

Umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti

Dugandžić, Marinela

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:502153>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marinela Dugandžić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti

Mentor:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Studentica:

Marinela Dugandžić

Zagreb, 2020.

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

Posebno se zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Vedranu Šimunoviću na korisnim savjetima i stručnom vodstvu pri izradi ovoga rada.

Veliku zahvalu dugujem obitelji i prijateljima, a najviše mojim roditeljima, za pruženu podršku tijekom cjelokupnog studiranja.

Marinela Dugandžić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARINELA DUGANDŽIĆ** Mat. br.: 0035199895

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of roundness measurement device**

Opis zadatka:

Umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti sastoji se od umjeravanja induktivnog ticala te provjere netočnosti vrtuje okretnog stola. Laboratoriji koriste različite etalone poput „flick standard-a“ ili „multiwave standarda“ kako bi se oba elementa umjerila istovremeno, ili pak koriste mjernu polusferu za provjeru netočnosti vrtuje, dok se tada ticalo umjerava zasebnim metodama. U ovom radu dat će se pregled postojećeg stanja te preporuka za izbor metode/a umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti Mahr MMQ 3.

1. Opisati načine umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti koji se uobičajeno koriste.
2. Opisati etalone koji se koriste za umjeravanje.
3. Opisati uređaj za mjerenje kružnosti Mahr MMQ 3 koji se koristi na FSB-a.
4. S obzirom na značajke uređaja Mahr MMQ 3 i postojeće etalone na FSB-u, predložiti moguća rješenja za umjeravanje.
5. Odabrati najprikladniju metodu umjeravanja za primjenu na FSB-u i donijeti zaključak o prednostima i nedostacima odabrane metode.

U radu je potrebno navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. travnja 2020.

Rok predaje rada:
2. srpnja 2020.

Predviđeni datum obrane:
6. srpnja do 10. srpnja 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. KRUŽNOST	3
2.1 Razlozi ispitivanja kružnosti	5
3. ISPITIVANJE KRUŽNOSTI	8
3.1 Uređaji s vanjskom mjernom referencom	8
3.1.1 Tip rotirajućeg ticala	8
3.1.2 Tip rotirajućeg stola	10
3.2 Numeričke metoda proračuna odstupanja od kružnosti	11
3.3 Ispitivanje kružnosti u LFSB	12
4. OSIGURAVANJE SLJEDIVOSTI	18
4.1 Sljedivost	18
4.2 Etaloni	19
4.2.1 Mjerna polukugla	20
4.2.2 Flick etalon	20
4.2.3 Multi-wave etalon (MWS)	21
5. NAČINI UMJERAVANJA UREĐAJA	23
5.1 Umjeravanje pomoću mjerne kugle ili polukugle	23
5.2 Umjeravanje pomoću planparalelnih graničnih mjerki	27
5.3 Umjeravanje korištenjem Cresting etalona	28
5.4 Umjeravanje korištenjem piezoelektričnih komponenti	30
5.5 Umjeravanje pomoću Flick etalona	40
5.6 Umjeravanje pomoću MWS etalona	43
5.7 Popis znanstvenih radova	46
6. PRIJEDLOG UMJERAVANJA UREĐAJA U LFSB	48
6.1 Statičko umjeravanje ticala u LFSB	48

6.2 Piezo aktuator	50
6.3 Signal generator.....	52
6.4 Provedba dinamičkog umjeravanja u LFSB.....	54
6.4.1 Simuliranje Flick etalona	55
6.4.2 Simuliranje Multi-wave etalona	57
7. ZAKLJUČAK	62
LITERATURA.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1 Odstupanje od kružnosti [1]	3
Slika 2 Tip rotirajućeg ticala [4].....	9
Slika 3 Tip rotirajućeg stola [4].....	10
Slika 4 Kružnica najmanjih kvadrata i profil predmeta [1]	11
Slika 5 Osnovni dijelovi uređaja „MMQ-3“ za ispitivanje kružnosti [2].....	13
Slika 6 Okretni stol uređaja za mjerenje kružnost [2]	14
Slika 7 Induktivno ticalo uređaja za mjerenje kružnosti [2].....	14
Slika 8 Elektronski uređaj za mjerenje i upravljanje (militron) [2].....	15
Slika 9 Kompjuterska kartica PCI – DAS6034 [5]	16
Slika 10 Mjerni sustav za ispitivanje kružnosti [2]	16
Slika 11 Lanac sljedivosti [7].....	19
Slika 12 Mjerna polukugla [2].....	20
Slika 13 Flick etalon (lijevo) i Odstupanje od kružnosti u ovisnosti o kutu rotacije (desno) [10]	20
Slika 14 Multi-wave etalon [9].....	22
Slika 15 Primjer ispitivanja mjerne kugle [4].....	24
Slika 16 Rezultati ispitivanja mjerne polukugle [11]	25
Slika 17 Ispitivanje mjerne kugle [12]	26
Slika 18 Polarni graf mjerne kugle [12]	26
Slika 19 Postupak centriranja referentne polukugle [2]	27
Slika 20 Umjeravanje pomoću planparalelnih graničnih mjerki [4]	28
Slika 21 Cresting etalon [13].....	29
Slika 22 Pogreška poravnavanja ticala [4]	30
Slika 23 Pogreške u apsolutnim polumjerima [4]	30
Slika 24 Umjeravanje ticala pomoću DPT [16]	32
Slika 25 Polarni dijagram amplitudnog spektra [15].....	33
Slika 26 Teorijski i izmjereni Flick etalon [15].....	34
Slika 27 Piezo sustav sa zatvorenom petljom [17].....	35
Slika 28 Piezo sustav s otvorenom petljom [17]	36
Slika 29 Amplitudni spektar izmjenjenog signala [17].....	37
Slika 30 Sustav za umjeravanje ticala pomoću piezo aktuatora [18]	37
Slika 31 Simulirani Multi-wave etalon [18].....	39
Slika 32 Umjeravanje DPT korištenjem interferometra [19]	40
Slika 33 Simulirani Flick etalon i amplitudni spektar [10]	41
Slika 34 Dimenzije Flick etalona i vrha ticala [20].....	41
Slika 35 Amplitudni spektar umjeravanog Flick etalona [20].....	42
Slika 36 MWS-1 i amplitudni spektar izmjenjenog profila [10].....	44
Slika 37 MWS-8 i amplitudni spektar nominalnog profila [10].....	44
Slika 38 Asimetrični Multi-wave etalon [22].....	45
Slika 39 Izmjereni profil Multi-wave etalona [12].....	46
Slika 40 Postavljanje piezo aktuatora na MMQ-3 uređaj [2]	49
Slika 41 Piezo stage P-621.ZCD [30].....	51
Slika 42 Piezo servo kontroler E-625.CR [31].....	51

Slika 43	Signal generator	52
Slika 44	AWG specifikacije [32]	53
Slika 45	Piezo servo kontroler [31]	54
Slika 46	Matematički model za generiranje točaka Flick etalona	56
Slika 47	Izgled različitih harmonika [4]	58
Slika 48	MWS broj 1	59
Slika 49	MWS broj 2	60
Slika 50	MWS broj 3	60
Slika 51	MWS broj 4	61

POPIS TABLICA

Tablica 1	Oblici odstupanja od kružnosti [3]	4
Tablica 2	Utjecaj odstupanja od kružnosti na funkcionalnost predmeta [3]	6
Tablica 3	Popis znanstvenih radova	46
Tablica 4	Harmonici i uzroci njihovog nastanka [4]	57

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
D	mm	nominalni promjer cilindra etalona
d	mm	promjer vrha ticala
E_1	μm	razlika umjerenog polumjera i horizontalne udaljenosti mjesta dodira ticala i umjerenog polumjera od središta
E_2	μm	razlika mjerenog polumjera i horizontalne udaljenosti mjesta dodira ticala i mjerenog polumjera od središta
E_{crest}	μm	vertikalna udaljenost mjesta dodira ticala i polumjera od središta
E_{rad}	μm	pogreška apsolutnog polumjera
e_x, e_y	mm	koordinate središta LSC kružnice
f_c	Hz	granična frekvencija
h	mm	visina vrha kružnice u središtu ravnog segmenta Flick etalona
n	-	broj točaka profila
r	mm	polumjer vrha ticala
R	mm	nominalni polumjer cilindra etalona
r'	mm	visina točke ravnog segmenta Flick etalona
R_1	mm	umjereni polumjer
R_2	mm	mjereni polumjer
r_i	mm	radij-vektor i-te točke profila predmeta
R_{LSC}	mm	polumjer LSC kružnice
$RONt$	μm	udaljenost između najviše udaljene i najmanje udaljene točke profila u radijalnom smjeru
T_K	μm	odstupanje od kružnosti
w	mm	polovica širine ravnog segmenta Flick etalona
x_i, y_i	mm	koordinate i-te točke profila predmeta
α'	°	kutni pomak
φ'	°	kutovi ravnog segmenta Flick etalona
φ_0	°	kut početka ravnog segmenta Flick etalona
φ_K	°	kut završetka ravnog segmenta Flick etalona

SAŽETAK

Ovaj rad može se podijeliti na pet osnovnih cjelina u kojima je prikazano:

1. Što je kružnost i zašto se mjeri odstupanje od kružnosti;
2. Način ispitivanja kružnosti;
3. Etaloni za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti;
4. Najčešće korištene metode za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti i popis znanstvenih radova;
5. Prijedlog novog načina umjeravanja ticala uređaja za mjerenje kružnosti.

U prvom dijelu definirani su pojmovi kružnost i odstupanje od kružnosti te je objašnjeno zašto je bitno mjerenje odstupanja od kružnosti. Navedeni su neki od karakterističnih oblika odstupanja od kružnosti te utjecaj odstupanja od kružnosti na funkcionalnost predmeta.

U drugom dijelu opisani su tipovi uređaja za mjerenje kružnosti i numeričke metode koje se koriste za računanje odstupanja od kružnosti. Također je prikazan postupak ispitivanja kružnosti u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje (LFSB).

Treći dio odnosi se na uspostavljanje lanca sljedivosti. Također, prikazani su najčešće korišteni etaloni za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti.

U četvrtom dijelu opisane su najčešće korištene metode umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti te popis znanstvenih radova povezanih s tom temom koji se mogu koristiti za daljnja istraživanja.

U posljednjem dijelu opisan je dosadašnji način statičkog umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti u LFSB te je predložen novi dinamički način umjeravanja uređaja.

SUMMARY

This paper can be divided into five main parts in which the following numbers are explained:

1. What is roundness and why it is important to measure out of roundness;
2. Procedure of out of roundness measurement;
3. Standards used for roundness measuring instrument calibration;
4. Most commonly used methods of roundness measuring instrument calibration and a list of scientific papers;
5. Proposal of a new stylus calibration method of roundness measuring instrument.

In the first part, the term roundness is defined. Also, the importance of out of roundness measurement is explained. Several typical forms of roundness errors are listed, as well as the influence of roundness on the functionality of an object.

In the second part, two types of roundness measuring instruments and numerical methods that are used for roundness determination are explained. Also, the procedure for roundness measurement in the Laboratory for Precise Measurement of Length (LFSB) of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture is demonstrated, step by step.

The third part refers to the establishment of a traceability chain. Also, the most common standards used for calibration of the roundness measuring instrument are illustrated.

The fourth part describes the most commonly used methods of calibration of roundness measuring instruments and a list of scientific papers related to this topic that can be used for further research.

In the last part, the current method of static calibration of the roundness measuring instrument in the LFSB is described, and a new dynamic method of instrument calibration is proposed.

1. UVOD

Predmeti kružnog poprečnog presjeka jedni su od najčešće izrađivanih u području strojarstva. Zbog različitih metoda obrade te ograničenja u tehnologijama potrebnima za njihovu proizvodnju, poprečni presjeci odstupaju od idealne kružnice. U kolikoj mjeri smiju odstupati od idealne kružnice definira se dopuštenim odstupanjem od kružnosti, a uređajima za ispitivanje kružnosti utvrđuje se koliko iznosi odstupanje od kružnosti te kako izgleda poprečni presjek proizvedenog predmeta.

Kako bi bili sigurni da uređaj za ispitivanje kružnosti pokazuje pouzdane vrijednosti, uređaj mora biti umjeren. Umjeravanjem se izmjerena vrijednost dovodi u vezu s definicijom metra uz određenu mjernu nesigurnost.

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a (LFSB) umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti MMQ-3 sastoji se od postupka provjere točnosti ticala i postupka provjere točnosti rotacije okretnog stola. Greška rotacije okretnog stola relativno jednostavno se utvrđuje mjerenjem referentne polukugle, dok se utvrđivanje pogreške ticala provodi pomoću piezo aktuatora. Naime, umjereni piezo aktuator ostvaruje referentni pomak tako da se naredbe za pomak šalju pomoću računala. Potrebno je osigurati ispravno postavljanje piezo aktuatora na okretni stol uređaja za mjerenje kružnosti na sličan način kao što bi se i postavio predmet mjerenja na kojem bi se mjerilo odstupanje od kružnosti. Razlika je u tome što se okretni stol ne rotira, dok se pokretna površina piezo aktuatora giba i uzrokuje otklon ticala. Mjeri se napon koji nastaje zbog tog otklona, a umjeravanjem se nastoji odrediti faktor pomoću kojeg se izmjereni naponi preračunavaju u duljinu, odnosno mikrometre, tako da izmjerene vrijednosti u mikrometrima što manje odstupaju od referentnih vrijednosti pomaka piezo aktuatora.

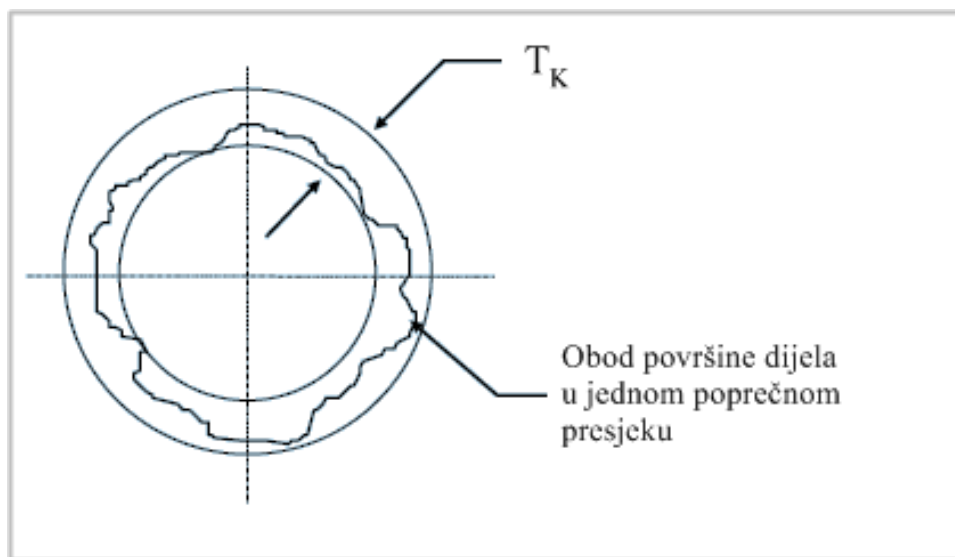
Budući da se za piezo aktuator mogu programirati ne samo trenutni pomaci, nego i valovi pomaka koji se uzastopno ponavljaju tijekom određenog vremenskog perioda, može se provesti i dinamičko umjeravanje uređaja za ispitivanje kružnosti. Statičko umjeravanje nije dostatno za potpuno umjeravanje uređaja jer se uređaj u stvarnosti susreće s dinamičkim podražajima. Dinamičkim umjeravanjem provjeravaju se pokretljivost ticala i softverska podrška uređaja, odnosno algoritmi za izračunavanje odstupanja od kružnosti. Tako se mogu programirati pomaci piezo aktuatora koji mogu zamijeniti Flick etalon i Multi-wave etalone,

koje LFSB ne posjeduje. Do sada se ovakvo dinamičko umjeravanje nije provodilo u LFSB zbog ograničenja postojećeg piezo aktuatora u smislu broja točaka koje može generirati, odnosno 256 točaka nije dovoljno za generiranje kompleksnijih profila. Stoga je predloženo povezivanje piezo aktuatora sa signal generatorom koji može generirati znatno veći broj točaka. Predloženi su i način simuliranja Flick etalona, kao i više različitih Multi-wave etalona, ovisno o informacijama koje želimo ustanoviti ispitivanjem takvih etalona.

U diplomskom radu detaljnije su opisane najčešće korištene metode umjeravanja uređaja za ispitivanje kružnosti te popis znanstvenih radova povezanih s tom temom za detaljnije proučavanje.

2. KRUŽNOST

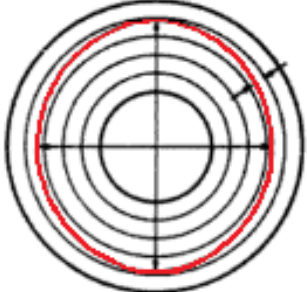
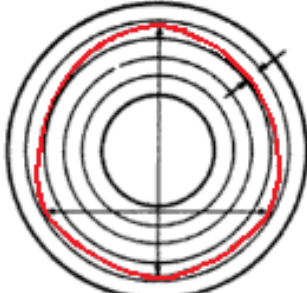
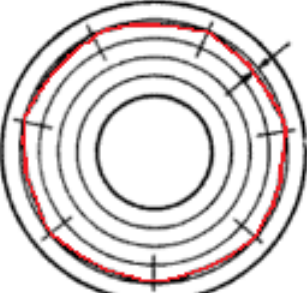
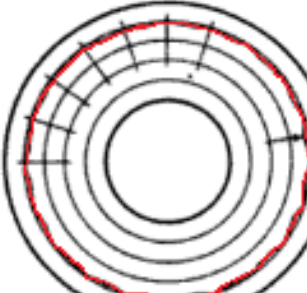
Kružnost se odnosi na stanje kružne linije ili površine kružnog dijela, kod kojeg su sve točke na liniji ili na obodu poprečnog presjeka dijela jednako udaljene od središnje točke. U stvarnosti predmeti nisu savršeni i neće sve točke biti jednako udaljene od središta. Stoga se uvodi dozvoljeno odstupanje unutar kojeg trebaju biti smještene točke da bi bili zadovoljeni kriteriji za kružnost. Dozvoljeno odstupanje od kružnosti određeno je površinom između dvije komplanarne koncentrične kružnice čija je razlika polumjera T_K (Slika 1). Linija profila ne smije niti jednom točkom izlaziti van definiranog kružnog vijenca. [1], [2]

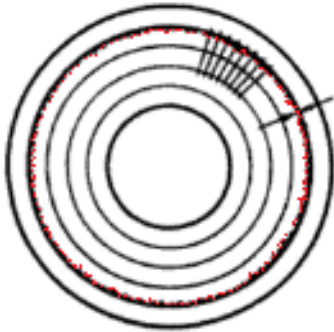
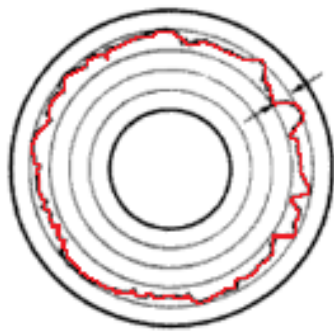


Slika 1 Odstupanje od kružnosti [1]

Zbog velike raznolikosti metoda obrade, opreme i uvjeta, pojavljuju se različite točnosti dimenzija i odstupanja od kružnosti. Uočeno je da se s različitim metodama obrade i uvjetima mogu povezati karakteristični tipovi odstupanja od kružnosti. Tako su na temelju iskustvenih podataka prikazani neki od najčešćih oblika odstupanja od kružnosti u odnosu na idealne kružnice (Tablica 1).

Tablica 1 Oblici odstupanja od kružnosti [3]

Dijagram poprečnog presjeka (preuveličano)	Imenovanje i opis	Potencijalni uzroci i značajne karakteristike
	<p>Ovalnost s nejednakim osima koje su približno okomite jedna na drugu i u odnosu na idealni profil.</p>	<p>Neporavnatost šiljka alatnog stroja i/ili središnjeg gnijezda izratka. Značajna dimenzija je razlika između manje i veće osi.</p>
	<p>Jajolikost, u suštini ovalnost, ali manja i veća os nisu simetrično postavljene.</p>	<p>Odstupanja šiljka alatnog stroja i/ili središnjeg gnijezda izratka. Oštećenja šiljaka ili gnijezda. Odstupanje osi od simetričnosti značajno je za funkcionalnost.</p>
	<p>Izbočenost karakterizirana neparnim brojevima izbočina u pravilu sličnog razmaka. Tipični brojevi izbočina duž opsega su 3, 5, 7 i 9.</p>	<p>Brušenje bez središnjeg gnijezda, kada nije adekvatno kontrolirano. Stezanje u strojnom škripcu (amerikaneru).</p>
	<p>Valovitost (konturne izbočine, srednja frekvencija). Valovi konture su konzistentni u razmaku i amplitudama u odnosu na idealnu kružnicu.</p>	<p>Vibracije alatnog stroja i/ili nedovoljna krutost izratka.</p>

	<p>Visokofrekventne izbočine (usko povezano s površinskom hrapavosti). Vrlo malen razmak između izbočina i malena amplituda.</p>	<p>Obično povezano s karakteristikama procesa obrade, kao što je veličina brusnog zrna, posmak i slično. Često se namjerno zanemaruje ili potisne filtriranjem kada se priprema mjerenje kružnosti.</p>
	<p>Nasumične nepravilnosti prepoznatljive po neperiodičnim pojavljivanjima izbočina u odnosu na idealnu kružnicu.</p>	<p>Može se pojaviti zbog različitih, neprikladno kontroliranih uvjeta u procesu brušenja. Često povezano s neodgovarajućom stabilnošću pri pozicioniranju i stezanju.</p>

2.1 Razlozi ispitivanja kružnosti

Jedan od osnovnih zahtjeva rotaciono-simetričnih predmeta je zadovoljavajuće odstupanje od kružnosti. Važnost mjerenja odstupanja od kružnosti naglašena je s tim da je kružni presjek jedan od najčešće korištenih osnovnih oblika u strojarstvu. Kružni oblik često se upotrebljava jer:

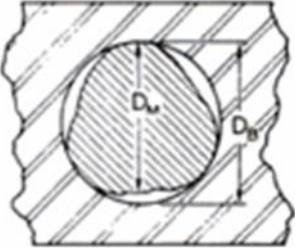
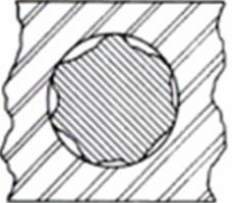
- jednostavan je za definiranje, potrebna je samo dimenzija promjera
- najjednostavniji je za proizvodnju velikim brojem metoda obrade
- može se mjeriti samo jedna dimenzija (promjer) s manje potencijalnih pogrešaka u odnosu na druge oblike
- ima nekoliko funkcionalnih prednosti, kao što su jednostavna montaža, glatko kotrljanje i jednolika snaga u svim smjerovima simetrično na središnju os.

