera zazora [11]

Također koriste se još i za podešavanje naprava izradaka na stolove bušilica, glodalica i blanjalica, kao podloge strojnih dijelova u montaži i kod kontrole dosjeda [4].

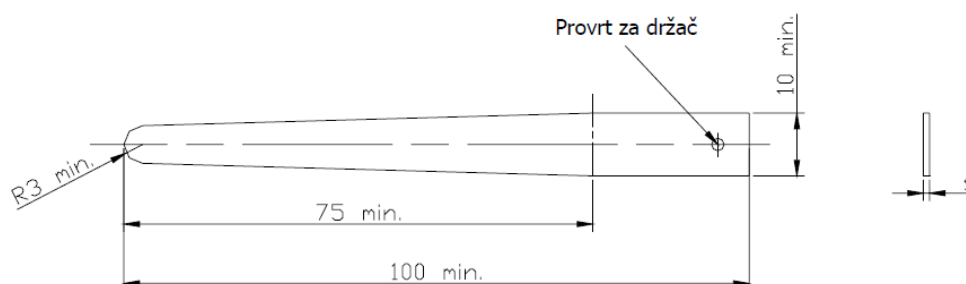
2.2. Konstrukcijske i tehničke karakteristike

U normi DIN 2275 navedene su sve bitne konstrukcijske i tehničke karakteristike etalona debljine. Sama izvedba, dimenzije i tehnički podaci prikazani su na slikama dolje, (slika 7. i slika 8.), te u tablici 1. Normom je propisano kako je držač i etalone najbolje izraditi iz čelika čija tvrdoća minimalno iznosi (420 ± 50) HV 5. Svaki etalon ima na sebi ugraviranu nazivnu mjeru (debljinu) s. [5]



Slika 7. Garnitura etalona debljine prema DIN 2275 [6]

Zanimljivo je primijetiti kako su etaloni najmanje nazivne mjere (debljine) stavljeni u sredinu garniture. Razlog leži u tomu što su takvi etaloni najpodložniji trošenju i oštećenju prilikom rukovanja stoga ih se na taj način štiti. Na slici 8. prikazan je etalone debljine sa minimalnim potrebnim dimenzijama prema DIN 2275.



Slika 8. Minimalne potrebne dimenzije prema DIN 2275 [6]

U tablici 1., prikazane su nazivne mjere etalona (s) i pripadajuća dopuštena odstupanja (u μm) kroz postojećih pet garnitura etalona debljine, označenih slovima od A do E. Nazivne mjere kreću se od 0,03 mm do 2 mm.

Tablica 1. Nazivne mjere i pripadajuća dopuštena odstupanja prema DIN 2275

Nazivna mjera, <i>s</i> (mm)	Dopušteno odstupanje (μm)	A	B	C	D	E
0,03	± 3		X			
0,04			X			
0,05		X	X	X	X	
0,06			X			
0,07	± 4		X			
0,08			X			
0,09			X			
0,1		X	X	X	X	X
0,15	± 5	X	X	X	X	
0,2	± 6	X	X	X	X	X
0,25		X	X	X	X	
0,3	± 7	X	X	X	X	X
0,35					X	
0,4	± 8	X	X	X	X	X
0,45					X	
0,5	± 9	X	X	X	X	X
0,55					X	
0,6	± 11			X	X	X
0,65					X	
0,7	± 12			X	X	X
0,75					X	
0,8	± 13			X	X	X
0,85					X	
0,9	± 14			X	X	X
0,95					X	
1	± 16			X	X	X
1,1	± 17					X
1,2	± 18					X
1,3	± 19					X
1,4	± 21					X
1,5	± 22					X
1,6	± 23					X
1,7	± 24					X
1,8	± 26					X
1,9	± 27					X
2	± 28					X

Garnitura etalona debljine oznake DIN 2275-A se sastoji od etalona debljine nazivne mjere od 0,05 mm do 0,5 mm i sadrži 8 komada, a u tablici 1. su označeni slovom „X“ u pripadajućem stupcu.

Garnitura etalona debljine oznake DIN 2275-B se sastoji od etalona debljine nazivne mjere od 0,03 mm do 0,5 mm i sadrži 14 komada, a u tablici 1. su označeni slovom „X“ u pripadajućem stupcu.

Garnitura etalona debljine oznake DIN 2275-C se sastoji od etalona debljine nazivne mjere od 0,05 mm do 1,0 mm i sadrži 13 komada, a u tablici 1. su označeni slovom „X“ u pripadajućem stupcu.

Garnitura etalona debljine oznake DIN 2275-D se sastoji od etalona debljine nazivne mjere od 0,05 mm do 1,0 mm i sadrži 20 komada, a u tablici 1. su označeni slovom „X“ u pripadajućem stupcu.

Garnitura etalona debljine oznake DIN 2275-E sastoji se od etalona debljine nazivne mjere od 0,1 mm do 2,0 mm i sadrži 20 komada, a u tablici 1. su označeni slovom „X“ u pripadajućem stupcu. Vrijednosti za dopušteno odstupanje od nazivne mjere koje se nalaze u tablici 1. se računaju prema izrazu: $\pm (3+s/80) \mu\text{m}$, nazivna mjera (s) se unosi u μm . Nadalje u normi stoji kako treba biti oprezan sa korištenjem više etalona debljine umjesto onog dotične nazivne mjere (pr. umjesto etalona od 0,5 mm koristimo kombinaciju etalona od 0,2 mm i 0,3 mm) jer će im odstupanje od nazivne mjere biti veće nego pri korištenju traženog etalona. [6]

2.3. Značajke komercijalno dostupnih etalona

Etaloni debljine koji su dostupni na tržištu najčešće su napravljeni iz čelika. Variraju između tvrdog čelika, nehrđajućeg čelika i mesinga, nazivne mjere (0,03 – 1) mm, sa 8 do 28 etalona u mjernoj garnituri i dužine od (100 do 500) mm, kako je navedeno u tablici 2. [7].

Tablica 2. Komercijalno dostupne garniture etalona debljine

Broj etalona	Mjerni raspon (mm)	Materijal
8	0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 / 0,50	Tvrđi čelik
8	0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 / 0,50	Nehrđajući čelik
8	0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 / 0,50	Mesing
13	0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 - 1,00	Tvrđi čelik
13	0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 - 1,00	Nehrđajući čelik
13	0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 - 1,00	Mesing
20	0,05 / 0,10 - 1,00	Tvrđi čelik
20	0,05 / 0,10 - 1,00	Nehrđajući čelik
20	0,05 / 0,10 - 1,00	Mesing
8	0,03 / 0,04 - 0,10	Tvrđi čelik
10	0,03 / 0,04 / 0,05 / 0,10 - 0,30 / 0,40 / 0,50	Tvrđi čelik
10	0,10 / 0,20 - 1,00	Tvrđi čelik
13	0,04 / 0,05 - 0,08 / 0,10 / 0,15 / 0,20 / 0,40 / 0,50 / 0,60 / 0,80 / 1,00	Tvrđi čelik
14	0,03 / 0,04 - 0,10 / 0,15 - 0,30 / 0,40 / 0,50	Tvrđi čelik
18	0,05 / 0,06 - 0,10 / 0,15 - 0,40 / 0,50 - 1,00	Tvrđi čelik
19	0,03 / 0,04 - 0,10 / 0,15 - 0,30 / 0,40 - 1,00	Tvrđi čelik
20	0,04 / 0,05 - 0,10 / 0,15 - 0,50 / 0,60 - 1,00	Tvrđi čelik
21	0,10 / 0,12 - 0,50	Tvrđi čelik
22	0,03 / 0,04 / 0,05 / 0,10 - 1,00	Tvrđi čelik
28	0,03 / 0,04 - 0,10 / 0,12 - 0,50	Tvrđi čelik

3. AKREDITIRANI POSTUPAK UMJERAVANJA

Tijekom korištenja mjerila se troše te je potrebno kontrolirati njihove mjeriteljske značajke što se vrši provedbom postupka umjeravanja.

Ovim poglavljem opisan je postupak umjeravanja etalona debljine kakav se provodi u Nacionalnom laboratoriju za duljinu RH koji djeluje u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Sva umjeravanja u Laboratoriju provode se sukladno odgovarajućim dokumentiranim postupcima umjeravanja, koji su izrađeni prema zahtjevima odgovarajuće dokumentacije vanjskog porijekla (norme, upute proizvođača i dr.). [6]

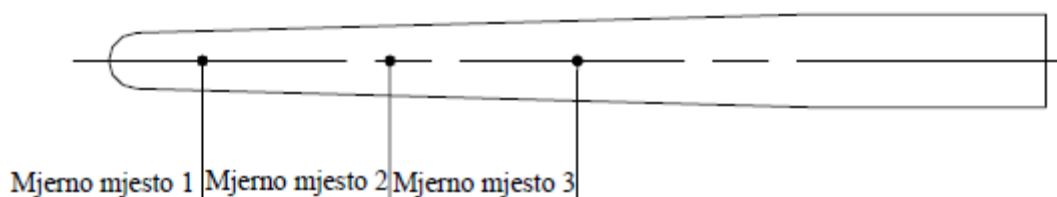
3.1. Mjerni uređaj

Univerzalni uređaj za mjerenje duljine, proizvođača Joint Instruments oznake MU 60-558, kojim se umjeravanje vrši, ima rezoluciju od 0,01 μm .

Da bi umjeravanje etalona debljine dalo vjerodostojne rezultate, svojstvo sljedivosti rezultata mjerenja mora biti jednoznačno definirano. „Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti kojeg etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti“.[9] Spomenuti uređaj umjerava se pomoću planparalelnih graničnih mjerki.

