

# Sljedivost rezultata mjerenja parametara hrapavosti i oblika

---

**Stemberger, Eros**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:776166>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Eros Stemberger**

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Gorana Baršić, dipl. ing

Student:

Eros Stemberger

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Gorani Baršić, dipl. ing. na iznimnom strpljenju, susretljivosti i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Eros Stemberger



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne i 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: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Eros Stemberger** JMBAG: **0035214728**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sljedivost rezultata mjerenja parametara hrapavosti i oblika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Traceability for roughness and form measurement results**

Opis zadatka:

Mjeriteljska zajednica je već neko vrijeme svjesna određenih manjkavosti u području osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja parametara hrapavosti i oblika ostvarenih sustavima s mjernim ticalima. Uz utvrđene manjkavosti lanaca sljedivosti, prisutna je i trajna težnja za smanjenjem mjernih nesigurnosti. Navedeno je rezultiralo pokretanjem EMPIR projekta 18PRT01 Probe Trace: *Traceability for contact probe and stylus instrument measurements*, na kojem je jedan od partnera Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

U radu je potrebno:

1. Opisati postojeće mjerne metode u postupcima osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja parametara hrapavosti i oblika ostvarenih sustavima s mjernim ticalima.
2. Pojasniti manjkavosti postojećih lanaca sljedivosti rezultata mjerenja parametara hrapavosti i oblika.
3. Definirati nove mjerne metode i lance postizanja izravne sljedivosti do jedinice SI metra pomoću dostupnih, prijenosnih generatora pomaka.
4. Obrazložiti potrebu i prikazati osnovne značajke softvera za smanjenje nepoželjnih nasumičnih utjecaja (*random noise reduction*) rezultata mjerenja hrapavosti i kružnosti (oblika).

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Gorana Baršić

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
 3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
 3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
1.1. Etalon .....	1
1.2. Mjeriteljska sljedivost .....	1
1.3. Umjeravanje .....	2
1.4. Mjerna nesigurnost .....	2
1.5. Vodeće organizacije u mjeriteljstvu .....	3
2. TRENUTNO STANJE .....	4
2.1. Postojeći načini umjeravanja uređaja mjerenje hrapavosti .....	6
2.2. Postojeći načini umjeravanja kontaktnih ticala za mjerenje oblika (kružnosti) .....	8
2.3. Manjkavosti postojećih načina umjeravanje uređaja za mjerenje hrapavosti .....	10
2.4. Manjkavosti postojećih načina umjeravanja kontaktnih ticala za mjerenje oblika ....	16
3. PIEZOELEKTRIČNI GENERATORI POMAKA .....	23
3.1. Uzdužni generatori pomaka.....	25
3.2. Piezoelektrični generator pomaka PI P – 621.ZCD i kontroler E-625 .....	26
4. KORIŠTENJE PIEZOELEMENTA ZA UMJERAVANJE KONTAKTNIH TICALA ...	28
5. ŠUM .....	32
5.1. Klasifikacija šuma.....	32
5.1.1. Šum instrumenta .....	32
5.1.2. Šum mjerenja .....	33
5.1.3. Statički šum .....	33
5.1.4. Dinamički šum.....	34
5.2. Uloga projekta u istraživanju šuma .....	34
5.3. Metode minimiziranja šuma .....	35
5.4. Pregled softvera .....	35
6. SIMULIRANI PROFILI HRAPAVOSTI KORIŠTENJEM PIEZOELEKTRIČNOG GENERATORA .....	37
6.1. Simuliranje profila hrapavosti u statičkim uvjetima .....	37
6.2. Simuliranje profila hrapavosti u dinamičkim uvjetima .....	38
7. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Piramida sljedivosti [2] .....	2
Slika 2. Regionalne mjeriteljske organizacije (RMO) [1] .....	3
Slika 3. Kontaktno ticalo [4] .....	4
Slika 4. Uređaj za mjerenje hrapavosti s ticalom [5] .....	7
Slika 5. Mjerne pločice na rotirajućem stolu [7] .....	9
Slika 6. <i>Flick</i> etalon [5] .....	9
Slika 7. Umjeravanje ticala <i>multi-wave</i> -etalonom [5] .....	10
Slika 12. Piezoelektrični efekt [10] .....	23
Slika 13. Piezoelektrični generator pomaka [11] .....	24
Slika 14. Točka optimuma piezo generatora pomaka [11] .....	24
Slika 15. Prikaz pomaka i smjera polarizacije uzdužnih generatora pomaka [11] .....	25
Slika 16. Piezo stage P-622.ZCD [14].....	26
Slika 17. Kontroler E-625 [16].....	27
Slika 8. Shema umjeravanja piezoelementa [5] .....	28
Slika 9. Relativni pomak piezoelementa u odnosu na ticalo [5] .....	29
Slika 10. Umjeravanje uređaja za ispitivanje kružnosti piezoelementom [5].....	30
Slika 11. Tipični izvori šuma instrumenta i šuma mjerenja [3] .....	33
Slika 18. Prikaz ticala pomoću koga se provodilo umjeravanje [20].....	37
Slika 19. Simulirani profil stepenice, parametar $Pt = 1 \mu\text{m}$ [20] .....	38
Slika 20. Umjeravanje vertikalne komponente ticala pomoću generatora pomaka [20] .....	38
Slika 21. Prikaz jednog od tri simuliranih trokutastih profila [20] .....	39

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Etaloni hrapavosti [5] .....	7
Tablica 2. Etaloni kružnosti [5].....	8
Tablica 3. Usporedba mjeriteljske sposobnosti NMI-a za mjerenje hrapavosti površina [8]...11	
Tablica 4. Usporedba mjeriteljske sposobnosti NMI-a za mjerenje kružnosti [8].....	16
Tablica 5. Mjerenje statičkog šuma [3] .....	34
Tablica 6. Mjerenje dinamičkog šuma [3] .....	34
Tablica 7. Odstupanja od referentnih parametara hrapavosti kod simuliranih profila [20].....	40



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$R_z$	m	maksimalna visina profila
$X_f$	m	slobodan pomak
$F_b$	N	sila blokiranja
$\Delta L_{uzdužno}$	m	uzdužni pomak
$d_{33}$	m/V	koeficijent uzdužne deformacije za piezoelektrični signal
$n$	-	broj naslaganih keramičkih slojeva
$U$	V	primijenjeni napon
$R_a$	$\mu\text{m}$	aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila
$P_t$	$\mu\text{m}$	ukupna visina profila

---

**SAŽETAK**

2019. godine pokrenut je projekt pod naslovom Sljedivost rezultata ostvarenih kontaktnim ticalom i uređajem za mjerenje hrapavosti (18RPT01 *ProbeTrace: Traceability for contact probe and stylus instrument measurements*), financiran u okviru Europskog programa za istraživanje i inovacije u području mjeriteljstva (EMPIR). U projektu sudjeluje deset nacionalnih instituta, odnosno laboratoriji iz deset zemalja, a trajanje je projekta tri godine. Laboratorij za precizna mjerenja dužina s Fakulteta strojarstva i brodogradnje, koji djeluje kao nacionalni laboratorij za duljinu u RH, jedan je od partnera projekta, te voditelj dijela projekta koji se bavi razvijanjem softvera za obradu signala mjerenja hrapavosti i kružnosti (oblika). Cilj projekta je razvoj mjernih sposobnosti za umjeravanje etalona hrapavosti i kružnosti s nesigurnostima u rasponu od 10 nm do 100 nm. Kako bi se postigle ciljane nesigurnosti, razvit će se softver za obradu signala mjerenja hrapavosti i kružnosti (oblika) koji će se temeljiti na suvremenim numeričkim metodama za smanjenje nepoželjnih nasumičnih utjecaja na mjerenje (random noise reduction). Osnovna je ideja projekta da se brojni fizički etaloni koji se upotrebljavaju za umjeravanje uređaja za ispitivanje hrapavosti i oblika zamijene s piezoelementom, pri čemu će vertikalni pomaci piezoelementa odgovarati profilu etalona koji se simulira. Tako je moguće pomoću piezoelementa simulirati čitav niz profila različitih geometrija i nazivnih vrijednosti. U ovom radu su predstavljeni i elaborirani motivi za pokretanje *ProbeTrace* projekta te su detaljno opisane aktivnosti kojima se žele ostvariti definirani ciljevi.

---

**SUMMARY**

In 2019, a project titled 18RPT01 ProbeTrace: Traceability for contact probe and stylus instrument measurements was launched, funded by the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). Ten national institutes and laboratories from ten countries are participating in the project, and the duration of the project is three years. The Laboratory for Precise Length Measurements from the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, which operates as the national laboratory for length in the Republic of Croatia, is one of the project partners and the leader in developing software for form and roughness measurement signal processing. The aim of the project is to develop measurement capabilities for calibration of roughness and roundness standards with uncertainties in the range from 10 nm to 100 nm. In order to achieve targeted uncertainties, software for processing roughness and circularity (shape) measurement signals will be developed based on modern numerical methods to reduce random noise reduction. The basic idea of the project is that the numerous physical standards used to calibrate the device for testing roughness and shape are replaced with a piezoelectric element, where the vertical displacements of the piezoelectric element will correspond to the profile of the standard being simulated. Thus, it is possible to simulate a whole range of profiles of different geometries and nominal values using a piezoelectric element. In this paper, the motives for starting the ProbeTrace project are presented and elaborated, and the activities aimed at achieving the defined goals are described in detail.

## 1. UVOD

Kako tehnologija napreduje, konstantno raste potreba za točnim proizvodima s dobrom kontrolom kvalitete. U ovom području napredne zemlje su najboljim tehnologijama postigle izvrsne rezultate, no problem nastaje kada se ista kvaliteta želi postići u drugim zemljama, odnosno laboratorijima koji nemaju dovoljno znanja ili sredstva. Kako bi se taj sraz mogućnosti smanjio napredni instituti pokrenuli su projekt s ciljem smanjivanja kompleksnosti i cijene uređaja bitnih za osiguravanje visoke točnosti. Time bi se manje razvijenim laboratorijima omogućilo da okolnoj industriji pruža usluge svrhom izrađivanja proizvoda više kvalitete. Da bi se shvatio način na koji se namjerava osigurati viša točnost diljem Europe prvo će se pojasniti pojmovi koje treba poznavati za shvaćanje projekta.

### 1.1. Etalon

Jedan od većih zadataka mjeriteljstva je uspostavljanje međunarodnih zajedničkih praksa putem standardnih mjernih jedinica, a one se prenose u praktični svijet preko etalona. Jedna od definicija glasi: „Mjerni etalon tvarna je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice ili jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca.“ [1] Etaloni kojima će se ovaj rad baviti su etaloni koje se koriste za umjeravanje uređaja za mjerenje odstupanja od kružnosti i hrapavosti.

### 1.2. Mjeriteljska sljedivost

„Lanac sljedivosti neprekidan je lanac umjeravanja, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini, koji u konačnici završavaju s primarnim etalom.“ [1] Krajnji korisnik može postići sljedivost do najviše međunarodne razine izravno od nacionalne mjeriteljske ustanove (NMI) ili od sekundarnoga umjernog laboratorija, u pravilu samo od akreditiranog laboratorija. Sljedivost se može dobiti i od laboratorija izvan države korisnika što je rezultat različitih sporazuma o međunarodnom priznavanju.



Slika 1. Piramida sljedivosti [2]

### 1.3. Umjeravanje

Umjeravanje mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti. Umjeravanje obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari. Ono se, u pravilu, postiže izravnom usporedbom s etalonima ili potvrđenim referentnim tvarima. O umjeravanju se izdaje potvrda o umjeravanju, a najčešće se na umjereno mjerilo stavlja naljepnica.

Četiri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. uspostavljanje i prikaz sljedivosti
2. osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima
3. određivanje točnosti očitavanja mjerila
4. utvrđivanje pouzdanost mjerila, tj. može li mu se vjerovati.

### 1.4. Mjerna nesigurnost

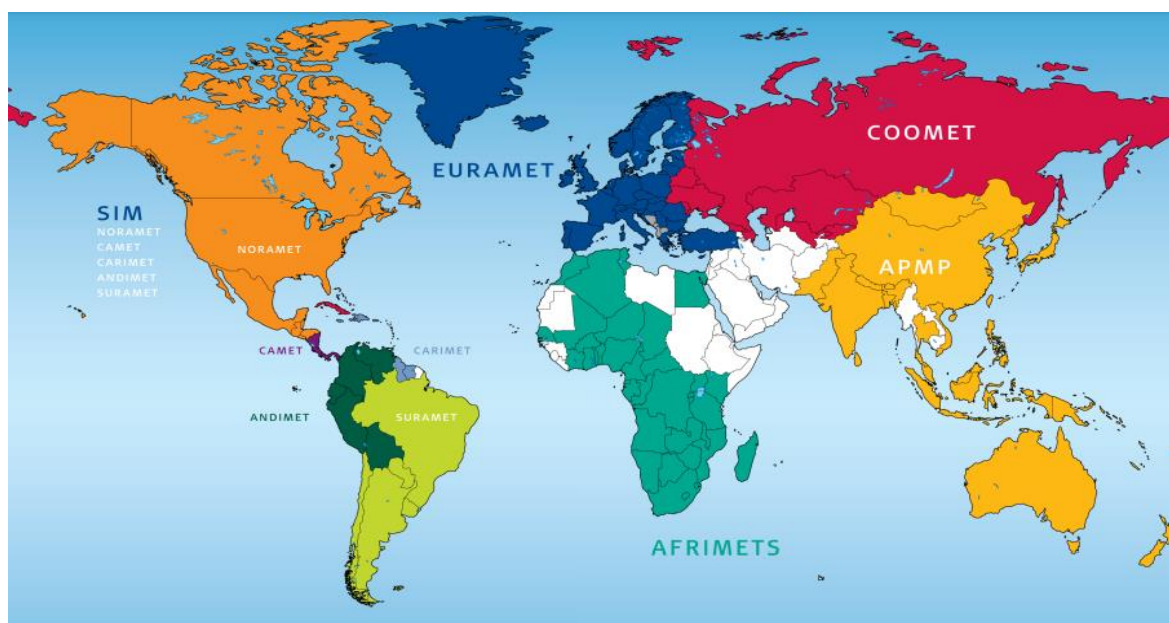
Mjerna nesigurnost je vjerojatno rasipanje vrijednosti pridruženo rezultatu mjerenja, odnosno mjera kvalitete mjernog rezultata, koja omogućuje da se mjerni rezultati uspoređuju s drugim rezultatima, referencijama, specifikacijama ili etalonima. Sva mjerenja podliježu pogreškama, čime se mjerni rezultat razlikuje od istinite vrijednosti mjerene veličine. Uz dato vrijeme i

sredstva, većina se izvora mjerne pogreške može identificirati, a mjerne se pogreške mogu količinski odrediti i ispraviti, npr. umjeravanjem.