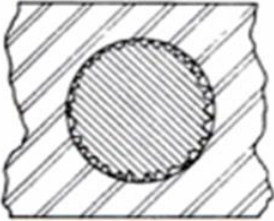
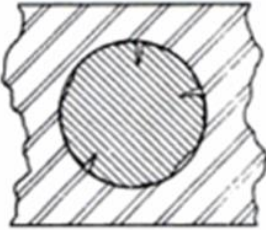
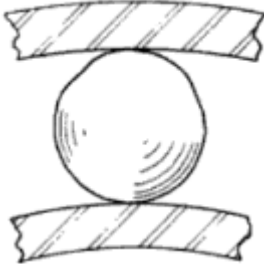
Različite namjene koje predmeti kružnog oblika izvršavaju rezultiraju velikim rasponom zahtjeva za kružnost. Kako bi propisno funkcionirali ili kako bi zadovoljili neke druge zahtjeve povezane s uporabom predmeta, većina tehničkih dijelova ima definirana dopuštena

odstupanja od oblika. Dakle, pouzdano ispitivanje kružnosti važan je proces za osiguravanje zahtijevanih funkcionalnih karakteristika predmeta s kružnim poprečnim presjekom. [3]

U principu definiranje zahtjeva za kružnost spada u konstrukcijske specifikacije i trebalo bi biti prikazano na radioničkom crtežu. Budući da odstupanje od idealne kružnice može imati različite karakteristične oblike, često nije moguće definirati odstupanje pomoću jedne dimenzije, kao što je to prikazano na radioničkom crtežu. Zbog toga razumijevanje funkcionalnih posljedica grešaka kružnosti može pridonijeti informativnijem prikazivanju mjera odstupanja od kružnosti kako bi se ustanovila adekvatnost ispitivanog predmeta za njegovu namjenu. Takvo razumijevanje može biti od pomoći u dva glavna aspekta: u razmatranju rezultata mjerenja kružnosti s funkcionalnog aspekta stavljanjem naglaska na dimenzije značajnih odstupanja od oblika te u odabiru metoda ispitivanja kružnosti koje mogu dovesti do traženih informacija o geometriji predmeta s najmanje napora i troškova. Kao uvod u funkcionalnu procjenu nedostataka kružnosti prikazano je nekoliko tipičnih primjera u kojima određena vrsta odstupanja od kružnosti može imati štetne posljedice na ispravno funkcioniranje predmeta (Tablica 2). [3]

Tablica 2 Utjecaj odstupanja od kružnosti na funkcionalnost predmeta [3]

Prikaz poprečnog presjeka (preuveličano)	Tipične posljedice koje utječu na funkcionalnost
	<p>Promjer poprečnog presjeka rotaciono-simetričnog predmeta predstavlja njegovu reprezentativnu dimenziju.</p> <p>Razlika između tako izmjenog promjera i promjera rupe u koju se treba umetnuti taj predmet može biti uzrokom funkcionalne manjkavosti ili poteškoća pri montaži.</p>
	<p>Izbočine koje prelaze preko površine idealne kružnice mogu narušiti namjeravanu točnost nalijeganja te prekidanjem filma maziva uzrokovati štetni kontakt metala.</p>

	<p>Određeni dijelovi izbočina mogu se slomiti zbog velikih opterećenja nastalih zbog koncentracija naprezanja većih od proračunatih vrijednosti. Posljedica je labavljenje spoja.</p>
	<p>Praznine u kontaktu između dosjednih površina zbog prekida u kontinuitetu konture poprečnog presjeka mogu uzrokovati istjecanje fluida koje je trebalo biti spriječeno čvrstim dosjedom.</p>
	<p>Gladak rad kugličnog ležaja ovisi o preciznoj sferičnosti svake njegove kuglice. Udubljenja ili izbočenja nepovoljno se odražavaju na performanse ležaja i mogu utjecati na povećanu glasnoću zvuka pri radu ležaja.</p>

3. ISPITIVANJE KRUŽNOSTI

Metode koje se primjenjuju za ispitivanje kružnosti mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine [3]:

- metode mjerenja kružnosti s unutrašnjom mjernom referencom
- metode mjerenja kružnosti s vanjskom mjernom referencom.

Unutrašnja mjerna referenca predstavlja jednu ili više točaka površine ispitivanog predmeta, dok vanjska mjerna referenca predstavlja neki vanjski element, različit od ispitivanog predmeta.

U nastavku će biti detaljnije opisan samo uređaj s vanjskom mjernom referencom jer se diplomski rad zasniva na takvim vrstama uređaja.

3.1 Uređaji s vanjskom mjernom referencom

Jedna od najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja kružnosti je mjerenje pomoću uređaja s vanjskom mjernom referencom. Dakle, za mjernu referencu uzima se os rotacije precizno izrađenog vretena s izrazito velikom točnošću rotacije. Budući da referenca nije vezana uz predmet koji se ispituje te nije promjenjiva tijekom mjerenja, postiže se veća preciznost mjerenja. Prednosti ove metode zbog koje se često primjenjuje su [3]:

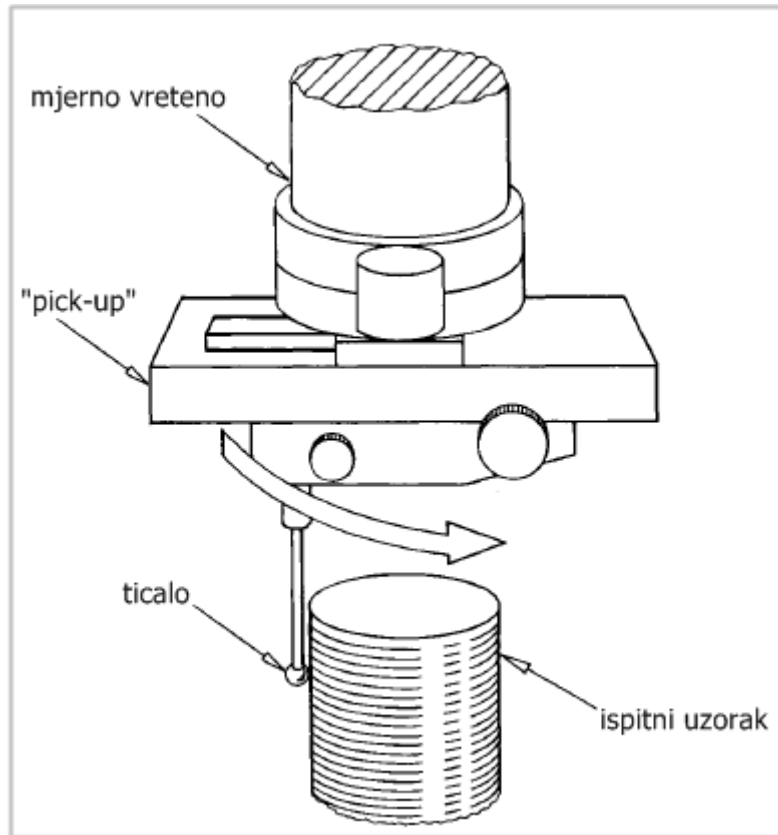
- intenzitet suzbijanja nekonzistentnih značajki (filtriranje) može se mijenjati kako bi se poboljšali značajni aspekti stanja kružnosti
- prikazuje stvarni prikaz geometrijskih karakteristika ispitivanog predmeta
- grafički prikaz kružnosti ispitivanog predmeta prikladan je za detaljnu analizu te se može interpretirati različitim matematičkim metodama
- kontinuiranim praćenjem ticalom po cijeloj površini predmeta u odabranoj ravnini isključuje se mogućnost zanemarivanja pogrešaka koje je moguće propustiti mjerenjem „point-to-point“.

Metoda ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom može se provoditi pomoću dva tipa uređaja za ispitivanje kružnosti: tip rotirajućeg ticala i tip rotirajućeg stola.

3.1.1 Tip rotirajućeg ticala

Mjerenje pomoću ovakvih uređaja provodi se tako da se ispitni uzorak postavi na stol i ostaje fiksiran tijekom cijelog mjerenja, odnosno nema gibanja uzorka. Ticalo je u kontaktu s

uzorkom te kruži oko njega. Tijekom gibanja ticala, ono prikuplja potrebne podatke (točke) te se linearni ili polarni graf promatranog poprečnog presjeka prikazuje na monitoru.



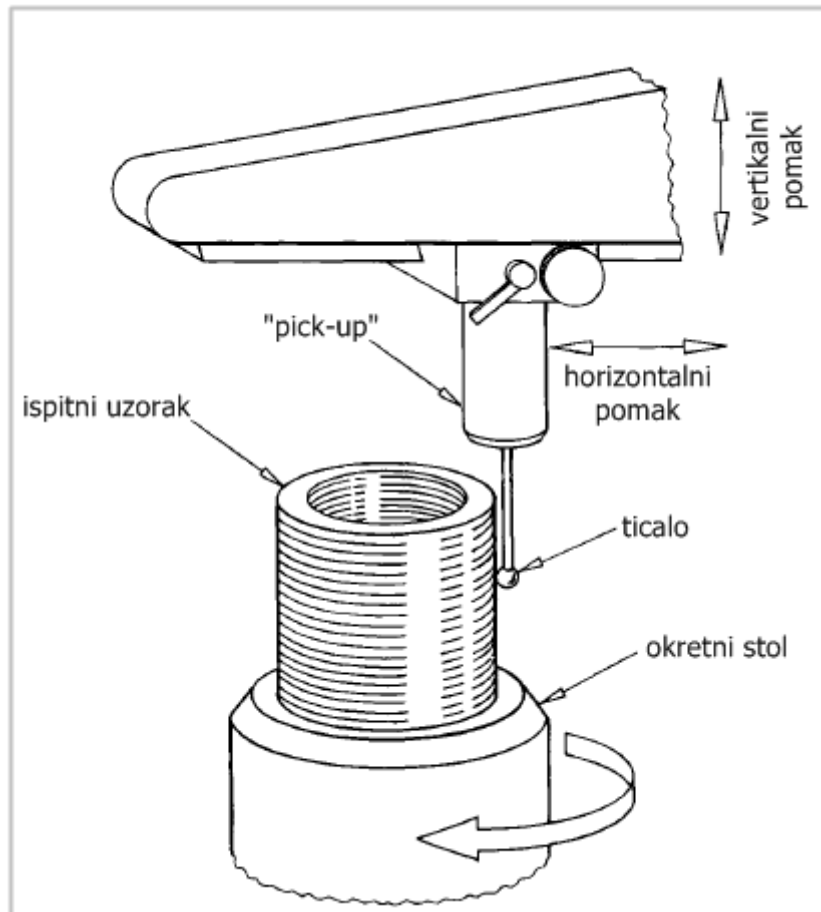
Slika 2 Tip rotirajućeg ticala [4]

Karakteristike mjerenja pomoću uređaja s rotirajućim ticalom [3], [5]:

- stol na kojeg se postavlja ispitni uzorak nije dio mjernog sustava pa može biti masivan
- mjerenja su manje ograničena težinom ispitnog uzorka
- mogu se mjeriti i uzorci većih dimenzija
- rotacijska točnost ticala ne ovisi o težini ispitnog uzorka
- sila koja djeluje na ticalo ostaje konstantna
- ticalo je osjetljivo na trenutne promjene temperature
- može se postići velika točnost ispitivanja jer mjerno vreteno koje predstavlja mjernu referencu nosi samo „pick-up“ male težine.

3.1.2 Tip rotirajućeg stola

Princip ispitivanja kružnosti pomoću uređaja s rotirajućim stolom je takav da se ispitni uzorak postavi na rotirajući stol tako da se os rotacije uzorka poklapa s osi rotacije stola. Uzorak rotira zajedno sa stolom dok ticalo miruje i mjeri otklon tijekom gibanja uzorka te se rezultati mjerenja prikazuju na monitoru u obliku linearnog ili polarnog grafa.



Slika 3 Tip rotirajućeg stola [4]

Karakteristike mjerenja pomoću uređaja s rotirajućim stolom [3]:

- mjerna referenca je os rotacije stola što osigurava ponovljivost rezultata ispitivanja
- za točnost rezultata mjerenja iznimno je bitna točnost rotacije stola
- točnost rotacije stola može biti narušena ispitnim uzorkom prevelike težine
- manja je osjetljivost sustava na trenutne promjene temperature
- mogu se uspostaviti kontakti za kontinuirano uzimanje podataka, bez mijenjanja izvornog postavljanja, na različitim razinama i na dijelovima različitih promjera istog predmeta. Takva mjerenja važna su za ispitivanje koaksijalnosti.

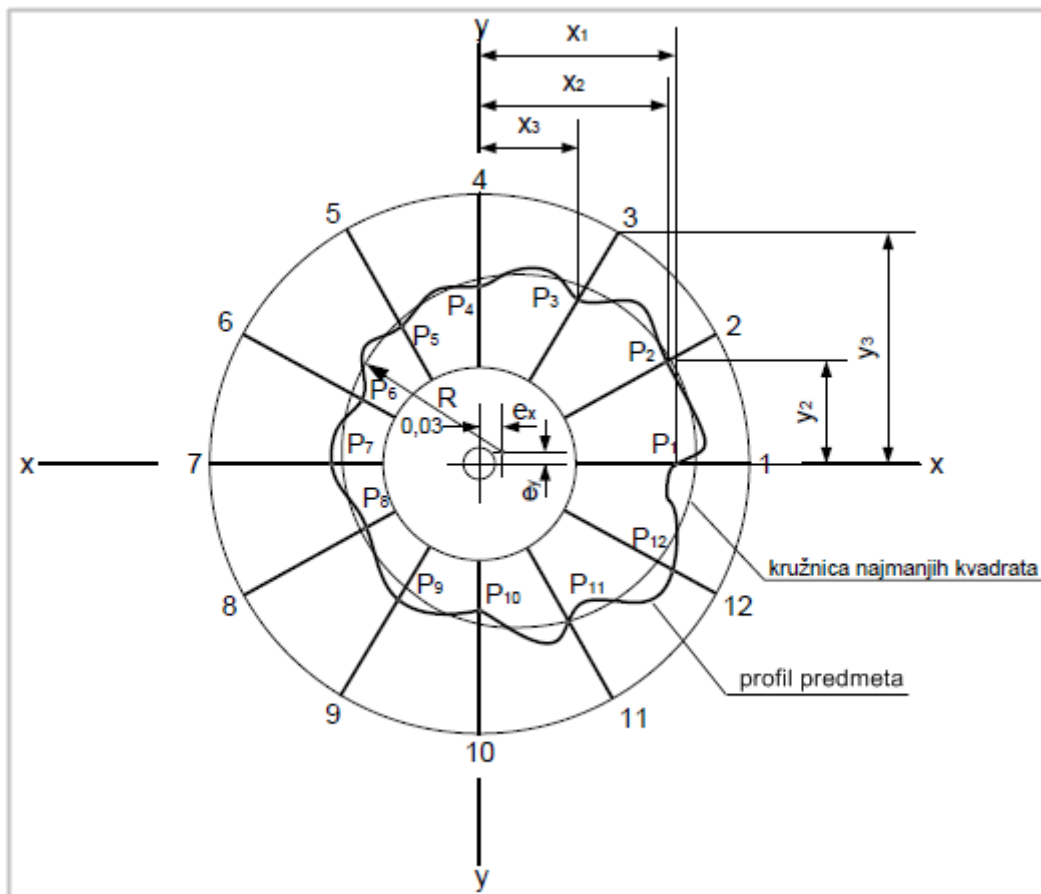
3.2 Numeričke metoda proračuna odstupanja od kružnosti

Rezultati mjerenja poprečnog presjeka ispitnog uzorka, prikupljeni uređajem za mjerenje kružnosti, obrađuju se korištenjem računala. Pomoću računala provode se numeričke metode proračuna odstupanja od kružnosti.

Prema ISO 12181-1 postupak procjenjivanja odstupanja od kružnosti bazira se na traženju središta sljedećih referentnih kružnica [6]:

- kružnice najmanjih kvadrata (*Least Squares Circle*)
- najmanje kružne zone (*Minimum Zone Circles*)
- najmanje opisane kružnice (*Minimum Circumscribed circle*)
- najveće upisane kružnice (*Maximum Inscribed Circle*).

U ovom radu koristit će se rezultati iznosa odstupanja od kružnosti dobiveni pomoću temeljne numeričke metode proračuna odstupanja od kružnosti - LSC metode (kružnica najmanjih kvadrata).



Slika 4 Kružnica najmanjih kvadrata i profil predmeta [1]

Za kružnicu najmanjih kvadrata (LSC kružnicu), matematička definicija glasi: “Suma kvadrata dovoljnog broja jednako kutno razmaknutih radijalnih udaljenosti točaka profila od te kružnice, ima najmanju vrijednost“. Na temelju točaka profila određuju se parametri kružnice, kao što su koordinate središta kružnice i polumjer. Jednadžbe za računanje koordinata središta LSC kružnice (3.2-1, 3.2-2) i polumjera iste (3.2-3) glase [5]:

$$e_x = \frac{2 \sum x_i}{n} \quad (3.2-1)$$

$$e_y = \frac{2 \sum y_i}{n} \quad (3.2-2)$$

$$R = \frac{\sum r_i}{n} \quad (3.2-3)$$

U ovim jednadžbama e_x predstavlja x-koordinatu središta LSC kružnice, x_i x-koordinatu i-te točke profila predmeta, n broj točaka profila predmeta, e_y y-koordinatu središta LSC kružnice, y_i y-koordinatu i-te točke profila predmeta, R polumjer LSC kružnice, te r_i radij-vektor i-te točke profila predmeta (Slika 4).

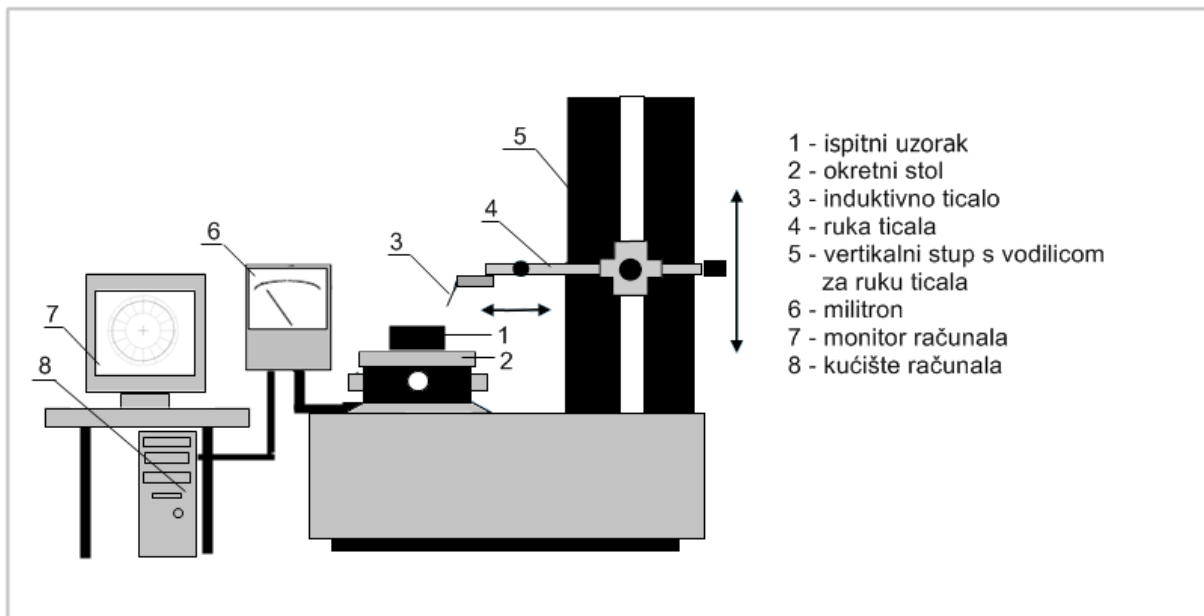
Točnost određivanja koordinata središta kružnice najmanjih kvadrata ovisi o broju uzetih točaka profila, pa se uzima da je 96 ordinata dovoljno da bi se pouzdano odredili parametri kružnice najmanjih kvadrata. Izračunato središte kružnice najmanjih kvadrata predstavlja središnju os uzorka koji se mjeri. Tada odstupanje od kružnosti predstavlja zbroj udaljenosti najvećeg brijega (*Peak*) i najvećeg dola (*Valley*) profila ispitnog uzorka od kružnice najmanjih kvadrata. [5]

3.3 Ispitivanje kružnosti u LFSB

Laboratorij za precizna mjerenja dužina (LFSB) Fakulteta strojarstva i brodogradnje koristi uređaj MMQ-3 proizvođača „Mahr Parthen“ za ispitivanje kružnosti. To je uređaj s okretnim stolom koji koristi metodu ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom.