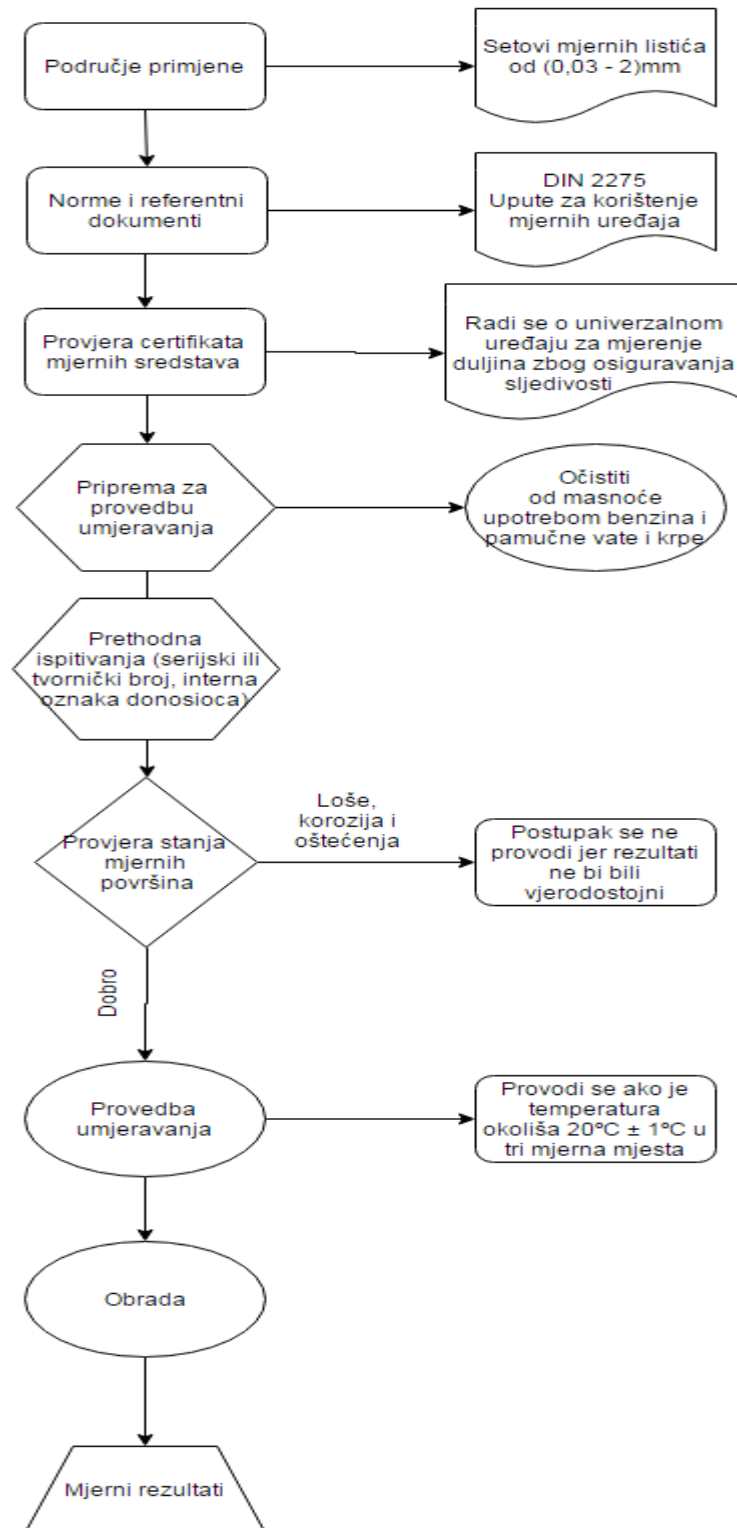
3.2. Postupak

Postupak umjeravanja, koji se provodi na univerzalnom uređaju za mjerenje duljina, vrši se na tri mjerna mjesta kako je prikazano na slici 9.



Slika 9. Mjerna mjesta

Koraci cijelog postupka umjeravanja prikazani su u dijagramu toka na slici 10., te je naknadno dano dodatno objašnjenje provedbe te obrade i prikaza rezultata.



Slika 10. Dijagram toka postupka umjeravanja

3.3. Provedba umjeravanja

Mjerni uređaj podešava se na nulu tako da se ticala namjeste u nulti položaj, odnosno tako da dodiruju jedan drugoga. Kada monitor pokaže vrijednost nula, ona se odabire za referentnu vrijednost. Sada se između dva ticala postavi etalon debljine, slika 11., te se očita vrijednost na monitoru. Postupak se ponavlja za preostala dva mjerna mjesta.



Slika 11. Način mjerenja

3.4. Obrada i prikazivanje rezultata

Temeljem dobivenih rezultata za sva tri mjerna mjesta izračunamo aritmetičku sredinu. Rezultat usporedimo s nazivnom mjerom i provjerimo po DIN 2275 da li je izmjerena vrijednost u granicama dopuštenog odstupanja. Ukoliko se pokaže da je mjerni rezultat izvan granica dopuštenih odstupanja prema odgovarajućoj normi, postupak treba ponoviti. Ako se i nakon ponovljenog mjerenja rezultati nalaze van granica dopuštenog odstupanja može se reći da su odstupanja etalona debljine u navedenoj garnituri veća od dopuštenih odstupanja za takvu vrstu etalona prema relevantnoj normi.

3.5. Mjerna nesigurnost

Proširena mjerna nesigurnost u postupku umjeravanja etalona debljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu RH iznosi $U = (0,8 + 7,5 \cdot L) \mu\text{m}$, L u m uz $k = 2$ i $P = 95\%$.

3.6. Potvrda o akreditaciji

Nacionalni laboratorij za duljinu Fakulteta strojarstva i brodogradnje akreditiran je prema zahtjevima norme [12] za umjeravanje etalona i mjernih uređaja duljine, hrapavosti i kuta u području opisanom u prilogu koji je sastavni dio potvrde o akreditaciji. Akreditacija je izdana od Hrvatske akreditacijske agencije koja je potpisnica multilateralnog sporazuma s Europskom organizacijom za akreditaciju (EA).

Na slici 12., stavka 33., navodi se dio područja akreditacije Laboratorija. Kako je prikazano Laboratorij je akreditiran i za umjeravanje etalona debljine za mjerno područje od (0,01 do 100) mm uz mjernu nesigurnost $U = (0,8 + 7,5 \cdot L) \mu\text{m}$, direktnim (izravnim) postupkom umjeravanja. [8]

	Mjerna veličina / Mjerilo <i>Measurand / Calibration item</i>	Mjerno područje <i>Measurement range</i>	Mjerna sposobnost* <i>Calibration and measurement capability* (CMC)</i>	Metode umjeravanja <i>Calibration methods</i>	Napomene <i>Remarks</i>
27.	Mjerilo debljine s mjernom urom / mjerna pogreška <i>Thickness gauge / error of indicated thickness</i>	vanjska mjerenja: <i>external measurements:</i> (0 - 100) mm unutarnja mjerenja: <i>internal measurements:</i> (2,5 - 200) mm	2,4 μm 5,6 μm	Direktna (izravna) <i>Direct</i> LFSB L 390 Izdanje / <i>Issue</i> 01 2013-04-03	-
28.	Kutnik / okomitost <i>90° square / squariness</i>	600 mm x 400 mm	Vanjski kut / <i>External angle:</i> (3,5 + 0,8·L) μm <i>L u / in m</i> Unutarnji kut / <i>Internal angle:</i> (4,1 + 0,8·L) μm <i>L u / in m</i>	Direktna (izravna) <i>Direct</i> LFSB L 370 Izdanje / <i>Issue</i> 02 2013-10-08	-
29.	Kutomjer / mjerna pogreška <i>Bevel, protractor / error of indicated angle</i>	0° - 360°	4"	Direktna (izravna) <i>Direct</i> LFSB L 470 Izdanje / <i>Issue</i> 01 2013-04-04	-
30.	Libela / mjerna pogreška <i>Spirit level / error of indicated inclination angle</i>	± 10 mm/m	0,01 mm/m	Direktna (izravna) <i>Direct</i> LFSB L 340 Izdanje / <i>Issue</i> 02 2013-07-02	-
31.	Lineal / pravocrtnost <i>Straight edge / straightness</i>	(0-1000) mm	(1,5 + 0,3·L) μm <i>L u / in m</i>	Direktna (izravna) <i>Direct</i> LFSB L 440 Izdanje / <i>Issue</i> 01 2013-04-02	-
32.	Mjerna ploča / ravnost <i>Surface plate / flatness</i>	(3 x 3) m ²	35·L μm	Direktna (izravna) <i>Direct</i> ** LFSB L 420 Izdanje / <i>Issue</i> 01 2012-04-18	L-mjerni korak u m / <i>L-measurement step in m</i>
33.	Etaloni debljine / duljina <i>Feeler (thickness) gauge / thickness</i>	(0,01 – 100) mm	(0,8 + 7,5·L) μm <i>L u / in m</i>	Direktna (izravna) <i>Direct</i> LFSB L 460 Izdanje / <i>Issue</i> 02 2013-10-11	-

Slika 12. Potvrda o akreditaciji

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U sklopu diplomskog zadatka provedeno je umjeravanje etalona debljine prema predloženom mjernom postupku te su dobiveni rezultati uspoređeni s rezultatima ostvarenim prema akreditiranom mjernom postupku. Sva mjerenja izvršena su u Nacionalnom laboratoriju za duljinu.

4.1. Umjeravanje etalona debljine prema akreditiranom mjernom postupku

Postupak umjeravanja etalona debljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu jedan je od 35 akreditiranih postupaka [8]. Postupak se provodi na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju, oznake MU 60-558, čija rezolucija iznosi 0,01 μm dok temperatura okoliša u prostoriji gdje je mjerni uređaj smješten iznosi $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

U okviru eksperimentalnog dijela, provedeno je mjerenje na garnituri etalona debljine oznake ML-01, mjernog područja (0,03 – 1) mm. Na etalonima postoje oznake nazivnih vrijednosti, ima vidljivih mehaničkih oštećenja kao i tragova korozije. Za potrebe samog mjerenja odabrano je pet etalona debljine nazivnih mjera prikazanih u tablici 3.

Tablica 3. Odabrani etaloni debljine

Broj	Nazivna mjera (mm)
1	0,03
2	0,1
3	0,5
4	0,75
5	1

Kao što je prikazano u tablici 3., za sama mjerenja odabrano je 5 etalona debljine na način da su obuhvaćeni početak i kraj mjernog područja navedene garniture etalona debljine, nazivnih mjera 0,03 mm i 1 mm. Dodatno, odabrana su još 3 etalona koja najbolje pokrivaju cijelo mjerno područje navedene garniture, nazivnih mjera 0,1 mm, 0,5 mm i 0,75 mm. Postupak se provodi na 3 mjerna mjesta kako je prikazano na slici 9., a rezultati su navedeni u poglavlju 4.1.1.

4.1.1. Rezultati mjerenja na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju

Navedeni uređaj nalazi se u Nacionalnom laboratoriju za duljinu u prostorijama FSB-a u prostoriji u kojoj se temperatura kontrolira na $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$. Rezultati se prikazuju na računalu povezanom s mjernim uređajem. Mjerni uređaj uključuje dva ticala koji se nalaze na kliznim vodilicama ali se mogu i fiksirati, te pomično-okretnog stolića na koji se smještaju teži predmeti prilikom mjerenja. Mjerna se ticala također mogu mijenjati, ovisno kakvim je ticalom potrebno mjeriti. Dijelimo ih na:

- ravna
- sferna i
- nožasta ticala.

Za ovaj zadatak odabrana su sferna ticala s obzirom da predmet mjerenja ima planske površine. Mjerna sila iznosi 4,8 N.

Prije mjerenja potrebno je očistiti i odstraniti masnoću s etalona debljine pomoću pamučne krpe i alkohola. Potrebno je podesiti relativan položaj ticala tako da se točka dodira sfernih ticala nalazi na mjernoj osi. To se radi pomoću vijaka na držačima ticala koji se pritežu ili popuštaju dok se, prateći pomake na računalu, ne nađe tražena točka. Tada se računalni program resetira i ta se točka definira kao početna s vrijednošću 0. Ostvareni rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju

Red. broj	Nazivna mjera (mm)	Izmjerena vrijednost (mm)			Aritmetička sredina (mm)	Odstupanje (μm)	Mjerna nesigurnost (μm)
1.	0,03	0,0302	0,0302	0,0301	0,03016	+0,16	0,8
2.	0,1	0,1005	0,1004	0,1000	0,1003	+0,3	
3.	0,5	0,4985	0,4980	0,4982	0,49823	-1,76	
4.	0,75	0,7505	0,7499	0,7501	0,75016	+0,16	
5.	1	1,0017	1,0031	1,0035	1,00276	+2,76	

Sva dobivena odstupanja nalaze se unutar granica dopuštenih odstupanja za navedene nazivne mjere etalona debljine, tablica 1., prema DIN-u 2275.