Etalon će predstavljati referentnu vrijednost koja će se umjeravanjem prenijeti na potrebni uređaj ili stroj. Svakim umjeravanjem u lancu sljedivosti greška će se povećavati, pa što je etalon „niže“ u lancu imat će veću mjernu nesigurnost.

### 1.5. Vodeće organizacije u mjeriteljstvu

Na vrhu znanosti mjeriteljstva nalazi se Međunarodni ured za mjere i utege (BIPM), međunarodna organizacija nastala na Konvenciji o metru održanoj 1875. godine sa sjedištem u Francuskoj. BIPM ima više od 60 članica koje uključuju sve vodeće zemlje svijeta i zato ima glavnu ulogu u mjeriteljstvu. U hijerarhiji poslije Međunarodnog ureda za mjere i utege slijede Regionalne mjeriteljske organizacije (RMO) (Slika 2.) koje imaju zadaću dijeliti i koordinirati mjeriteljske aktivnosti i usluge. Europski RMO je Europski savez nacionalnih mjeriteljskih instituta (EURAMET). EURAMET uključuje nacionalne mjeriteljske institute (NMI) zemalja članica Europske unije (EU) i Europske slobodne trgovačke zone (EFTA). Sve članice EURAMET-a imaju svoj nacionalni mjeriteljski institut (NMI) koji je međunarodno priznat i koji ima odgovornost predstavljati i održavati mjeriteljske standarde te zemlje. Institut ima odgovornost da omogućuje akreditiranim laboratorijima i industriji u svojoj zemlji mjernu sljedivost do SI definicije mjernih veličina.



Slika 2. Regionalne mjeriteljske organizacije (RMO) [1]

## 2. TRENUTNO STANJE

Tolerancije površina imaju veliki utjecaj pri određivanju funkcija površina. Značajan udio kvarova komponenti počinje na površini zbog postepene deterioracije kvalitete što može uzrokovati zamor materijala i napetosnu koroziju. Ove posljedice često prolaze nezapažene i njihovim širenjem nastaje havarija. U proizvodnoj industriji se zbog navedenih opasnosti zadaju fine tolerancije za oblik i hrapavost površine. Komponente koje su izvan tolerancija uzrokuju pad produktivnosti kompanija i cijele europske proizvodne industrije. Na primjer, ako se komponente vjetroturbina proizvedu izvan tolerancija nastat će zastoji u proizvodnji energije i veliki troškovi popravka kvarova. Dakle točne izmjere hrapavosti površine i njenog oblika vitalne su za dobru kontrolu kvalitete komponenti. [3]

Za karakteriziranje površina koriste se uređaji za mjerenje oblika i hrapavosti s kontaktnim ticalom. Kontaktna ticala funkcioniraju kao prekidač koji generira električni impuls pri kontaktu igle ticala s površinom mjerenog tijela. Pritom se bilježi pomak igle ticala i pomoću pretvornika se otklon igle pretvara u električni signal koji se šalje u računalo na obradu. Uređaj s ticalom ima mogućnost mjerenja s rasponom od nekoliko milimetara i rezolucijom u nanometrima. Većina greška nastalih upotrebom kontaktnih ticala nastaju zanemarivanjem ispravnog načina korištenja zbog ubrzavanja procesa. Ispravnim korištenjem uglavnom će se dobiti precizne, točne i ponovljive mjere, no provode se istraživanja kako bi bilo moguće još više povećati točnost kontaktnog ticala pošto točnost kontaktnog ticala ima značajan utjecaj na ukupnu točnost izmjera npr. istraživanje o varijabilnosti točnosti kontaktnog ticala pri mjerenju objekata različitih materijala. Pri mjerenju hrapavosti koristi se kuglica malog radijusa vrha igle (npr. 2  $\mu\text{m}$ ), dok se za mjerenje tolerancija oblika koristi sfera promjera 2 mm - 5 mm.



Slika 3. Kontaktno ticalo [4]

U proizvodnim uvjetima odstupanja od oblika većinom se mjere koordinatnim mjernim uređajima (CMM) koji su ključni mjerni uređaji za tvornicu budućnosti (industrija 4.0). Zahtjevi za što brža mjerenja doveli su do nove generacije CMM-ova koji rade na režimu skeniranja te koji istodobno mjere i dimenzije i oblik. CMM-ovi se često koriste ticalima koja skeniraju mjernu površinu i pritom prikupljaju x i z koordinate točaka s površine skeniranog objekta. [5]

Mjerenje kontaktnim ticalom uvriježena je metoda pri mjerenju odstupanja od oblika i hrapavosti. Međutim, uočena je potreba za sljedivim etalonima za hrapavost zbog potrebe za povećanjem raspona mjerenja (npr. do 1000  $\mu\text{m}$ ). Dodatno, uporaba ticala za mjerenje oblika u načinu skeniranja s velikim brzinama skeniranja može biti problematična zbog potrebnih visokih brzina prikupljanja podataka, stoga bi dinamičke performanse ticala trebale biti umjerene. Ako se žele postići veće točnosti mjerenja oblika, za mjerenje se upotrebljavaju namjenski uređaji (engl. *form measurement device*) opremljeni induktivnim ticalima kojima se skenira mjerna površina. Kako bi se ti uređaji umjerali, upotrebljavaju se namjenski etaloni s kojima se provjerava dinamička karakteristika ticala i/ili cijelog uređaja. [5]

Mjeriteljska zajednica nije jednoznačno definirala smjernice za umjeravanje takvih mjernih uređaja tako da se postupci umjeravanja mogu razlikovati od laboratorija do laboratorija. S druge strane mjerni protokoli za umjeravanje uređaja za ispitivanje hrapavosti dostupni su već godinama (ISO 12179; ISO25178-701:2010 i DKD-R 4-2). No, mjeriteljska je zajednica posljednjih godina otkrila određena ograničenja postojećeg sustava umjeravanja uređaja za ispitivanje hrapavosti. [5]

U EURAMET projektu 649. „*A comparison of sensitivity standards in form metrology*“ [6] provodila se usporedba mjerne sposobnosti nacionalnih mjeriteljskih instituta diljem Europe. Isti viševalni etaloni i *flick* etaloni bili su cirkulirali između NMI-eva kako bi utvrdili mjernu sposobnost diljem EURAMET-a. Projekt je ukazao na odstupanja u ostvarenim mjernim rezultatima. Instituti su iskazali i bitno drugačije CMC vrijednosti od deklariranih. Takve nesukladnosti ukazuju na nedostatak znanja o utjecajnim faktorima i o njihovom utjecaju na mjerne nesigurnosti. Također rezultati projekta ukazuju na manjak komunikacije između europskih instituta što dovodi do različitih praksi zemalja EURAMET-a i time u određenoj mjeri koči sjedinjavanje i napredak europskog mjeriteljstva i posljedično industrije. U Projektu je zaključeno da je potrebno unaprijediti postojeće metode mjerenja i umjeravanja ili ih zamijeniti novim metodama. Omogućavanje praktičnije metode ostvarivanja sljedivosti

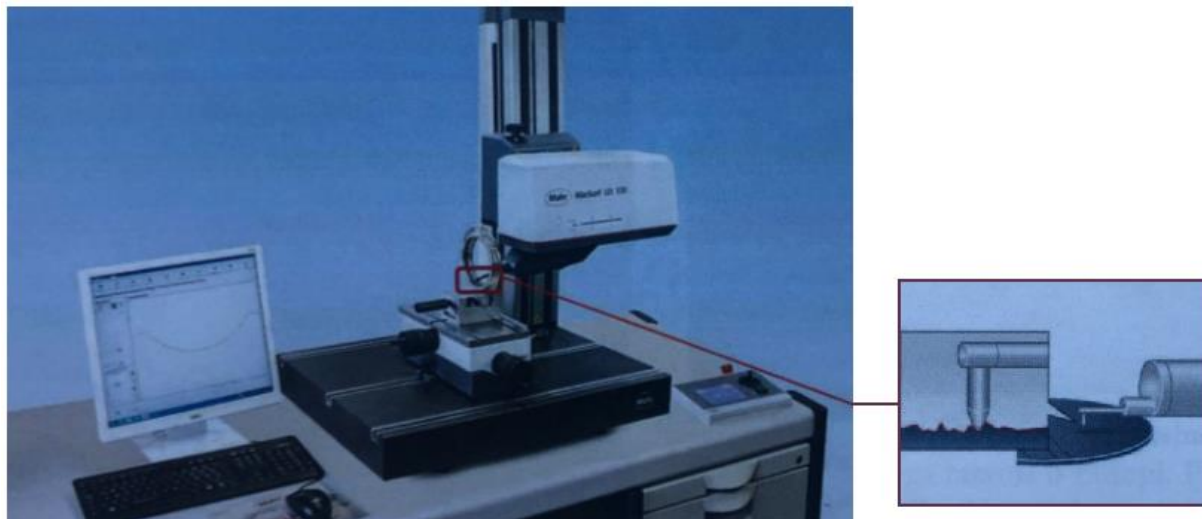


omogućilo bi lakšu eliminaciju utjecajnih faktora na rezultat umjeravanja i omogućilo smanjenje mjernih nesigurnosti.

Na tom je tragu 2019. godine je pokrenut EMPIR projekt s naslovom „Sljedivost rezultata ostvarenih kontaktnim ticalom i uređajem za mjerenje hrapavosti“ (18RPT01 *ProbeTrace: Traceability for contact probe and stylus instrument measurements*). U projektu sudjeluje deset nacionalnih instituta, odnosno laboratoriji iz deset zemalja, a trajanje projekta je tri godine. Laboratorij za precizna mjerenja dužina s Fakulteta strojarstva i brodogradnje, koji djeluje kao nacionalni laboratorij za duljinu u RH, jedan je od partnera u projekta. Glavni cilj Projekta je istražiti sljedive generatore pomaka i njihovu primjenu za uspostavljanje novih efikasnih načina za ostvarenje primarne sljedivosti do SI definicije jedinice metra. Europski kapacitet za istraživanje u mjeriteljstvu za mjerenje kontaktnim ticalima treba se poboljšati i ovaj projekt će doprinijeti tom pothvatu tako da će povećati kooperaciju između nacionalnih mjeriteljskih instituta, laboratorija za umjeravanje i istraživačkih organizacija partnerskih regija. Mjeriteljska sposobnost nije jednaka diljem Europe i instituti manje razvijenih zemalja EU kaskaju, stoga je potrebno osigurati nove novčano efektivne metode koje će omogućiti institutima u razvoju sljedivost do SI jedinice metra.

## 2.1. Postojeći načini umjeravanja uređaja mjerenje hrapavosti

Uređaj za mjerenje hrapavosti skenira površinu ticalom koje se konstantnom brzinom pomiče duž površine ispitnog uzorka (Slika 4.). Uređaj pritom bilježi vertikalne promjene položaja ticala, koje odgovaraju nepravilnostima na ispitnoj površini, te ih pretvaračem pretvara u električni signal koji se dalje obrađuje u računalnoj jedinici mjernoga uređaja. Uređaj za mjerenje hrapavosti umjerava se s pomoću različitih tipova etalona koji su definirani normom ISO 5436-1:2000 „*Geometrical Product Specifications (GPS) . Surface texture: Profile Method; measurement standards – Part: Material measures*“. Tablica 1. donosi pregled etalona za umjeravanje uređaja za ispitivanje hrapavosti prema normi ISO 5436-1:2000. [5]



Slika 4. Uređaj za mjerenje hrapavosti s ticalom [5]

Tablica 1. Etaloni hrapavosti [5]

Tip	Naziv	Profil
A	etalon dubine	
B	etalon stanja igle ticala	
C	lateralni etalon	
D	etalon hrapavosti	
E	etalon koordinata profila	

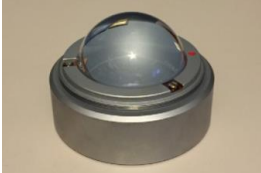

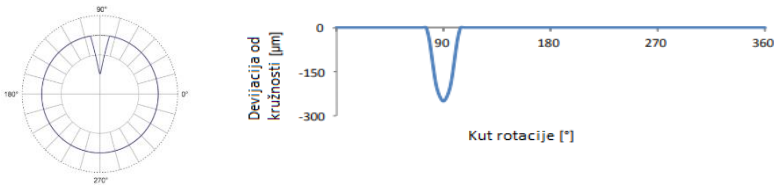
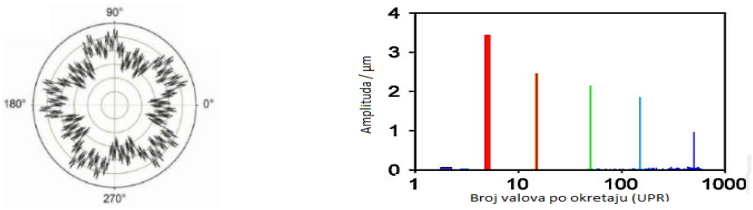
Svaki tip etalona za umjeravanje ima ograničeno područje primjene prema svojim karakteristikama i karakteristikama uređaja jer nemaju promjenjiv oblik. Primjerice, etaloni dubine su proizvedeni na određene vrijednosti dubine (npr. 10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ ). Koristeći te etalone umjeravanje kontaktnih ticala provodi se diskretno, te se utvrđene vrijednosti pogreške mjernog uređaja između nazivnih vrijednosti etalona interpoliraju. Provedba mjerenja parametra

hrapavosti s pomoću uređaja s ticalom obavlja se u dinamičkom modu, pri čemu se ili predmet mjerenja ili igla ticala pomiče konstantnom brzinom. Međutim, umjeravanje mjernoga uređaja s pomoću etalona dubine brazde odvija se u statičkom režimu. Nadalje, pri umjeravanju mjernoga uređaja s pomoću lateralnog etalona (Tip C) i etalona hrapavosti (Tip D) laboratoriji uglavnom raspolažu sa samo nekoliko artefakata različitih nazivnih vrijednosti što dovodi do nedostatnih vrijednosti različitih amplituda i valnih duljina. [5]

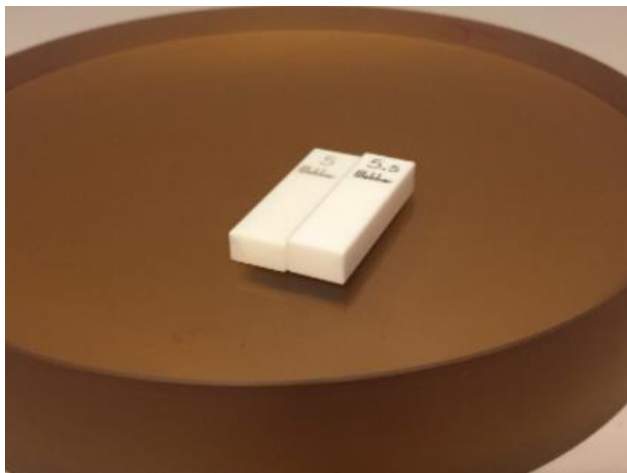
## 2.2. Postojeći načini umjeravanja kontaktnih ticala za mjerenje oblika (kružnosti)

Odstupanje od kružnosti provodi se pomoću CMM-ova ili sa specijaliziranim mjernim uređajima koji su namijenjeni isključivo za mjerenje kružnosti. Različiti etaloni se koriste pri umjeravanju uređaja za mjerenje kružnosti, najčešće mjerna kugla i polukugla, *flick* etalon, *cresting* etalon i *multi-wave* etaloni (Tablica 2.).