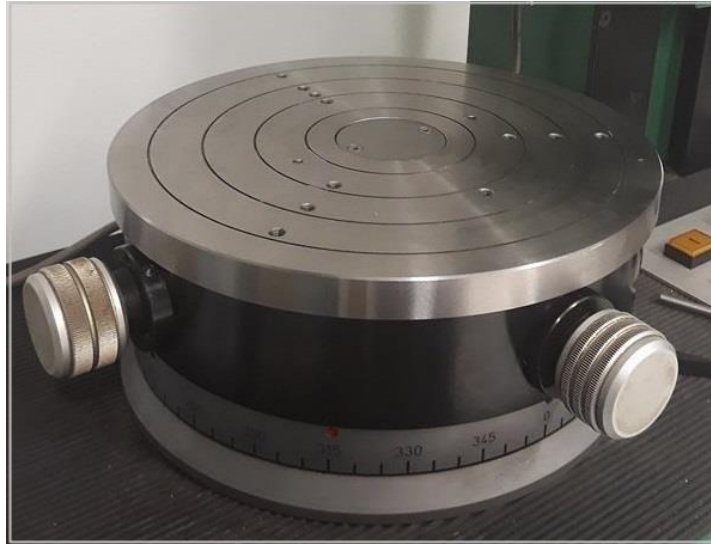
Osnovni dijelovi uređaja su:

- okretni stol
- induktivno ticalo
- stup s vodilicom
- ruka ticala
- pojačalo signala (militron)
- računalo.



Slika 5 Osnovni dijelovi uređaja „MMQ-3“ za ispitivanje kružnosti [2]

Okretni stol (Slika 6) služi za vremenski ujednačeno rotiranje ispitnog uzorka postavljenog na njemu. Stol treba imati što veću geometrijsku točnost osi rotacije, odnosno točnost vrtnje vretena okretnog stola, jer to utječe na ispravnost i ponovljivost rezultata mjerenja. Okretni stol ovog uređaja posjeduje dva precizna vijka za centriranje uzorka u x-y ravnini, te još dva za podešavanje nagiba (rotacija oko x i y osi). Na dnu stola nalaze se brojčane oznake koje predstavljaju iznos kuta pri rotaciji, od 0° do 360°. Pomoću ovakvih finih načina reguliranja translacije i rotacije stola, može se postići precizno centriranje uzorka koji će se ispitivati jer je uvjet kvalitetnog mjerenja što točnije poklapanje aksijalne osi ispitnog uzorka s osi rotacije stola.



Slika 6 Okretni stol uređaja za mjerenje kružnost [2]

Na masivnom vertikalnom stupu, koji posjeduje vodilicu za ruku ticala, pričvršćena je ruka ticala, a na rubu ruke nalazi se ticalo za ispitivanje kružnosti. Ruka ticala može se micati vertikalno i horizontalno. Vertikalni pomak ruke omogućuje ispitivanje kružnosti u različitim ravninama okomitima na os rotacije uzorka, odnosno na različitim poprečnim presjecima, a ostvaruje se vretenom koje je pogonjeno električnim putem. Ruka ticala opremljena je preciznim vijkom pomoću kojeg se ostvaruje horizontalni pomak. Horizontalnim micanjem ruke ticalo se dovodi u kontakt s ispitnim uzorkom. Budući da je ticalo u kontaktu s uzorkom, svaka točka različite udaljenosti od središta predmeta u odnosu na udaljenost referentne točke od središta predmeta uzrokuje otklon ticala. Induktivno ticalo (Slika 7) registrira taj mehanički pomak i pretvara ga u analogni naponski signal.



Slika 7 Induktivno ticalo uređaja za mjerenje kružnosti [2]

U elektronskom uređaju za mjerenje i upravljanje (militrone) (Slika 8) registriraju se pomaci ticala te se u njemu pojačava i obrađuje naponski signal. Na mjernoj skali militrone prikazuju se vrijednosti tog otklona, ovisno o odabranom mjernom području. Mogu se odabrati mjerna područja od $\pm 3 \mu\text{m}$, $\pm 10 \mu\text{m}$, $\pm 30 \mu\text{m}$, $\pm 100 \mu\text{m}$, $\pm 300 \mu\text{m}$ i $1000 \mu\text{m}$. Mjerno područje odabire se na temelju vrijednosti koje se trebaju mjeriti, tako da se izmjerene vrijednosti nalaze unutar mjernog područja. Često se odabire iduće veće mjerno područje ako se izmjerene vrijednosti nalaze na rubovima mjernog područja kako bi se izbjegla eventualna nelinearnost na rubovima. Postoje izvedbe uređaja koje imaju samo jedno mjerno područje što olakšava provedbu mjerenja, kao i postupak umjeravanja, jer se ne trebaju obavljati zasebna umjeravanja za manja mjerna područja, nego samo za jedno mjerno područje. [2]



Slika 8 Elektronski uređaj za mjerenje i upravljanje (militrone) [2]

Analogni naponski signal se digitalizira pomoću kompjuterske kartice za prikupljanje podataka (DAQ – *data acquisition board*) PCI – DAS6034 (Slika 9) proizvođača „Measurement Computing“. Karticu karakterizira 16 analognih ulaza u normalnom načinu rada ili 8 u diferencijalnom, 8 digitalnih ulaza i 8 digitalnih izlaza, 16 – bitna rezolucija A/D pretvornika, te mogućnost prikupljanja 200000 uzoraka po sekundi. Mjerno područje kartice kreće se od $\pm 25 \text{ mV}$ do $\pm 10 \text{ V}$, dok maksimalna rezolucija iznosi $0,5 \text{ mV}$. Kartica se spaja na računalo preko standardne PCI sabirnice. Signal mjerenja preuzima se s izlaza upravljačke jedinice Millitrone. Zbog veće točnosti mjerenja i smanjivanja elektromagnetskog šuma, korišten je tzv.diferencijalni način spajanja kod kojeg se signal i njegovo uzemljenje spajaju

na odvojene kanale na kartici. Na taj način iznos uzemljenja se relativno oduzima od veličine signala, te korigira šum izazvan induciranjem napona na vodičima i samom uređaju. Pomoću softverskog rješenja (aplikacije) prikazuju se prikupljeni podaci, obrađuju se te izrađuju izvještaji o mjerenju. [5]



Slika 9 Kompjuterska kartica PCI – DAS6034 [5]



Slika 10 Mjerni sustav za ispitivanje kružnosti [2]

Ispitivanje kružnosti na uređaju MMQ-3 (Slika 10) provodi se tako da se ispitni uzorak postavi na okretni stol i centrira, odnosno aksijalna os uzorka treba se poravnati s osi rotacije stola. Kada je predmet poravnat, vrh ticala dovodi se u kontakt s nekom točkom na konturi ispitivane kružnice predmeta. Pokretanjem okretnog stola predmet rotira zajedno s njim te se omogućava kontinuirano prikupljanje točaka kružne linije ispitivanog poprečnog presjeka. Pri mjerenju dolazi do otklona ticala, a induktivno ticalo registrira taj mehanički pomak i pretvara ga u naponski signal. Naponski signal se obrađuje u militrону i na njegovoj mjernoj skali se prikazuje vrijednost tog otklona. Svaka vrijednost otklona na mjernoj skali prikazuje se točno u tom trenutku. Signal se dalje prenosi na računalo opremljeno sa softverom za prikaz linearnog i polarnog grafa. Na monitoru se prikazuju rezultati ispitivanja neovisno o vremenu kada se provelo ispitivanje, odnosno podatci ostaju vidljivi i nakon obavljenog ispitivanja. [2]

4. OSIGURAVANJE SLJEDIVOSTI

4.1 Sljedivost

Mjeriteljstvo obuhvaća tri glavna zadatka:

- definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica
- ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama
- utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenju tog znanja.

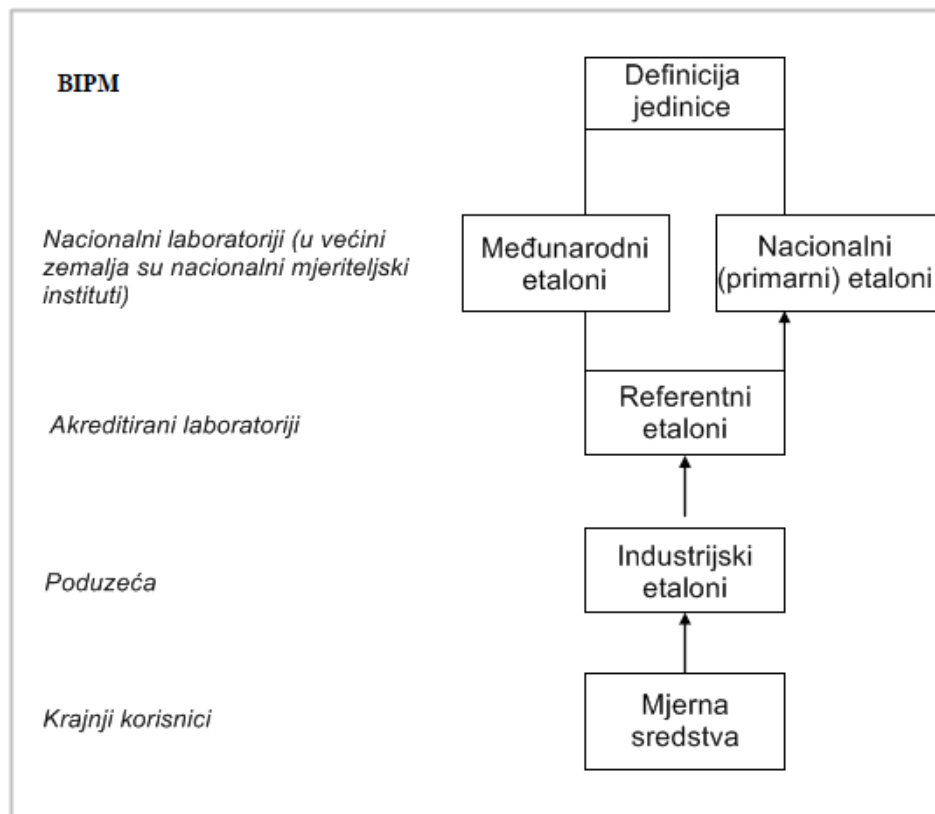
Iz navedenog se vidi da je važan zadatak laboratorija za mjeriteljstvo osiguravanje sljedivosti. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se rezultat dovodi u vezu s navedenim referencijskim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja. Svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Točnost rezultata ostvarenih mjerenjem određenog etalona ovisi o broju puta koliko je uspoređivan s etalomom višeg reda, recentnosti izvršene usporedbe, zadovoljenju uvjeta pri usporedbi te stabilnosti samog etalona.

Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedbi, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Ovakvim usporedbama osigurava se da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini. Lanac sljedivosti osigurava da različite mjerne metode i instrumenti korišteni u različitim državama u različito vrijeme daju pouzdane, ponovljive i usporedive rezultate mjerenja (Slika 11).

Osnovno sredstvo za osiguravanje sljedivosti je umjeravanje mjernog instrumenta, mjernog sustava ili referentnog materijala. Umjeravanjem se određuju karakteristike performansi instrumenta, sustava ili referentnog materijala. Obično se to postiže izravnom usporedbom s mjernim standardima ili certificiranim referentnim materijalima. [7], [8]

Četiri glavna razloga umjeravanja uređaja su [8]:

- uspostavljanje i prikazivanje sljedivosti
- osiguravanje usklađenosti očitavanja uređaja s ostalim mjerenjima
- određivanje točnosti očitavanja uređaja
- utvrđivanje pouzdanosti uređaja.



Slika 11 Lanac sljedivosti [7]

4.2 Etaloni

Etaloni su tvari koje predstavljaju referencu za utvrđivanje vrijednosti veličina i njihovih mjernih nesigurnosti te služe za uspostavljanje mjeriteljske sljedivosti.

Uređaji za ispitivanje oblika općenito su bolje optimizirani za ispitivanje kružnosti nego ravnosti i pravocrtnosti. Jedan od razloga je taj što se rotirajuće vodilice mogu obrađivati s većom preciznošću od linearnih vodilica. Ali postoji i glavni argument, a to je da su okrugli profili po definiciji zatvoreni. Stoga se mogu otkriti i ukloniti utjecaji kao što je termički pomak te se algoritmi za filtriranje mogu lakše primijeniti na zaobljene nego na ravne profile. Zbog svih tih razloga većina dostupnih etalona za umjeravanje uređaja za ispitivanje oblika su etaloni kružnog oblika. Općenito predmeti koji se moraju mjeriti s velikom točnošću imaju promjer u rasponu od 1 mm do 500 mm. Zbog toga je većina opreme za mjerenje prilagođena ovom rasponu tako da etaloni za kružnosti imaju nominalni promjer u rasponu od 20 mm do 100 mm. Najčešće korišteni etaloni za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti su mjerne kugla i polukugla, planparalelne granične mjerke, Cresting etalon, Flick etalon i različiti Multi-wave etaloni. [2], [9]

4.2.1 Mjerna polukugla

Mjerne polukugle (Slika 12) napravljene su tako da svi poprečni presjeci okomito na os rotacije budu što sličniji idealnim kružnicama. U pravilu imaju grešku odstupanja od kružnosti manju od 250 nm te mjernu nesigurnost do ± 10 nm [4]. Služe za otkrivanje radijalnih grešaka rotacije ili aksijalnih referenci za mjerenje kružnosti.

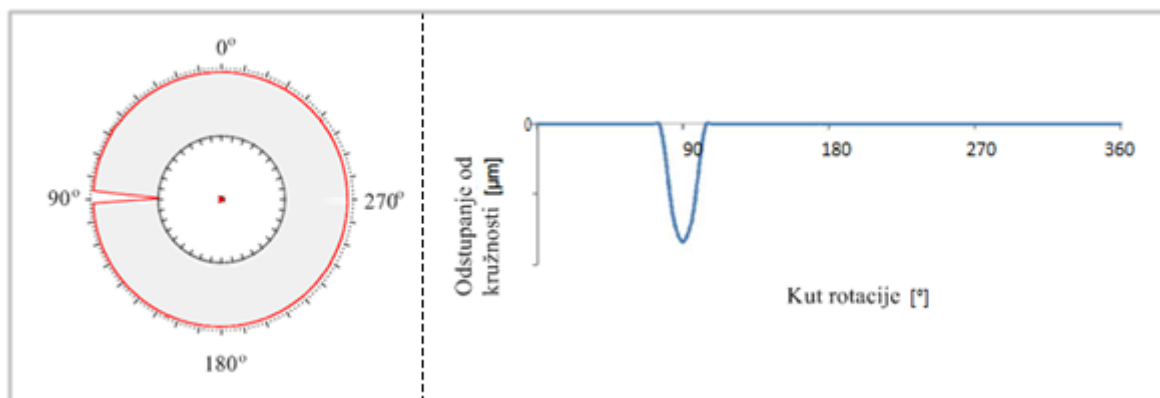
LFSB posjeduje referentnu polukuglu RET 227-509 proizvođača „Taylor Hobson“ čije odstupanje od kružnosti iznosi 0,026 μm .



Slika 12 Mjerna polukugla [2]

4.2.2 Flick etalon

Flick etalon je etalon koji sadrži namjerno izazvanu pogrešku odstupanja od kružnosti. Kružnog je oblika s jednim zarezom (flick) koji prekida kontinuiranost konture kružnog poprečnog presjeka (Slika 13).



Slika 13 Flick etalon (lijevo) i Odstupanje od kružnosti u ovisnosti o kutu rotacije (desno) [10]

Greška uvećanja ili osjetljivost uređaja za mjerenje kružnosti mogu se provjeravati mjerenjem Flick etalona. Također služi za provjeru softverske podrške uređaja, odnosno za provjeru ispravnosti algoritama za izračunavanje odstupanja od kružnosti. [10]

Kružni oblik izrađen je približno obliku idealne kružnice s neznatnom greškom što služi kao referenca za provjeru uređaja koliko točno može ispitati odstupanje od kružnosti. Ako je etalon ispravan, svaki prikaz odstupanja od kružnosti (osim zareza) dobiven ispitivanjem tog etalona pomoću određenog uređaja upućuje na grešku u mjernom sustavu. Na temelju toga mogu se istražiti uzroci takvih grešaka te ih se može pokušati eliminirati ili korigirati rezultate na ispravan način.

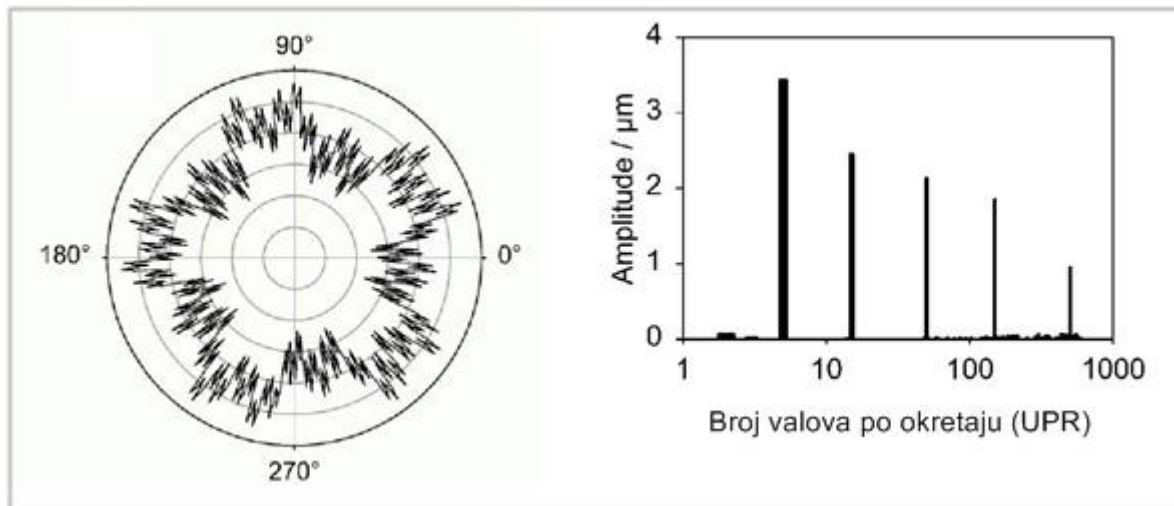
Pomoću zareza (flick) provjerava se pokretljivost, odnosno tromost ticala. Budući da je zarez dubok i naglo se pojavljuje, može se dogoditi da ticalo, ako nije dovoljno pokretljivo, ne uspije pravovremeno detektirati zarez i ne uspije doći u doticaj sa cijelom površinom zareza (ticalo izađe iz zareza prije nego je došlo do vrha zareza). Podatci dobiveni ispitivanjem etalona uspoređuju se s definiranim vrijednostima etalona jer su dimenzije zareza izuzetno dobro poznate. Na temelju odstupanja izmjerenih dimenzija u odnosu na stvarne dimenzije etalona (zareza) dobije se uvid o pokretljivosti ticala.

U mjerenjima kružnosti izbor filtra utječe na rezultate, a to osobito vrijedi za mjerenje Flick etalona. Naime, kod mjerenja kružnosti filtrira se hrapavost. Budući da se zarez prikazuje kao duboka dolina, ona se smanjuje uporabom bilo kojeg filtra.

Flick etalon je svestran jer se pomoću njega može umjeravati nekoliko vrsta mjernih uređaja, kao što su uređaj za ispitivanje kružnosti, uređaj za ispitivanje oblika, koordinatni mjerni stroj i uređaj za mjerenje duljine. Izrada ovakvog etalona je skupa i zahtjevna, a ne postoje gotovi standardizirani etaloni koji se mogu kupiti, tako da LFSB ne posjeduje ovakav tip etalona. [2]

4.2.3 Multi-wave etalon (MWS)

MWS je etalon koji predstavlja prostorno utjelovljenje superpozicije nekoliko sinusoidalnih valova, odakle i dolazi dio naziva „multi-wave“ (više-valni). Valovi mogu biti i na unutarnjem i na vanjskom cilindru. Amplitudni spektar takvog više-valnog etalona sastoji se od linija na utjelovljenim frekvencijama bez signala za druge frekvencije (Slika 14).



Slika 14 Multi-wave etalon [9]

Ispitivanjem ovih etalona i analizom valova koji se nalaze na površini profila provjerava se softverska podrška mjernog sustava, ponajviše harmonijska analiza, odnosno filtracija.

Glavne prednosti MWS-a u odnosu na, npr., Flick etalone su puno bolji omjer signala i šuma te niska osjetljivost na buku u profilima mjernog oblika. [9], [10]

Promjenom amplitudnog spektra mogu se izraditi različite izvedbe MWS, odnosno nema točno definiranog standardiziranog etalona. Ponajviše iz razloga što nema masovne proizvodnje ovakvih etalona, nego ih većinom laboratoriji naručuju od proizvođača koji proizvedu točno takav etalon. Zbog cijene i teške dostupnosti LFSB ne posjeduje ovaj tip etalona.

5. NAČINI UMJERAVANJA UREĐAJA

Umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti sastoji se od uvriježenih općih postupaka ispitivanja i korištenja nekolicine etalona za procjenu sposobnosti opreme. Vrste režima ispitivanja koje se poduzimaju obično mogu sadržavati sljedeće [4]:

- vreteno – provjeravanje pomoću prethodno umjerene mjerne kugle ili polukugle
- tromost i izvijanje ticala - korištenjem odgovarajućeg skupa planparalelnih graničnih mjerki ili korištenjem Flick etalona
- poravnavanje ticala prema ispitnom uzorku - upotrebom Cresting etalona
- softverska podrška (filtracija) – korištenjem Multi-wave etalona.