4.2. Razrada novog postupka umjeravanja etalona debljine

Zbog velikog broja aktivnosti poput održavanja sljedivosti i umjeravanja raznih etalona, jednoosni univerzalni mjerni uređaj vrlo je često u upotrebi. Takav uređaj sa širokim mjernim područjem i visokom rezolucijom potrebno je rasteretiti i smanjiti mu obim upotrebe. S obzirom na propisana dopuštena odstupanja etalona debljine postupak umjeravanja nije potrebno provoditi na uređaju tako visoke rezolucije. Zbog toga je potrebna razrada novog postupka umjeravanja etalona debljine.

Predložen novi postupak umjeravanja etalona debljine uključuje mjerenje na digitalnom visinomjeru, proizvođača Mitutoyo, oznake MU 45-422, slika 13.



Slika 13. Visinomjer

Mjerno područje uređaja je od 0 mm do 600 mm. Kao što mu i samo ime kaže, uređaj mjeri na način da se ticalo pomiče po vertikalnoj osi uz rezoluciju očitavanja od 0,1 μm . Kako visinomjer nema dva ticala između kojih bi ostvarili kontakt mjernih površina etalona debljine potrebno je definirati konstrukcijsko rješenje kojim će se osigurati drugo ticalo mjernog sustava.

4.2.1. *Konstruktivsko rješenje prihvata*

Prilikom mjerenja etalona debljine s jednim ticalom i prihvatom postavljenim na površinu stola može doći do pomicanja ili progiba samih etalona uslijed mjerenja gdje se predmet mjerenja ne nalazi između dva ticala već, kao u navedenom slučaju, između ticala i ravnine. Utjecaj na rezultate može imati i odstupanje od ravnosti površine stola. Zbog svega toga, potrebno je konstruirati prihvata koje će osigurati ispravan kontakt mjernih površina s dva sferna ticala.

Prilikom izrade CAD modela vodilo se računa o sljedećim karakteristikama:

- minimalna masa prihvata iznosi 3 kg,
- čelik povoljan za strojnu obradu,
- pločica debljine 3 mm,
- ravnost i paralelnost baze i nalijegajućih površina,
- cementirani vijak M6 sa izbušenom rupom u glavi vijka,
- kuglica ležaja promjera 5 mm koja će se utisnuti u vijak M6,
- utor minimalne širine 14 mm kao vodilica za etalone debljine.

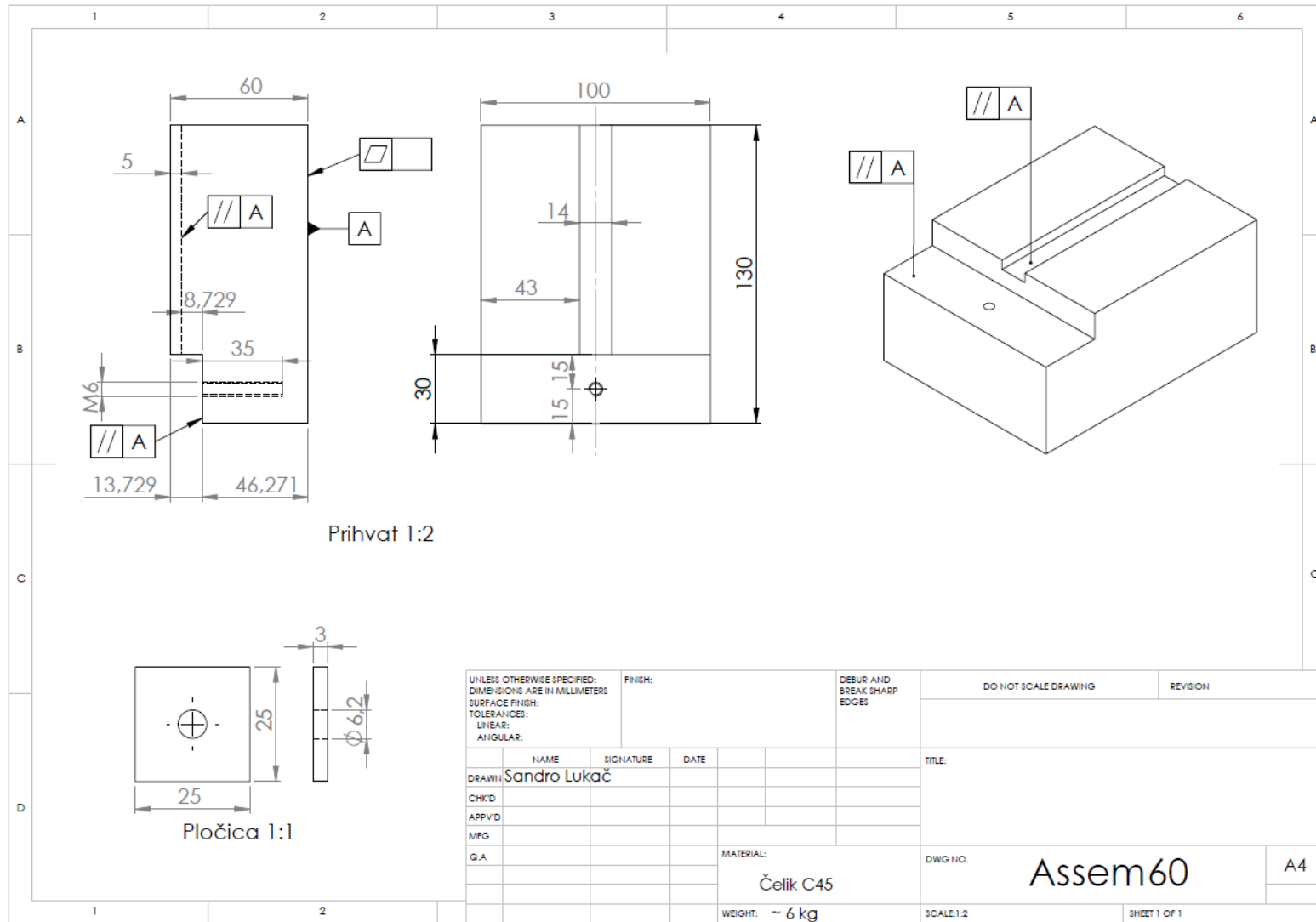
Postupak izrade krenuo je od ideje da bi prihvata etalona debljine trebao biti minimalne mase 3 kilograma, kako bi bio robustan i teže pomičan prilikom postupka umjeravanja. Prihvata izrađen od čelika povoljnog za strojnu obradu radi lakšeg i bržeg procesa izrade. Sferno ticalo napravljeno je od cementiranog vijka M6 u čiju glavu je izbušena rupa i utisnuta kuglica promjera 5 mm kako bi promjer odgovarao promjeru ticala na visinomjeru. Kuglica utisnuta u vijak je element kugličnog ležaja.

Ideja prihvata je da etalon debljine nalegne na utor i vijak M6 sa utisnutom kuglicom, koji su dovedeni na istu visinu. Zatim će ticalo visinomjera izmjeriti debljinu etalona točno iznad sfernog ticala prihvata odnosno mjernog mjesta.

Kako bi se osigurala ista dimenzija visine utora i vrha sfernog ticala prihvata radi lakše obrade dodana je pločica debljine 3 mm.

Postupak obrade do konačnog izgleda prihvata kreće iz kocke čelika. Kako se ne bi nepotrebno provodila dodatna strojna obrada, prije samog konstruiranja u CAD programu, utvrđeno je uvidom u stanje na tržištu kako se kvadratni puni profili prodaju u nekoliko dimenzija, od kojih najbolje odgovara dimenzija 100 mm x 100 mm iz čelika za strojnu obradu C45. Zatim je prema tim dimenzijama u CAD programu SolidWorks konstruiran

prihvat s rupom za vijak M6 u koju će doći sferno ticalo, kako je prikazano na slici 14. Naravno, konačna verzija prihvata rezultat je nekoliko izmjena u dizajnu i dimenzijama do koje se došlo zahvaljujući savjetima kolega s Katedre za mjerenje i kontrolu i Katedre za alatne strojeve kako bi prihvat imao što bolju ravnost i točnost dimenzija baze i površina bitnih za provedbu postupka umjeravanja.

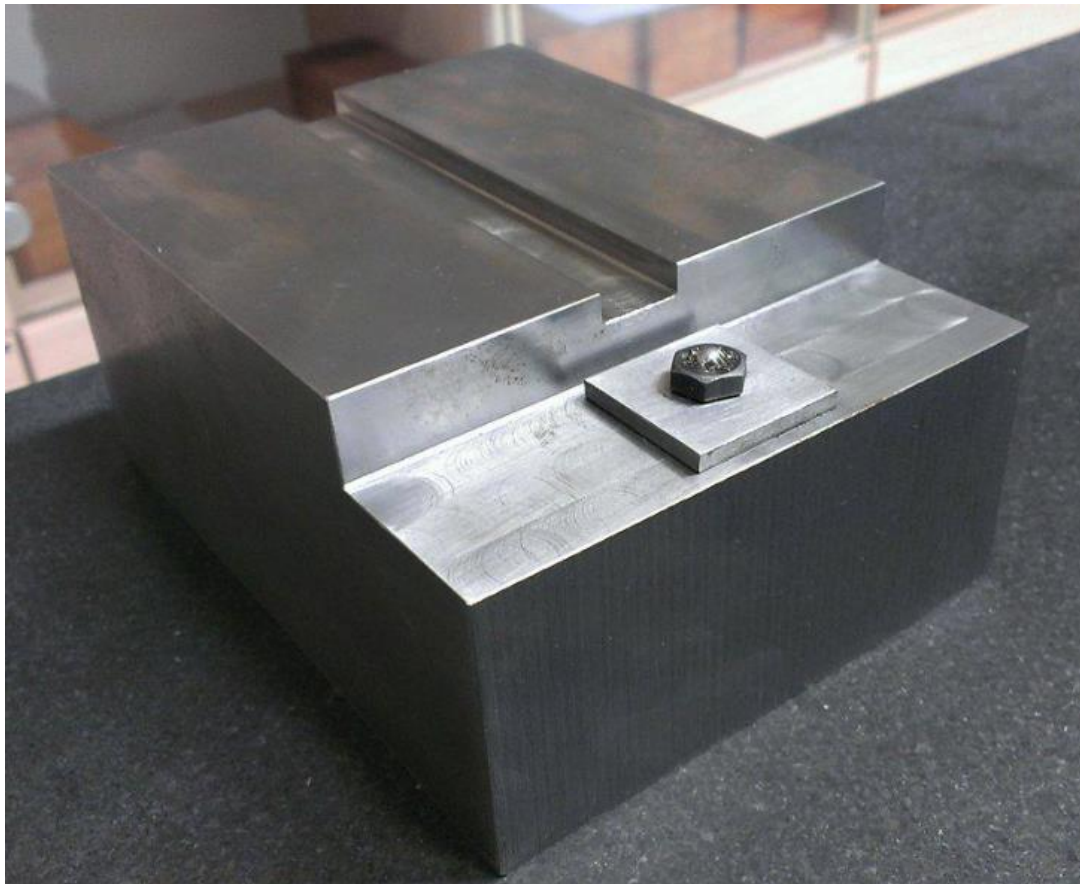


Slika 14. Radionički crtež

Nakon izrade prema konačnom radioničkom crtežu, dobiveni prihvat je u isto vrijeme robusan i zadovoljavajuće točnosti. Kada se sferno ticalo prihvata postavi na predviđenu poziciju u navojni provrt M6, prihvat je spreman za postupak mjerenja, slika 15. i slika 16.