Tablica 2. Etaloni kružnosti [5]

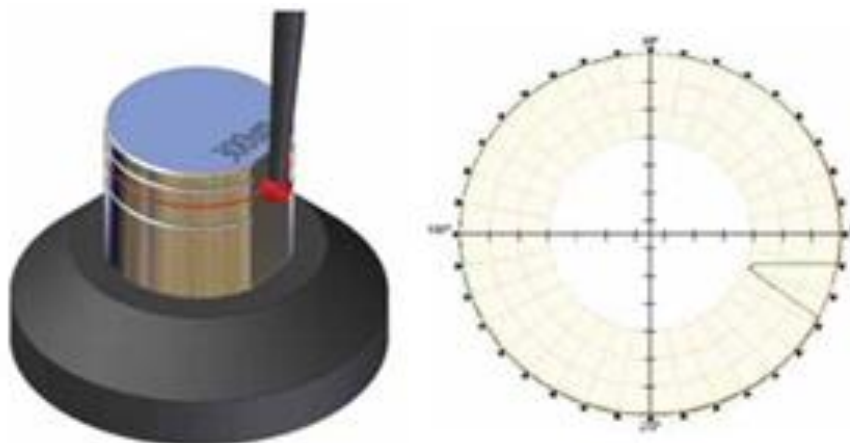
Naziv	Slika
mjerna (polu)kugla	
<i>cresting</i> etalon	
<i>flick</i> etalon	 <p>The <i>flick</i> etalon is characterized by a circular diagram with angular markings at 90°, 180°, 270°, and 0°. The graph shows the deviation from circularity in micrometers (µm) on the y-axis (ranging from 0 to -300) against the rotation angle in degrees on the x-axis (ranging from 0 to 360). A single sharp dip is visible at 90 degrees, reaching approximately -250 µm.</p>
<i>multi-wave</i> etalon	 <p>The <i>multi-wave</i> etalon is characterized by a circular diagram with angular markings at 90°, 180°, 270°, and 0°. The bar chart shows the amplitude in micrometers (µm) on the y-axis (ranging from 0 to 4) against the number of waves per revolution (UPR) on the x-axis (logarithmic scale from 1 to 1000). The chart shows several bars of varying heights, with the highest bar at approximately 10 UPR reaching an amplitude of about 3.5 µm.</p>

Proizvođači najčešće preporučuju korištenje optičkog stakla u kombinaciji s planparalelnim graničnim mjerama za umjeravanje kontaktnog ticala. Minimalno dva etalona duljine polože se na staklo da bi stvorili razliku u visini, odnosno stepenicu. Nakon toga, optičko staklo se pričvrsti na rotirajući stol uređaja za mjerenje oblika. Zbog rotacije stola vrh kontaktnog ticala će prijeći preko etalona duljine različitih visina (Slika 5.). Tako se izmjere različite razlike u visini da bi se zadovoljio potreban raspon mjera. Na ovaj se način umjerava ticalo u statičkom režimu, no ovim je načinom nemoguće umjeriti ticalo u dinamičkom režimu.



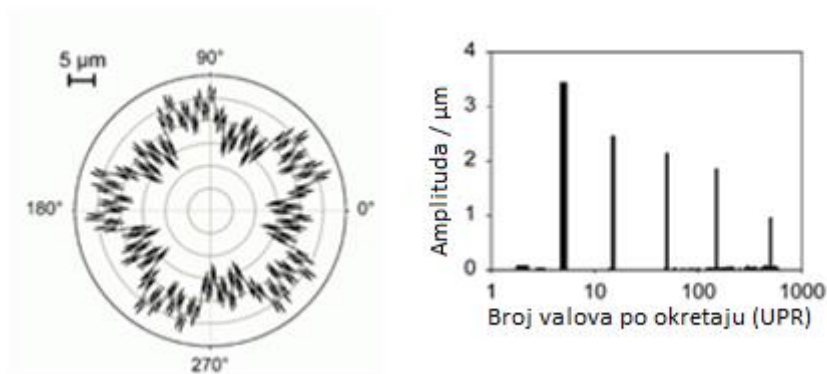
**Slika 5. Mjerne pločice na rotirajućem stolu [7]**

U tu svrhu koristi se i *flick* etalon (Slika 6.). Kontaktno ticalo u tom slučaju mjeri poznato odstupanje ravnog dijela etalona i tako dobivenim podacima utvrđuje se i ispravlja greška uređaja. Također, *flick* etalon omogućuje umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti u dinamičkom režimu rada. Kod mjerenja kružnosti ravni dio cilindra bit će prikazan na grafu kao dol i zbog toga bilo koje filtriranje ulaznih podataka npr. filtriranje nisko-valne površinske hrapavosti utjecat će na rezultat i smanjiti točnost. Cilindri s ravnim djelom umjeravanju se ultra preciznim 3-D profilometrom s laserskim interferometrom.



**Slika 6. Flick etalon [5]**

Za umjeravanje kontaktnog ticala u dinamičkoj konfiguraciji može se upotrijebiti i *multi-wave*-etalon koji predstavlja materijalnu superpoziciju više sinusoidnih valova (Slika 5.). Umjeravanje se radi na isti način kao i korištenjem *flick*-etalona. Prednost *multi-wave*-etalona je da osim podatka o odstupanju od kružnosti, s *multi-wave*-etalonom dobije se i podatak o standardnoj frekvenciji sinusoida na etalonu.



Slika 7. Umjeravanje ticala *multi-wave*-etalonom [5]

### 2.3. Manjkavosti postojećih načina umjeravanje uređaja za mjerenje hrapavosti

Za sada se koriste artefakti sa specifičnim vrijednostima (npr. etalon dubine) za umjeravanje uređaja koji mjere površinsku hrapavost. Primarna sljedivost je ostvarena umjeravanjem ovih artefakata koristeći vrlo složene interferencijske sustave. Samo nekolicina renomiranih mjeriteljskih instituta imaju opremu kojim je moguće osigurati mjernu nesigurnost u rasponu od 10 nm do 100 nm. Ostali institute koriste artefakte umjerene od strane razvijenijih instituta kako bi umjerali svoje uređaje. Za sada nema dokumentacije ili detaljnih istraživanja za alternativne metode umjeravanja uređaja za mjerenje hrapavosti. S povećanjem broja umjeravanje u lancu sljedivosti tako se i povećavaju mjerne nesigurnosti što je danas postalo neprihvatljivo kompanijama koje stavljaju veliku važnost na kontrolu kvalitete te zbog toga traže manje vrijednosti mjernih nesigurnosti (npr. 10 nm). Shodno tome, postoji velika potreba da se institutima koji nemaju složene interferencijske sustave za umjeravanje etalona hrapavosti omogući metoda putem koje će moći samostalno provoditi primarno umjeravanja uređaja za mjerenje hrapavosti.

U tijeku je usporedba EURAMET.L-S26 [8] kojim se umjeravaju etaloni dubine brazde do 1000 μm, a što se pokazalo kao vrlo zahtijevan mjeriteljski zadatak za većinu nacionalnih mjeriteljskih instituta. Naime, uređaji za mjerenje hrapavosti imaju problem s nelinearnošću posebice kod velikih mjernih raspona.

CMCU BIPM-ovoj bazi KCDB (*Key Comparison DataBase*) nalaze se CMC (*Calibration and Measurement Capability*) vrijednosti nacionalnih mjeriteljskih instituta u području umjeravanja etalona hrapavosti (Tablica 3.). Iz tablice vidimo koliko variraju mjeriteljske sposobnosti, odnosno deklarirane mjerene nesigurnosti i mjerna područja etalona hrapavosti.

**Tablica 3. Usporedba mjeriteljske sposobnosti NMI-a za mjerenje hrapavosti površina [8]**

<i>Institute</i>	<i>Instrument or Artifact</i>	<i>Measurement method</i>	<i>Measurand Minimum value, <math>\mu\text{m}</math></i>	<i>Measurand Maximum value, <math>\mu\text{m}</math></i>
NMISA	<i>Groove or step-height standard: step height</i>	<i>Stylus instrument</i>	0,01	3000,0
NMISA	<i>Roughness standard: ISO parameters, <math>R_a</math></i>	<i>Stylus instrument</i>	0,01	100,0
BelGIM	<i>Roughness standard: peak parameter, <math>R_z</math></i>	<i>Stylus instrument</i>	0,02	100
SE	<i>Roughness standard: ISO parameters <math>R_a</math></i>	<i>Profilometer, profilograph, stylus</i>	0,001	100,0
METAS	<i>Profile coordinate standard: edge shape of cutting tool standard</i>	<i>Stylus instrument</i>	0,0	5,0
CENAM	<i>Groove or step-height standard: step height, <math>H</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,03	0,1
CENAM	<i>Groove or step-height standard: step height, <math>H</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,03	0,1
CENAM	<i>Groove or step-height standard: step height, <math>H</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,1	100,0
CENAM	<i>Groove or step-height standard: step height, <math>H</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,1	100,0
NIST	<i>Groove or step-height standard: step height <math>H</math></i>	<i>Stylus instrument</i>	0,007	25,0
NIST	<i>Roughness standard: ISO parameters <math>R_a</math>, <math>R_q</math>, <math>R_z</math></i>	<i>Stylus instrument</i>	0,3	10,0
INMETRO	<i>Groove or step-height standard: step height, <math>H</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,05	20,0
INMETRO	<i>Roughness standard: roughness parameters</i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,01	20,0
INTI	<i>Grove or step-height standard: step heighth, <math>H</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,03	10,0
INTI	<i>Roughness standard: roughness parameters, <math>P</math></i>	<i>2-D profile stylus instrument</i>	0,03	20,0
NIS	<i>groove depth (step height) standard</i>	<i>Stylus profilometry</i>	0,15	11,0
NIS	<i>Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters</i>	<i>Stylus profilometry</i>	0,04	3,0
NIS	<i>Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters</i>	<i>Stylus profilometry</i>	0,2	10,0
NIS	<i>Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters</i>	<i>Stylus profilometry</i>	7,0	100,0

NIS	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus profilometry	0,04	0,3
BelGIM	Roughness standard: average parameter, Ra	Stylus instrument	0,02	10,0
METAS	Depth standard (ISO 5436-1 type A): depth d	Stylus instrument	0,1	1000,0
METAS	Spacing standard (ISO 5436-1 type C)	Stylus instrument	0,01	30,0
METAS	Spacing standard (ISO 5436-1 type C)	Stylus instrument	0,02	200,0
METAS	Spacing standard (ISO 5436-1 type C)	Stylus instrument	0,03	300,0
METAS	Spacing standard (ISO 5436-1 type C)	Stylus instrument	8,0	1000,0
METAS	Roughness standard (ISO 5436-1 type D)	Stylus instrument	0,01	20,0
METAS	Roughness standard (ISO 5436-1 type D)	Stylus instrument	0,02	100,0
METAS	Roughness standard (ISO 5436-1 type D)	Stylus instrument	0,03	200,0
METAS	Profile coordinate standard: edge radius (of cutting tool standard) R	Stylus instrument	5,0	62,5
METAS	Profile coordinate standard: edge angle (of cutting tool standard)	Stylus instrument	55,0	130,0
CMI	Depth standard: step height, groove depth Pt (eg., ISO 5436-1 Type A)	Stylus instrument	0,01	1,0
CMI	Spacing standards type C: ISO 5436-1 parameters	Stylus instrument	0,01	100,0
CMI	Spacing standards type C: ISO 5436-1 parameters	Stylus instrument	0,01	100,0
CMI	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): parameters	Stylus instrument	0,01	100,0
CMI	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): parameters	Stylus instrument	0,01	100,0
CMI	Depth standard: step height, groove depth Pt (eg., ISO 5436-1 Type A)	Stylus instrument	1,0	100,0
PTB	Depth standard (ISO 5436-1 type A): groove depth	Stylus instrument, ISO 3274	0,01	5,0
DFM	Depth standard (ISO 5436-1 type A): depth d	Stylus instrument	0,25	10,0
DFM	Roughness standard (ISO 5436-1 type C), amplitude parameters Ra	Stylus instrument	0,2	10,0
DFM	Roughness standard (ISO 5436-1 type C), amplitude parameters Rz	Stylus instrument	1,5	50,0
CEM	Groove or step-height standard: step height, H	Stylus instrument	0,01	15,0
CEM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	15,0
CEM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	15,0

MIKES	Roughness standard	Stylus instrument	0,0	400,0
MIKES	Roughness standard	Stylus instrument	0,0	400,0
MIKES	Depth standard (ISO 5436 type A)	Stylus instrument	0,0	400,0
MIKES	Depth standard (ISO 5436 type A)	Stylus instrument	0,0	400,0
FSB-LPMD	Roughness standards (ISO 5436-1 type C, D) ISO roughness parameter	Roughness instrument	0,02	30,0
FSB-LPMD	Roughness standards (ISO 5436-1 type C, D) ISO roughness parameter	Roughness instrument	0,025	100,0
INRIM	Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters	Stylus profilometry	50,0	500,0
INRIM	Depth standard (ISO 5436-1 type A): depth, d	Stylus profilometry	0,01	15,0
INRIM	Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters	Stylus profilometry	0,01	20,0
INRIM	Spacing standard (ISO 5436-1 type C): amplitude parameters	Stylus profilometry	0,01	20,0
INRIM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus profilometry	0,01	20,0
INRIM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus profilometry	0,01	20,0
GUM	(groove) depth (step height) standard (ISO 5436-1 type A): step height, (groove) depth d	Stylus instrument	0,1	100,0
GUM	Wavelength standard (ISO 5436-1 type C): amplitude parameters	Stylus instrument	0,05	30,0
GUM	Wavelength standard (ISO 5436-1 type C): amplitude parameters	Stylus instrument	0,05	30,0
GUM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,05	30,0
GUM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,05	30,0
IPQ	Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,1	10,0
IPQ	Roughness standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,1	20,0
IPQ	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,1	10,0
IPQ	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,1	20,0
IPQ	Depth standard (ISO 5436-1 type A2)	Stylus instrument	0,1	10,0
DMDM	Depth standard: (ISO 5436-1 type A), depth d	Stylus instrument	0,01	50,0