5.1 Umjeravanje pomoću mjerne kugle ili polukugle

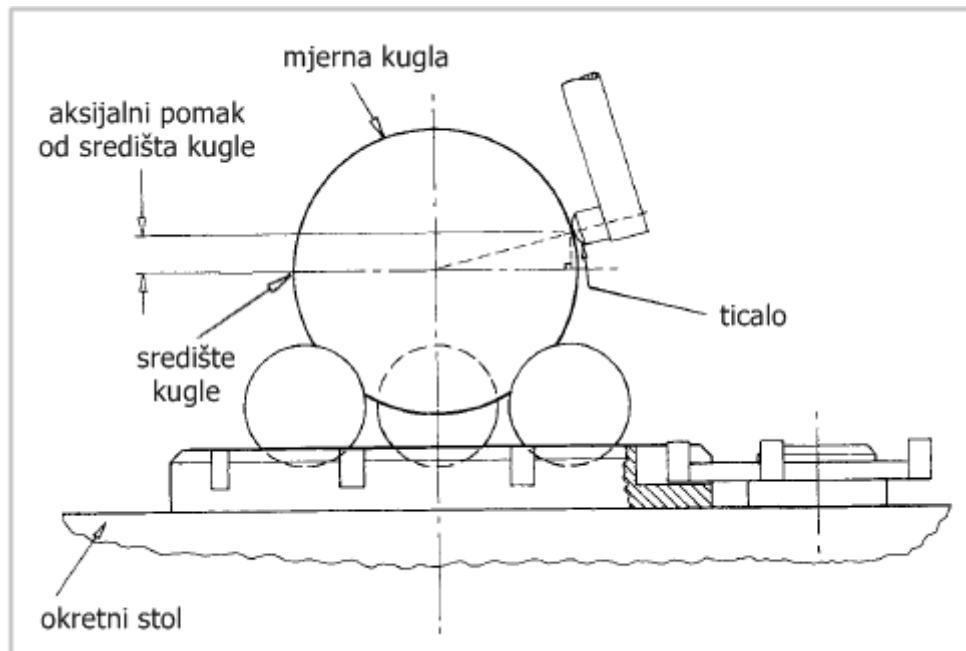
Korištenjem umjerene mjerne kugle ili polukugle mogu se umjeravati uređaji za mjerenje kružnosti na tri načina.

Jedan od načina je *provjera*. Koristi se za brzo dobivanje uvida u stanje uređaja i za njegovu adekvatnost za nastavak rada na njemu. Princip je takav da se prethodno umjerene kugla ili polukugla mjere na uređaju koji se želi ispitivati. Ako se razlike nalaze unutar definiranih granica, uređaj je pogodan za daljnju upotrebu ili daljnja umjeravanja.

Drugi način je *sekundarno umjeravanje*. Prethodno umjerene kugla ili polukugla mjere se na uređaju te se rezultat uređaja uspoređuje s poznatim rezultatom. Te se razlike pohranjuju u uređaj i koriste se za ispravljanje naknadnih mjerenja, odnosno ti podatci služe za softversku korekciju.

Još jedan od načina je *primarno umjeravanje*. Bez obzira na konfiguraciju opreme, prije bilo kakvog umjeravanja uređaja etalon treba biti centriran. Na nekim se uređajima koriste automatizirani postupci za poravnavanje radne osi s vretenom stola, dok drugi zahtijevaju ručno centriranje i poravnavanje. Da bi se osigurala konzistentnost i ponovljivost podataka umjeravanja, potrebno je etalon orijentirati na položaj poznatog kutnog položaja na uređaju. Orijentacija etalona može biti provedena pomoću oznake na etalonu koja označava nulti kutni položaj; ovo se postiže tako da se oznaka na etalonu podudara sa sličnom oznakom na uređaju, izjednačavajući obje njihove nulte pozicije. Na sofisticiranijim uređajima poznavanje pogreške u određenim kutnim orijentacijama znači da se može primijeniti softverska korekcija kako bi se takve pogreške svele na najmanju moguću mjeru. Zbog kompleksnosti postavljanja

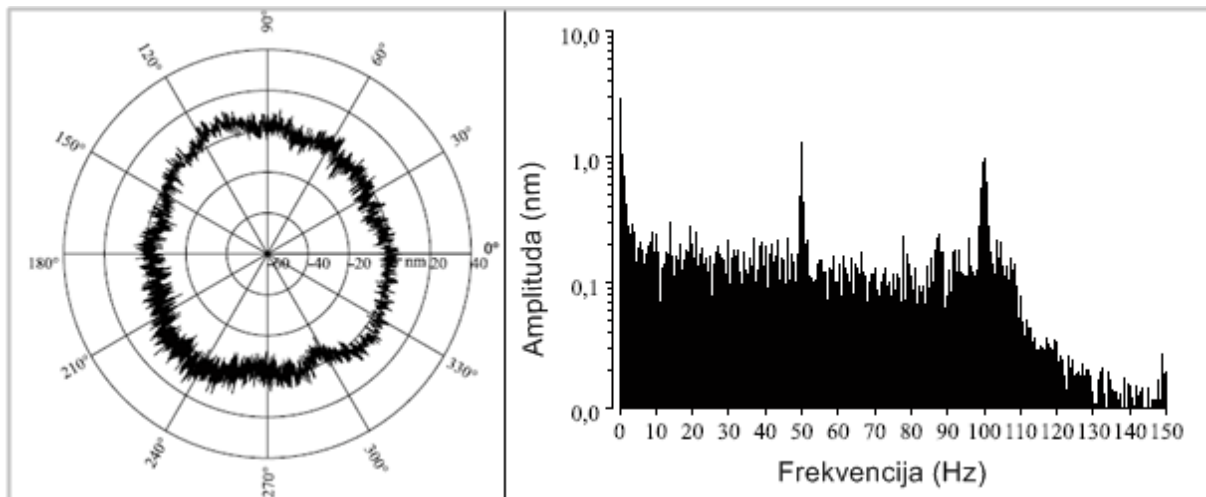
mjerne kugle, u praksi se češće koristi mjerna polukugla koja je već fiksirana na svome postolju. Za mjerne kugle i polukugle karakteristično je da mogu biti umjerene na definiranoj aksijalnoj razini različitoj od središta kugle. U bilo kojoj procjeni umjeravanja važno je zabilježiti kut između ticala i tangente na etalon na mjestu kontakta. Taj se kut obično postavlja na 0° za kuglu koja se mjeri na središtu, ali može biti i neki kut različit od 0° zbog aksijalnog pomaka u odnosu na središte kugle (Slika 15). [4]



Slika 15 Primjer ispitivanja mjerne kugle [4]

U primjeru provedenom na Physikalisch-Technische Bundesanstalt (M. Neugebauer) mjerna polukugla korištena je u svrhu određivanja mjerne nesigurnosti uređaja za mjerenje kružnosti. Ticalo s vrhom promjera 1 mm rotira se sa 6 okretaja / min oko ispitnog uzorka. Tijekom jednog okretaja pohranjuje se 4096 izmjerenih vrijednosti. Faza odstupanja od kružnosti polukugle se mijenja, dok faza greške vretena ostaje konstantna. Iz rezultirajućeg sustava jednadžbi mogu se odrediti odstupanja od kružnosti polukugle i greška vretena. Dobivena odstupanja od kružnosti polukugle su filtrirana s graničnom frekvencijom od 50 UPR, kao što je uobičajeno pri umjeravanju polukugle, jer odstupanja od kružnosti pri takvom umjeravanju ne uključuju harmonike veće od 20 UPR. Parametar odstupanja od kružnosti $RONt$ (*roundness total*), kojeg je potrebno odrediti, po definiciji je udaljenost između najviše udaljene i najmanje udaljene točke profila u radijalnom smjeru. Korišten je LSC algoritam, a analiza nesigurnosti vrijedi samo za ovaj algoritam te se pretpostavlja da je utjecaj implementacije LSC algoritma zanemariv. [11]

Na slici (Slika 16) prikazani su podatci izmjereni u jednom mjerenju kružnosti. Razina šuma iznosi otprilike ± 5 nm. Analizom frekvencija podataka dobiven je linijski spektar s dominantnim frekvencijama ispod 5 Hz, pri 50 Hz i oko 100 Hz; kako je brzina mjerenja 6 okretaja / min, signal od 50 Hz preklapa se s profilom od 500 UPR. Niska frekvencija može biti posljedica odstupanja oblika i greške vretena, dok se 50 Hz i harmonici od 100 Hz vjerojatno mogu pripisati šumu uređaja. [11]



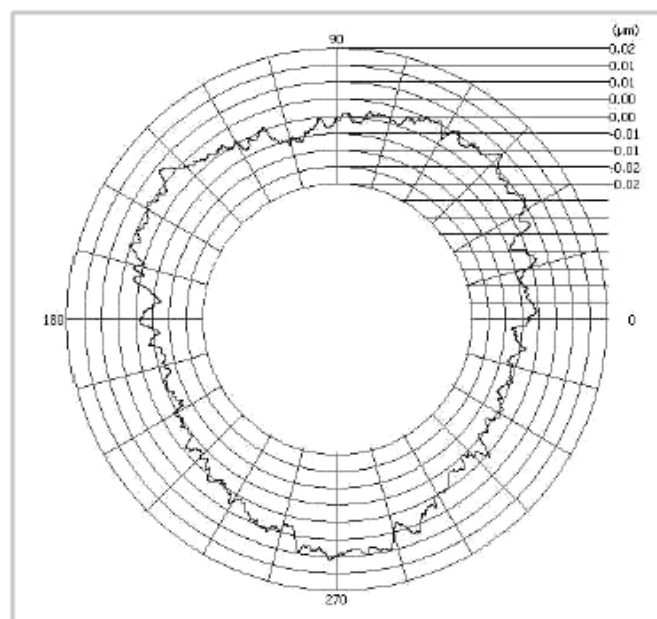
Slika 16 Rezultati ispitivanja mjerne polukugle [11]

U ovom primjeru mjerna kugla korištena je za određivanje greške vretena (Slika 17). Greška vretena određena je primjenom multi-step metode izdvajanja pogreške. Etalon se mjeri u 10 kutnih položaja na svakih 36° , a pogreška vretena dobiva se iz prosjeka deset profila. Ovim uprosječivanjem skoro u potpunosti se poništava odstupanje od kružnosti artefakata (mjerne kugle) izuzev višekratnika desetog harmonika (zbog 10 kutnih koraka). Određivanje odstupanja od kružnosti referentne kugle vrši se na isti način, ali pomicanjem mjernih profila na isto mjesto (svaki izmjereni profil zarotira se za višekratnik od 36°) prije nego li se izračuna prosjek 10 mjerenja. Na taj način se eliminira pogreška vretena (izuzev višekratnika desetog harmonika). Upotrebom mjerne kugle određuje se samo radijalna greška vretena, dok se korištenjem polukugle, kod koje mjerenja nisu provedena u ravnini središta kugle, određuje i aksijalna komponenta greške vretena. Svaki se profil mjeri pet puta kako bi se smanjila razina šuma te kako bi se otkrili vrhovi u profilu uzrokovani prašinom ili bilo kakvim drugim poremećajima. Posebna pažnja mora se posvetiti poravnanju etalona u odnosu na vreteno i oznake kutnog pomaka. Najprije se etalon centriraju u odnosu na oznake kutnog pomaka, a zatim se oznake zajedno sa etalom centriraju u odnosu na vreteno. [12]



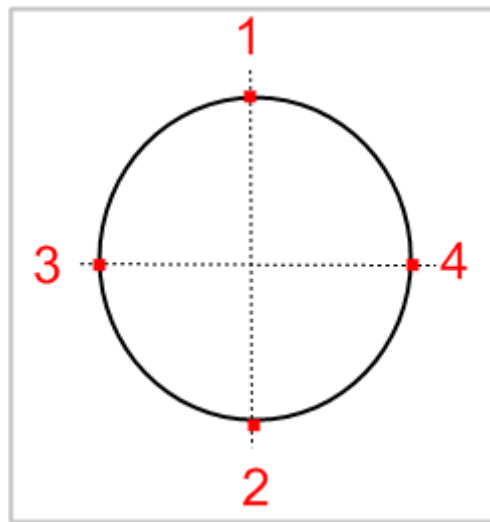
Slika 17 Ispitivanje mjerne kugle [12]

Kao etalon služi keramička kugla promjera 30 mm. Rezultati umjeravanja su grafički prikazani na slici u obliku polarnog grafa s filterom od 500 UPR (Slika 18). Kugla ima, za razliku od staklenih polukugli, relativno veliki sadržaj viših harmonika i odstupanje od kružnosti od 19 nm. Prednost upotrebe kugle je ta što se mjerna ravnina lako reproducira pronalaskom središta kugle i što greška vretena utvrđena uz pomoć kugle ima samo radijalne, a nema aksijalne komponente. [12]



Slika 18 Polarni graf mjerne kugle [12]

U LFSB također se provodi umjeravanje okretnog stola pomoću referentne polukugle RET 227-509. Iterativnim postupkom referentna polukugla se centrirana na okretni stol (Slika 19). U prvom koraku okretni stol se postavi u početni položaj i očita se vrijednost na militrону kada je ticalo u dodiru s polukuglom (točka 1). Zatim se okretni stol rotira za 180° (točka 2) pri čemu se očita vrijednost na militrону te se pomicanjem po translacijskim osima vrši centriranje. Okretni stol zarotira se za 90° (točka 3), očita se vrijednost, od te točke stol se zarotira za još 180° (točka 4) pri čemu se očita vrijednost na militrону te se obavi centriranje translacijskim pomakom. Ovaj postupak ponavlja se za više mjernih područja.



Slika 19 Postupak centriranja referentne polukugle [2]

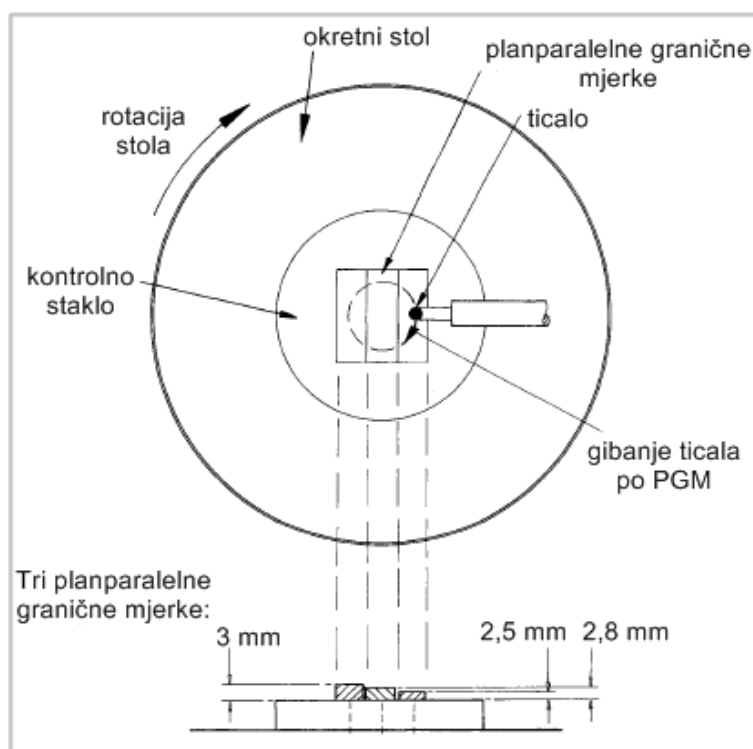
Nakon što je polukugla centrirana na okretnom stolu, ispituje se kružnost istog poprečnog presjeka referentne polukugle u više ponavljanja (najčešće 30). Mjerenje se provodi u najmanjem mjernom području $\pm 3 \mu\text{m}$ te se dobiveno odstupanje od kružnosti uspoređuje s poznatim odstupanjem od kružnosti referentne polukugle. [2]

5.2 Umjeravanje pomoću planparalelnih graničnih mjerki

Umjeravanje otklona ticala može se provesti upotrebom planparalelnih graničnih mjerki (PGM) i kontrolnog stakla (Slika 20). Kontrolno staklo se postavlja na stol uređaja za mjerenje kružnosti, obavlja se njegovo centriranje i poravnanje na stolu, omogućujući PGM da se „priljube“ na površinu kontrolnog stakla, eliminirajući male količine zraka koje bi se inače mogle pojaviti. Vrh ticala se dovede u kontakt s PGM te se stol rotira. Ako se koriste tri PGM, tada se može točno odrediti visina dvaju koraka, što daje zabilježeni niz visina koraka, koji se tada može usporediti s potvrdom o umjeravanju PGM za utvrđivanje otklona i osjetljivosti ticala. Podatci o korekciji mogu se unijeti u softver uređaja te takvi faktori

umjeravanja igraju ključnu ulogu u smanjenju nesigurnosti u mjernom lancu. Na primjer, faktor umjeravanja za visinu dvaju koraka PGM može se naći na sljedeći način [4]:

- izmjereni korak: $X - Y = Z$
- korak PGM: C
- faktor umjeravanja: $C/Z = F$.



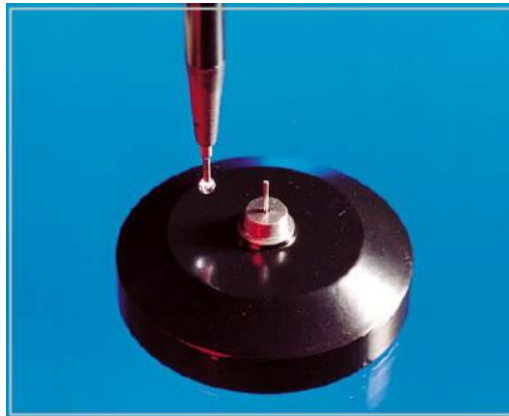
Slika 20 Umjeravanje pomoću planparalelnih graničnih mjerki [4]

5.3 Umjeravanje korištenjem Cresting etalona

Pri mjerenju kružnosti poželjno je postići osno poravnanje središta ispitnog uzorka i središta sfere na vrhu ticala, odnosno poravnanje ticala prema osi rotacije uređaja. Često se dogodi maleni kutni pomak sfere u odnosu na ispitni uzorak, što rezultira greškom poravnavanja (*cresting error*). Pri pokušaju centriranja uzorka, potrebno je izmjeriti ekscentričnost uzorka i ukloniti je podešavanjem. Da bi se to postiglo često je potrebno znati položaj ekscentričnosti u smislu kuta, pogotovo ako uređaj za mjerenje kružnosti koristi automatizirana sredstva za izračunavanje i uklanjanje ekscentričnosti. Postojanje greške poravnavanja otežava centriranje ispitnog uzorka. Iako je poželjno ukloniti svu ekscentričnost mehaničkim putem, to nije uvijek moguće, tako da se preostala ekscentričnost obično uklanja matematičkim putem. Ako postoji velika greška poravnavanja, izgledno je da će se pojaviti pogreške pri korištenju matematičkih rješenja.

Postoji više načina poravnavanja ticala kako bi se izbjegla pogreška poravnavanja. Moguće je koristiti ispitivani uzorak, pogotovo ako je uzorak oblika šiljka ili je manjeg promjera. Ako je uzorak većeg promjera, poravnavanje je teže izvedivo te se najčešće koristi Cresting etalon. To je vrsta etalona koja se koristi za procjenu kutnih pomaka nastalih zbog sfernih vrhova ticala na uređajima za mjerenje kružnosti. Primjer Cresting etalona prikazan na slici (Slika 21) je mali šiljak koji se nalazi na postolju. Idealno bi bilo da postolje ima tri noge kako bi se omogućilo što stabilnije postavljanje etalona na uređaj za mjerenje kružnosti. Etalon se postavlja i centrira na stol uređaja. Kada je etalon ispravno postavljen, često je moguće uočiti grešku poravnavanja pogledom odozgo te se može prilagoditi položaj ticala prema postavljenom etalonu. Ako greška poravnavanja nije vidljiva okom, tada se koriste očitavanja na uređaju tako što se pronade položaj pri najvećem pomaku.

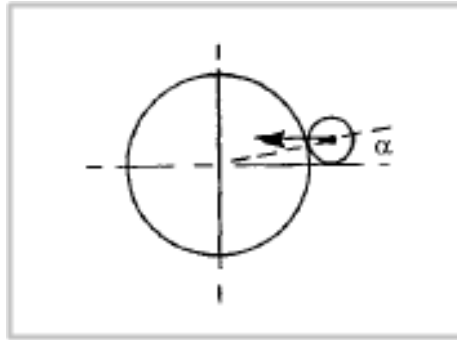
Pogrešan kontakt ticala i ispitivanog uzorka uzrokuje određenu količinu šuma koja je uključena u podatke mjerenja, ali ne utječe značajno na rezultate mjerenja obrađene korištenjem filtera. [4], [13]



Slika 21 Cresting etalon [13]

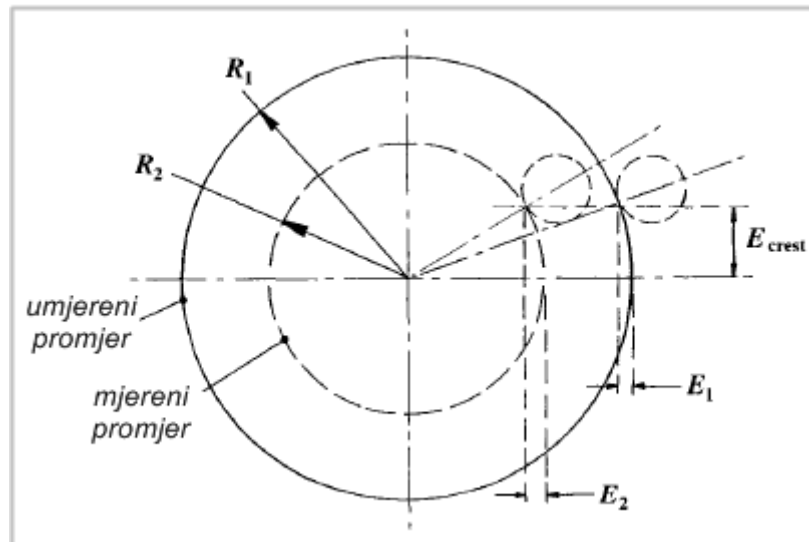
Na rezultate mjerenja mogu utjecati [4]:

- pogreške u mjerenjima „peak-to-valley“ - Ovo je vjerojatno najmanje značajna pogreška koju unosi loše pozicioniranje ticala, a njegova vrijednost je reda veličine $1 - \cos \alpha$ (gdje je α kutni pomak) (Slika 22). Primjerice, s promjerom ispitivanog uzorka od približno 10 mm i ticalom pomaknutim unutar 0,5 mm, α je $5,7^\circ$, što znači da je $(1 - \cos 5,7^\circ) = 0,005$, to jest uvođenje 0,5% pogreške u peak-to-valley mjerenju. Ako su promjeri veći od 10 mm, problem pozicioniranja ticala postaje još manje značajan.