Slika 15. Sferno ticalo prihvata



Slika 16. Prihvat spreman za mjerenje

5. UMJERAVANJE ETALONA DEBLJINE PREMA PREDLOŽENOM POSTUPKU

Postupak umjeravanja etalona debljine proveo se u Nacionalnom laboratoriju za duljinu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u konstantnim okolišnim uvjetima te uključuje iste etalone duljine, isti mjerni uređaj i istog mjeritelja. Također postupak se provodi u kratkom vremenskom intervalu.

5.1. Provedba umjeravanja

Iz odabrane garniture etalona debljine izdvojeno je ranije odabranih pet etalona debljine, slika 17.



Slika 17. Korišteni etaloni debljine

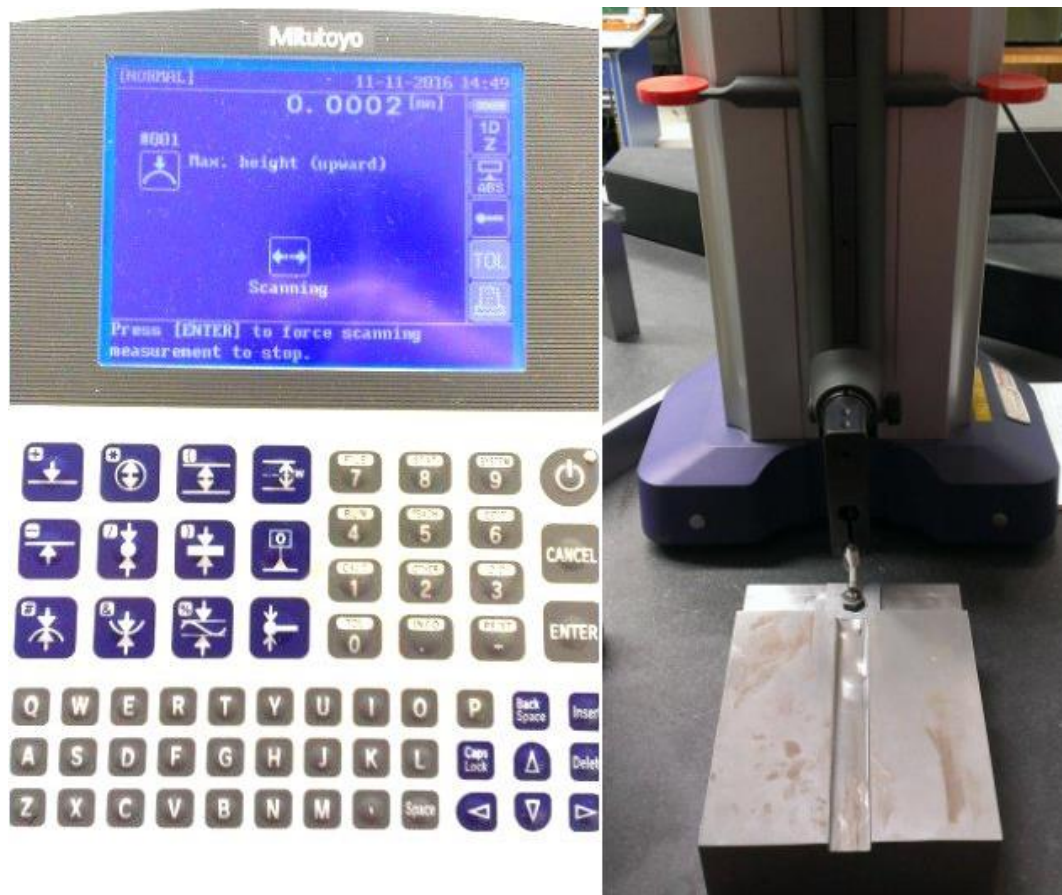
Zatim se granitna ploča na kojoj je visinomjer postavljen, baza prihvata i utor za etalon na prihvatu očiste pomoću medicinskog benzina i pamučne krpe. Prije početka rada s visinomjerom potrebno je pomaknuti nosač s ticalom cijelom dužinom klizača kako bi uređaj saznao poziciju ticala. Da bi mjerenja bila valjana također je potrebno umjeriti i ticalo

visinomjera dodirom ploha s obiju strana elementa, prikazanog na slici 18., korištenog za taj postupak.



Slika 18. Element za umjeravanje ticala visinomjera

Sljedeći korak je postavljanje prihvata u točan relativan položaj. Precizno namještanje prihvata obavlja se pomoću funkcije visinomjera, prikazane na slici 19., koja traži maksimalne vrijednosti.

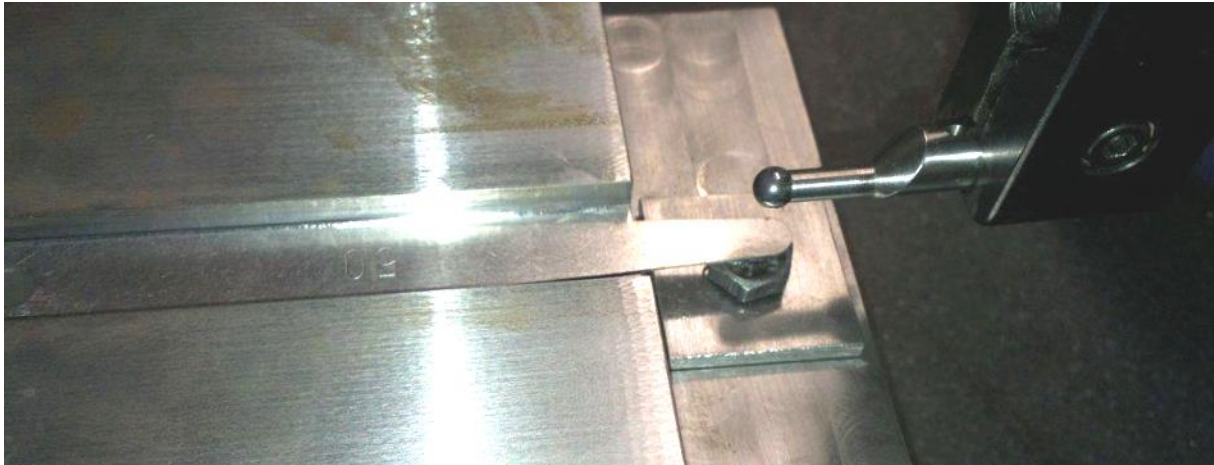


Slika 19. Funkcija maksimalne vrijednosti

Uključivanjem te funkcije ticalo visinomjera konstantno lagano pritišće sferno ticalo prihvata i prikazuje izmjerenu vrijednost. Tada pomicanjem prihvata po granitnoj ploči prvo u x pa u y smjeru tražimo prekretno točke. U trenutku promjene, prilikom pomicanja prihvata u x smjeru na granitnoj ploči, rastuće vrijednosti u padajuću znamo da se radi o prekretnoj točki za taj smjer te se postupak ponavlja za y smjer. Pronalazak druge prekretno točke označava položaj u kojem se sfere ticala tangiraju i nalaze direktno jedna iznad druge u vertikalnom smjeru, u odnosu na mjernu os (skalu) visinomjera. To je položaj prihvata u odnosu na visinomjer u kojem se vrše mjerenja.

5.1.1. Provedba mjerenja

Etaloni debljine se prije provedbe umjeravanja moraju očistiti od masnoća i nečistoća. Svaki etalon debljine mjeri se na tri mjerna mjesta na način da se etalon pomiče unutar utora te se na kraju dobiva 30 rezultata mjerenja za svako mjerno mjesto.



Slika 20. Etalon debljine u prvom mjernom mjestu

Izmjerivši vrijednost debljine etalona na prvom mjernom mjestu, etalon se pomiče na drugo odnosno treće mjerno mjesto te se zapisuju rezultati. Nakon provedbe mjerenja na sva tri mjerna mjesta ciklus se ponavlja uz prethodno ponovno namještanje referentne nule, točke u kojoj vrijednost na visinomjeru pokazuje nulu kada se ticala dotaknu.

5.1.2. Rezultati mjerenja na visinomjeru

Svi rezultati mjerenja dani su u prilogu, dok su rezultati u vidu aritmetičkih sredina prikazani u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja na visinomjeru

Etaloni debljine					
	0,03 mm	0,1 mm	0,5 mm	0,75 mm	1 mm
Mjerenje br.	Aritmetička sredina (mm)	Aritmetička sredina (mm)	Aritmetička sredina (mm)	Aritmetička sredina (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,030049	0,099961	0,497739	0,750000	1,002884
2.	0,030026	0,099826	0,497479	0,749511	1,002061

6. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

Problem koji se stalno javlja u mjeriteljstvu je kako procijeniti mjernu nesigurnost rezultata mjerenja. Tradicionalne metode oslanjale su se na iskustvo i ugled mjeritelja. Zadnjih godina uložen je veliki trud s ciljem pronalaženja matematičkih modela i općih pravila za proračun i iskazivanje mjernih nesigurnosti [10]. Tako je 1993. godine skupina stručnjaka s područja mjeriteljstva izdala upute za procjenu mjerne nesigurnosti: „ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“. Kako navodi stručna literatura, mjerna nesigurnost je :
„...parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti mjerene veličine uz neku određenu vjerojatnost. Nesigurnost je količinska mjera kvalitete mjernog rezultata koja omogućuje uspoređivanje mjernih rezultata s drugim rezultatima, referencijama ili često etalonima.“ [9]. Iz toga slijedi da nesigurnost mjernog rezultata iskazuje pomanjkanje znanja o mjerenoj veličini i da je taj rezultat samo procjena mjerne veličine zbog nesavršenosti sustava mjerenja, djelovanja i postupka mjerenja.

U praksi postoje mnogi izvori nesigurnosti u mjerenju [9]:

- Nepotpuno određivanje mjerene veličine.
- Nereprezentativni uzorci s mehaničkim oštećenjima i korozijom.
- Nedovoljno poznavanje uvjeta okoliša na mjerenje.
- Mjeriteljeva pristranost u očitavanju uređaja.
- Netočne vrijednosti mjernih etalona i referentnih uzoraka.
- Netočne vrijednosti konstanta i drugih parametara dobivenih iz vanjskih izvora ili specifikacija.
- Pretpostavke i približna određenja uključena u mjerni postupak.
- Promjene rezultata ponovljenih mjerenja u istovjetnim uvjetima.
- Svojstva materijala etalona.

Da bi se rezultati dobiveni u predloženom postupku umjeravanja etalona debljine mogli koristiti, potrebno je napraviti procjenu mjerne nesigurnosti odnosno postavljanje i izračun mjerne nesigurnosti radi nedvosmislenog iskazivanja i usporedbe mjernih rezultata.

Također, mjerna nesigurnost potrebna je i radi usporedbe rezultata sa specifikacijama proizvoda ili navedenom tolerancijom.