DMDM	Spacing standard (ISO 5436-1 type C): amplitude parameters	Stylus instrument	0,01	15,0
DMDM	Spacing standard (ISO 5436-1 type C): amplitude parameters	Stylus instrument	0,04	30,0
DMDM	Spacing standard (ISO 5436-1 type C): wavelength parameters	Stylus instrument	10,0	500,0
DMDM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	10,0
DMDM	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,04	30,0
RISE	Groove or step-height standard: step height H	Stylus instrument	0,05	1000,0
RISE	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	20,0
RISE	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	20,0
UME	(groove) depth or (step-height) standard (eg., ISO 5436 - 1 Type A), depth d	Stylus instrument	0,01	50,0
UME	Wavelength standard (ISO 5436-1 type C): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	50,0
UME	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument	0,01	50,0
CENAM	Roughness standard: roughness parameter	2-D profile stylus instrument	0,02	50,0
CENAM	Roughness standard: roughness parameter	2-D profile stylus instrument	0,5	50,0
CENAM	Roughness standard: roughness parameter	2-D profile stylus instrument	0,5	50,0
NMC, A*STAR	roughness standard: ISO roughness parameters: Rz/Rt R	Stylus instrument	0,03	600,0
PTB	Roughness standard (ISO 5436-1 type C): mean width of the profile elements	Stylus instrument, ISO 3274	25,0	2500,0
PTB	Roughness standard (ISO 5436-1 type C, D): ISO roughness parameters	Stylus instrument, ISO 3274	0,02	4,0
PTB	Roughness standard (ISO 5436-1 type C, D): ISO roughness parameters	Stylus instrument, ISO 3274	0,1	20,0
PTB	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument, ISO 3274	0,02	10,0

PTB	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus instrument, ISO 3274	0,02	10,0
NIS	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters	Stylus profilometry	0,2	1,0
NIMT	Depth standard, (ISO 5436-1, type A), depth $d$	Stylus instrument	0,025	32,0
NIMT	Roughness standard (ISO 5436-1 type C, D): $R_a$ (ISO 4287)	Stylus instrument	0,025	32,0
NIMT	Roughness standard (ISO 5436-1 type C, D): $R_z$ (ISO 4287)	Stylus instrument	0,025	32,0
NIMT	Spacing standard, ISO 5436-1 type C: wavelength parameters $D$ : $R_{sm}$ (ISO 4287)	Stylus instrument	0,1	1000,0
KRISS	Groove depth (step height) standard: groove depth; step height	2-D profile stylus instrument	0,3	30,0
KRISS	Roughness standard: ISO roughness parameters e.g. $R_a$	2-D profile stylus instrument	0,03	3,0
NMIA	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters $R_a$	2-D surface profilometer	0,1	10,0
NMIA	Roughness standard (ISO 5436-1 type D): ISO roughness parameters $R_z$	2-D surface profilometer	0,1	30,0
SCL	Roughness standard: ISO parameter $R_a$	Stylus instrument	0,3	6,5
SCL	Roughness standard: ISO parameter $R_y$	Stylus instrument	1,1	23,0
SCL	Roughness standard: ISO parameter $R_z$	Stylus instrument	0,9	15,0
CMS	Roughness standards: ISO roughness parameters $R$	Stylus method	0,01	20,0
CMS	Roughness standards: ISO roughness parameters $R$	Stylus method	0,01	20,0
CMS	Roughness standards: ISO roughness parameters $R$	Stylus method	0,01	20,0
CMS	Roughness standards: ISO roughness parameters $R$	Stylus method	0,01	20,0
CMS	(groove) depth, step height standard: step height, (groove) depth $D$	Stylus method	0,01	50,0
NIM	Roughness standard: ISO parameters, e.g. $R_a$	Profile stylus instrument	0,025	5,0
NIM	Roughness standard: ISO parameters, e.g. $R_z$	Profile stylus instrument	0,1	20,0
NIM	Roughness standard: ISO parameters, e.g. $R_k$	Profile stylus instrument	0,1	20,0
NMC, A*STAR	Step height standard (e.g. ISO 5436-1 Type A1): step height $h$	Stylus instrument	0,005	500,0
NMC, A*STAR	Step height standard (e.g. ISO 5436-1 Type A2): step height $h$	Stylus instrument	0,1	50,0
NMC, A*STAR	roughness standard: ISO roughness parameters: $R_a/R_q R$	Stylus instrument	0,01	50,0

NMC, A*STAR	roughness standard: ISO roughness parameters: RSm	Stylus instrument	10,0	500,0
-------------	--	-------------------	------	-------

## 2.4. Manjkavosti postojećih načina umjeravanja kontaktnih ticala za mjerenje oblika

Većina uređaja za mjerenje oblika imaju mogućnost mijenjanja kuta, promjera te duljine ticala. Svaka od navedenih mogućnosti povećava nesigurnost uređaja jer utječe nana šum ili pogreške u signalu, većinom zbog utjecaja pojačanja. Stoga se pojačanje treba ispravljati na dnevnoj bazi, obično mjerenjem poznatih pomaka. Navedeni etaloni u tablici 2. imaju mnoge nedostatke koje su usko povezane s konstrukcijom i mjernim karakteristikama uređaja za mjerenje kružnosti. Glavni nedostatak je postupak umjeravanja etalona za umjeravanje uređaja za mjerenje oblika s nesigurnostima od 10 nm – 100 nm kojeg mogu izvoditi samo nekolicina naprednih mjeriteljskih instituta. Ostali instituti umjeravanju artefakte za naručitelje uspoređujući ih s etalonima umjerenim od strane spomenutih naprednih instituta. Na stranicama BIPM-a nalazi se usporedba mjeriteljskih sposobnosti nacionalnih instituta za mjerenje kružnosti (Tablica 3.). Iz tablice vidimo koliko variraju mjeriteljske sposobnosti, odnosno deklarirane mjerene nesigurnosti i mjerna područja. Za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti nije definirana norma, iako je kružnost jedan od najčešće toleriranih oblika. Takvo stanje dovodi manje institute u situaciju gdje se trebaju sami snalaziti i u najboljem slučaju trebaju čekati da im veći instituti omoguće potrebne etalone. Zbog svih navedenih razloga jasna je potreba za novom metodom umjeravanja takvih mjernih ticala.

**Tablica 4. Usporedba mjeriteljske sposobnosti NMI-a za mjerenje kružnosti [8]**

<i>Institute</i>	<i>Instrument or Artifact</i>	<i>Measurement method</i>	<i>Parameters</i>	<i>Measurand Minimum value</i>	<i>Measurand Maximum value</i>
NMISA	External cylinder (plug): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Cylinder size : 5 mm to 200 mm	1,0	1000,0
NMISA	Internal cylinder (ring): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Cylinder size : 5 mm to 200 mm	1,0	1000,0
NMISA	Sphere or hemisphere: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Sphere size : 5 mm to 100 mm	0,01	1,0
NMISA	Magnification standard: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Standard size : 5 mm to 50 mm	0,1	1000,0
BelGIM	Magnification stanart (e. g. flick standard): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	300,0
BelGIM	Sphere, hemisphere: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 100 mm	0,0	2000,0

VNIIMS	Magnification stanart (e. g. fkick standard): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	300,0
VNIIMS	Sphere, hemisphere: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 100 mm	0,0	2000,0
NSC IM	Magnification stanart (e. g. fkick standard): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	300,0
NSC IM	Sphere, hemisphere: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 100 mm	0,0	2000,0
LNE	External cylinder: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm	0,01	50,0
LNE	Internal cylinder: roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm	0,01	50,0
LNE	Sphere or hemisphere: external roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 100 mm	0,01	100,0
LNE	Magnification standard	Stylus-on-spindle roundness instrument		0,0	20,0
GUM	Sphere (hemisphere)	Talyrond measurement instrument	Maximum diameter : 200 mm	0,0	200,0
GUM	External cylinder: roundness	Roundness instrument	Diameter : up to 300 mm	0,0	400,0
GUM	Internal cylinder: roundness	Roundness instrument	Diameter : up to 300 mm	0,0	400,0
GUM	Magnification standard (e.g. flick standard): roundness, amplitude and phase harmonic content	Stylus instrument and roundness instrument		0,0	300,0
CENAM	Flick standard: roundness, R	Roundness measuring machine		2,0	300,0
CENAM	Sphere or hemisphere: roundness, R	Roundness measuring machine	Diameter : 300 mm	0,0	5,0
CENAM	External cylinder: roundness, R	Roundness measuring machine	Height : up to 500 mm	0,0	5,0
CENAM	Internal cylinder: roundness, R	Roundness measuring machine	Height : up to 200 mm	0,0	5,0
NIST	External cylinder (plug): roundness	Spindle-based roundness measuring instrument		0,0	0,5
NIST	Internal cylinder (ring): roundness	Spindle-based roundness measuring instrument		0,0	0,5
NIST	Sphere or hemisphere: roundness	Spindle-based roundness measuring instrument	Sphere diameter : 5 mm to 100 mm	0,0	0,5
INMETRO	External cylinder (plug): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 2 mm to 200 mm	0,0	400,0

INMETRO	Internal cylinder (ring): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 4 mm to 200 mm	0,0	400,0
INMETRO	Ball or sphere (hemisphere): roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 2 mm to 100 mm	0,0	200,0
VSL	Magnification standard (e.g. flick standard): amplitude	Stylus instrument	Diameter : 5 mm to 100 mm	0,0	2,0
NPL	External cylinder: roundness	Spindle based roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm	0,01	50,0
NPL	Internal cylinder: roundness	Spindle based roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm	0,01	50,0
NPL	spheres and hemispheres: roundness	Multi-step, stylus on spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 100 mm	0,0	2000,0
METAS	External cylinder: roundness R	Form tester	Diameter : up to 300 mm	0,0	100,0
METAS	Internal cylinder: roundness R	Form tester	Diameter : up to 270 mm	0,0	100,0
METAS	Sphere: roundness R	Roundness instrument	Diameter : up to 150 mm	0,0	1,0
CMI	Plug: external cylinder roundness	CMM	Cylinder diameter D : from 1mm to 0.5 m	0,0	0,5
CMI	Ring: internal cylinder roundness	CMM	Cylinder diameter D : from 1mm to 0.5 m	0,0	0,5
CMI	Spheres (balls): roundness	CMM	Sphere diameter D : from 1mm to 0.5 m	0,0	0,5
CMI	Plug: external cylinder roundness R	Talyrond 595S	Cylinder diameter : from 1 to 355 mm	0,0	2,0
CMI	Ring: internal cylinder roundness R	Talyrond 595S	Cylinder diameter : from 3 mm to 355 mm	0,0	2,0
CMI	Spheres (balls), roundness R	Talyrond 595S	Sphere diameter : from 1 to 355 mm	0,0	2,0
PTB	Ring, plug, sphere, hemisphere: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 100 mm	0,0	400,0
PTB	Magnification standard (e.g. flick standard): roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 100 mm	2,0	400,0

DTI	Plug: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	400,0
DTI	Ring: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	400,0
DTI	Sphere, hemisphere: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	400,0
CEM	External cylinders: roundness, R	Spindle roundness instrument and multi step method	Diameter : 5 mm to 100 mm	0,0	100,0
CEM	Internal cylinders: roundness R	Spindle roundness instrument and multi step method	Diameter : 5 mm to 70 mm	0,0	100,0
CEM	Spheres and hemispheres: roundness, R	Spindle roundness instrument and multi step method	Diameter : 5 mm to 100 mm	0,0	100,0
CEM	Magnification standard (flick standard): roundness, R	Stylus and index table on spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 150 mm	0,01	30,0
CEM	External cylinder (plug): roundness, R	Stylus and index table on spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm Height : up to 500 mm	0,0	400,0
CEM	Internal cylinder (ring): roundness, R	Stylus and index table on spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 270 mm Height : up to 500 mm	0,0	400,0
CEM	Hemisphere: roundness, R	Stylus and index table on spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 150 mm	0,0	400,0
MIKES	External cylinders: roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm Height : 100 mm	0,0	1000,0
MIKES	Internal cylinders: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm Height : 100 mm	0,0	1000,0
MIKES	Spheres (hemispheres): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument, error separation	Diameter : 20 mm to 200 mm	0,0	100,0
FSB-LPMD	External cylinder (plug): roundness, R	Form tester stylus instrument	Diameter : 8 mm to 200 mm	0,0	100,0
FSB-LPMD	Internal cylinder (ring): roundness, R	Form tester stylus instrument	Diameter : 8 mm to 200 mm	0,0	100,0
FSB-LPMD	Hemisphere: roundness, R	Form tester stylus instrument	Diameter : 8 mm to 200 mm	0,0	3,0

INRIM	External cylinder (plug): roundness, R	Multi-step		0,0	20,0
INRIM	Internal cylinder (ring): roundness, R	Multi-step		0,0	20,0
INRIM	Sphere or hemisphere: roundness, R	Multi-step		0,0	20,0
INRIM	Magnification (flick) standard: roundness, R	Stylus instrument, 1- profile		0,0	20,0
VSL	External cylinders: roundness deviation R	Roundness measuring machine, error separation	Diameter : 2.5 mm to 200 mm	0,0	2,0
VSL	Internal cylinders: roundness deviation R	Roundness measuring machine, error separation	Diameter : 4 mm to 200 mm	0,0	2,0
VSL	Sphere (hemispheres): roundness deviation R	Roundness measuring machine, reversal technique	Diameter : 2.5 mm to 200 mm	0,0	1,0
INM	External cylinder (plug): roundness, R	Roundness instrument	Diameter : 3 mm to 350 mm	0,0	80,0
INM	Internal cylinder (ring): roundness, R	Roundness instrument	Diameter : 3 mm to 300 mm	0,0	80,0
INM	Sphere or hemisphere: roundness, R	Roundness instrument	Diameter : 3 mm to 200 mm	0,0	80,0
RISE	External cylinder: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : up to 250 mm Height : up to 500 mm	0,0	400,0
RISE	Internal cylinder: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : up to 250 mm	0,0	400,0
RISE	Sphere (hemisphere): roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : up to 250 mm	0,0	400,0
RISE	Magnification standard: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument		0,0	400,0
UME	External cylinder (plug): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 3 mm to 400 mm	0,01	1000,0
UME	Internal cylinder (ring): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 350 mm	0,01	1000,0
UME	Sphere or hemisphere: roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 250 mm	0,01	1000,0
UME	Magnification standard (e.g. Flick standard): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 3 mm to 300 mm	0,01	1000,0
UME	External cylinder (plug): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 0.3 mm to 400 mm	0,01	1000,0
UME	Internal cylinder (ring): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1.5 mm to 350 mm	0,01	1000,0