Slika 22 Pogreška poravnavanja ticala [4]

- pogreške u apsolutnim polumjerima - Pri umjeravanju većeg promjera od onog kojeg se treba mjeriti (Slika 23), može doći do uvođenja greške gdje je $E_{rad} = E_2 - E_1$. Na primjer, ako je $E_{crest} = 0,5 \text{ mm}$, $R_1 = 50 \text{ mm}$ i $R_2 = 25 \text{ mm}$, onda je $E_{rad} = (5 \text{ } \mu\text{m} - 2,5 \text{ } \mu\text{m}) = 2,5 \text{ } \mu\text{m}$. To uvodi pogrešku od $2,5 \text{ } \mu\text{m}$ u apsolutnom polumjeru.



Slika 23 Pogreške u apsolutnim polumjerima [4]

- pogreške u centriranju i poravnavanju - Budući da se na nekim sofisticiranijim uređajima podaci o apsolutnom polumjeru koriste za obavljanje operacija automatskog centriranja i poravnavanja, tada se primjenjuju izračuni navedeni u prethodnoj točki. Takvi postupci neće spriječiti pojavljivanje preciznog centriranja i poravnavanja, ali će imati učinak na povećanje broja potrebnih operacija.

5.4 Umjeravanje korištenjem piezoelektričnih komponenti

Osnovna karakteristika piezoelektričnih elemenata je da mogu pretvoriti električnu energiju u mehanički oblik. Kako se narinuti napon mijenja, piezoelektrični element mijenja svoje dimenzije. Budući da je slobodno naprezanje ili pomak malen, ovakvi elementi se općenito ne

moгу izravno koristiti kao aktuatori u svom izvornom obliku, osim u slučaju ako se koriste visoke razine napona. Piezo aktuatori obično koriste mehanička pojačala za pretvaranje malog induciranog naprezanja piezoelektričnog materijala u veliki izlazni pomak, koji se može koristiti u praktičnoj primjeni. [14]

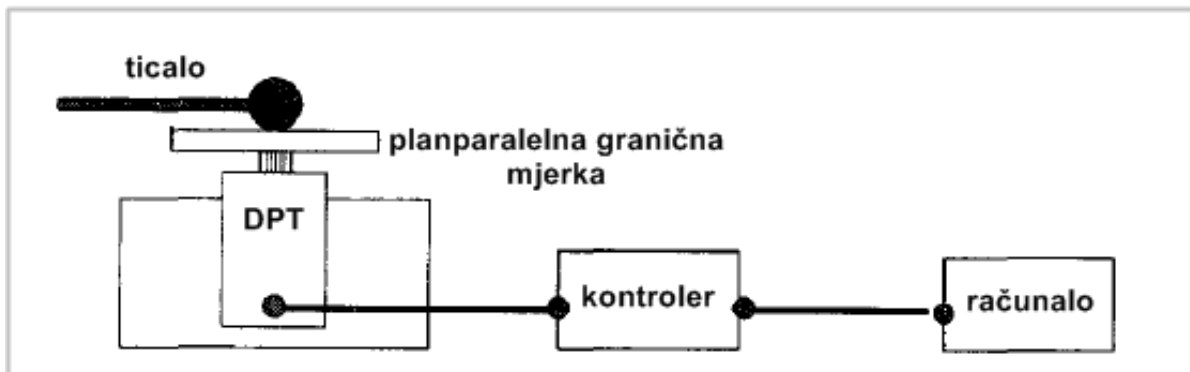
Primjer korištenja piezo aktuatora naveden je u radu autora Han Haitjema. U ovom primjeru sustav se temelji na Queensgate Digital Piezo Transducer (DPT). Sastoji se od piezo aktuatora koji stvara maksimalni pomak od 15 μm , a sustav se pokreće računalom putem IEEE sučelja. Linearnost je poboljšana povratnim sustavom koji se temelji na mjerenju položaja s kapacitivnim pretvornikom. Prema specifikaciji proizvođača, obnovljivost je bolja od nanometra, granična frekvencija je oko 300 Hz, a maksimalna brzina je 500 $\mu\text{m/s}$. [15]

Sustav je umjeren laserskim interferometrom. Sljedivost mjerenja laserskim interferometrom postiže se umjeravanjem valne duljine u vakuumu laserskog interferometra u usporedbi s jod stabiliziranim laserom koji služi kao etalon primarne duljine. U dobro definiranim uvjetima okoline može se postići relativno niska nesigurnost izmjerenog pomaka pomoću laserskog interferometra. Međutim, za male pomake mogu se pojaviti interpolacijske pogreške. U ovom slučaju prvo se umjerava DPT uzimajući laserski interferometar kao referencu. Nakon toga se kalibracijska krivulja provjerava na odstupanja koja se, ako su značajna, pripisuju interpolacijskim odstupanjima laserskog interferometra. [16]

Za ovo umjeravanje planparalelna granična mjerka zamijenjena je šupljom kutnom prizmom. DPT pokreće blok funkcija nominalne visine (primjerice 2 sekunde 0 nm, 2 sekunde 50 nm, 2 sekunde 0 nm, ...) te se ta nazivna visina uspoređuje s očitavanjem laserskog interferometra. Rezolucija digitalnog ulaza je 1 nm, dok je rezolucija laserskog interferometra 0,1 nm. Pokazalo se da je ponovljivost očitavanja laserskog interferometra bila 0,7 nm, a ponovljivost pozicioniranja DPT-a 0,2 nm. Pomak zbog digitalnog ulaza u DPT uspoređen je s očitanjem laserskog interferometra u koracima od 64 nm u cijelom rasponu od 15 μm te se dokazalo se da se kalibracijska krivulja može dobro opisati pomoću polinoma drugog reda uz prihvatljivu razinu ostataka. [15]

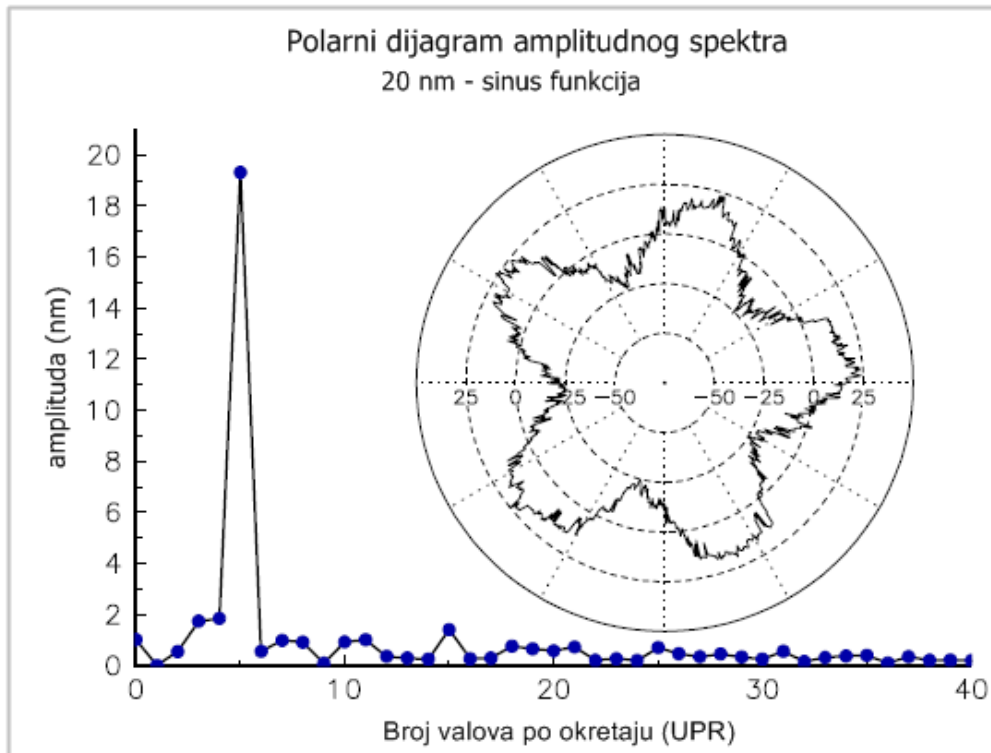
Nadalje, obavlja se umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti. Budući da se na uređaju inače koriste etaloni s odstupanjem u rasponu 20 nm – 60 nm, bitno je provesti umjeravanje u tom rasponu. Proces umjeravanja sastoji se od nekoliko koraka: Ticalo koje se umjerava uklonjeno je s uređaja, za stvaranje pomaka sinusoidalnog oblika koristi se DPT, na kojem je

montirana planparalelna granična mjerka (9 x 32 x 2 mm) te ticalo bilježi signal na način kao da se ispituje kružnost nekog predmeta (Slika 24).



Slika 24 Umjeravanje ticala pomoću DPT [16]

Utjecaj šuma uređaja na rezultat umjeravanja minimiziran je primjenom Fourierove analize na izmjereni signal i uzimanjem u obzir samo amplitude Fourierove komponente koja odgovara upotrijebljenoj sinusnoj frekvenciji. Prikazan je polarni dijagram za signal s amplitudom 20 nm i frekvencijom koja odgovara 5 UPR (*undulation per revolution* – broj valova po okretaju) (Slika 25). Iako graf ukazuje na veliku količinu šuma, signal od 5 UPR s amplitudom od 19,6 nm može se vrlo dobro razlikovati od šuma u Fourierovom spektru. Ponovljena mjerenja pokazala su da je standardno odstupanje komponente od 5 UPR 0,8 nm za jedno mjerenje, što za ispitivano ticalo dokazuje da su odstupanja unutar 2 nm od nominalnog pomaka za amplitude između 4 nm i 100 nm. [15]



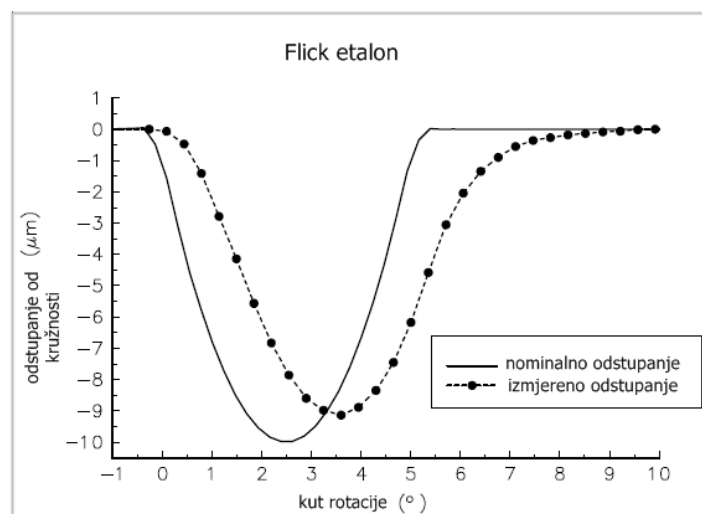
Slika 25 Polarni dijagram amplitudnog spektra [15]

Funkcija frekvencije odziva ticala može se odrediti na dva načina:

- generiranjem pomaka u obliku sinusa s povećanjem frekvencije
- generiranjem funkcije s naglim skokom u obliku oštrog vrha (impulsom), zatim mjerenjem signala, primjenom Fourierove transformacije na primijenjeni i izmjereni signal te na kraju dijeljenjem amplitude (izmjerena/nominalna) na svakoj frekvenciji.

Obje metode primijenjene su na ticalo. Prva metoda primijenjena je generiranjem pomaka u obliku sinusa s amplitudom od $0,5 \mu\text{m}$ i frekvencijom između $0,2 \text{ Hz}$ i 30 Hz (što odgovara frekvencijama odstupanja od kružnosti između 2 UPR i 300 UPR). Druga metoda primijenjena je generiranjem impulsa s maksimalnom visinom od $1 \mu\text{m}$ i širinom od 20 ms , pretpostavljajući da značajke DPT-a ne utječu na rezultate. Kada se uspoređuju obje metode, može se zaključiti da je prva metoda preciznija u smislu da se dobije sljedivi rezultat kojem se može pripisati nesigurnost, a prednost druge metode je što daje brzi uvid u funkciju odziva (dovoljno je jedno mjerenje). Ovaj rezultat znači da sustav (senzor / pojačalo / digitalizator) ima veća odstupanja za harmonike veće od 40 UPR . To obično nije problem za etalone za kružnost s nižim harmonicima, ali se za etalone s višim harmonicima mogu pojaviti značajnija odstupanja. [15]

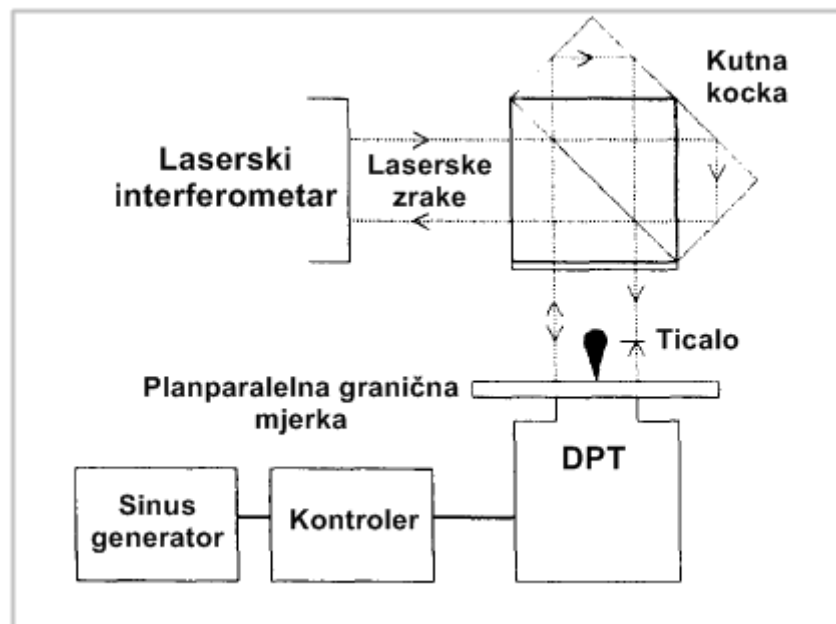
Osim navedenih funkcija, DPT može generirati i funkcije sličnije profilima realnih predmeta. Kao primjer simulirano je mjerenje Flick etalona. Oblik etalona predstavlja cilindar zanemarivog odstupanja od kružnosti sa zarezom poznate dubine u odnosu na cilindar. Budući da se ispituje kružnost, ticalo se ne bi trebalo micati na cilindričnom dijelu etalona, a pomak bi se trebao dogoditi samo kada se pojavi zarez. Zato se Flick etalon simulira kao ravna linija s udubinom visine koja odgovara dubini zarez. Kako se DPT pomiče, tako pokreće ticalo kao kad bi se mjerio Flick etalon. Na slici (Slika 26) uspoređen je računski profil gibanja od $10\ \mu\text{m}$ zajedno s profilom izmjerenim ticalom. Jasno je vidljivo da je stvarni profil donekle iskrivljen i da ne doseže maksimalnu dubinu od $10\ \mu\text{m}$, već umjesto toga mjeri vrh od $9,2\ \mu\text{m}$ što znači 8% odstupanja. Kad se isti profil generira sporije, tj. prividni zarez postaje širi, ticalo može pratiti profil i mjeri ispravnu dubinu od $10\ \mu\text{m}$. Ove simulacije daju izravan uvid u odstupanja koja se mogu pojaviti zbog ograničenog frekvencijskog odziva ticala u stvarnom mjerenju. Također pokazuje da Flick etalon nije odgovarajuće sredstvo za umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti ako sustav ticala ne prenosi pravilno visoke frekvencije. [15]



Slika 26 Teorijski i izmjereni Flick etalon [15]

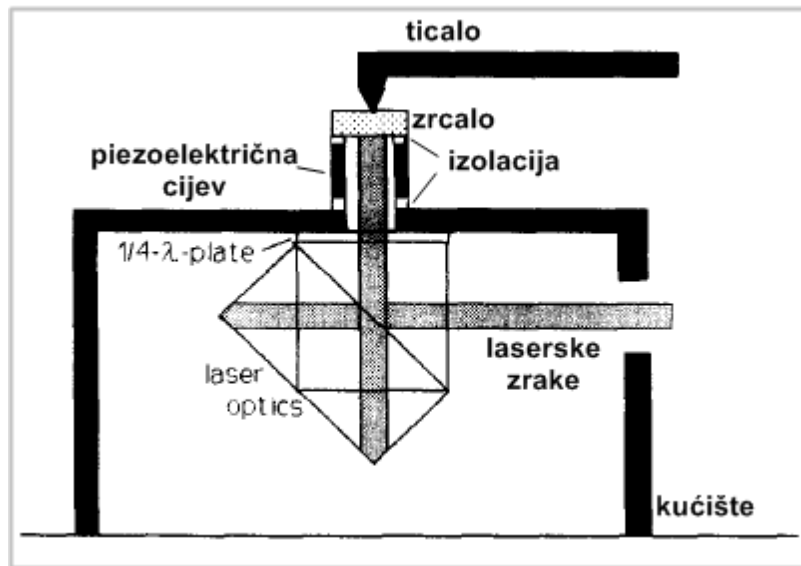
Nadalje, u radu H. Haitjema i G. J. Kotte opisana su dva sustava za dinamičko umjeravanje ticala: piezo sustav sa zatvorenom petljom i s otvorenom petljom. U piezo sustavu sa zatvorenom petljom (Slika 27) korišten je DPT s prethodno provjerenim performansama. Tako je ponovljivost pomaka DPT-a $0,2\ \text{nm}$, dok je izvediv pomak do $15\ \mu\text{m}$ s maksimalnom frekvencijom od oko 100Hz . PGM djeluje kao ravna referentna točka za pomično ticalo i istovremeno kao optičko kontrolno staklo za laserski interferometar koji bilježi kretanje PGM dok ju ticalo skenira. Nagib je oko $5''$ i pokazuje histerezu kada se PGM pomiče gore ili dolje.

To podrazumijeva pogrešku od oko 0,2% za svaki milimetar podešavanja ili pomicanja osi. [17]



Slika 27 Piezo sustav sa zatvorenom petljom [17]

Piezo sustav s otvorenom petljom (Slika 28) dizajniran je za postizanje većih frekvencija i za fleksibilnije pričvršćivanje ticala od sustava sa zatvorenom petljom, ali s nešto manjom ponovljivošću i mnogo manjom linearnošću generiranog pokreta zrcala. Ovakav sustav temelji se na istom "standardnom" optičkom rasporedu ravnih zrcala za laserske interferometre kao i sustav sa zatvorenom petljom, a razlika je da se ulazni i izlazni snop laserskog interferometra preklapaju. U jednoj od zraka interferometra ravno je zrcalo pričvršćeno na piezoelektričnu cijev. Da bi se postigla maksimalna širina spektra, koristi se piezoelektrična cijev s otvorenom petljom, a masa zrcala je minimalna. Kod pričvršćivanja zrcala na cijev i cijevi na kućište potrebno je obratiti pozornost na povećanje duljine cijevi, ali i na promjenu promjera cijevi pri primjeni napona. Izolacija s obje strane cijevi sastoji se od tri mala keramička cilindra koji su zalijepljeni između cijevi i zrcala s jedne strane i cijevi i kućišta s druge strane. Laserska optika montirana je ispod piezoelektrične cijevi, tako da ticalo ima jednostavan pristup s gornje strane. Promjenom izlaznog napona HV pojačala od 0 V do 1000 V stvara se pomak od 10 μm . [17]

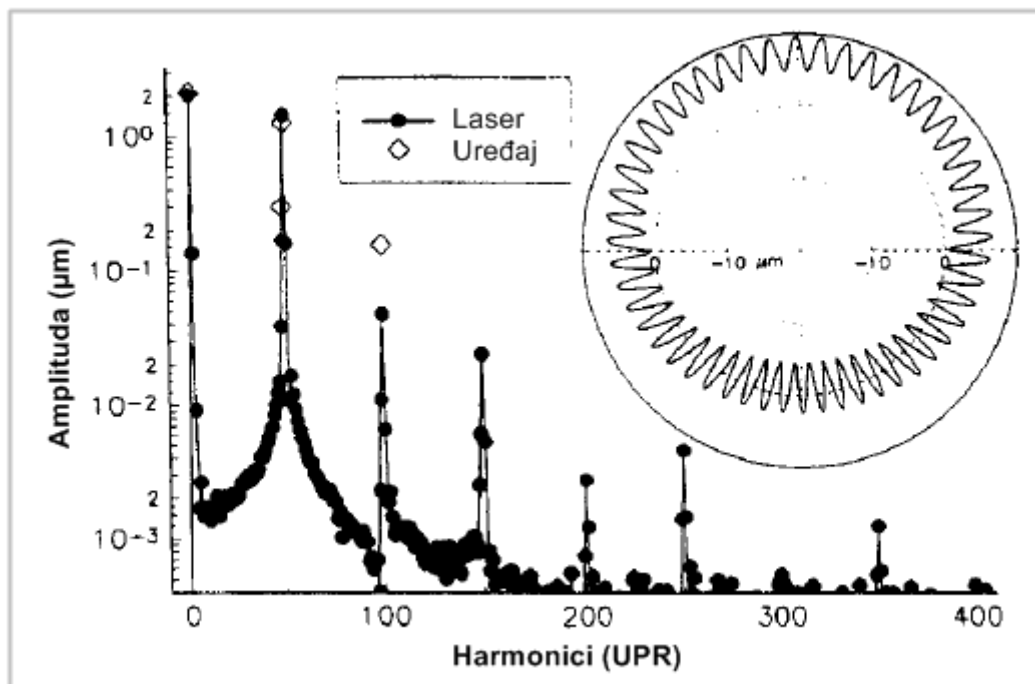


Slika 28 Piezo sustav s otvorenom petljom [17]

Umjeravanje se provodi za ticalo za ispitivanje kružnosti kuglica. Kuglice koje se mjere se fiksiraju u jednom položaju i ne može ih se dalje centrirati, što dovodi do ekscentričnosti od oko $2 \mu\text{m}$ za svako mjerenje. Brzina rotacije može biti različita, a za ovo umjeravanje korišteno je 4 okretaja / min i 1024 točke po okretaju. Ticalo je premješteno s uređaja i postavljeno u piezo sustav s otvorenom petljom. U ovaj sustav doveden je signal koji odgovara praktičnom mjerenju. Ekscentričnost od $2 \mu\text{m}$ simulirana je sinusnim signalom s amplitudom od oko 2 mikrometra i frekvencijom koja odgovara frekvenciji rotacije stola; u ovom slučaju $0,066 \text{ Hz}$ (4 okretaja / min). Na ovaj signal superponiran je drugi sinusni signal koji odgovara frekvenciji i amplitudi harmonika kojeg se želi umjeriti.