6.1. Matematički model mjerenja

Postavljanje matematičkog modela prvi je i osnovni korak za iskazivanje mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja [9]. Matematički model mora sadržavati sve sastavnice koje utječu na vrijednost rezultata mjerenja [13]. Nakon pomnog proučavanja utjecaja na rezultate mjerenja debljine etalona debljine, 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 – debljina etalona
- L_{Si} – izmjerena duljina etalona debljine
- δL_{Si} – utjecaj mjernog uređaja
- δL_N – utjecaj nesuosnosti mjernih kapica
- Δt – utjecaj razlike temperatura
- δL_M – mehanički utjecaj

6.1.1. Nesigurnost mjerenja duljina etalona

Nesigurnost mjerenja duljina etalona debljine procijenjena je na osnovu mjerenja pet etalona nazivnih duljina 0,03 mm, 0,1 mm, 0,5 mm, 0,75 mm i 1,0 mm. Mjerenja su provedena u uvjetima ponovljivosti koji uključuju: iste etalone, istog mjeritelja, konstantne uvjete okoline, isti instrument i višestruko mjerenje u kratkom vremenskom intervalu.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati prve garniture mjerenja na visinomjeru

Etaloni debljine					
Mjerenje	0,03 mm	0,1 mm	0,5 mm	0,75 mm	1 mm
1.	0,02983	0,09997	0,49767	0,74967	1,00270
2.	0,03037	0,09980	0,49807	0,75017	1,00280
3.	0,02993	0,09983	0,49780	0,75000	1,00263
4.	0,02990	0,09973	0,49797	0,74987	1,00250
5.	0,03013	0,10007	0,49770	0,74997	1,00273
6.	0,03000	0,10013	0,49760	0,75000	1,00293
7.	0,03010	0,10003	0,49783	0,74987	1,00307
8.	0,03010	0,10000	0,49780	0,75000	1,00293
9.	0,03000	0,10013	0,49773	0,75017	1,00290
10.	0,03003	0,09977	0,49767	0,74970	1,00303
11.	0,03023	0,09987	0,49743	0,74990	1,00313
12.	0,03000	0,10003	0,49783	0,74993	1,00310
13.	0,03013	0,09993	0,49777	0,74987	1,00273
14.	0,03010	0,10027	0,49817	0,74987	1,00287
15.	0,02990	0,09987	0,49743	0,75017	1,00283
16.	0,03010	0,10017	0,49740	0,75013	1,00237
17.	0,03003	0,09997	0,49763	0,75007	1,00287
18.	0,03000	0,09960	0,49770	0,75000	1,00280
19.	0,03010	0,09980	0,49780	0,75013	1,00367
20.	0,03007	0,09980	0,49793	0,75020	1,00290
21.	0,03010	0,09987	0,49750	0,74957	1,00293
22.	0,02993	0,09987	0,49773	0,75033	1,00297
23.	0,03023	0,10017	0,49760	0,75000	1,00280
24.	0,03003	0,09997	0,49783	0,75003	1,00293
25.	0,03003	0,09973	0,49777	0,75023	1,00273
26.	0,03000	0,10020	0,49770	0,74990	1,00297
27.	0,03000	0,10013	0,49770	0,74997	1,00280
28.	0,02997	0,10010	0,49777	0,75027	1,00310
29.	0,03003	0,09993	0,49787	0,75013	1,00293
30.	0,03007	0,10010	0,49777	0,74990	1,00287

Procijenjeno standardno odstupanje je mjera koja nam govori koliko su vrijednosti iz garniture podataka, raspršene od aritmetičke sredine te iste garniture podataka:

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

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

$$s_p = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2 + s_5^2}{5}} \quad (3)$$

gdje su:

- $s_1..s_5$ – procijenjena standardna odstupanja svakog od 5 etalona debljine, gdje s_1 pripada etalonu najmanje nazivne mjere 0,03 mm, a s_5 etalonu najveće nazivne mjere od 1 mm.

Procijenjena standardna odstupanja, izračunata korištenjem programskog paketa MS Excel i funkcije „STDEV“, dana su u tablici 7.

Tablica 7. Standardna odstupanja za svaki etalon debljine

Standardno odstupanje	Iznos (μm)
s_1	0,108
s_2	0,165
s_3	0,172
s_4	0,178
s_5	0,225

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, $u(L_{Si})$:

$$u(L_{Si}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{0,173}{\sqrt{3}} = 0,1 \mu\text{m} \quad (4)$$

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

6.1.2. Nesigurnost umjeravanja visinomjera

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

$$u(\delta L_{Si}) = \frac{U(\delta L_{Si})}{k} = \frac{5 + 4,5 \cdot L}{2} = (2,5 + 2,25 \cdot L) \mu m \quad (5)$$

6.1.3. 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. Kako bi se utjecaj nesuosnosti smanjio, postavljanje prihvata i pripadajućeg ticala u odnos sa ticalom visinomjera radi se uz pomoć funkcije visinomjera koja traži maksimalne vrijednosti, kako je opisano u poglavlju 5. Prekretna točka je ona u kojoj se sfere ticala 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 pet puta se mjerila pozicija prekretno točke i ostvareni rezultati su prikazani u tablici 8.

Tablica 8. Prekretno točke

Mjerenje br.	Rezultati (mm)
1.	8,7610
2.	8,7613
3.	8,7622
4.	8,7626
5.	8,7617
Raspon	0,0016

Na temelju dobivenih rezultata raspon prekretnih točaka iznosi $1,6 \mu m$. Nesuosnost ticala mjernog sustava slijedi pravokutnu razdiobu u iznosu $\pm 0,8 \mu m$. Standardna nesigurnost utjecaja nesuosnosti ticala iznosi:

$$u(L_N) = \frac{0,8}{\sqrt{3}} = 0,462 \mu m \quad (6)$$

6.1.4. 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:

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

6.1.5. Nesigurnost zbog mehaničkih utjecaja

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

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

gdje je:

- E – modul elastičnosti, $2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
- ν – 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:

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

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

6.1.6. 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:

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

Članovi pod korijenom prikazani su u tablici 10., u zadnjem stupcu „doprinos mjernoj nesigurnosti“ koji predstavlja umnožak iznosa standardne nesigurnosti i koeficijenta osjetljivosti te su vrijednosti su izražene u μm . Radi članova koji zavise o veličini L (duljini odnosno debljini etalona) potrebno je napraviti linearizaciju pomoću početne i konačne vrijednosti, dobivene na temelju početka i kraja mjernog područja, dakle 0 mm i 1 mm.

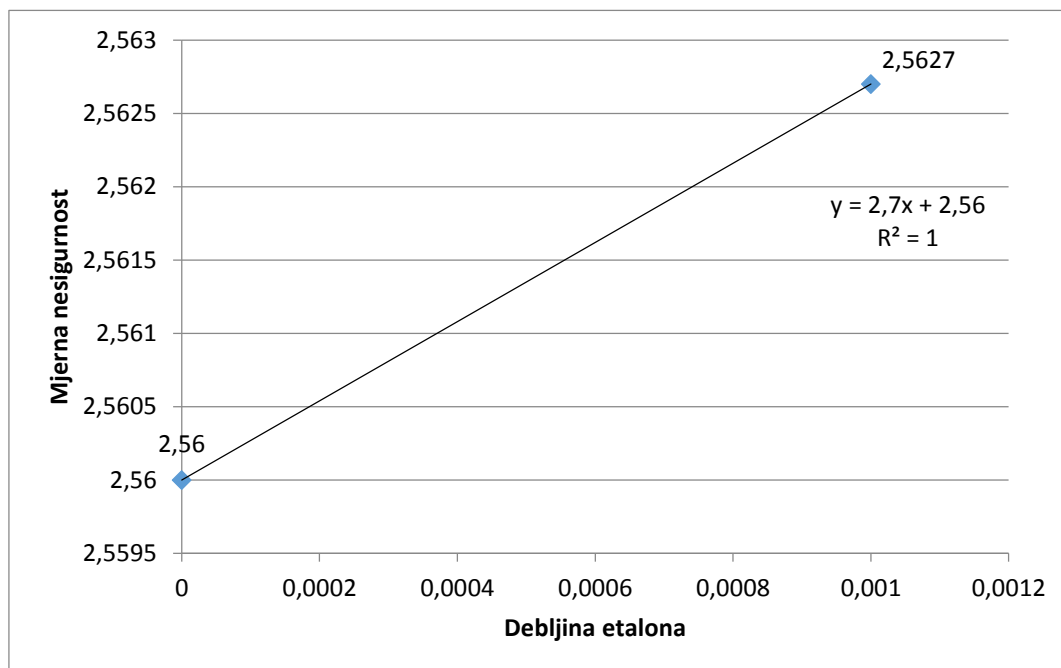
6.1.7. Linearizirana proširena mjerna nesigurnost

Uvrštavanjem vrijednosti početka i kraja mjernog područja (0 mm i 1 mm) u izraze za doprinos mjernoj nesigurnosti prema tablici 10. te zatim u jednadžbu (10) dobivaju se dvije točke:

Tablica 9. Točke pravca

	Početak mjernog područja (0 mm)	Kraj mjernog područja (1 mm)
Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm
$u(L_{Si})$	0,01	0,01
$u(\delta L_{Si})$	6,25	6,26136
$u(\delta L_N)$	0,2134	0,2134
$u(\Delta t)$	0	$1,104 \cdot 10^{-5}$
$u(\delta L_M)$	0,083	0,083
Ukupno, u_c	2,56	2,5627

Prema točkama iz tablice 9., provedena je linearizacija kako je prikazano na slici 21.



Slika 21. Linearizacija

Iz linearizacije se dobiva:

$$u_c = 2,56 + 2,7 \cdot L \quad (11)$$

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:

$$U = 5,2 \mu\text{m} \quad (12)$$

Svi utjecaji na mjernu nesigurnost i njihovi iznosi prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja

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	0,1	1	Normalna	0,1
$u(\delta L_{Si})$	Umjeravanje visinomjera	$2,5 + 2,25 \cdot L$	1	Normalna	$2,5 + 2,25 \cdot L$
$u(\delta L_N)$	Nesuosnost	0,462	1	Pravokutna	0,462
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura	0,289 °C	$L_S \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	$3,323 \cdot L$
$u(\delta L_M)$	Mehanički utjecaji	0,288	1	Pravokutna	0,288
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c			$u_c = (2,56 + 2,7 \cdot L) \mu\text{m}$		
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U za $P = 95\%$, $k = 2$			$U = 5,2 \mu\text{m}$		

7. USPOREDBA I ANALIZA OSTVARENIH REZULTATA

Cilj analize rezultata mjerenja je potvrđivanje prikladnosti predloženog postupka umjeravanja etalona debljine. Kako bi se potvrdila prikladnost postupka provedena je usporedba rezultata mjerenja debljine etalona provedenih s dva postupka. Prvi postupak je akreditirani postupak umjeravanja etalona debljine na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju, a drugi je predloženi postupak umjeravanja na visinomjeru.

Kao referentne vrijednosti u ovoj analizi smatraju se rezultati dobiveni prvim postupkom, umjeravanjem etalona debljine akreditiranim postupkom na jednoosnom univerzalnom mjernom uređaju, proizvođača Joint Instruments, oznake MU 60-558.