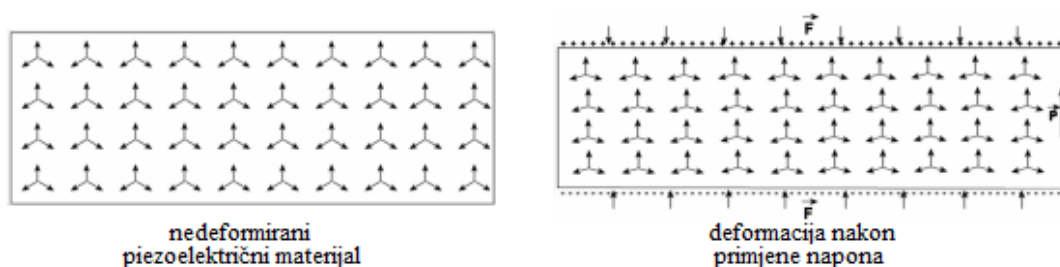
UME	Sphere or hemisphere: roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 0.3 mm to 350 mm	0,01	1000,0
UME	Sphere or hemisphere: roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 0.3 mm to 350 mm	0,01	1000,0
UME	Magnification standard (e.g. Flick standard): roundness, R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 3 mm to 50 mm	0,01	300,0
NMIJ AIST	Sphere and hemispheres: roundness	Multi-step, stylus on spindle roundness instrument	Diameter : 5 mm to 100 mm	0,0	2,0
NIMT	Glass hemisphere: roundness R	Multi-step, stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 355 mm	0,0	20,0
NIMT	Internal and external cylinder, magnification standard: roundness R	Stylus-on-spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 355 mm	0,0	20,0
KRISS	Magnification standard (elliptical), roundness R	Roundness instrument	Diameter : 5 mm to 50 mm	2,0	400,0
KRISS	Hemi-sphere, roundness R	Roundness instrument	Diameter : 5 mm to 300 mm	0,0	1,0
KRISS	Magnification standard (flicker), roundness R	Roundness instrument	Diameter : 5 mm to 50 mm	2,0	100,0
NMIA	External cylinder: roundness	Roundness measuring machine	Diameter, d : 2 < d < 400 mm	0,0	40,0
NMIA	Internal cylinder: roundness	Roundness measuring machine	Diameter, d : 2 < d < 400 mm	0,0	40,0
NMIA	spheres and hemispheres: roundness	Roundness measuring machine	Diameter, d : 2 < d < 400 mm	0,0	2,0
MSL	External cylinder	Stylus on spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	400,0
MSL	Internal cylinder	Stylus on spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	400,0
MSL	Sphere	Stylus on spindle roundness instrument	Diameter : 1 mm to 300 mm	0,0	400,0
CMS	Sphere, hemisphere: roundness	Rotary table type roundness measuring instrument		0,01	2,0
CMS	Sphere, hemisphere: roundness R	Rotating pick-up type		0,01	2,0
NPLI	Internal cylinder, roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Cylinder diameter : 20 mm to 150 mm	0,01	100,0
NPLI	External cylinder, roundness	Stylus-on-spindle roundness instrument	Cylinder diameter : 20 mm to 150 mm	0,01	400,0
NPLI	Sphere (hemisphere)	Stylus-on-spindle roundness instrument	Sphere diameter : 20	0,01	100,0



			mm to 150 mm		
NPLI	Magnification standard (flick, etc.)	Stylus-on-spindle roundness instrument	Sphere diameter : 20 mm to 150 mm	0,01	100,0
NIM	External cylinder: roundness	Roundness measuring instrument		0,0	0,5
NIM	Internal cylinder: roundness	Roundness measuring instrument		0,0	0,5
NIM	Sphere and hemispheres: roundness	Multi-step, stylus on spindle roundness instrument	Diameter : up to 100 mm	0,0	0,5
NMC, A*STAR	internal cylinder (ring): roundness R	work piece on spindle roundness instrument	diameter size : 5 mm to 150 mm	0,0	2,0
NMC, A*STAR	sphere (ball): roundness R	work piece on spindle roundness instrument	diameter size : 5 mm to 50 mm	0,0	2,0
NMC, A*STAR	Sphere(Hemisphere): roundness R	Multi-step, work piece on spindle roundness instrument	diameter size : 5 mm to 100 mm	0,0	2,0
NMC, A*STAR	external cylinder (plug, ring, wire): roundness R	work piece on spindle roundness instrument	diameter size : 1 mm to 150 mm	0,0	2,0

### 3. PIEZOELEKTRIČNI GENERATORI POMAKA

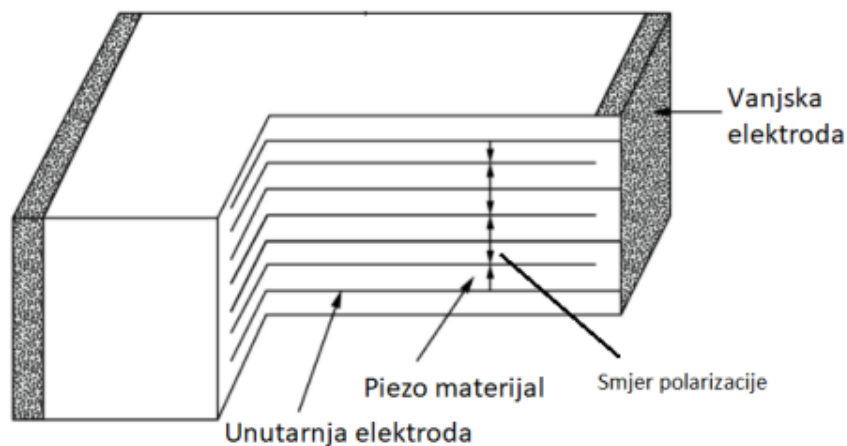
Piezoelektrični generatori pomaka su uređaji koji rade na principu piezoelektričnog efekta kako stvarali kratke pomake s brzim vremenom odziva. Piezoelektrični efekt naziv je za pojavu električnog naboja na površini izolatora koji je elastično deformiran vanjskom silom. Piezo materijal će postati električki polariziran, odnosno jedna strana izolatora nabit će se negativno, a druga pozitivno. Vrijedi i obrnuto, piezo materijal će se deformirati kada se primjeni električni napon na njega. Veličina deformacije, odnosno sile, bit će proporcionalna narinutom naponu. Pozitivno polarizirani piezo materijal će se širiti prilikom dovođenja pozitivnog napona i skupljati dovođenjem negativnog napona. Koristeći taj princip generatori pomaka ostvaruju male precizne pomake pogodne za primjenu u mjeriteljstvu.



Slika 8. Piezoelektrični efekt [10]

Piezo aktuatori karakteriziraju mali pomaci u odnosu na dovedeni napon te zbog toga može doći do histereze, pogotovo pri prvim primjenama aktuatora, jer se njegova osjetljivost eksponencijalno smanjuje s vremenom. Ta histereza se većinom može ispraviti nelinearnim dovođenjem napona.

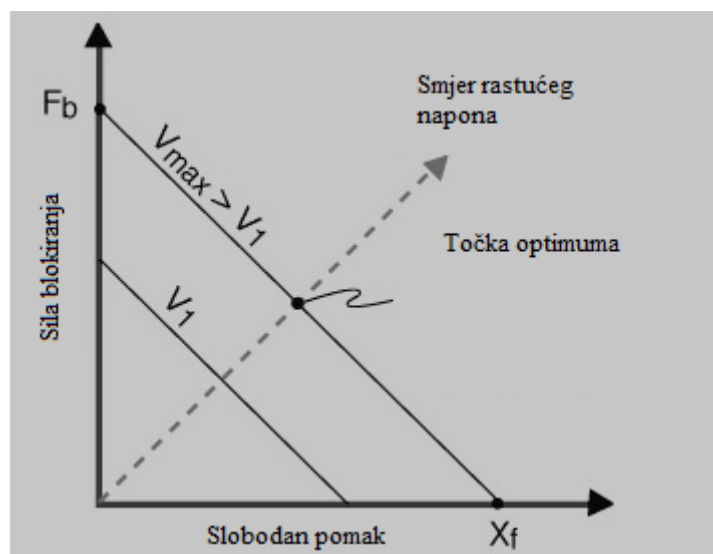
Na slici 13. vidi se skica presjeka na kojoj su prikazani osnovni elementi piezoelektričnog generatora pomaka.



**Slika 9. Piezoelektrični generator pomaka [11]**

Iako se svi piezoelektrični generatori sastoje od ista tri osnovna elementa, oni se razlikuju po vrsti i smjeru gibanja. Različita gibanja ostvaruju se različitim rasporedima osnovnih elementa unutar uređaja. Unutar ovog rada promatrat će se uzdužni generatori pomaka zbog njihove mogućnosti preciznih pomaka po z osi.

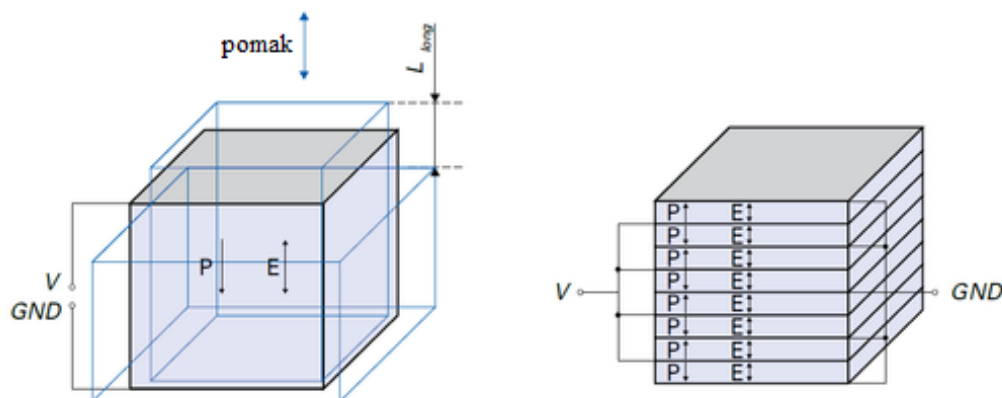
Uglavnom se koriste dva parametra kako bi se karakterizirali piezo generatori pomaka, slobodan pomak ( $X_f$ ) i sila blokiranja ( $F_b$ ). Slobodan pomak je pomak koji se generira kada se primjeni maksimalan napon bez stvaranja sile. Slično, sila blokiranja je maksimalna sila koja može biti generirana kada se primjeni maksimalan napon, dok je gibanje generatora pomaka spriječeno. Optimiran piezo generator daje traženu silu na polovici slobodnog pomaka (Slika 14.) [11]



**Slika 10. Točka optimuma piezo generatora pomaka [11]**

### 3.1. Uzdužni generatori pomaka

Kod uzdužnih generatora pomaka, električno polje u keramičkom sloju primjenjuje se paralelno na smjer polarizacije. Ovo stvara naprezanje, odnosno pomak u smjeru polarizacije. Primjenom samo jednog piezo elementa ostvaruju se premali pomaci, tako da se oni slažu jedno na drugo. Mehanički se spajaju u seriju kako bi se njihovi pomaci zbrajali, a električno se spajaju u paralelu kako bi se isti napon primijenio na svaki piezo element (Slika 15.)



**Slika 11. Prikaz pomaka i smjera polarizacije uzdužnih generatora pomaka [11]**

U odnosu na ostale aktuatorne, uzdužna izvedba je vrlo efikasna u pretvaranju električne u mehaničku energiju ostvarujući pomake od 0,1% do 0,15% duljine aktuatora. Nazivna vrijednost naprezanja relativna je poprečnom presjeku aktuatora, a kreće se oko 30 N/mm<sup>2</sup>. Mogu se postići sile od nekoliko desetaka tisuća njutna. [13]

Uzdužni aktuatori prikladni su za dinamične primjene zbog svojih visokih rezonantnih frekvencija. Mehaničko prednaprezanje aktuatora prigušuje inducirana vlačna naprezanja krhkog keramičkog materijala omogućujući brzinu odziva od nekoliko mikrosekundi i izvrsnu mehaniku.

Procjena uzdužnog pomaka izračunava se formulom: [13]

$$\Delta L_{uzdužno} = n d_{33} U$$

$\Delta L_{uzdužno}$  Uzdužni pomak [m]

$d_{33}$  Koeficijent uzdužne deformacije za piezoelektrični signal [m/V]

$n$  Broj naslaganih keramičkih slojeva

$U$  Primijenjeni napon [V]

### 3.2. Piezoelektrični generator pomaka PI P – 621.ZCD i kontroler E-625

Laboratorij FSB-a opremljen je s uzdužnim piezo aktuatorom proizvođača „Pi“ koji se sastoji od piezo „stage“ P-621.ZCD koji je priključen na piezo kontroler E-625.CR. Piezo stage P-621.ZCD (Slika 16.) može izvršiti precizne vertikalne pomake s točnošću od ispod nanometra i rasponom do 100  $\mu\text{m}$ . Ugrađeni kapacitivni senzori mjere položaj izravno i bez kontakta, povećavajući točnost pozicioniranja. Rad gotovo bez trenja i histereze u kombinaciji s rezolucijom ispod nanometra omogućuje visoku razinu linearnosti i visoku širinu pojasa. Pomak se detektira tako da kapacitivni senzori mjere poziciju pokretne ploče u odnosu na kućište.



Slika 12. Piezo stage P-622.ZCD [14]

Točnost pozicioniranja je 0,02% s brzinom odziva od nekoliko desetaka milisekundi. Ima aluminijsko kućište, teži 0,17 kg, dimenzije su mu 40 mm x 40 mm x 17,5 mm i raspon temperature od -20 °C do 80 °C. [15]

Namijenjen je za primjenu u [15]:

- interferometriji
- mikroskopiji
- nano pozicioniranju
- biotehnologiji
- tehnologiji poluvodiča i dr.

Spajanje s računalom te analiza rezultata na njemu provodi se putem kontrolera E-625.

Kontroler E-625.CR [Slika 17] je uređaj koji se koristi u paru s uređajima s kapacitivnim opterećenjem, kao što je piezo aktuator. Može se koristiti za statičku i dinamičku primjenu.