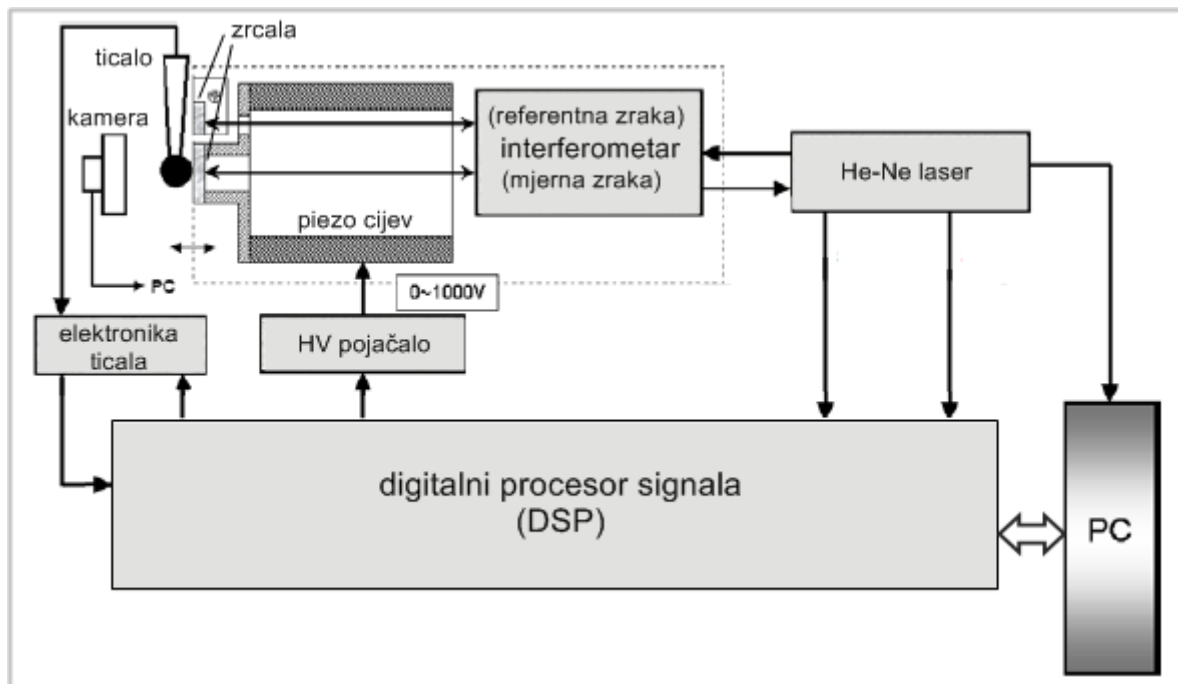
Rezultati uređaja pri umjeravanju su kao kada se provodi mjerenje odstupanja od kružnosti nekog ispitnog uzorka; laserski interferometar prikupio je 8192 točaka u 15 s. Podatci laserskog interferometra analizirani su korištenjem algoritma brze Fourierove transformacije, a za ticalo je korišten sustav analize uređaja. Na slici (Slika 29) prikazani su rezultati od zadanog 50 UPR signala s amplitudom od $1,5 \mu\text{m}$. U spektru su prisutni viši harmonici zbog nelinearnosti piezoelektrične cijevi. Također su naznačene vrijednosti mjerene ticalom: ekscentričnost (prvi harmonik) i tri ostala dominantna harmonika od 49, 50 i 100 UPR. Amplituda harmonika od 50 UPR mjerena ticalom iznosi $1,26 \mu\text{m}$, dok je referentna vrijednost mjerena laserskim interferometrom $1,44 \mu\text{m}$. Ovakvo odstupanje prisutno je i pri drugim mjerenjima, što ukazuje na učinak filtriranja s graničnom frekvencijom koja odgovara 70 UPR, čak i kada rezultati mjerenjem ticalom nisu filtrirani. Veći harmonici od 100 UPR

prisutni su zbog nelinearnosti ticala, što se potvrđuje mjerenjem s različitim amplitudama. Na ovaj način također se mogu umjeriti karakteristike filtriranja. [17]



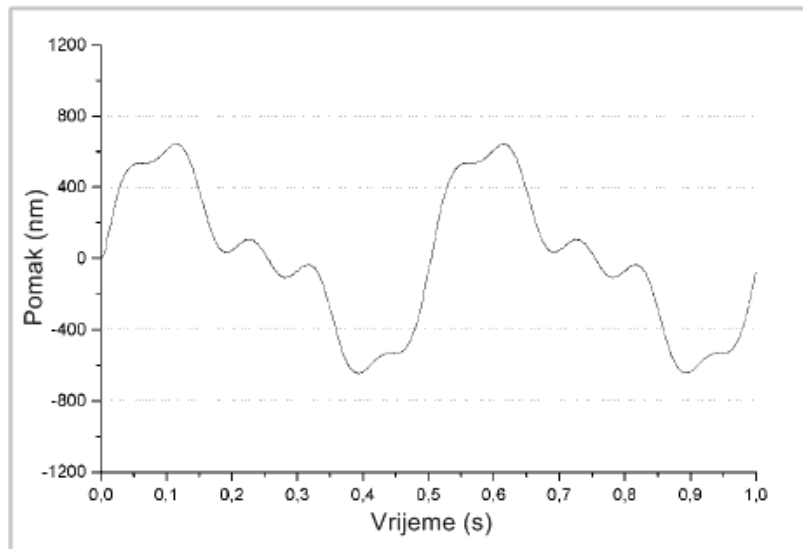
Slika 29 Amplitudni spektar izmjenog signala [17]

U Physikalisch-Technische Bundesanstalt prikazan je još jedan primjer korištenja piezoelektrične cijevi za umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti. (Slika 30)



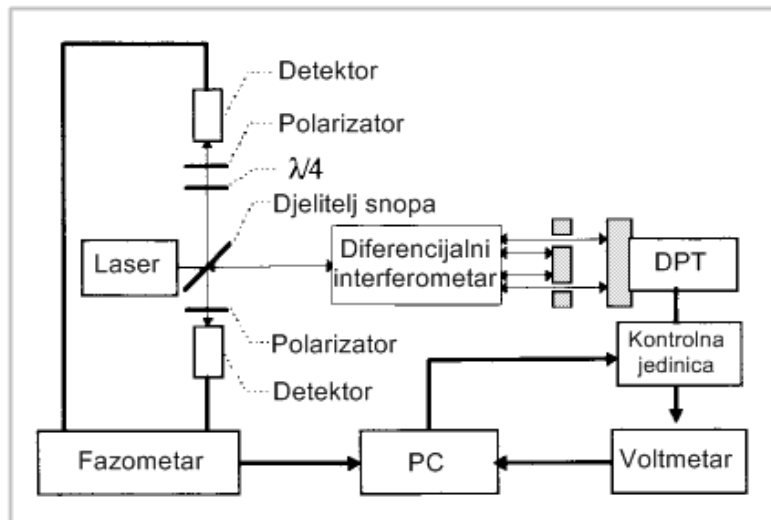
Slika 30 Sustav za umjeravanje ticala pomoću piezo aktuatora [18]

Sustav se, između ostalog, sastoji od piezo cijevi, interferometra, zrcala, računala i digitalnog procesora signala (DSP). Samostalni DSP odvojen od računala odabran je jer je rad samo s jednim zadatkom u stvarnom vremenu izuzetno bitan za kontrolu pozicije piezo elementa. Kretanje piezo cijevi mjeri se u stvarnom vremenu minijaturnim interferometrom i zatvorenom petljom upravljanom DSP-om, dakle interferometar radi kao senzor pomaka. Piezo cijev se koristi kako bi zrake interferometra mogle putovati kroz cijev. Mjerna zraka interferometra prolazi kroz geometrijsko središte piezo cijevi i pojavljuje se na pomičnom zrcalu, koje je u dodiru s ticalom i pokreće ticalo. Referentna zraka interferometra putuje blizu geometrijskog središta piezo cijevi i pada na drugo fiksirano zrcalo. Budući da lokalni utjecaji okoliša utječu na obje zrake, postavljanje zraka paralelno i što bliže jednu drugoj može umanjiti takve utjecaje. Za kontrolu gibanja piezo elementa implementiran je sustav upravljanja sa zatvorenom petljom koji eliminira nesavršenosti piezo aktuatora, poput histereze, nelinearnosti i puzanja. Interferometar detektira pomak piezo elementa te se optičko-elektronički signali s interferometra obrađuju i zatim šalju analogno-digitalnom pretvaraču (ADC), koji je jedan modul DSP-a. DSP provodi interpolaciju pozicije piezo aktuatora, koja se zatim uspoređuje sa željenom pozicijom. HV pojačalo pojačava napon za pokretanje piezo cijevi. DSP istovremeno prikuplja podatke pozicije s ticala i interferometra za daljnju usporedbu. Nakon umjeravanja, podatci o poziciji s interferometra i ticala mogu se prenijeti na računalo radi daljnje obrade podataka, kao što su FFT, filtriranje i usporedba, te se na taj način mogu procijeniti dinamičke performanse ticala. Dodatno, da bi se vrh ticala poravnao sa središtem zrcala i tako postigla minimalna pogreška, na dodirnoj površini pokretnog zrcala nalazi se niz koncentričnih krugova različitih promjera, a kamera je postavljena za praćenje stanja poravnanja. Poravnavanje je završeno kada vrh ticala savršeno odgovara jednom od krugova ili ako je jednaka udaljenost od najbližeg kruga. U usporedbi s metodom poravnanja okom, ova metoda pruža pogodan način za takvo umjeravanje i uvelike poboljšava točnost poravnanja. Pomoću ovakvog sustava dobiveni su uvidi u histerezu piezo cijevi, nagibni kut piezo cijevi, šum cijelog sustava. Također je generiran pomak piezo cijevi koji odgovara Multi-wave etalonu (Slika 31), čiji se profil sastoji od tri komponente (amplituda, frekvencija, faza): 500 nm, 1 Hz, 0°; 250 nm, 2 Hz, 0°; 100 nm, 5 Hz, 0°. [18]



Slika 31 Simulirani Multi-wave etalon [18]

Nadalje, opisan je sustav za umjeravanje DPT korištenjem diferencijalnog interferometra (Slika 32). Princip mjerenja zasnovan je na korištenju dvopropusnog diferencijalnog interferometra i pomaka piezo aktuatora upravljanim računalom. Umjeravanje se provodi ostvarivanjem pomaka zrcala na DPT-u zadavanjem jednakih pomaka koji se reguliraju petljom s računalom. Izlazna zraka lasera sastoji se od dvije ortogonalne komponente, linearno polarizirane i razdvojene u frekvenciji za oko 3 MHz. Obje komponente su podijeljene djelitelem snopa u referentni i mjerni snop. Dvije komponente u referentnom snopu prolaze kroz $\lambda / 4$ ploču i polarizator te padaju na fotodetektor. Mjerni snop ulazi u diferencijalni interferometar, gdje polarizirajući djeliteľ snopa razdvaja dvije komponente na referentni i mjerni snop. Referentna zraka reflektira se fiksnim dijagonalnim zrcalom, dok se mjerna zraka reflektira pomičnim zrcalom kojim upravlja DPT čije umjeravanje se provodi. Pomak pomičnog zrcala u mjernom kraku dovodi do promjene fazne razlike između mjernog i referentnog kraka, što rezultira promjenom intenziteta ponovno kombiniranog vala.

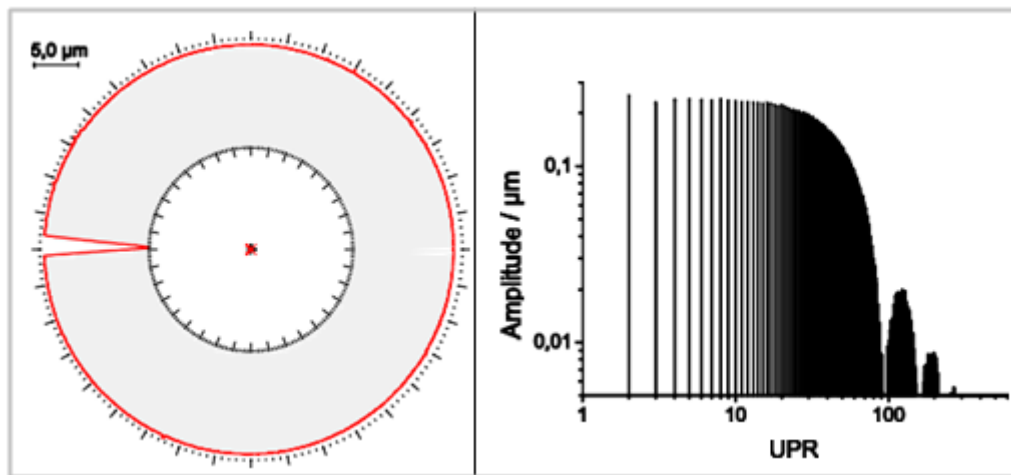


Slika 32 Umjeravanje DPT korištenjem interferometra [19]

Dvije zrake napuštaju interferometar i prolaze kroz polarizator, a zatim padaju na drugi fotodetektor, koji prati rezultate mjernog signala. Referentni i mjerni signal dovode se u fazometar, koji daje njihovu faznu razliku kao mjeru pomaka kojeg se umjerava, dakle pomak se određuje usporedbom faze signala iz interferometra s referentnim signalom. [19]

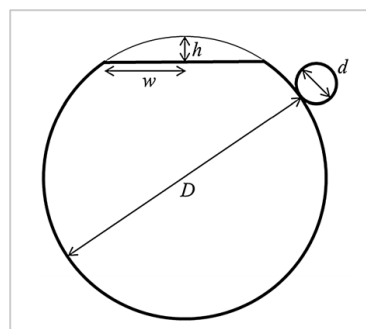
5.5 Umjeravanje pomoću Flick etalona

Flick etaloni se često koriste u akreditiranim laboratorijima i industriji. Postoje u različitim veličinama i tehničkim realizacijama, a u ovom primjeru korišten je etalon sa zarezom od 12 μm na osnovnom cilindru od 20 mm. Izmjereni profil će biti sličniji nominalnom kada je, između ostalog, promjer vrha ticala manji i kada je broj prikupljenih točaka po okretaju što veći. Na slici se vidi da spektar naglo propada i da se ne pojavljuju veće amplitude od 0,2 μm . (Slika 33) Glavni nedostatak Flick etalona je malen dinamički sadržaj za veće harmonike. Amplituda signala ovakvog etalona nema značajniji doprinos od harmonika većih od oko 75 UPR. Svi harmonici manji od 75 UPR doprinose signalu, dok su pojedinačne amplitude prilično niske u usporedbi s odstupanjem od kružnosti od 12 μm . Svako umjeravanje treba biti provedeno u odgovarajućem mjernom području kakvo je inače prilikom mjerenja odstupanja od kružnosti, iako stvarno umjeravanje ovisi o pojedinačnim amplitudama harmonika, pa je za ovakve etalone prilično nizak omjer signal-šum (SNR – *signal to noise ratio*). [4], [10]



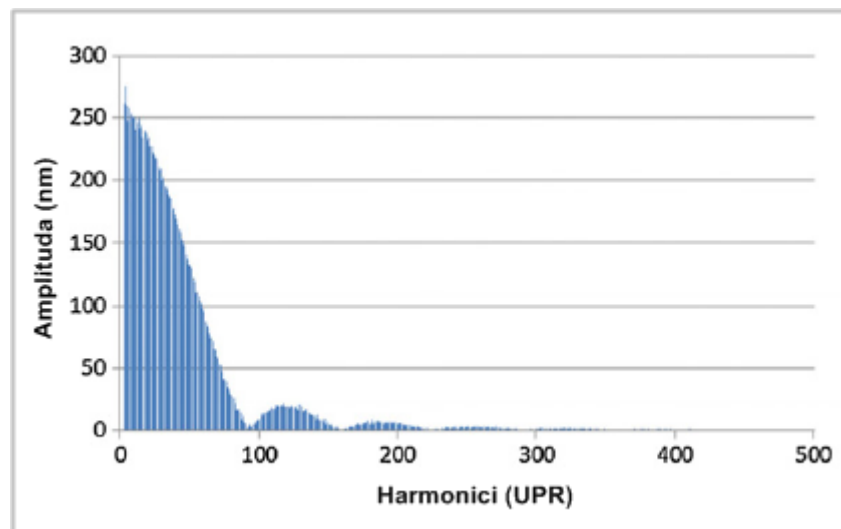
Slika 33 Simulirani Flick etalon i amplitudni spektar [10]

Primjena Flick etalona je učinkovita i funkcionalna jer omogućuje umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti u uobičajenom dinamičnom načinu rada. Do neke se mjere Flick etaloni mogu čak koristiti za testiranje primjene filtera. Ograničenja proizlaze iz činjenice da se odstupanje ticala može umjeriti samo za jednu vrijednost i da ograničena kvaliteta Flick etalona sprječava postizanje najbolje moguće nesigurnosti, kako za umjeravanje etalona, tako i za primjenu etalona pri umjeravanju uređaja. Stoga je izuzetno bitno umjeriti etalon i poznavati njegove dimenzije, no to je prilično kompleksan zadatak. Na slici (Slika 34) su prikazane značajne dimenzije Flick etalona koje definiraju etalon i vrh ticala. Te dimenzije su promjer cilindra (D), visina koja odgovara vrhu kružnice u središtu ravnog segmenta (h), promjer vrha ticala (d) te polovica širine ravnog segmenta (w). U ovom slučaju promjer D iznosi 19 mm, a visina h je 12 μm . Veličina koja se mjeri je $RONt$, približno dimenziji h . Vrijednost $RONt$ do neke mjere ovisi o referentnoj kružnici odabranoj za ispitivanje kružnog profila, odnosno o izboru između kružnice najmanjih kvadrata (LSC), najmanje kružne zone (MZC), najmanje opisane kružnice (MCC) ili najveće upisane kružnice (MIC). LSC i MIC su skoro iste, dok MZC i MCC imaju tendenciju prema nešto nižim vrijednostima. [20]



Slika 34 Dimenzije Flick etalona i vrha ticala [20]

Za svrsishodno umjeravanje Flick etalona potrebno je utvrditi faktore koji utječu na uređaj. U ovom je slučaju prethodno provedeno statičko umjeravanje ticala usporedbom s visoko preciznim inkrementalnim indikatorom dužine, koji je umjeren laserskim interferometrom. Na slici (Slika 35) vidljivo je da su dominantni harmonici do oko 80 UPR. Što se tiče harmonijskog spektra (UPR), on ovisi o brzini vrtnje vretena. Tako je pri 4, 6 i 8 okretaja u minuti (*Revolution per Minute* - RPM), vrijednost granične frekvencije f_c (50 % prigušenje) 520 UPR, 346 UPR i 260 UPR. [20]



Slika 35 Amplitudni spektar umjeravanog Flick etalona [20]

Također se htjelo provjeriti kako ograničena širina spektra mjernog sustava utječe na $RONt$ vrijednost filtriranih profila. Uspoređene su vrijednosti $RONt$ kakve bi se dobile bez ograničenja širine spektra za profile filtrirane s 500 UPR, 150 UPR, 50 UPR i 15 UPR. Zatim su izračunate relativne promjene $RONt$ za tri različita smanjenja širine spektra. Smanjenje vrijednosti $RONt$ je približno -0,2%, -0,5% i -0,8%, osim za 15 UPR, na što je znatno manje utjecalo ograničenje širine spektra. To pokazuje da u normalnom načinu rada promatranog uređaja, tj. pri 6 okretaja u minuti što odgovara 346 UPR graničnoj frekvenciji, mjerenja Flick etalona sadržavaju sustavnu grešku takvu da su izmjerene vrijednosti manje za oko 0,5%. Eksperimentalnom provjerom smanjenja filtriranih vrijednosti $RONt$ zbog ograničene širine spektra potvrđene su ove pretpostavljene vrijednosti. [20]

Za potpuno valjanu procjenu potrebno je istražiti i utjecaj odstupanja od idealnog oblika. U pravilu, odstupanja na cilindričnom dijelu etalona ulaze u izračun vrijednosti $RONt$, a utjecaj odstupanja ovisi o njihovom položaju u odnosu na ravni dio i o referentnoj kružnici. U ovom slučaju, ne uzimajući u obzir ravni dio, preostalo odstupanje od kružnosti iznosi 0,32 μm .