Mjeriteljski instituti i laboratoriji imaju potrebu uspoređivati se s drugim institutima i laboratorijima i na taj način, uspoređivanjem dobivenih rezultata i izraženih mjernih nesigurnosti, utvrditi mjeriteljsku sposobnost uspostavljenog mjernog sustava. Svrha usporedbenih mjerenja je odrediti gdje se laboratorij nalazi u odnosu na duge laboratorije, a sve u cilju postizanja točnih mjernih rezultata sa što manjom mjernom nesigurnosti [10].

7.1. Faktor slaganja

Odabrana metoda za analizu rezultata temelji se na izračunu faktora slaganja E_n , koji predstavlja stupanj u kojem je izmjerena vrijednost u skladu s referentnom vrijednosti.

Faktor slaganja E_n služi kao mjerilo konzistentnosti individualnih rezultata mjerenja u odnosu na referentnu vrijednost. Faktor slaganja E_n računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{x_i - x_{ref}}{k * \sqrt{u^2(x_i) - u^2(x_{ref})}}; k = 2 \quad (13)$$

Gdje su:

E_n - faktor slaganja

x_i - rezultat mjerenja na visinomjeru

x_{ref} - rezultat referentne vrijednosti (mjerenje na jednoosnom uređaju)

$u(x_i)$ - mjerna nesigurnost visinomjera

$u(x_{ref})$ - mjerna nesigurnost referentne vrijednosti (mjerenja na jednoosnom uređaju)

k - faktor pokrivanja

Da bi se rezultat smatrao usporedivim vrijednost faktora slaganja $|E_n|$ treba biti manja od 1, odnosno što je vrijednost faktora slaganja E_n bliža nuli to je rezultat mjerenja ostvaren pomoću predloženog postupka na visinomjeru bliži rezultatu referentnog akreditiranog postupka na jednoosnom mjernom uređaju. Ako vrijednost ima pozitivan predznak to znači da je rezultat mjerenja predloženog postupka veći od referentne vrijednosti, a ukoliko je manji onda će se to odraziti kao vrijednost prikazana sa negativnim predznakom. Rezultati metode faktora slaganja prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Faktor slaganja

Rezultati							
Visinomjer (mm)	u (mm)	Jednoosni mjerni uređaj (mm)	u (mm)	$x_i - x_{ref}$ (mm)	$u^2(x_i) - u^2(x_{ref})$ (mm)	E_n	$ E_n $
0,0300	0,0026	0,03016	0,0004	-0,00012	$6,6 \cdot 10^{-6}$	-0,0239	0,024
0,0999		0,10030		-0,00041	$6,6 \cdot 10^{-6}$	-0,0791	0,079
0,4976		0,49823		-0,00062	$6,6 \cdot 10^{-6}$	-0,1209	0,121
0,7498		0,75016		-0,00040	$6,6 \cdot 10^{-6}$	-0,0787	0,079
1,0025		1,00276		-0,00029	$6,6 \cdot 10^{-6}$	-0,0559	0,056

Uvrštavanjem vrijednosti navedenih u tablici 11. u jednadžbu (13) dobivamo vrijednosti E_n tj. faktora slaganja. Kako su sve vrijednosti manje od 1 može se zaključiti da je postignuta usporedivost rezultata. Također možemo primijetiti da su sve dobivene vrijednosti faktora slaganja negativne, te se sumnja na prisutnost sustavnog pomaka u rezultatima mjerenja predloženim postupkom, tj. rezultati na visinomjeru uvijek su manji od rezultata na jednoosnom mjernom uređaju.

7.2. Odstupanje izmjerenih vrijednosti na visinomjeru

U prethodnom poglavlju potvrđena je usporedivost rezultata ostvarenih predloženim i prema akreditiranom postupku. Međutim kada se rezultatima mjerenja ostvarenim s predloženim postupkom pridruži mjerna nesigurnost, te se rezultati mjerenja usporede s dopuštenim odstupanjima prikladnost predloženog postupka dovedena je u pitanje, kako je prikazano u tablici 12. i tablici 13.

Tablica 12. Odstupanje izmjerenih vrijednosti prvog mjerenja

Nazivna mjera (mm)	Izmjerena vrijednost, prvo mjerenje (mm)	Odstupanje (μm)	Odstupanje + mjerna nesigurnost (μm)	Dopušteno odstupanje (μm)
0,03	0,0300	0,0	5,2	± 3
0,1	0,0999	-0,1	-5,3	± 4
0,5	0,4977	-2,3	-7,5	± 9
0,75	0,7500	0,0	5,2	± 12
1	1,0028	2,8	8,0	± 16

Tablica 13. Odstupanje izmjerenih vrijednosti drugog mjerenja

Nazivna mjera (mm)	Izmjerena vrijednost, drugo mjerenje (mm)	Odstupanje (μm)	Odstupanje + mjerna nesigurnost (μm)	Dopušteno odstupanje (μm)
0,03	0,0300	0,0	5,2	± 3
0,1	0,0998	-0,2	-5,4	± 4
0,5	0,4974	-2,6	-7,8	± 9
0,75	0,7495	-0,5	-5,7	± 12
1	1,0020	2,0	7,2	± 16

Iz tablica 12. i 13. vidimo da rezultati etalona debljina nazivnih mjera 0,03 mm i 0,1 mm ne zadovoljavaju zahtjeve dopuštenih odstupanja. Kako je odstupanje izmjerenih vrijednosti za etalon nazivne mjere 0,03 mm u oba slučaja jednako 0 μm , a za etalon debljine 0,1 mm manje od pola mikrometra jasno je da izmjerene vrijednosti ne zadovoljavaju zahtjeve dopuštenih odstupanja zbog doprinosa mjerne nesigurnosti. Međutim, vidljivo je da je za veće nazivne vrijednosti etalona debljine postupak prikladan i vraća rezultate u granicama dopuštenih

odstupanja. Najveći doprinos mjernoj nesigurnosti (U) ima nesigurnost mjerne pogreške visinomjera zbog čijeg iznosa rezultati mjerenja etalona debljine nazivne mjere do 0,5 mm ne ulaze u granice dopuštenih odstupanja.

8. ZAKLJUČAK

Kontrolnici predstavljaju način brze kontrole točnosti mjera ili oblika u serijskoj ili masovnoj proizvodnji. Postoje razne vrste kontrolnika, „ide/ne ide“ izvedbe, a jedni od njih su i etaloni debljine. Izrađuju se vrlo precizno te se u normi DIN 2275 navode sve njihove bitne konstrukcijske i tehničke karakteristike. Kako bi kontrola etalonima debljine bila pouzdana i oni se moraju umjeravati. Nacionalni laboratorij za duljinu RH akreditiran je za postupak umjeravanja jednoosnim univerzalnim mjernim uređajem. Zbog visoke rezolucije jednoosnog mjernog uređaja predložen je novi postupak umjeravanja etalona debljine kako bi se uređaj rasteretio i mogao koristiti za mjerenja u kojima je potrebna tako visoka rezolucija i točnost. Predložen postupak uključuje mjerenja na visinomjeru s prihvatom konstruiranim u CAD programu SolidWorks i realiziranim na Katedri za alatne strojeve. Prilikom konstrukcije prihvata vodilo se računa o zahtjevu da se mjerenje debljine provodi korištenjem dva sferna ticala radi eliminacije greške zbog progiba koji bi se javljao u slučaju rezultata dobivenih mjerenjem etalona koji leži na granitnoj ploči. Provedena su mjerenja na 5 etalona debljine nazivnih mjera 0,03 mm, 0,1 mm, 0,5 mm, 0,75 mm i 1 mm. Mjerna nesigurnost predloženog mjernog postupka izračunata je prema smjernicama GUM-a [13]. Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c iznosi $u_c = (2,56 + 2,7 \cdot L) \mu\text{m}$, L u m. Međutim, kada se u obzir uzme kraj mjernog područja (nazivna mjera etalona debljine od jednog milimetra), linearni član navedenog izraza $2,7 \cdot L$ može se zanemariti. Zbog toga linearizirana proširena mjerna nesigurnost U , uz $k = 2$ i $P = 95\%$ iznosi $U = 5,2 \mu\text{m}$.

S ciljem potvrđivanja prikladnosti predložene metode umjeravanja etalona debljine provedena je usporedba rezultata računanjem faktora slaganja E_n uzimajući rezultate i pripadajuće nesigurnosti akreditiranog postupka referentnim vrijednostima u ovoj analizi. Sve izračunate vrijednosti faktora slaganja bile su $|E_n| < 1$ čime je potvrđena usporedivost rezultata ostvarenih s predloženim postupkom i akreditiranim referentnim postupkom.

Iako je ostvarena usporedivost rezultata mjerenja, utvrđeno je da su rezultati ostvareni predloženim postupkom manjih vrijednosti u odnosu na vrijednosti ostvarene akreditiranim postupkom, što upućuje na sustavnu pogrešku predložene metode čije uzrok nije poznat.

Kada se izračunata mjerna nesigurnost pridruži rezultatima mjerenja prema tablici dopuštenih odstupanja vidi se da rezultati prva dva etalona debljine 0,03 mm i 0,1 mm, ne zadovoljavaju

granice dopuštenih odstupanja. Međutim treba zamijetiti da je dopušteno odstupanje kod etalona nazivne mjere 0,03 mm svega $\pm 3 \mu\text{m}$ što znači da rezultat mjerenja može biti potpuno jednak rezultatu dobivenom na jednoosnom mjernom uređaju no svejedno neće zadovoljavati zbog i dalje velike nesigurnosti. Ipak, treba primijetiti kako je za nazivne vrijednosti etalona debljine 0,5 mm i veće predloženi postupak umjeravanja primjenjiv s obzirom na dopuštena odstupanja propisana relevantnom normom. S porastom nazivnih mjera etalona debljine rastu i vrijednosti dopuštenih odstupanja, stoga je predloženi postupak primjenjiv i za te etalone debljine.

Zbog svega navedenog zaključuje se kako je predložen postupak umjeravanja etalona debljine prikladan, te osigurava sljedive i usporedive rezultate mjerenja. Najveći doprinos nesigurnosti rezultata umjeravanja etalona debljine je utjecaj standardne nesigurnosti umjeravanja visinomjera. Kako utvrđene vrijednosti faktora slaganja potvrđuju usporedivost rezultata ostvarenih prema referentnom postupku i predloženom postupku, potrebno je naći rješenje za smanjenje mjerne nesigurnosti rezultata ostvarenih predloženim postupkom, odnosno smanjenje nesigurnosti mjerne pogreške visinomjera kako bi postupak bio prikladan i za manje nazivne mjere etalona debljine.