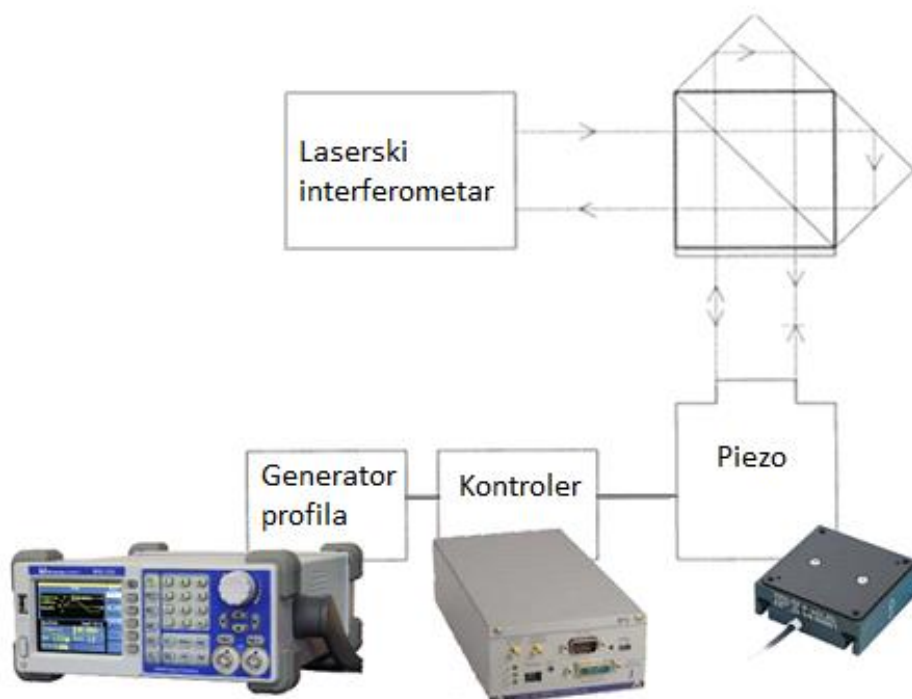
Softver koji se koristi za upravljanje kontrolerom i piezo elementom je PZTControl. To je 32-bitni Windows program koji je razvijen za kontrolu jednog ili više umreženih kontrolera. Njegove osnovne funkcije su mogućnost unošenja informacija i naredbi o poziciji piezo elementa ili o korištenom naponu. Pomoću njega se omogućuje pristup svim naredbama vezanim za kontroler i piezo element. Alatne trake omogućuju lakše i jednostavnije snalaženje u programu. Neke od dodatnih funkcija softvera su: istovremeno upravljanje s više osi, uključivanje/isključivanje servo načina rada, prikaz statusa sustava, prikaz napona i položaja u stvarnom vremenu, konfiguriranje parametara. [16]



Slika 13. Kontroler E-625 [16]

#### 4. KORIŠTENJE PIEZOELEMENTA ZA UMJERAVANJE KONTAKTNIH TICALA

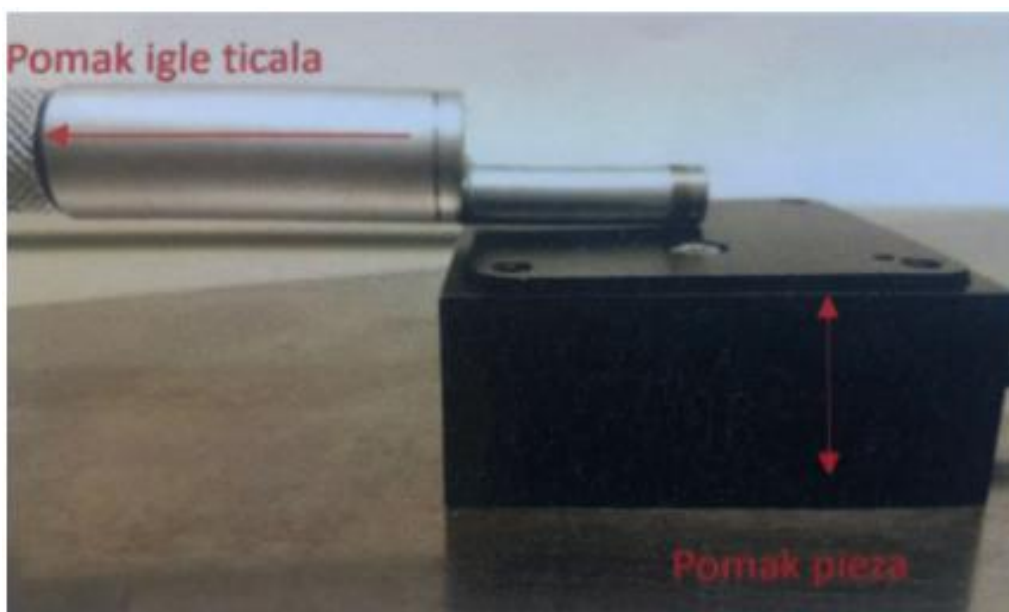
Osnovna je značajka piezoelektričnih elemenata mogućnost pretvorbe električne energije u mehanički pomak. Promjenom napona, piezoelektrični element mijenja svoje dimenzije. Takvi elementi općenito se ne mogu koristiti kao aktuatori u svom izvornom obliku jer su pomaci izrazito maleni, osim u visokog narinutog napona. Ovaj problem rješava se dodavanjem mehaničkih pojačala piezoelektričnom elementu koji pretvaraju mala inducirana naprezanja piezoelektričnog materijala u veliki izlazni pomak, koji se može upotrebljavati u praktičnoj primjeni. Za dobivanje visoko preciznih pomaka potrebnih u mjeriteljstvu, ugrađuje se kapacitivni mjerni sustav koji služi kao referenca za narinuti napon. Upravljanje piezoelementom provodi se upravljačkom jedinicom (kontrolerom) putem koje se zadaju vrijednosti željenih pomaka. Uloga je kontrolera narinuti i održavati odgovarajući napon na piezoelement kako bi stvarni pomak (mjeren kapacitivnim mjernim sustavom) odgovarao zadanomu. Postoje različite izvedbe kontrolera, s različitim mogućnostima upravljanja, međutim, ako se žele ostvariti brzi pomaci, najčešće se upotrebljavaju kontroleri koji imaju analogni ulaz na koji se dovodi signal kojim se zadaje promjena pomaka u vremenu. Signal se može generirati računalom opremljenim s digitalnim ili analognim pretvaračem ili generatorima signala.



Slika 14. Shema umjeravanja piezoelementa [5]

Kako bi uređaji umjereni piezoelementima davali sljedive rezultate, sam piezoelement treba biti umjeren. Umjeravanje piezoelementa provodi se s pomoću laserskoga interferometra čiji laser predstavlja SI definiciju metra (Slika 8.).

Preciznim usklađivanjem brzine kretanja ticala i frekvencija pomaka piezoelementa u smjeru z-osi moguće je ostvariti simulirani profil. Dakle, ako je moguće dobro kontrolirati frekvenciju pomicanja piezoelementa u smjeru z-osi s obzirom na poznatu brzinu kretanja ticala, moguće je simulirati mnogo različitih profila u dinamičkoj konfiguraciji uz velik raspon vrijednosti amplituda i valnih duljina. Takvi simulirani profili mogli bi zamijeniti etalone hrapavosti za umjeravanje uređaja.



**Slika 15. Relativni pomak piezoelementa u odnosu na ticalo [5]**

Primjenom piezoelementa moguće je simulirati i etalone kružnosti s različitim nazivnim vrijednostima karakterističnih parametara. U ovoj primjeni ticalo miruje, a pomak piezoelementa stvara otklon ticala.





**Slika 16. Umjeravanje uređaja za ispitivanje kružnosti piezoelementom [5]**

Glavna svrha *ProbeTrace* projekta je razviti sljedljivu i efikasnu mjeriteljsku sposobnost za umjeravanje kontaktnih ticala i uređaja za mjerenje hrapavosti s nesigurnostima u rasponu 10 nm – 100 nm.

Ciljevi *ProbeTrace* projekta su: [3]

1. Umjeriti uređaje za mjerenje hrapavosti koristeći nove generatore pomaka s nesigurnostima u rasponu 10 nm – 100 nm i usporediti efektivnost ove metode umjeravanja s postojećim metodama (npr. etaloni dubine brazde) za umjeravanje uređaja za mjerenje hrapavosti.
2. Umjeriti kontaktna ticala za mjerenje oblika u statičkoj i dinamičkoj konfiguraciji koristeći nove generatore pomaka s nesigurnostima u rasponu 10 nm – 100 nm i tu metodu usporediti s uvriježenom metodom korištenja umjerenih *flick*-etalona.
3. Istražiti sljedivost umjerenih konvertera za njihovo korištenje kao generatore pomaka u statičkim i dinamičkim uvjetima korištenja, uključujući istraživanje o prenosivosti istih generatora pomaka. Nadalje, razviti vodič za korištenje generatora pomaka za umjeravanje kontaktnih ticala.

4. Razviti softver za otklanjanje šuma, uključujući korištenje numeričkih metoda za smanjenje nasumičnog šuma koji će moći biti korišten za procesiranje podataka o profilima hrapavosti i oblika sa svrhom smanjivanja nesigurnosti do 10 nm u mjerenjima hrapavosti i kružnosti.

5. Razvijanje individualnih strategija svih partnera projekta za dugoročnu primjenu rezultata istraživanja. Uskladiti individualne strategije kako bi osigurali optimalan pristup osiguravanja sljedivosti diljem zemalja članica EURAMET-a i Europske unije.

Interferometri s piezo sistemima korišteni su u nekim naprednim nacionalnim mjeriteljskim institutima za umjeravanje kontaktnih ticala za mjerenje oblika, no ne svrhom umjeravanja za mjerenje površinske hrapavosti zbog svoje veličine i nezgrapnosti. Piezo sistemi opremljeni s laserskim interferometrima (dostupni u nekim NMI-evima) korišteni su za dinamičko umjeravanje kontaktnih ticala od ranih 2000-ih. Njihov raspon je limitiran na oko 20  $\mu\text{m}$  - 50  $\mu\text{m}$ .

Piezo tehnologija je od tada jako napredovala, kapacitivni senzori s linearnim enkoderima, kompaktni pretvarači pomaka opremljeni sa specijalnim sustavima vođenja i piezoelektričnim aktuatorima mogu postići pomake od nekoliko milimetara s preciznošću od svega nekoliko nanometara. Pretvarači pomaka, laserski interferometri, kapacitivni senzori i linearni enkoderi mogu biti odabrani i kombinirani ovisno o potrebnom rasponu i preciznosti. Sljedivost svih navedenih sistema je ostvarena laserskim interferometrima.

Navedena nova tehnologija još nije primijenjena za umjeravanje kontaktnih ticala i postoje problemi dinamičkih svojstva, dugoročne stabilnosti i umjeravanja visokih točnosti kojih treba istražiti. Stariji modeli pretvarača pomaka istraženi su u studiji „EURAMET TC-L project no.866“ [17] te je finalno izvješće objavljeno nedavno.

Ovim projektom želi se utvrditi mogućnost primjene prethodno umjerenih generatora pomaka (bez interferometra), u postupku sljedivog umjeravanja kontaktnih ticala i uređaja za mjerenje

## 5. ŠUM

Šum je limitirajući faktor pri mjerenju oblika i hrapavosti površine. Šum se klasificira po njegovom izvoru, npr. šum instrumenta, šum mjerenja, statički šum ili dinamički šum itd. Bez obzira na njegov izvor, šum obuhvaća sve vanjske utjecaje na signal koji ga distorziraju ili onemogućuju njegovo mjerenje. Zbog tog razloga, šum je jedan od glavnih izazova pri mjerenju oblika i hrapavosti površine. Za otklanjanje ili minimiziranje šuma prvo se treba utvrditi razina i karakteristika šuma instrumenta i šuma okoline u statičkim uvjetima. Nakon toga se u dinamičkim uvjetima snima se utjecaj pomaka dijelova instrumenta i kontaktnog ticala. Svrhom smanjivanja utjecaja šuma, uređaji za mjerenje oblika i hrapavosti površine postavljaju se na stolove koji prigušuju vibracije svojom velikom masom ili koristeći sisteme aktivnog ili pasivnog prigušenja vibracija. Nadalje, proizvođači ovih uređaja razvijaju specifične softvere i statističke alate, no unatoč tome kompleksne mjere i kalkulacije se moraju poduzeti da bi se ostvarile precizne izmjere.

Trenutno se kod izmjera oblika i hrapavosti površine umjesto smanjenja šuma provodi proces filtriranja po normama ISO 3274 [18] i ISO 12181 [19]. Kod izmjera hrapavosti koriste se kalibrirani artefakti (npr. optička stakla) za određivanje razine šuma, te se ta razina pridodaje ukupnoj mjernoj nesigurnosti. Shvaćanje ovog aspekta mjerne nesigurnosti i kako se on očituje pri korištenju piezo elementa ključan je za uspjeh njihove upotrebe. [3]

### 5.1. Klasifikacija šuma

Šum je svaki vanjski utjecaj koji distorzira signal ili onemogućuje mjerenje. Pošto je šum povezan sa širinom pojasa, njegov utjecaj ovisi o količini vremena tijekom kojeg se analiziraju podaci. Šum se tipično manifestira s visokom frekvencijom što ograničava detektiranje hrapavosti površine malih razmjera. Postoje dva tipa greška koje dovode utjecaje šuma u mjeriteljske sisteme: sistematske, odnosno ponavljajuće greške koje se minimiziraju metodama izoliranja i nasumične greške koje se minimiziraju pomoću filtriranja. Ovisno o izvoru šuma razlikujemo šum instrumenta i šum mjerenja.

#### 5.1.1. Šum instrumenta

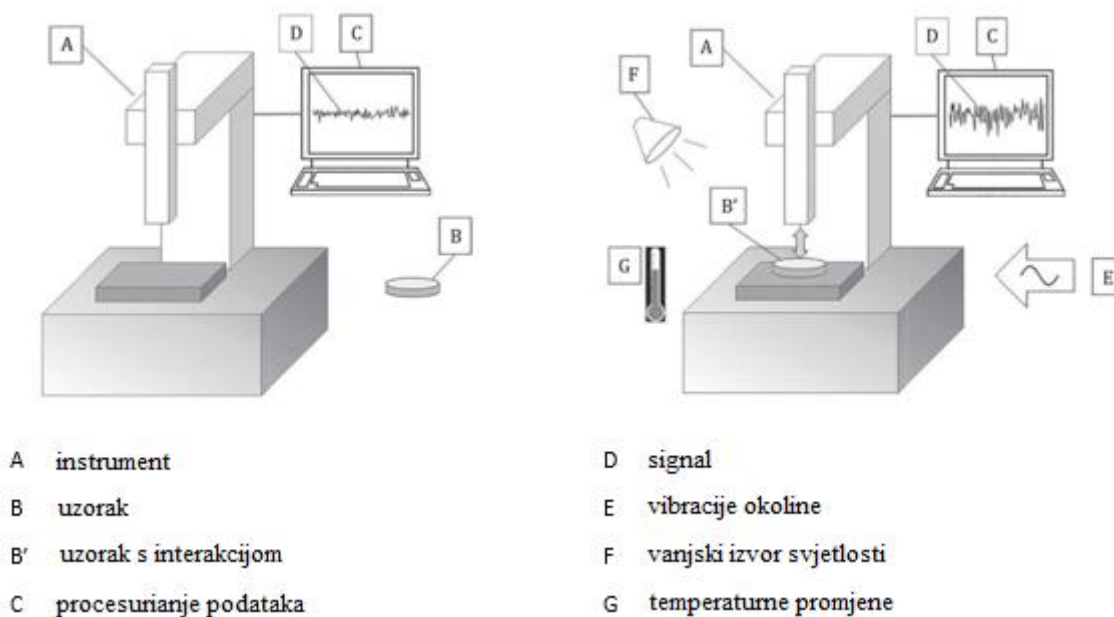
Šum instrumenta je unutarnji šum signala kojeg proizvodi instrument u idealnoj okolini bez šuma. Može nastajati zbog nestabilnosti elektronike instrumenta

(npr. iz pojačala) ili zbog optičkog šuma (npr. zbog svjetlosti).. Kod instrumenta koji mjere samo tijekom gibanja, šum instrumenta ne može se izolirati od dinamičke komponente. Za reduciranje visokih frekvencija ove vrste šuma, norma ISO 25178-3 preporučuje korištenje S-filtera.