Također je izmjereno odstupanje ravnog dijela etalona. Uočene su i poneke lokalne devijacije u obliku hrapavosti, no njihov iznos nije veći od $0,01 \mu\text{m}$ te stoga nema značajan utjecaj na rezultate. Greška u paralelnosti ravnog dijela etalona u odnosu na os cilindra bi mogla utjecati na rezultate, no mjerenja na različitim visinama etalona nisu pokazala značajan utjecaj visine na mjerne rezultate. Što se tiče broja prikupljenih točaka po okretaju, za ovakav etalon i 8192 točaka po okretaju najveća nesigurnost iznosi $0,7 \text{ nm}$, dok bi za 1024 točke iznosila 45 nm . Procijenjeno je da utjecaj buke (pretvarač, pojačalo, vibracije) i preostalih neispravljenih grešaka vretena ne iznosi više od 10 nm . [20]

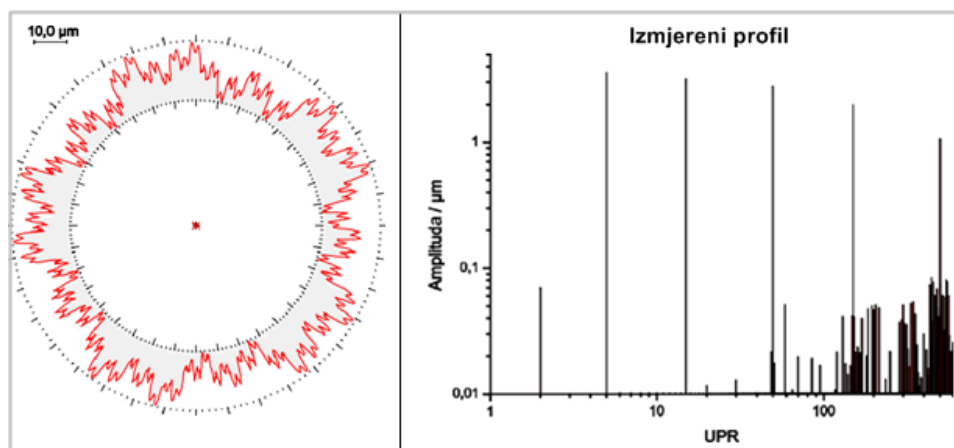
Poznato je da je prikaz ispitivanog profila izobličen u odnosu na stvarni profil zbog utjecaja promjera vrha ticala. Prisutan je utjecaj na amplitudu izmjerenog profila samo ako je polumjer vrha ticala veći od najmanjeg polumjera zakrivljenosti profila, ali profil je izobličen već za mnogo manje promjere vrha ticala. Takav učinak se događa i pri mjerenju Flick etalona. Iako amplituda, tj. vrijednost $RONt$, ostaje nepromijenjena, profil se izobličava blizu rubova, što rezultira različitim harmonicima i tako utječe na filtrirane vrijednosti. Procjena utjecaja promjera vrha ticala na $RONt$ za različite postavke filtera provedena je numeričkom simulacijom i eksperimentalnom potvrdom pomoću ticala promjera 4 mm , 2 mm i 1 mm . Budući da su dominantni harmonici do oko 80 UPR , vrijednosti od 50 UPR i 15 UPR su više pogođene od onih koje su filtrirane samo u domeni viših harmonika. Iako se eksperimentalne vrijednosti dobro podudaraju s njihovom simuliranim vrijednostima, uočene su razlike od teorijske vrijednosti promjera. To je vjerojatno zbog sadržaja visokih harmonika izmjerenog profila, uzrokovanih bukom i nesavršenostima oblika, na što također utječe filtriranje. [20]

Prema ISO 12181-2, predložen je način određivanja dimenzije vrha ticala; potreban je omjer $D : r$, koji mora biti najmanje 50 ako se koristi filtriranje u području od 150 UPR ili barem područje od 150 UPR do 500 UPR . Za uobičajeno korišteni Flick etalon od $12 \mu\text{m}$, kao što je i u ovom slučaju, sfera ticala promjera 1 mm rezultira u omjeru $D : r = 38$, dakle nedovoljno zahtjevima norme. S druge strane, budući da Flick etalon služi kao referenca za naknadna umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti, uvjeti bi trebali biti što sličniji onima pri stvarnim mjerenjima. Stoga se smatra da je promjer sfere ticala od 1 mm dovoljan. [20], [21]

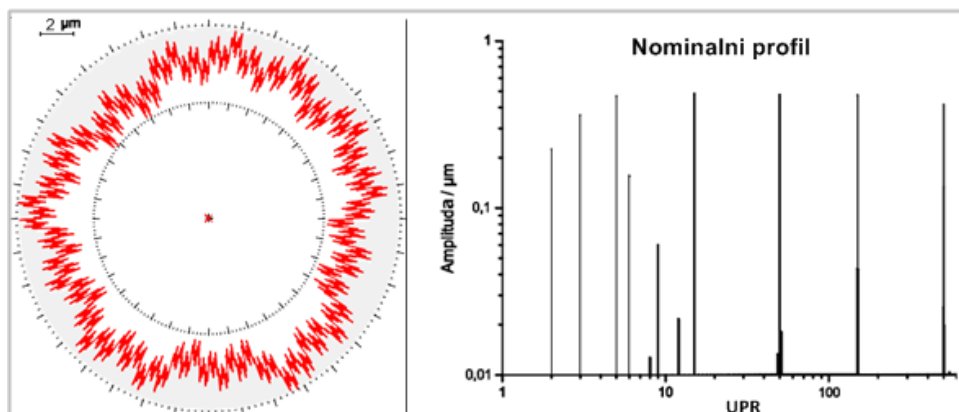
5.6 Umjeravanje pomoću MWS etalona

Povodom međulaboratorijske usporedbe u projektu EURAMET 649 mjerena su dva MWS-a, s oznakama MWS-1 i MWS-8. MWS-1 je vanjski cilindar (Slika 36), a MWS-8 unutarnji cilindar (Slika 37). Oba profila sastoje se od superpozicije nekoliko sinusoidalnih valova, od 5 ,

15, 50, 150 i 500 UPR, no kod MWS-8 je vidljivo da su prisutni i dodatni harmonici. Zbog kompliciranije proizvodnje unutarnjeg cilindra, MWS-1 je preciznije izrađen od MWS-8. Provedenim ispitivanjem uočeno je da je spektralna analiza MWS-a stabilnija i daje bolje iskoristive rezultate od primjerice mjerenja parametra $RONt$. Razlog je taj što je spektralna analiza integralna metoda koja koristi sve prikupljene točke, dok se za mjerenje $RONt$ koristi tek nekolicina točaka potrebnih za matematičko računanje. Također je primijećeno da se pozadinski šum može gotovo potpuno potisnuti koncentriranjem na dominantne amplitude (nominalni profil), a takav šum izravno utječe na $RONt$ procjenu. Još jedna prednost je da je spektralna analiza manje osjetljiva na grešku umjeravanja ticala od $RONt$ procjene. [10]



Slika 36 MWS-1 i amplitudni spektar izmjerеног profila [10]

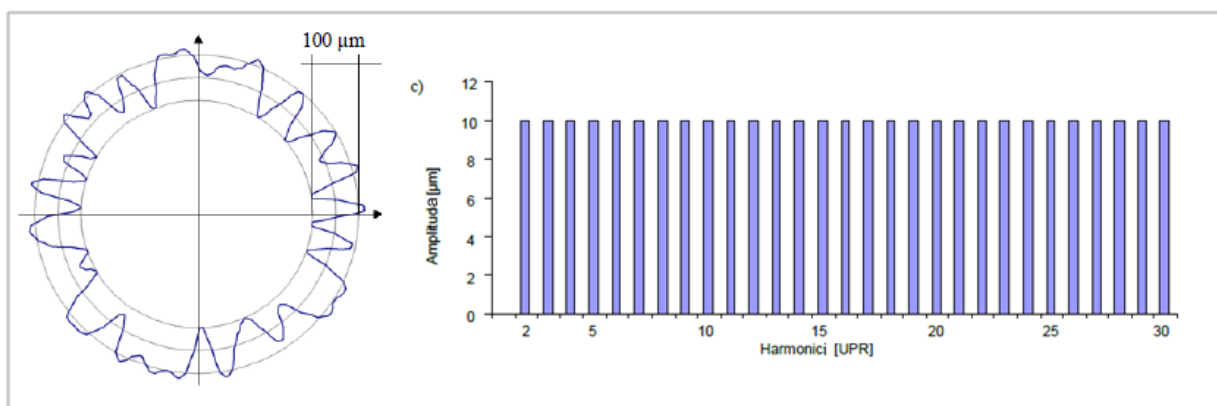


Slika 37 MWS-8 i amplitudni spektar nominalnog profila [10]

Budući da MWS etaloni nisu standardizirani, prilagođavaju se svakom pojedinačnom sustavu ovisno o specifikacijama sustava i pogreškama koje se žele detektirati te naknadno ukloniti ili smanjiti. Tako su predložena dva etalona za kvantificiranje izvora grešaka koje se nalaze u velikom mjernom sustavu za ispitivanje rotora velikih razmjera. Izvori pogrešaka za koje se očekuje da će biti pronađeni su pogreške pretvornika, pogreška kutne orijentacije i pogreška

pozicioniranja pretvornika. Termička ekspanzija i vibracije mjernog okvira su drugi mogući izvori pogrešaka.

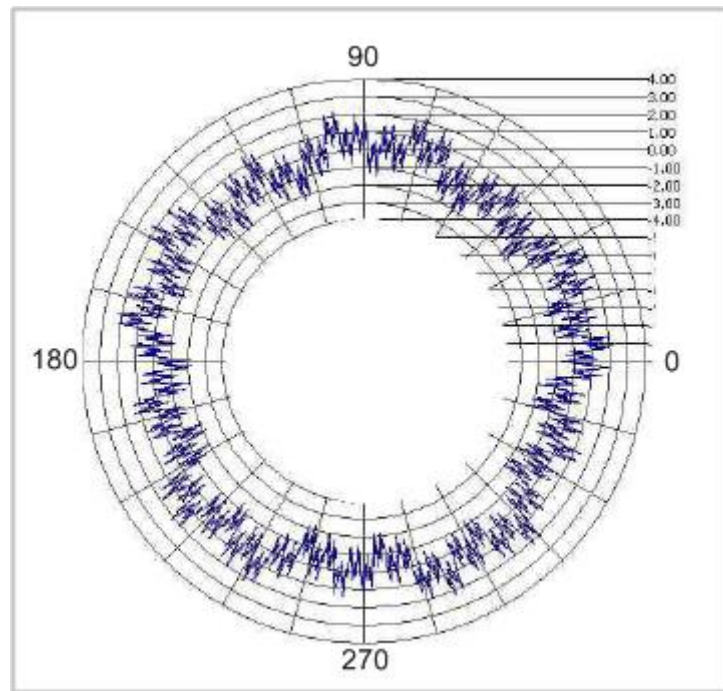
Uobičajeno su etaloni za mjerenje odstupanja od kružnosti znatno manji od promjera od 500 mm i najčešće su predviđeni za korištenje u mjeriteljskim laboratorijima te nisu pogodni za osiguravanje sljedivosti za mjerenje velikih dijelova u industriji. Zato je predložen etalon tipa B koji je disk promjera 503 mm i debljine 50 mm, što je dovoljno za robusnost, a nije preteško za rukovanje. Na vanjskom cilindru ima jedan karakterističan oblik vala od 21 UPR s odstupanjem od kružnosti od 25 μm . Etalon tipa C (Slika 38) je asimetrični Multi-wave etalon (2 UPR – 30 UPR), istog promjera i debljine kao i etalon tipa B. [22]



Slika 38 Asimetrični Multi-wave etalon [22]

Izvršena su mjerenja na tri različita uređaja za mjerenje kružnosti u različitim laboratorijima. Rezultati prikazani u obliku amplituda harmonika pokazuju da je odstupanje harmonika 3 UPR – 30 UPR između različitih mjernih uređaja manje od 1 μm . Odstupanje drugog harmonika između mjernih uređaja je 1 μm i 2,3 μm . Još uvijek je potrebna potpuna procjena nesigurnosti, ali ovi prvi rezultati pokazuju da su moguća pouzdana mjerenja kružnosti velikih rotora u industriji. [22]

Prikazan je još jedan primjer umjeravanja uređaja pomoću Multi-wave etalona. Etalon je proizveden tako da ima različite harmonike (pri 15 UPR, 50 UPR, 150 UPR i 500 UPR) približno istih amplituda i stoga je najprikladniji za ispitivanje uređaja za mjerenje kružnosti, uključujući njihov dinamički odziv i filtriranje. Na slici (Slika 39) prikazan je izmjereni profil. [12]



Slika 39 Izmjereni profil Multi-wave etalona [12]

5.7 Popis znanstvenih radova

U tablici (Tablica 3) mogu se naći znanstveni radovi povezani s umjeravanjem uređaja za mjerenje kružnosti.

Tablica 3 Popis znanstvenih radova

Referenca	Naslov
[2]	Statičko umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti
[9]	Novel multi-wave standards for the calibration of form measuring instruments
[10]	A comparison of sensitivity standards in form metrology - Final results of the EURAMET project 649
[11]	Uncertainty analysis for roundness measurements by the example of measurements on a glass hemisphere
[12]	A primary roundness measuring machine
[14]	A simple interferometric method to measure the calibration factor and displacement amplification in piezoelectric flexensional actuators
[15]	Traceable dynamic calibration of probes of roundness and roughness testers in the nanometric region using a digital piezo transducer
[16]	Dynamic probe calibration in the μm region with nanometric accuracy

[17]	Dynamic probe calibration up to 10 kHz using laser interferometry
[18]	A novel piezo vibration platform for probe dynamic performance calibration
[19]	The IMG C Calibration Setup for Microdisplacement Actuators
[20]	Calibration of Flick standards
[22]	New material standards for traceability of roundness measurements of large scale rotors
[23]	Design and calibration of a parallel-moving displacement generator for nanometrology
[24]	Interferometric calibration of microdisplacement actuators
[25]	Basics of highest Accuracy Roundness Measurement
[26]	Analysis of Linearity and Frequency Response of a Novel Piezoelectric Flexensional Actuator Using a Homodyne Interferometer and the J1–J4 Method
[27]	Development of the Probe Calibration System for the Roundness Measuring Machine
[28]	Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments
[29]	International comparison of roundness profiles with nanometric accuracy

6. PRIJEDLOG UMJERAVANJA UREĐAJA U LFSB

U laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje (LFSB) provodi se statičko umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti MMQ-3 tako što se okretni stol i ticalo umjeravaju odvojeno. Umjeravanje okretnog stola provodi se pomoću referentne mjerne polukugle, kao što je opisano u točki 5.1, dok se statičko umjeravanje ticala provodi korištenjem piezo aktuatora, što će biti objašnjeno u točki 6.1. Statičko umjeravanje nije dostatno za potpuno umjeravanje uređaja jer se uređaj u stvarnosti susreće s dinamičkim podražajima. Dinamičko umjeravanje moglo bi se provesti kada bi se nabavilo jedan ili više Flick etalona i Multi-wave etalona, što iziskuje velika ulaganja za LFSB uz dodatni problem što su takvi etaloni teško dostupni. Kao što se moglo uočiti u pregledu literature povezane s umjeravanjem uređaja pomoću piezo aktuatora, često se spominje da piezo aktuator može generirati bilo kakve profile te da je zbog toga gotovo idealan izbor za dinamička umjeravanja, posebno za generiranje Multi-wave etalona. Zbog toga se htjelo provesti dinamičko umjeravanje korištenjem piezo aktuatora. Iako LFSB posjeduje piezo aktuator, nisu se mogla provoditi valjana dinamička umjeravanja zbog ograničenja piezo aktuatora. Naime, za statičko umjeravanje potrebno je definirati jednostavnije oblike, odnosno samo pomake određene visine, za što nije potrebno mnogo točaka. Za generiranje kompleksnijih signala koji se sastoje od nekolicine superponiranih valova potreban je veći broj točaka od onog navedenog u specifikacijama za piezo aktuator. Stoga je prijedlog rješenja za dinamičko umjeravanje uređaja korištenje istog piezo aktuatora, ali spojenog sa signal generatorom pomoću kojeg se može definirati znatno veći broj točaka. Ovakvim rješenjem bilo bi izvedivo dinamičko umjeravanje simuliranjem Flick etalona za različita mjerna područja i velikog broja različitih Multi-wave etalona.

6.1 Statičko umjeravanje ticala u LFSB

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje provedeno je statičko umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti pomoću piezo aktuatora.

Potrebno je piezo aktuator postaviti na odgovarajuće mjesto na MMQ-3 uređaju (Slika 40). Aktuator je u ulozi ispitnog uzorka pa treba biti postavljen na okretni stol. Budući da ticalo miruje, a piezo aktuator pomakom uzrokuje otklon ticala, okretni stol treba mirovati kako bi i aktuator mogao mirovati. Jedine sile koje bi mogle uzrokovati pomak okretnog stola za vrijeme mjerenja su sile kontakta između pomične površine aktuatora i vrha ticala. Te sile su izuzetno malog iznosa, no za sigurnost od pomaka postavljena su dva magnetna držača na

suprotnim stranama stola te je tako eliminirana mogućnost zakreta stola koja bi mogla utjecati na ponovljivost rezultata mjerenja. Na okretni stol postavlja se prijenosni stol koji služi za reguliranje položaja aktuatora u odnosu na ticalo. Prijenosni stol može obavljati translaciju po x-osi i y-osi te rotaciju oko aksijalne osi malih iznosa kuta pomaka. Na prijenosni stol se stavlja držač na čijem podnožju se nalazi magnet kojim se držač pričvrsti za prijenosni stol. Na vertikalnoj pločici držača nalazi se više provrta različitih promjera te se aktuator pričvrsti na držač pomoću vijaka i matica. Koristi se ovakav oblik držača jer aktuator mora biti u vertikalnom položaju pri mjerenju. Ovako stabilan i krut sustav ne treba biti postavljen u centru rotacije okretnog stola jer stol miruje. Položaj ticala se namješta pomoću vertikalnog i horizontalnog pomaka na vertikalnom stupu uređaja i ruci ticala, dok se položaj aktuatora u odnosu na vrh ticala namješta pomacima prijenosnog stola.



Slika 40 Postavljanje piezo aktuatora na MMQ-3 uređaj [2]

Mjerenje se prvo provodi u mjernom području $\pm 3 \mu\text{m}$, a zatim slijede isti principi za mjerna područja $\pm 10 \mu\text{m}$ i $\pm 30 \mu\text{m}$ jer uređaj MMQ3 ima takva mjerna područja. Aktuatoru se šalju naredbe pomoću računala za referentni pomak od $0,50 \mu\text{m}$. Tako se u mjernom području $\pm 3 \mu\text{m}$ očitavaju naponi za referentne vrijednosti: $2,50 \mu\text{m}$, $2,00 \mu\text{m}$, $1,50 \mu\text{m}$, $1,00 \mu\text{m}$, $0,50 \mu\text{m}$, $0,00 \mu\text{m}$, $-0,50 \mu\text{m}$, $-1,00 \mu\text{m}$, $-1,50 \mu\text{m}$, $-2,00 \mu\text{m}$ i $-2,50 \mu\text{m}$. Zbog ovakvog redoslijeda referentnih vrijednosti, pomoću uređaja MMQ-3 za referentnu vrijednost $2,50 \mu\text{m}$ očitava se vrijednost od $2,50 \mu\text{m}$, dok se za ostale referentne vrijednosti očitana vrijednost razlikuje.

Ovaj način mjerenja odabran je kako bi se osiguralo da pomak aktuatora bude u smjeru sile ticanja. Naime, induktivno ticalo u sebi sadrži mehaničku oprugu koja se ponaša kao prigušenje ukoliko na njega djeluje sila piezo pomaka. S obzirom na to da se piezo pomak ostvaruje u izuzetno kratkom vremenu, ovakav sustav predstavlja dinamički sustav u kojem može doći do pojave vibracija. Stoga su rezultati mjerenja translaterani kako bi za referentnu vrijednost $0,00 \mu\text{m}$ bilo prikazano očitavanje od $0,00 \mu\text{m}$. Izmjerene vrijednosti napona su također translaterane. Budući da je piezo aktuator umjeren (osigurana je sljedivost do definicije metra), ideja umjeravanja ticala je da izmjerena vrijednost pomoću ticala bude što bliže referentnoj vrijednosti. To se ostvaruje tako što se izmjereni napon preračuna u mikrometre pomoću koeficijenta korekcije ticala. Koeficijent korekcije ticala je koeficijent nagiba pravca kod kojeg x-os predstavlja vrijednosti referentnog pomaka, a y-os vrijednosti napona koji odgovaraju tim referentnim pomacima. Budući da je odnos referentnih pomaka i napona približno linearan, može se izračunati koeficijent nagiba pravca. Vršiti se više ponavljanja za isto mjerno područje (minimalno tri ponavljanja), za svako mjerenje se izračuna korekcijski faktor te se aritmetička sredina odabire kao korekcijski faktor ticala za to mjerno područje. Reprezentativni korekcijski faktor se unosi u računalo uređaja MMQ-3 za svako mjerno područje. [2]

6.2 Piezo aktuator

Piezo aktuator radi na principu piezoelektriciteta. Piezoelektricitet je električni naboj koji se akumulira u određenim čvrstim materijalima koji nastaje kao odgovor na primijenjeno mehaničko opterećenje. Dakle, piezoelektrični materijali (razni kristali, keramika) se šire ili skupljaju proporcionalno dovedenom naponu. Okarakterizirani su njihovom osjetljivošću, odnosno omjerom pomaka materijala u odnosu na dovedeni napon. Piezoelektrični materijali pokazuju veću osjetljivost na početku mjerenju, nego na kraju. To uzrokuje određenu histerezu kada se mjeri u suprotnim smjerovima. Histereza se može ispraviti primjenom nelinearne promjene napona. Osjetljivost piezoelektričnih materijala se eksponencijalno smanjuje s vremenom. Najveće promjene u osjetljivosti događaju se pri prvim korištenjima, dok se s prolaskom vremena promjene smanjuju te piezoelektrični materijal postaje stabilniji.