LITERATURA

- [1] Danijel Horvatić, Diplomski rad – Umjeravanje mjernih instrumenata, FSB, 2012.
- [2] <http://ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/26/3.%20Mjerenje%20i%20kontrola.pdf>, preuzimanje: listopad 2016.
- [3] https://hr.wikipedia.org/wiki/Mjerni_listi%C4%87i, preuzimanje: listopad 2016.
- [4] <http://specijalna-oprema.hr/kontrolni-listici>, preuzimanje: listopad 2016.
- [5] Norma DIN 2275, Fühlerlehren, 1977
- [6] Domagoj Nedved, Završni rad – Razrada postupka umjeravanja mjernih listića, FSB, 2009.
- [7] <http://mediotehna.hr/hr/Granicne-mjerke-i-mjerni-listici/Mjerni-listici.html>, preuzimanje: listopad 2016.
- [8] <https://www.fsb.unizg.hr/zzk/lfsb/>, preuzimanje: listopad 2016.
- [9] Biserka Runje, Predavanja, Teorija i tehnika mjerenja, FSB, 2014.
- [10] Biserka Runje, Predavanja, Mjeriteljstvo, FSB, 2013.
- [11] <http://goldwingdocs.com/forum/viewtopic.php?t=2229>, preuzimanje: studeni 2016.
- [12] HRN EN ISO/IEC 17025:2007
- [13] JCGM 100:2008 Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti

PRILOZI

Prilog I. CD-R disc

Prilog II. Postupak za umjeravanje etalona debljine

POSTUPAK ZA UMJERAVANJE ETALONA DEBLJINE

Zagreb, studeni 2016.

SADRŽAJ

Poglavlje	Naslov	Stranica
1	Svrha	46
2	Područje primjene	46
3	Norme i referentni dokumenti	46
4	Korištena mjerna sredstva	46
5	Provjera certifikata mjernih sredstava	46
6	Priprema za provedbu umjeravanja	46
7	Prethodna ispitivanja	46
8	Provedba umjeravanja	47
9	Proračun mjerne nesigurnosti	47
10	Sljedivost	48

1 SVRHA

Svrha ovog dokumenta je razrada postupka ispitivanja funkcionalnih i dimenzionalnih značajki etalona debljine.

2 PODRUČJE PRIMJENE

Postupak je namijenjen umjeravanju etalona debljine mjernog područja od 0,03 mm do 1 mm.

3 NORME I REFERENTNI DOKUMENTI

Za potpuno razumijevanje i primjenu ovog postupka potrebno je koristiti slijedeće norme i referentne dokumente:

3.1 DIN 2275 (1977) : Fühlerlehren.

4 KORIŠTENA MJERNA SREDSTVA

4.1 *Naziv:* Visinomjer
Proizvođač: Mitutoyo
Oznaka: MU 45-422

5 PROVJERA CERTIFIKATA MJERNIH SREDSTAVA

5.1 Prije provedbe umjeravanja potrebno je provjeriti valjanost certifikata onih mjernih sredstava koja se koriste u postupku umjeravanja.

6 PRIPREMA ZA PROVEDBU UMJERAVANJA

6.1 Mjerne površine etalona i uređaja koje koristimo treba očistiti i odstraniti masnoću korištenjem medicinskog benzina, pamučne vate i čiste pamučne krpe.

7 PRETHODNA ISPITIVANJA

- 7.1 Provjeriti postojanje identifikacijske oznake etalona debljine (serijski broj i/ili tvornički broj i/ili interna oznaka donosioca etalona.).
- 7.2 Provjeriti stanje mjernih površina (korozija, oštećenja, istrošenost i dr.).
- 7.3 Provjeriti uočljivost brojevnih oznaka nazivne mjere.

7.4 U slučaju da etaloni debljine ne zadovoljavaju zahtjeve iz točke 8. postupak umjeravanja se ne provodi.

8 PROVEDBA UMJERAVANJA

8.1 Umjeravanje provoditi samo u slučaju ako je temperatura okoliša $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$.

8.2 Utvrđivanje debljine etalona provesti korištenjem visinomjera, oznake MU 45-422.

8.3 Prihvat za postupak umjeravanja pozicionirati pomoću značajke visinomjera koja traži maksimalne vrijednosti tako da se ticalo prihvata nalazi direktno ispod ticala visinomjera.

8.4 Debljinu etalona treba utvrditi na tri mjerna mjesta, ravnomjerno raspoređena na mjernoj površini etalona debljine. Nakon dobivanja vrijednosti na sva tri mjerna mjesta ciklus se ponavlja nakon što se ponovno namjesti referentna nula. Ciklus mjerenja za tri mjerna mjesta ponavlja se 30 puta.

9 PRORAČUN ZA ISKAZIVANJE MJERNE NESIGURNOSTI

9.1 Matematički model mjerenja

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

gdje je:

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

9.2 Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja etalona debljine prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti, μm	Koeficijent osjetljivosti, c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, $\mu\text{m}, L$ u m
$u(L_{Si})$	Ponovljivost	0,1	1	Normalna	0,1
$u(\delta L_{Si})$	Umjeravanje visinomjera	$2,5+2,25 \cdot L$	1	Normalna	$2,5+2,25 \cdot L$
$u(\delta L_N)$	Nesuosnost	0,462	1	Pravokutna	0,462
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura	0,289 °C	$L_S \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	$3,323 \cdot L$
$u(\delta L_M)$	Mehanički utjecaji	0,288	1	Pravokutna	0,288
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c	$u_c = (2,56 + 2,7 \cdot L) \mu\text{m}$				
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U za $P = 95 \%$, $k = 2$	$U = 5,2 \mu\text{m}$				

10 SLJEDIVOST

10.1 Sljedivost rezultata mjerenja etalona debljine osigurana je neprekinutim lancem umjeravanja koji uključuje:

Visinomjer → kratke i duge planparalelne granične mjerke → univerzalne jednoosne mjerne uređaje → interferometar → jodno stabilizirani He-Ne laser.

Prilog III. Mjerenja

Prvo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,03 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,0297	0,0299	0,0299	0,029833
2.	0,0303	0,0304	0,0304	0,030367
3.	0,0300	0,0299	0,0299	0,029933
4.	0,0300	0,0299	0,0298	0,029900
5.	0,0300	0,0304	0,0300	0,030133
6.	0,0301	0,0301	0,0298	0,030000
7.	0,0300	0,0302	0,0301	0,030100
8.	0,0301	0,0302	0,0300	0,030100
9.	0,0301	0,0301	0,0298	0,030000
10.	0,0301	0,0300	0,0300	0,030033
11.	0,0302	0,0303	0,0302	0,030233
12.	0,0300	0,0301	0,0299	0,030000
13.	0,0301	0,0302	0,0301	0,030133
14.	0,0300	0,0301	0,0302	0,030100
15.	0,0299	0,0299	0,0299	0,029900
16.	0,0301	0,0302	0,0300	0,030100
17.	0,0299	0,0302	0,0300	0,030033
18.	0,0299	0,0301	0,0300	0,030000
19.	0,0302	0,0301	0,0300	0,030100
20.	0,0301	0,0301	0,0300	0,030067
21.	0,0300	0,0302	0,0301	0,030100
22.	0,0299	0,0301	0,0298	0,029933
23.	0,0303	0,0303	0,0301	0,030233
24.	0,0300	0,0301	0,0300	0,030033
25.	0,0300	0,0301	0,0300	0,030033
26.	0,0299	0,0302	0,0299	0,030000
27.	0,0299	0,0301	0,0300	0,030000
28.	0,0301	0,0300	0,0298	0,029967
29.	0,0301	0,0300	0,0300	0,030033
30.	0,0301	0,0300	0,0301	0,030067

Prvo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,1 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,1001	0,1000	0,0998	0,099967
2.	0,0999	0,0997	0,0998	0,099800
3.	0,0998	0,1001	0,0996	0,099833
4.	0,0996	0,0998	0,0998	0,099733
5.	0,1003	0,1000	0,0999	0,100067
6.	0,1005	0,0999	0,1000	0,100133
7.	0,1002	0,1001	0,0998	0,100033
8.	0,0999	0,1001	0,1000	0,100000
9.	0,1005	0,1000	0,0999	0,100133
10.	0,0995	0,1000	0,0998	0,099767
11.	0,1000	0,0995	0,1001	0,099867
12.	0,1001	0,0999	0,1001	0,100033
13.	0,1000	0,0998	0,1000	0,099933
14.	0,1001	0,1003	0,1004	0,100267
15.	0,1000	0,0997	0,0999	0,099867
16.	0,1003	0,1004	0,0998	0,100167
17.	0,0998	0,1004	0,0997	0,099967
18.	0,0996	0,0996	0,0996	0,099600
19.	0,1003	0,0994	0,0997	0,099800
20.	0,0997	0,0998	0,0999	0,099800
21.	0,1001	0,0995	0,1000	0,099867
22.	0,1001	0,0995	0,1000	0,099867
23.	0,1004	0,1002	0,0999	0,100167
24.	0,0996	0,1001	0,1002	0,099967
25.	0,0995	0,0998	0,0999	0,099733
26.	0,1006	0,1002	0,0998	0,100200
27.	0,1000	0,1003	0,1001	0,100133
28.	0,1004	0,1000	0,0999	0,100100
29.	0,1000	0,0998	0,1000	0,099933
30.	0,1001	0,1000	0,1002	0,100100

Prvo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,5 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,4976	0,4978	0,4976	0,497667
2.	0,4981	0,4981	0,4980	0,498067
3.	0,4984	0,4980	0,4970	0,497800
4.	0,4985	0,4980	0,4974	0,497967
5.	0,4979	0,4977	0,4975	0,497700
6.	0,4977	0,4978	0,4973	0,497600
7.	0,4975	0,4981	0,4979	0,497833
8.	0,4977	0,4980	0,4977	0,497800
9.	0,4982	0,4978	0,4972	0,497733
10.	0,4978	0,4972	0,4980	0,497667
11.	0,4977	0,4974	0,4972	0,497433
12.	0,4978	0,4979	0,4978	0,497833
13.	0,4977	0,4978	0,4978	0,497767
14.	0,4983	0,4977	0,4985	0,498167
15.	0,4978	0,4975	0,4970	0,497433
16.	0,4976	0,4975	0,4971	0,497400
17.	0,4976	0,4978	0,4975	0,497633
18.	0,4985	0,4972	0,4974	0,497700
19.	0,4981	0,4982	0,4971	0,497800
20.	0,4982	0,4973	0,4983	0,497933
21.	0,4975	0,4978	0,4972	0,497500
22.	0,4983	0,4971	0,4978	0,497733
23.	0,4977	0,4974	0,4977	0,497600
24.	0,4984	0,4973	0,4978	0,497833
25.	0,4981	0,4975	0,4977	0,497767
26.	0,4978	0,4980	0,4973	0,497700
27.	0,4979	0,4977	0,4975	0,497700
28.	0,4978	0,4984	0,4971	0,497767
29.	0,4978	0,4982	0,4976	0,497867
30.	0,4974	0,4981	0,4978	0,497767

Prvo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,75 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,7495	0,7499	0,7496	0,749667
2.	0,7504	0,7501	0,7500	0,750167
3.	0,7503	0,7499	0,7498	0,750000
4.	0,7504	0,7498	0,7494	0,749867
5.	0,7503	0,7497	0,7499	0,749967
6.	0,7505	0,7501	0,7494	0,750000
7.	0,7501	0,7500	0,7495	0,749867
8.	0,7497	0,7501	0,7502	0,750000
9.	0,7502	0,7503	0,7500	0,750167
10.	0,7499	0,7497	0,7495	0,749700
11.	0,7499	0,7500	0,7498	0,749900
12.	0,7499	0,7503	0,7496	0,749933
13.	0,7504	0,7497	0,7495	0,749867
14.	0,7502	0,7499	0,7495	0,749867
15.	0,7505	0,7502	0,7498	0,750167
16.	0,7503	0,7503	0,7498	0,750133
17.	0,7505	0,7500	0,7497	0,750067
18.	0,7505	0,7497	0,7498	0,750000
19.	0,7498	0,7505	0,7501	0,750133
20.	0,7501	0,7504	0,7501	0,750200
21.	0,7499	0,7494	0,7494	0,749567
22.	0,7505	0,7504	0,7501	0,750333
23.	0,7502	0,7502	0,7496	0,750000
24.	0,7506	0,7496	0,7499	0,750033
25.	0,7501	0,7504	0,7502	0,750233
26.	0,7498	0,7496	0,7503	0,749900
27.	0,7504	0,7495	0,7500	0,749967
28.	0,7503	0,7501	0,7504	0,750267
29.	0,7506	0,7496	0,7502	0,750133
30.	0,7502	0,7500	0,7495	0,749900