### 5.1.2. Šum mjerenja

Šum mjerenja je šum pridodan signalu tijekom normalnog korištenja instrumenta.

Šum mjerenja uključuje šum instrumenta kao i druge komponente koje dolaze iz okoline (vibracije, fluktuacije temperature, vrtloženje zraka, zvukovi) i ostalih izvora. Slika 11. pokazuje kontrast između šuma instrumenta nastalog u laboratorijskim uvjetima i šuma mjerenja. Kao i šum instrumenta, tipično je visoke frekvencije što ograničava detektiranje hrapavosti površine malih razmjera. Za reduciranje visokih frekvencija ove vrste šuma, norma ISO 25178-3 preporučuje korištenje S-filtera.



Slika 17. Tipični izvori šuma instrumenta i šuma mjerenja [3]

### 5.1.3. Statički šum

Statički šum je kombinacija utjecaja šuma instrumenta i šuma okoline na izlazni signal dok instrument ne skenira lateralno. Šum okoline uzrokuju, na primjer, seizmičke ili zvučne elektromagnetske smetnje. U tablici 5. vidimo primjer mjerenja statičkog šuma. Statički šum se mjeri svrhom procjenjivanja šuma instrumenta i šuma okoline. Mjerenje bi se trebalo provoditi u najgorim očekivanim uvjetima.

Tablica 5. Mjerenje statičkog šuma [3]

<b>Tip mjerenja</b>	Profil
<b>Korišten etalon</b>	Bilo koji objekt
<b>Uvjeti mjerenja</b>	Odabrana ekvivalentna dužina mjerenja i indeksi gniježđenja bit će suglasni s predviđenim upotrebama etalona pri njegovoj kalibraciji. Dodirna sila na etalon bit će ista kao kod mjerenja.
<b>Izmjereni parametar</b>	Tipično, za kalibraciju, maksimalna visina profila, <i>Rz</i> .
<b>Metoda mjerenja</b>	Koristi se maksimalno povećanje instrumenta.
<b>Rezultati</b>	Prosječne vrijednosti dobivenih parametra će biti dodane maksimalnoj dopuštenoj grešci ( <i>MPE</i> ) ekvivalentnih parametra definiranih u tablici 6.
<b><sup>a</sup> Računanje parametara zahtijevalo je da količine budu izražene u jedinicama duljine; naknadno, vrijeme mjerenja je pretvoreno u ekvivalentnu duljinu.</b>	

#### 5.1.4. Dinamički šum

Dinamički šum je šum koji se pridodaje izlaznom signalu tijekom rada gibajućih dijelova uređaja. Dinamički šum uključuje statički šum, a dio je šuma mjerenja. U tablici 6. vidimo primjer mjerenja dinamičkog šuma.

Tablica 6. Mjerenje dinamičkog šuma [3]

<b>Tip mjerenja</b>	Arealni
<b>Korišten etalon</b>	Optičko staklo (postavljeno sukladno s ISO 12179:2000, 7.1)
<b>Uvjeti mjerenja</b>	Mjerenje duljine i površine s veličinama kompatibilnim s traženim indeksima gniježđenja filtera.
<b>Izmjereni parametar</b>	Tipično, za kalibraciju, maksimalna visina profila, <i>Rz</i> .
<b>Metoda mjerenja</b>	– Jedno mjerenje u jednom kutu mjernog raspona X-Y – Jedno mjerenje u sredini mjernog raspona X-Y – Jedno mjerenje u suprotnom kutu mjernog raspona X-Y Koristi se maksimalno povećanje instrumenta.
<b>Rezultati</b>	Izmjereni parametri bit će zabilježeni.

## 5.2. Uloga projekta u istraživanju šuma

Kako bi se minimizirao utjecaj šuma i tako smanjile mjerne nesigurnosti metode istražene u projektu, definirani su projektni zadaci: [3]

1. Pružiti pregled numeričkih metoda i softverskih mogućnosti partnera projekta s obzirom na unos/izlaz neobrađenih podataka.
2. Stvoriti novi softver za smanjenje šuma koji se može koristiti za pretprocesiranje neobrađenih podataka pri mjerenju hrapavosti i oblika.
3. Primijeniti novi softver na podatke dobivene mjerenjem oblika.

### 5.3. Metode minimiziranja šuma

Postoje dvije metode koje se mogu koristiti za minimiziranje šuma. Jedna je bazirana na metodi oduzimanja, a druga na metodi prosjeka.

Metoda oduzimanja se provodi tako da se dva puta mjeri ista pozicija uzorka s malim vremenskim razmakom. Topografija prvog rezultata mjerenja se oduzme od topografije drugog rezultata tako da razlika sadrži samo informaciju o šumu mjerenja. Metoda oduzimanja kombinira varijance od dvije identične raspodjele vjerojatnosti koje karakteriziraju šum instrumenta.

Metoda prosjeka funkcionira tako da se provede veliki broj mjerenja na pozicijama gdje se pretpostavlja da su greške nepovezane, te se izračuna njihov prosjek.

No, kada šum postane dinamičan, u statističkom smislu, više se ne može ukloniti uzimanjem prosjeka. U tom slučaju izolacija šuma putem metode oduzimanja također nije moguća.

### 5.4. Pregled softvera

Softveri za analizu hrapavosti površine i kružnosti uobičajeno su napravljeni od strane proizvođača uređaja i često koriste različite metode i algoritme što otežava suradnju NMI-eva koji koriste uređaje različitih proizvođača. Stoga, mjeriteljske zajednice smatraju svojom zadaćom razviti standarda za mjeriteljske softvere da bi mogli omogućiti lakšu suradnju.

Međunarodna ISO norma definirala je dvije vrste softverskih standarda, standard tip F1 i standard tip F2. Tip F1. Prvi od njih sastoji se od digitalne mjerne datoteke koja sadrži informacije o nefiltriranim podacima profila ili površine. Takva se datoteka dobiva s dodatnim datotekama u koje se pohranjuju filtrirani podaci, kao i različiti parametri završne obrade površine koji su već procijenjeni. Budući da se ove informacije dostavljaju korisniku, samostalno napravljeni algoritmi za filtriranje i procjenu parametra i mogu se potvrditi

---

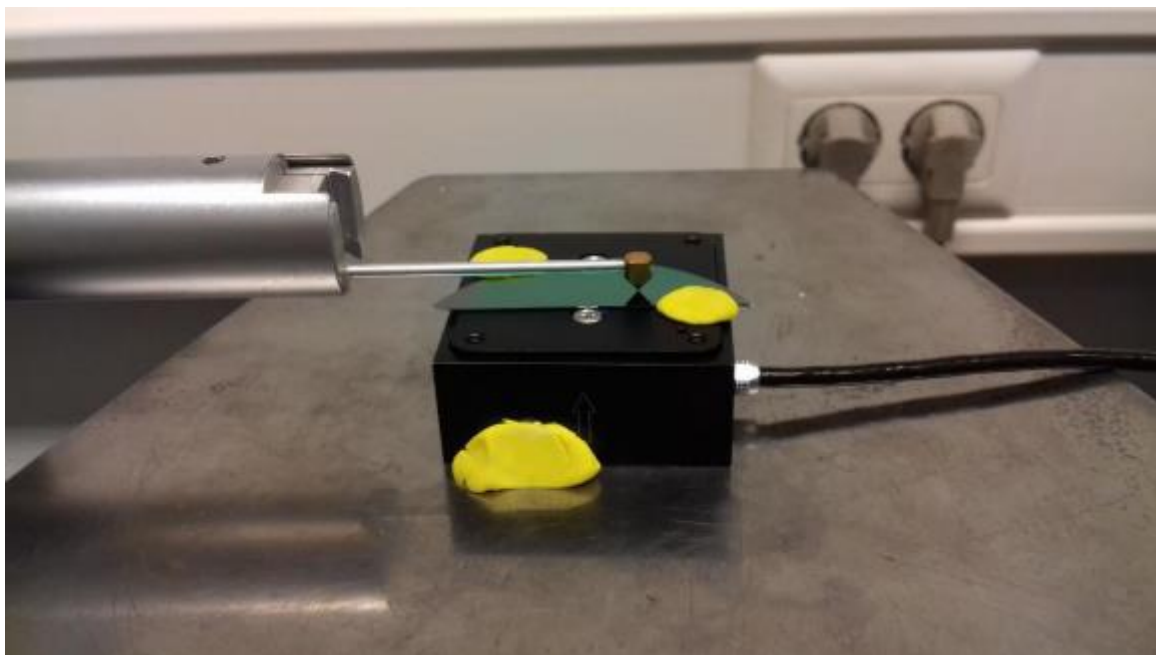
uspoređivanjem dobivenih rezultata s onima koje daje standard tipa F1. S druge strane, standardi tipa F2 su računске aplikacije u koje korisnik može unijeti grube mjerne podatke i zatim birati između različitih opcija filtriranja i parametara. Ovi standardi daju izračunate rezultate, omogućujući korisnicima da ih usporede, bilo s učinkom korištenog instrumenta ili s vlastitim izračunima. Standardi tipa F2 zahtijevaju računalnu podršku koja ne samo da primjenjuje algoritme filtriranja i izračunavanja evaluacije, već i omogućuje međusobnu povezanost između više korisnika. [3].

## 6. SIMULIRANI PROFILI HRAPAVOSTI KORIŠTENJEM PIEZOELEKTRIČNOG GENERATORA

U prethodnim poglavljima ustanovljeno je da se uzdužni generatori pomaka mogu vrlo precizno pomicati po z osi s izuzetno brzim vremenom odziva. Upravljanjem takvim generatorima pomaka tako da se gibaju po točno definiranim uzorcima mogu se simulirati profili različitih geometrija i valnih duljina. Takvi simulirani profili, ako su ponovljivi, precizni i točni, mogu zamijeniti razne etalone hrapavosti i pritom omogućiti kontinuirano umjeravanje.

U laboratoriju FSB-a prilikom izrade završnog rada „Grbavac, M. 2018. - Prijedlog proširenja etalonske baze za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom” [20] testirano je umjeravanje kontaktnog ticala putem simuliranih profila hrapavosti pomoću piezo generatora pomaka.

U ovom poglavlju opisan će se korišteni postupak umjeravanja u statičkim i dinamičkim uvjetima.



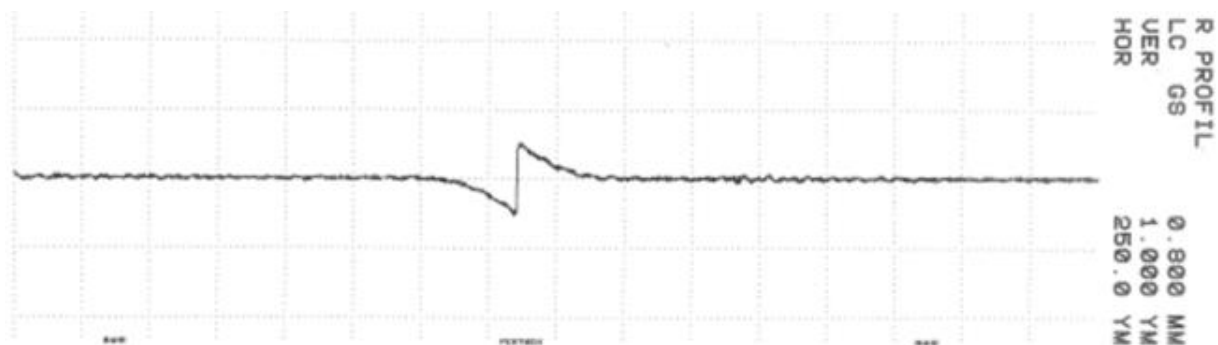
Slika 18. Prikaz ticala pomoću koga se provodilo umjeravanje [20]

### 6.1. Simuliranje profila hrapavosti u statičkim uvjetima

U statičkom načinu rada umjerava se vertikalna komponenta mjernog uređaja. Statičko mjerenje podrazumijeva da su otklonjeni utjecaji brzine ticala, lateralnog pomaka i frekvencije. Ticalo miruje, a piezo element se u jednom trenutku pomiče u smjeru z osi te

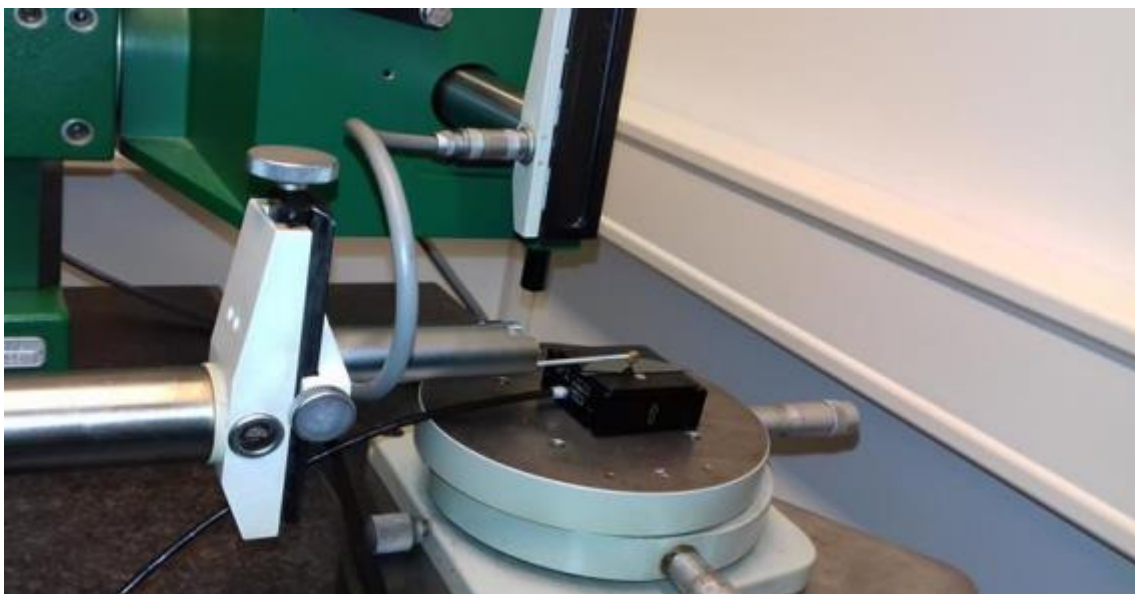


tako simulira stepenicu određene visine (dubine). Parametrom  $Pt$  (Slika 18.) iskazuje se ukupna visina profila (stepenice). [20]



**Slika 19. Simulirani profil stepenice, parametar  $Pt = 1 \mu\text{m}$  [20]**

Izmjereni rezultati parametra  $Pt$  uspoređuju se s referentnom vrijednosti kako bi se dobilo odstupanje, odnosno greška. Nadalje, izračunavaju se statistički podaci potrebni za analiziranje točnosti, mjerne nesigurnosti, linearnosti, utjecaja šuma itd.