Prvo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 1,0 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	1,0020	1,0031	1,0030	1,002700
2.	1,0026	1,0032	1,0026	1,002800
3.	1,0020	1,0028	1,0031	1,002633
4.	1,0024	1,0025	1,0026	1,002500
5.	1,0024	1,0030	1,0028	1,002733
6.	1,0031	1,0027	1,0030	1,002933
7.	1,0027	1,0036	1,0029	1,003067
8.	1,0026	1,0029	1,0033	1,002933
9.	1,0022	1,0030	1,0035	1,002900
10.	1,0024	1,0035	1,0032	1,003033
11.	1,0028	1,0034	1,0032	1,003133
12.	1,0026	1,0034	1,0033	1,003100
13.	1,0024	1,0028	1,0030	1,002733
14.	1,0025	1,0031	1,0030	1,002867
15.	1,0023	1,0032	1,0030	1,002833
16.	1,0023	1,0024	1,0024	1,002367
17.	1,0022	1,0033	1,0031	1,002867
18.	1,0026	1,0029	1,0029	1,002800
19.	1,0034	1,0038	1,0038	1,003667
20.	1,0024	1,0032	1,0031	1,002900
21.	1,0025	1,0033	1,0030	1,002933
22.	1,0029	1,0031	1,0029	1,002967
23.	1,0021	1,0032	1,0031	1,002800
24.	1,0023	1,0032	1,0033	1,002933
25.	1,0027	1,0029	1,0026	1,002733
26.	1,0025	1,0036	1,0028	1,002967
27.	1,0026	1,0026	1,0032	1,002800
28.	1,0026	1,0036	1,0031	1,003100
29.	1,0023	1,0034	1,0031	1,002933
30.	1,0029	1,0030	1,0027	1,002867

Drugo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,03 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,0302	0,0302	0,0302	0,030200
2.	0,0300	0,0299	0,0300	0,029967
3.	0,0300	0,0302	0,0300	0,030067
4.	0,0300	0,0303	0,0301	0,030133
5.	0,0298	0,0299	0,0298	0,029833
6.	0,0298	0,0301	0,0299	0,029933
7.	0,0299	0,0300	0,0299	0,029933
8.	0,0300	0,0301	0,0300	0,030033
9.	0,0301	0,0301	0,0298	0,030000
10.	0,0300	0,0301	0,0301	0,030067
11.	0,0302	0,0302	0,0301	0,030167
12.	0,0300	0,0300	0,0300	0,030000
13.	0,0301	0,0301	0,0303	0,030167
14.	0,0301	0,0302	0,0302	0,030167
15.	0,0300	0,0299	0,0300	0,029967
16.	0,0301	0,0302	0,0302	0,030167
17.	0,0298	0,0297	0,0298	0,029767
18.	0,0299	0,0300	0,0299	0,029933
19.	0,0299	0,0298	0,0301	0,029933
20.	0,0300	0,0301	0,0297	0,029933
21.	0,0300	0,0301	0,0300	0,030033
22.	0,0300	0,0301	0,0300	0,030033
23.	0,0302	0,0301	0,0300	0,030100
24.	0,0300	0,0301	0,0301	0,030067
25.	0,0300	0,0299	0,0300	0,029967
26.	0,0301	0,0302	0,0303	0,030200
27.	0,0299	0,0300	0,0300	0,029967
28.	0,0301	0,0300	0,0300	0,030033
29.	0,0302	0,0300	0,0302	0,030133
30.	0,0300	0,0298	0,0298	0,029867

Drugo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,1 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,1002	0,1001	0,0995	0,099933
2.	0,0998	0,0996	0,0996	0,099667
3.	0,0997	0,0997	0,0995	0,099633
4.	0,1003	0,0997	0,0995	0,099833
5.	0,1004	0,1000	0,1000	0,100133
6.	0,1002	0,1001	0,1000	0,100100
7.	0,1000	0,0998	0,1000	0,099933
8.	0,0999	0,0998	0,0994	0,099700
9.	0,1000	0,0999	0,1002	0,100033
10.	0,0998	0,0996	0,0993	0,099567
11.	0,0999	0,0993	0,0999	0,099700
12.	0,0995	0,0995	0,0998	0,099600
13.	0,0996	0,0996	0,0993	0,099500
14.	0,0999	0,0997	0,0999	0,099833
15.	0,1002	0,0999	0,1002	0,100100
16.	0,1003	0,0994	0,0994	0,099700
17.	0,1002	0,0999	0,1002	0,100100
18.	0,1001	0,1001	0,0996	0,099933
19.	0,0998	0,0999	0,0999	0,099867
20.	0,1004	0,1000	0,0996	0,100000
21.	0,0995	0,0998	0,0993	0,099533
22.	0,1001	0,0996	0,1002	0,099967
23.	0,0998	0,0995	0,0993	0,099533
24.	0,1003	0,0993	0,0999	0,099833
25.	0,1004	0,0996	0,0994	0,099800
26.	0,0996	0,0998	0,0995	0,099633
27.	0,0997	0,1001	0,0995	0,099767
28.	0,1001	0,1000	0,0993	0,099800
29.	0,1004	0,1003	0,0997	0,100133
30.	0,1000	0,0998	0,0999	0,099900

Drugo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,5 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,4975	0,4984	0,4969	0,497600
2.	0,4979	0,4976	0,4973	0,497600
3.	0,4976	0,4973	0,4978	0,497567
4.	0,4978	0,4977	0,4973	0,497600
5.	0,4973	0,4973	0,4969	0,497167
6.	0,4975	0,4972	0,4974	0,497367
7.	0,4977	0,4974	0,4976	0,497567
8.	0,4978	0,4975	0,4972	0,497500
9.	0,4977	0,4976	0,4969	0,497400
10.	0,4971	0,4979	0,4969	0,497300
11.	0,4983	0,4971	0,4971	0,497500
12.	0,4972	0,4970	0,4967	0,496967
13.	0,4978	0,4983	0,4970	0,497700
14.	0,4978	0,4973	0,4970	0,497367
15.	0,4979	0,4980	0,4974	0,497767
16.	0,4979	0,4979	0,4973	0,497700
17.	0,4979	0,4970	0,4971	0,497333
18.	0,4973	0,4972	0,4974	0,497300
19.	0,4972	0,4974	0,4975	0,497367
20.	0,4977	0,4973	0,4978	0,497600
21.	0,4973	0,4973	0,4969	0,497167
22.	0,4975	0,4979	0,4978	0,497733
23.	0,4973	0,4971	0,4976	0,497333
24.	0,4980	0,4974	0,4975	0,497633
25.	0,4984	0,4978	0,4979	0,498033
26.	0,4976	0,4975	0,4970	0,497367
27.	0,4979	0,4971	0,4975	0,497500
28.	0,4986	0,4970	0,4981	0,497900
29.	0,4972	0,4978	0,4967	0,497233
30.	0,4973	0,4972	0,4971	0,497200

Drugo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 0,75 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	0,7490	0,7493	0,7494	0,749233
2.	0,7496	0,7492	0,7490	0,749267
3.	0,7498	0,7494	0,7492	0,749467
4.	0,7495	0,7490	0,7494	0,749300
5.	0,7498	0,7495	0,7493	0,749533
6.	0,7497	0,7499	0,7493	0,749633
7.	0,7501	0,7493	0,7498	0,749733
8.	0,7500	0,7494	0,7496	0,749667
9.	0,7496	0,7490	0,7491	0,749233
10.	0,7497	0,7495	0,7492	0,749467
11.	0,7499	0,7498	0,7490	0,749567
12.	0,7497	0,7492	0,7495	0,749467
13.	0,7500	0,7493	0,7494	0,749567
14.	0,7499	0,7493	0,7496	0,749600
15.	0,7499	0,7496	0,7490	0,749500
16.	0,7500	0,7490	0,7493	0,749433
17.	0,7492	0,7495	0,7494	0,749367
18.	0,7497	0,7492	0,7497	0,749533
19.	0,7502	0,7494	0,7492	0,749600
20.	0,7496	0,7492	0,7494	0,749400
21.	0,7502	0,7492	0,7497	0,749700
22.	0,7500	0,7493	0,7496	0,749633
23.	0,7500	0,7490	0,7502	0,749733
24.	0,7501	0,7490	0,7492	0,749433
25.	0,7494	0,7494	0,7489	0,749233
26.	0,7496	0,7497	0,7494	0,749567
27.	0,7499	0,7491	0,7497	0,749567
28.	0,7503	0,7495	0,7495	0,749767
29.	0,7497	0,7489	0,7493	0,749300
30.	0,7502	0,7496	0,7497	0,749833

Drugo mjerenje - Etalon debljine nazivne mjere 1,0 mm				
Broj mjerenja	mjerno mjesto 1. (mm)	mjerno mjesto 2. (mm)	mjerno mjesto 3. (mm)	Aritmetička sredina (mm)
1.	1,0013	1,0015	1,0022	1,001667
2.	1,0017	1,0023	1,0025	1,002167
3.	1,0017	1,0020	1,0031	1,002267
4.	1,0009	1,0024	1,0023	1,001867
5.	1,0019	1,0020	1,0022	1,002033
6.	1,0012	1,0024	1,0022	1,001933
7.	1,0014	1,0021	1,0025	1,002000
8.	1,0015	1,0021	1,0032	1,002267
9.	1,0018	1,0026	1,0021	1,002167
10.	1,0018	1,0023	1,0027	1,002267
11.	1,0014	1,0022	1,0023	1,001967
12.	1,0020	1,0020	1,0020	1,002000
13.	1,0011	1,0021	1,0024	1,001867
14.	1,0013	1,0028	1,0019	1,002000
15.	1,0012	1,0026	1,0026	1,002133
16.	1,0019	1,0021	1,0018	1,001933
17.	1,0020	1,0020	1,0023	1,002100
18.	1,0019	1,0022	1,0026	1,002233
19.	1,0015	1,0025	1,0023	1,002100
20.	1,0014	1,0025	1,0019	1,001933
21.	1,0019	1,0018	1,0021	1,001933
22.	1,0015	1,0020	1,0017	1,001733
23.	1,0019	1,0027	1,0028	1,002467
24.	1,0013	1,0021	1,0025	1,001967
25.	1,0017	1,0022	1,0025	1,002133
26.	1,0022	1,0025	1,0027	1,002467
27.	1,0022	1,0025	1,0025	1,002400
28.	1,0015	1,0017	1,0023	1,001833
29.	1,0016	1,0023	1,0021	1,002000
30.	1,0015	1,0022	1,0023	1,002000