**Slika 20. Umjeravanje vertikalne komponente ticala pomoću generatora pomaka [20]**

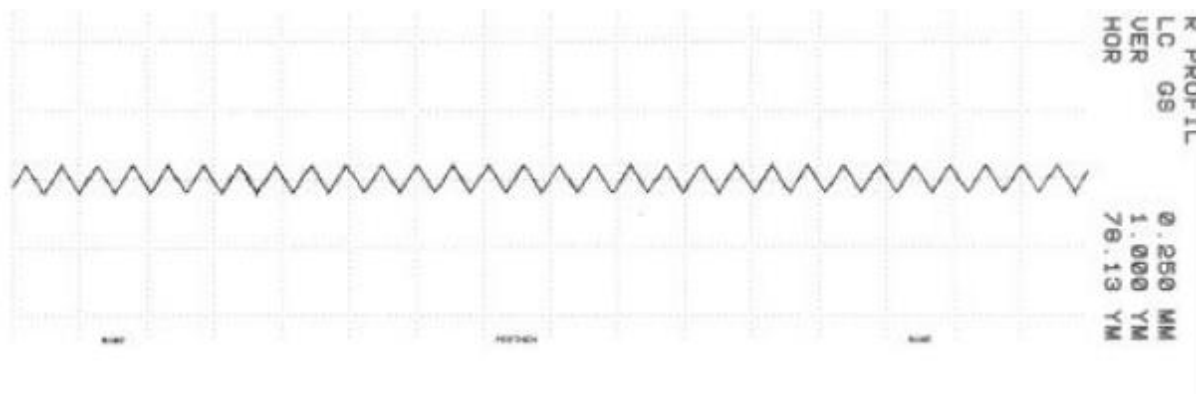
## 6.2. Simuliranje profila hrapavosti u dinamičkim uvjetima

Umjeravanje u dinamičkim uvjetima obavlja se tako da ticalo prikuplja informacije o normiranoj mjernoj površini dok se kreće po njoj. Obično se u tu svrhu koristi etalon, no ovdje promatramo mogućnost zamjene etalona piezoelementom.

Jer se u dinamičkim uvjetima mjeri kontinuirano, trebaju se definirati granične vrijednosti mjerenja, odnosno cut-off vrijednosti. One se određuju normom ISO 4288:1996 *Geometric Product Specification (GPS) - Surface texture: profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture* (Tablica 7.) [20]

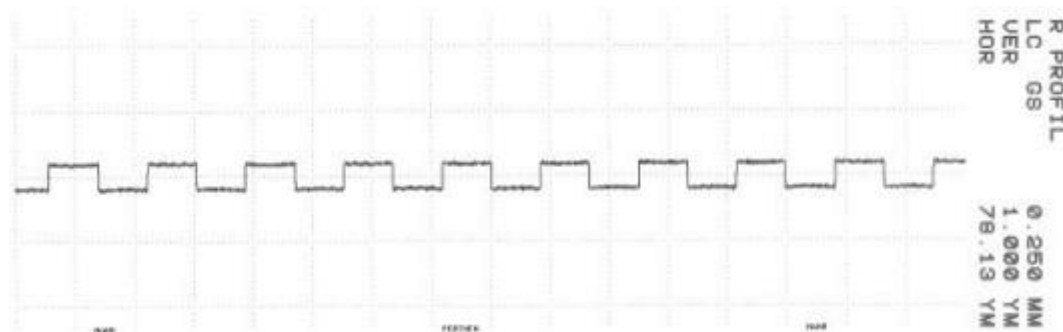
Simulirali su se regularni profili s dvije različite geometrije – slijed regularnih trokutastih i slijed regularnih pravokutnih struktura. Umjeravali su se parametri  $R_a$  i  $R_z$ .

Za simulaciju svakog od tri trokutastih profila koristilo se 40 točaka, odnosno 20 pomaka pieza.



**Slika 21. Prikaz jednog od tri simuliranih trokutastih profila [20]**

Za simulaciju pravokutnih profila bilo je dovoljno uzeti dvije točke.



**Slika 22. Prikaz jednog od tri simuliranih pravokutnih profila [20]**

Nakon što su simulirana sva tri profila trokutne geometrije, uspoređeni su dobiveni rezultati parametara  $R_a$  i  $R_z$  s referentnim vrijednostima istih, te je izračunata aritmetička sredina i standardno odstupanje od nje.

Izmjerene vrijednosti potom su se usporedile s referentnim vrijednostima parametara hrapavosti. Razlika  $\Delta$  računala se prema formuli: [20]

$$\Delta = \text{izmjerena vrijednost} - \text{referentna vrijednost}$$

**Tablica 7. Odstupanja od referentnih parametara hrapavosti kod simuliranih profila [20]**

Trokutni profil br.	Referentna vrijednost Rz ( $\mu\text{m}$ )	Referentna vrijednost Ra ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ (Rz) ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ (Ra) ( $\mu\text{m}$ )	$ \delta $ (Rz) %	$ \delta $ (Ra) %
1.	0,4	0,1	0,073	0	18,3	0
2.	4	1	0,075	-0,008	1,9	0,8
3.	40	10	-0,028	-0,058	0,1	0,6
Pravokutni profil br.	Referentna vrijednost Rz ( $\mu\text{m}$ )	Referentna vrijednost Ra ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ (Rz) ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ (Ra) ( $\mu\text{m}$ )	$ \delta $ (Rz) %	$ \delta $ (Ra) %
1.	0,4	0,2	0,094	-0,01	23,5	5
2.	4	2	0,107	-0,12	2,7	6
3.	40	20	-0,007	-1,026	0	5,1
Dubina brazde profil br.	Referentna vrijednost Pt ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ ( $\mu\text{m}$ )	$ \delta $ %			
1.	1	0,144	14,4			
2.	5	0,109	2,2			
3.	10	-0,022	0,2			
4.	25	-0,111	0,4			
5.	50	0,041	0,1			

Pomoću podataka iz tablice 7. utvrđeno je da korištena metoda umjeravanja simuliranim strukturama nije primjenjiva za vertikalne komponente  $< 1 \mu\text{m}$  zbog prevelikih odstupanja od apsolutne vrijednosti.

S obzirom na ostvarene rezultate zaključeno je da ne postoji nikakav trend (rasta ili pada) odstupanja dobivenih rezultata od referentnih. Također ne postoji ni linearnost u greškama. Veća odstupanja izmjerene vrijednosti od referentne prisutna su kod manjih struktura. [20]

---

## 7. ZAKLJUČAK

Zbog vrlo kompleksnih mjernih sustava koji su dostupni samo u najrazvijenijim institutima, vrlo je teško doći do sljedivo umjerenih etalona hrapavosti i kružnosti potrebnih institutima kako bi umjerali svoje mjerne uređaje i time osigurali i u industriji sljedivost do SI jedinice metra. Metode za umjeravanje uređaja se često razlikuju te u nekim slučajevima nisu dostupne potrebne norme što koči razvitak manjih instituta i uzrokuje velike troškove.

Cilj *ProbeTrace* projekta je razvoj sljedivih, novčano isplativih mjeriteljskih sposobnosti za umjeravanje etalona hrapavosti i kružnosti, u statičkim i dinamičkim uvjetima, koristeći sljedive generatore pomaka kao samostalne uređaje nakon umjeravanja laserskim interferometrima.

U tu svrhu koristit će se najnovije inovacije u piezo tehnologiji koje su omogućile napredak mnogih područja. U projektu će se piezo tehnologija koristiti u generatorima pomaka kako bi svojim preciznim vertikalnim pomacima simulirali etalone hrapavosti i kružnosti.

U projektu *ProbeTrace* detaljno će se razraditi upute o korištenju generatora pomaka i načinu njegovog sljedivog umjeravanja.

Korištenjem generatora pomaka u postupcima umjeravanja omogućit će nacionalnim mjeriteljskim institutima samostalno umjeravanje kontaktnih ticala i uređaja za mjerenje hrapavosti sljedivih do SI jedinice metra s mjernim nesigurnostima manjim od 10 nm. Također, jer generatori pomaka omogućavaju simuliranje različitih horizontalnih i uzdužnih značajki profila, instituti će moći proširiti raspon umjeravanja kako u lateralnom tako i u vertikalnom smjeru.

Šum je jedan od glavnih izazova pri mjerenju hrapavosti i kružnosti. Kako bi se ostvarile ciljane mjerne nesigurnosti potrebno je riješiti problem nasumičnog šuma koji degradira točnost ostvarenih simuliranih profila.

U okviru projekta *ProbeTrace* razviti će se softver za redukciju šuma koristeći numeričke metode za nasumičan šum. Ta metoda će biti primjenjiva u svim komercijalnim uređajima koji imaju mogućnost *input / output* podataka.

---

**LITERATURA**

- [1] Mjeriteljstvo ukratko 3. izdanje, 14. listopada 2010. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://www.szp.hr/UserDocsImages/dokumenti/publikacije/MjeriteljstvoUkratko3.pdf>
- [2] Slika piramide sljedivosti. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://us.flukecal.com/calibration-standards>
- [3] G. Barsic and V. Simunovic, 18PRT01 *ProbeTrace, Traceability for contact probe and stylus instrument measurements*
- [4] Slika kontaktnog ticala. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://www.blu.marposs.com/en/applications/advanced-search-applications/mida-t25-touch-probe/>
- [5] G. Baršić i V. Šimunović, Svijet po mjeri, Hrvatski mjeriteljsko društvo, Godina 9. Broj 3-4. prosinac 2020. ISSN 1848-7114, Novosti u području sljedivosti rezultata hrapavosti i oblika.
- [6] EURAMET projekt 649. Usporedba etalona pri mjerenju oblika. Dostupno na: [16.2.2022.]  
[https://www.researchgate.net/publication/241780153\\_A\\_comparison\\_of\\_sensitivity\\_standards\\_in\\_form\\_metrology\\_-\\_Final\\_results\\_of\\_the\\_EURAMET\\_project\\_649](https://www.researchgate.net/publication/241780153_A_comparison_of_sensitivity_standards_in_form_metrology_-_Final_results_of_the_EURAMET_project_649)
- [7] Slika mjernih pločica na optičkom staklu. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://digitalmetrology.com/calibrating-a-roundness-system/>
- [8] Projekt EURAMET L-S26.1. Dostupno na: [16.2.2022.]  
[https://www.euramet.org/technical-committees/search-technical-projects/details/project/supplementary-comparison-eurametl-s261-measurement-of-groove-depth-standards-in-the-range-1-um-up/?tx\\_euramettcp\\_project%5Baction%5D=show&tx\\_euramettcp\\_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=48369ad988bf876d0384167679d03bb1](https://www.euramet.org/technical-committees/search-technical-projects/details/project/supplementary-comparison-eurametl-s261-measurement-of-groove-depth-standards-in-the-range-1-um-up/?tx_euramettcp_project%5Baction%5D=show&tx_euramettcp_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=48369ad988bf876d0384167679d03bb1)
- [9] CMCU BIPM baza KCDB, CMC (Calibration and Measurement Capability) vrijednosti, usporedba mjerteljske sposobnosti NMI-a. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://www.bipm.org/kcdb/cmc/advanced-search?area=3>  
[\[1\]](#)
- [10] Slika deformiranja izolatora pod utjecajem piezoelektričog efekta. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<http://www.cqm.rs/fq2006/pdf/B/13%20-%20Krstic%20D..pdf>
- [11] Skica piezoelektričnog generatora pomaka. Dostupno na: [16.2.2022.]

- [https://www.researchgate.net/publication/318031205\\_Multilayer\\_Technologies\\_for\\_Piezoceramic\\_Materials/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/318031205_Multilayer_Technologies_for_Piezoceramic_Materials/figures?lo=1)
- [12] Informacije o ovisnosti o slobodnom pomaku i blokirajuće sile piezo generatora pomaka. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://www.linearmotiontips.com/what-are-piezo-actuators/>
- [13] Formula za procjenu pomaka piezo generatora pomaka. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://www.piceramic.com/en/expertise/piezo-technology/properties-piezo-actuators/displacement-modes/>
- [14] Slika piezoelektričnog generatora pomaka PI P – 622.ZCD. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://www.physikinstrumente.com/en/products/nanopositioning-piezo-flexure-stages/linear-piezo-flexure-stages/p-620z-p-622z-pihera-precision-z-stage-202501/>
- [15] Informacije i specifikacije za piezoelektrični generator pomaka PI P – 621.ZCD. Dostupno na: [16.2.2022.]  
[https://www.pi-usa.us/fileadmin/user\\_upload/pi\\_us/files/product\\_datasheets/P620\\_Z\\_Precision\\_Piezo\\_Nano-Positioning-Stage.pdf](https://www.pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/product_datasheets/P620_Z_Precision_Piezo_Nano-Positioning-Stage.pdf)
- [16] Informacije i specifikacije kontrolera E625. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://datasheets.globalspec.com/ds/4096/PhysikInstrumente/AB5A65A8-3741-4E1D-81F7-AFD646308BEB>
- [17] EURAMET projekt REG. NO. 866 Interferometric calibration of microdisplacement actuators. Dostupno na: [16.2.2022.]  
[https://www.euramet.org/technical-committees/tc-projects/details/project/interferometric-calibration-of-microdisplacement-actuators/?tx\\_eurametctp\\_project%5Baction%5D=show&tx\\_eurametctp\\_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=c51e33318aafb8e03e2cf3eb7933602e](https://www.euramet.org/technical-committees/tc-projects/details/project/interferometric-calibration-of-microdisplacement-actuators/?tx_eurametctp_project%5Baction%5D=show&tx_eurametctp_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=c51e33318aafb8e03e2cf3eb7933602e)
- [18] ISO 5274-2:1996 *Geometrical product specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Nominal characteristic of contact (stylus) instruments.*
- [19] ISO 12181:2011 *Geometrical product specifications (GPS) -- Roundness -- Part 2: Specification operators.*
- [20] Grbavac, M. 2018. Završni rad - Prijedlog proširenja etalonske baze za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom. Dostupno na: [16.2.2022.]  
<https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:4125>