Korišteni piezo aktuator proizvođača „Pi“ kojeg posjeduje LFSB sastoji se od piezo „stage“ P-621.ZCD koji je priključen na piezo kontroler E-625.CR.

Piezo stage P-621.ZCD (Slika 41) s ugrađenim kapacitivnim senzorom može izvršiti pomak u smjeru z-osi s rasponom vertikalnog pomaka do $100 \mu\text{m}$ i rezolucijom ispod nanometra.

Kapacitivni senzori mjere položaj izravno i bez kontakta, što povećava točnost pozicioniranja. Piezo stage izuzetno je precizan uz točnost pozicioniranja od 0,02 % koju može postići za nekoliko desetaka milisekundi. Izrađen je od aluminija i teži 0,17 kg, dimenzije mu iznose 40 mm x 40 mm x 17,5 mm, dok se raspon temperature pri kojoj se koristi kreće od -20 °C do 80 °C. [30]



Slika 41 Piezo stage P-621.ZCD [30]

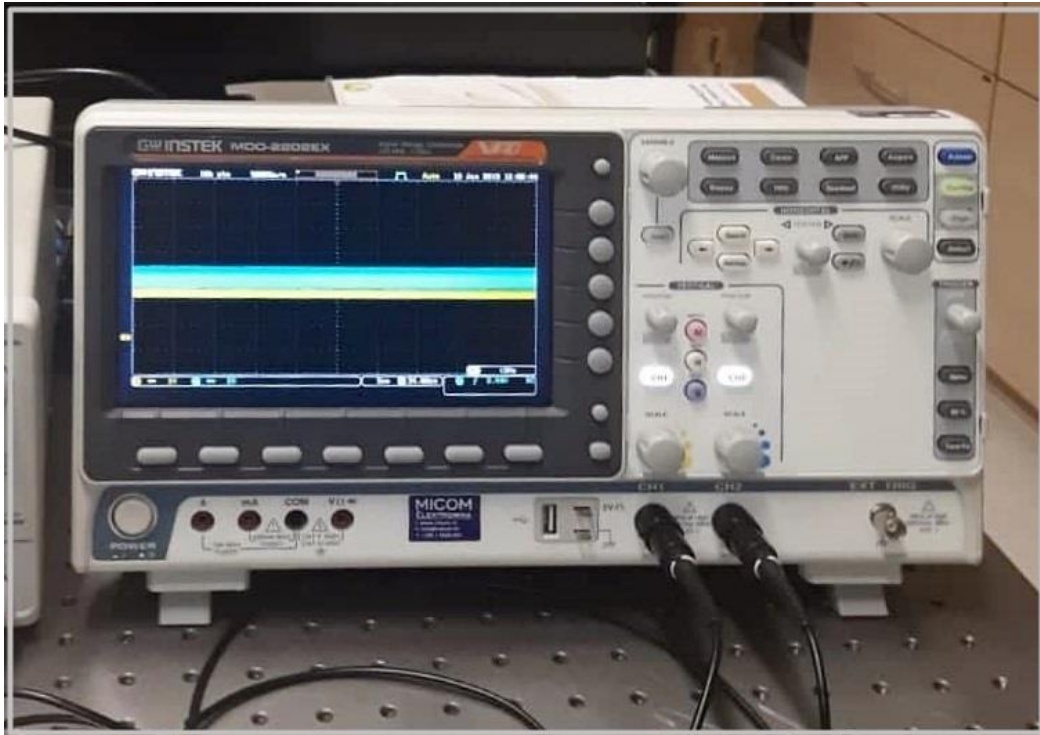
Kontroler E-625.CR (Slika 42) je laboratorijski uređaj primjenjiv za uređaje s kapacitivnim opterećenjem, kao što je piezo aktuator. Može se koristiti za statičku i dinamičku primjenu. Modul E-625.CR opremljen je E-816 podskupom računalnog sučelja. To mu omogućuje da se nekoliko E-625.CR uređaja može kontrolirati s jednog sučelja te da korisnik može pohraniti sve funkcijske vrijednosti u unutarnju tablicu i jednostavno doći do izlaznih podataka. [31]



Slika 42 Piezo servo kontroler E-625.CR [31]

6.3 Signal generator

Za generiranje signala koristi se MDO-2202EX signal generator proizvođača *Good Will Instrument* (GW INSTRTEK).



Slika 43 Signal generator

Signal generator ima više implementiranih hardver instrumenata, uključujući generator proizvoljnih valova (*Arbitrary Wave Generator - AWG*), digitalni multimetar te analizator spektra za analizu signala u frekvencijskoj domeni. Za generator je karakteristično da ima frekvencijski pojas od 200 MHz, dva ulazna kanala, memoriju dovoljnu za duljinu zapisa od 10 milijuna točaka, dvokanalni izlaz za napajanje s kontinuiranim podešavanjem 1 V do 5 V s korakom od 0,1 V. Na slici (Slika 43) su prikazane neke njegove karakteristike. [32]

AWG Specifications	
Channels	2
Sample Rate	200 Msa/s
Vertical Resolution	14 bits
Max. Frequency	25 MHz
Waveforms	Sine, Square, Pulse, Ramp, DC, Noise, Sinc, Gaussian, Lorentz, Exponential Rise, Exponential Fall, Haversine, Cardiac
Output Range	20 mVpp to 5 Vpp, HighZ; 10 mVpp to 2.5 Vpp, 50 Ω
Output Resolution	1mV
Output Accuracy	2% (1 kHz)
Offset Range	± 2.5 V, HighZ; ± 1.25 V, 50 Ω
Offset Resolution	1mV
Sine	
Frequency Range	100mHz to 25MHz
Flatness	± 0.5 dB(relative to 1kHz)
Harmonic Distortion	-40 dBc
Stray (Non-harmonic)	-40 dBc
Total Harmonic Distortion	1%
S/N Ratio	40 dB

Slika 44 AWG specifikacije [32]

Iz navedenih „Arbitrary Wave Generator“ specifikacija može se uočiti da je vertikalna rezolucija 14 bita, odnosno $2^{14} = 16\,384$ točke po vertikalnoj osi, što je i više nego dovoljno za generiranje sinus vala. U sklopu signal generatora postoje unaprijed definirane funkcije, kao što je i sinus val.

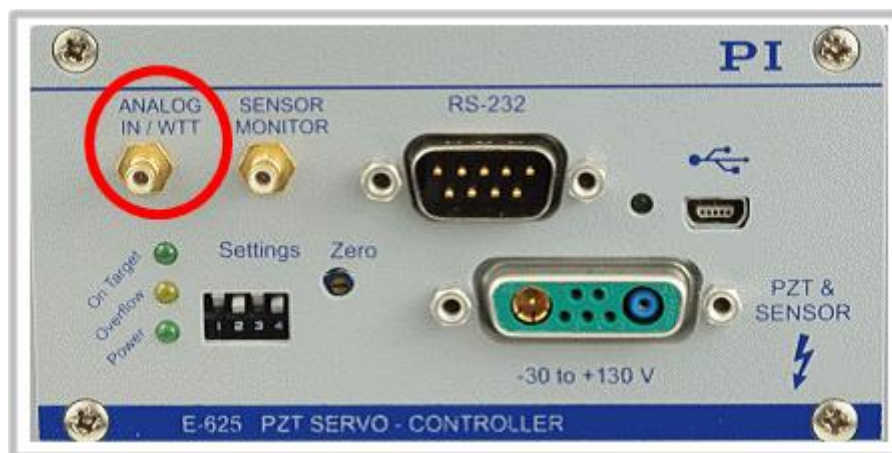
Kao što je već spomenuto, piezo aktuator ima mogućnost vertikalnog pomaka do 0 μm do 100 μm , a ulazni napon Piezo servo kontrolera treba biti u rasponu od -2 V do $+12$ V, što je ukupno 14 V. Dijeljenjem napona od 14 V s pomakom od 100 μm dobije se iznos 0,14 V/ μm , odnosno zaokruženo na jednu decimalu 0,1 V/ μm , što pokazuje koliko je napona potrebno da bi se ostvario pomak piezo aktuatora za 1 μm .

Zbog ograničenja sustava, dinamičko umjeravanje pomoću generiranih valova može se provoditi u najmanjem mjernom području od ± 10 μm , a ne od ± 3 μm . Kada se pomnoži 0,1 V/ μm s 20 μm (što je jednako ± 10 μm), dobije se da je za to mjesto područje dovoljan raspon od 2 V. Na taj iznos, kao što je navedeno u specifikacijama, odnosi se greška od 2 %, a to je jednako 0,04 V. Budući da se dinamičkim umjeravanjem ticala teži postići točnost na razini mikrometra, a ova greška bi iznosila 0,4 μm , može se vidjeti da su ovakve specifikacije dovoljno dobre za postizanje željenih rezultata.

6.4 Provedba dinamičkog umjeravanja u LFSB

Pri dinamičkom umjeravanju ticala uređaja MMQ-3, piezo stage se postavlja na okretni stol uređaja na isti način kao i pri statičkom umjeravanju (točka 6.1), ali se Piezo servo kontroler povezuje sa signal generatorom.

Pomoću postojećeg piezo aktuatora može se ostvariti 256 točaka za definiranje potrebnog profila kretanja. Budući da za simuliranje Multi-wave etalona nije dovoljno 256 točaka, potrebno je povezati Piezo servo kontroler i signal generator. Za povezivanje E-625.CR kontrolera bitna je ANALOG IN/WTT utičnica.



Slika 45 Piezo servo kontroler [31]

Kod analognog načina rada ANALOG IN/WTT se koristi kao ulazni napon za ciljnu vrijednost. Ovisno o servo modu, ulazni napon se interpretira kao izravna specifikacija za piezo napon ili kao specifikacija za ciljni položaj. Ulazni napon uvijek treba biti u rasponu od -2 V do $+12\text{ V}$. Raspon se može proširiti na -3 V do $+13\text{ V}$, ali to može skratiti vijek trajanja piezo aktuatora. Ulazni napon može također biti kompjuterski generirani analogni signal. Za generiranje analognog signala preporučljivo je koristiti analogni upravljački program PI LabVIEW, no za njegovo funkcioniranje potrebna je DAQ kartica (*Data Acquisition Card*).

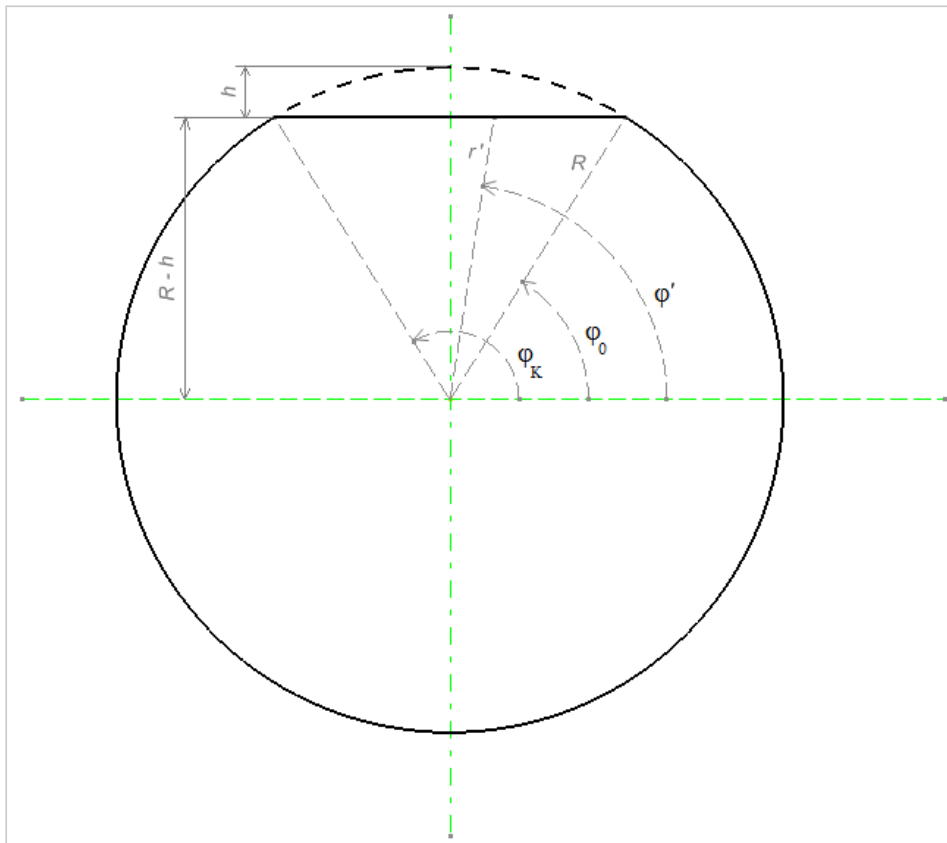
Kod kompjuterski upravljano načina rada ANALOG IN/WTT se koristi kao ulazni signal okidač za "wave table output" (WTO) i aktivirano gibanje (MVT). Podmodul računalnog sučelja E-816, koji je integriran u E-625.CR, kontrolira stvaranje piezo napona. Ciljna vrijednost (položaj ili piezo napon, ovisno o servo modu) može se postaviti pomoću naredbi poslanih s računala. Nadalje, kretanje piezo aktuatora može se također pokrenuti pomoću WTO ili ulazom okidačem na ANALOG IN / WTT SMB utičnici.

Servo način određuje hoće li se kretanje provoditi u otvorenoj petlji (servo način rada isključen) ili u načinu rada zatvorene petlje (servo način rada uključen). Kontrolni i servo modovi mogu se kombinirati po želji. Kod zatvorene petlje servo-petlja podmodula za servo-upravljanje određuje piezo napon na temelju ciljnog položaja i povratne veze od senzora položaja. Tako servo petlja regulira poziciju piezo aktuatora, odnosno održava trenutni položaj osi na temelju danog ciljnog položaja i povratne informacije o položaju odgovarajućeg senzora. Pozicioniranje u zatvorenom krugu je slobodno od histereze i neovisno o promjenama opterećenja. Za potrebe generiranja valova koristit će se servo način rada. [31]

SMB/BNC kabel potreban je za spajanje izvora signala MDO-2202EX s Piezo servo kontrolerom E-625.CR. Kada se spoje signal generator i Piezo servo kontroler, otvara se mogućnost za definiranjem velikog broja valova koji predstavljaju različite izvedbe Flick etalon i Multi-wave etalona.

6.4.1 Simuliranje Flick etalona

Kao što je već objašnjeno u radu, Flick etalon prvenstveno služi za provjeru tromosti, odnosno pokretljivosti ticala. Karakteristični oblik Flick etalona prilagođen je strojnoj obradi i fizičkoj izvedbi takvog etalona. To je cilindar nominalnog promjera D , odnosno nominalnog polumjera R s odrezanim rubom visine h . Najčešće dimenzije Flick etalona su nominalni promjer D od 20 mm te visina h 12 μm . S razvojem tehnologija sve češće se generiraju takvi etaloni digitalnim putem. Budući da bi se u LFSB povezivanjem piezo aktuatora i signal generatora mogao ostvariti velik broj točaka za generiranje bilo kojeg profila, mogao bi se generirati i Flick etalon s velikim brojem točaka. Stoga je na slici (Slika 46) preuveličano prikazan matematički model pomoću kojeg se mogu generirati točke Flick etalona korištenjem piezo aktuatora.



Slika 46 Matematički model za generiranje točaka Flick etalona

Pri generiranju profila nominalni cilindar predstavlja ravnu liniju visine nominalnog polupromjera R jer takva idealna kružnica ne uzrokuje nikakav otklon ticala te ticalo miruje. Kada bi promatrali rotaciju etalona u smjeru kazaljke na satu, prvi nagli pomak ticala ostvaruje se na mjestu gdje se nalazi kut φ_0 . Dalje ticalo prelazi po ravnom odrezanom dijelu te bi profil gibanja ticala izgledao kao zarez, odnosno udubina, za sve točke s nekim kutom φ' , a kut φ' se nalazi između φ_0 i φ_K . Za sve točke povezane s φ' visina točke više ne bi bila R , nego bi se visina promijenila na r' u ovisnosti o kutu φ' zbog odrezanog vrha visine h . Kada ticalo dođe do kuta φ_K , visina točaka nastavlja biti konstantne visine R . Stoga jednadžbe za φ_0 i φ_K (6.5-1, 6.5-2) glase:

$$\varphi_0 = \sin^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) \quad (6.5-1)$$

$$\varphi_K = 180^\circ - \varphi_0 \quad (6.5-2)$$

Za svaki kut φ' , uz uvjet da je $\varphi_0 < \varphi' < \varphi_K$, može se povezati jednadžba:

$$\cos(90^\circ - \varphi') = \sin(\varphi') = \frac{R-h}{r'} \quad (6.5-3)$$

Iz ove jednadžbe može se dobiti izraz za svaku visinu točke r' , ovisno o kutu φ' :

$$r' = \frac{R-h}{\sin(\varphi')} \quad (6.5-4)$$

6.4.2 Simuliranje Multi-wave etalona

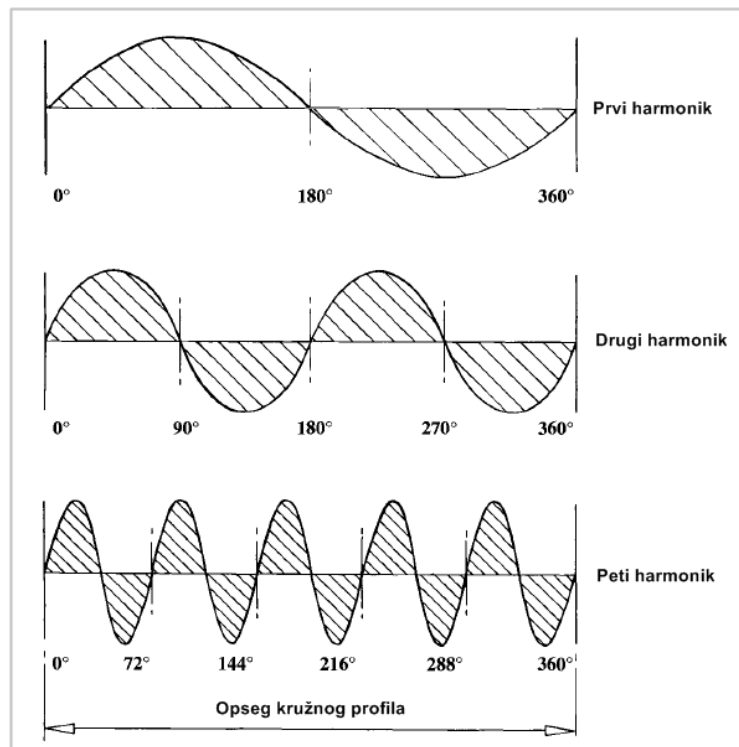
Osim pokretljivosti ticala, jako bitno je provjeriti softversku podršku uređaja jer je harmonijska analiza profila ispitnog uzorka važan aspekt pri dobivanju potpunog uvida u kružnost uzorka. Prisutni harmonici posljedica su različitih čimbenika, poput geometrije uzorka, materijala i metode izrade. Uobičajeno, harmonici profila mogu se grupirati na način naveden u tablici (Tablica 4), što se može povezati s prethodno navedenom tablicom (Tablica 1). [4]

Tablica 4 Harmonici i uzroci njihovog nastanka [4]

Harmonici	Uzrok
1 UPR	Funkcija mjerenja – uzrokovana samo pogreškom postavljanja na uređaju koji se koristi za mjerenje odstupanja od kružnosti. Amplituda harmonika jednaka je ekscentričnosti ispitnog uzorka u odnosu na os vretena uređaja.
2 UPR	Funkcija mjerenja ili izrade – ovaj aspekt harmonika općenito se naziva ovalnost i može biti uzrokovan ili greškom u postavljanju uzorka na uređaj ili greškom pri izradi ako os uzorka nije paralelna s osi vretena uređaja.
3 UPR – 7 UPR	Funkcija izrade – ovi harmonici su najčešće prisutni zbog načina pridržavanja i učvršćivanja izratka.
15 UPR i više	Funkcija materijala i izrade – viši harmonici prisutni su zbog nestabilnosti uređaja na kojem se dio proizvodi (primjerice vibracije) ili zbog reakcije materijala uzorka i reznog alata.

Na kružnom profilu harmonici se mogu zamisliti kao ujednačeni valni oblik (sinus val) koji je superponiran na površinu dijela (Slika 47). Budući da se ne mogu proizvoditi savršeni predmeti bez ikakvog odstupanja od kružnosti, može se reći da će se bilo koji kružni profil sastojati od niza sinusnih valova koji se kombiniraju kako bi tvorili cjelokupni kružni oblik. U osnovi se računanje harmonika sastoji od prebrojavanja broja harmonika, s tim da su njihove amplitude relativno jednostavne za mjerenje. Kada se pojavi složeniji profil, koji se sastoji od dva ili više harmonika (uobičajeno je između 10 i 12 harmonika), tada je ključno korištenje softvera, odnosno brze Fourierove transformacije (FFT). Algoritam FFT raščlanjuje profil na

njegove sastavne valne oblike i izračunava amplitudu i fazni kut svakog harmonika te se profil proučava u frekvencijskoj, a ne u vremenskoj domeni. [4], [21]

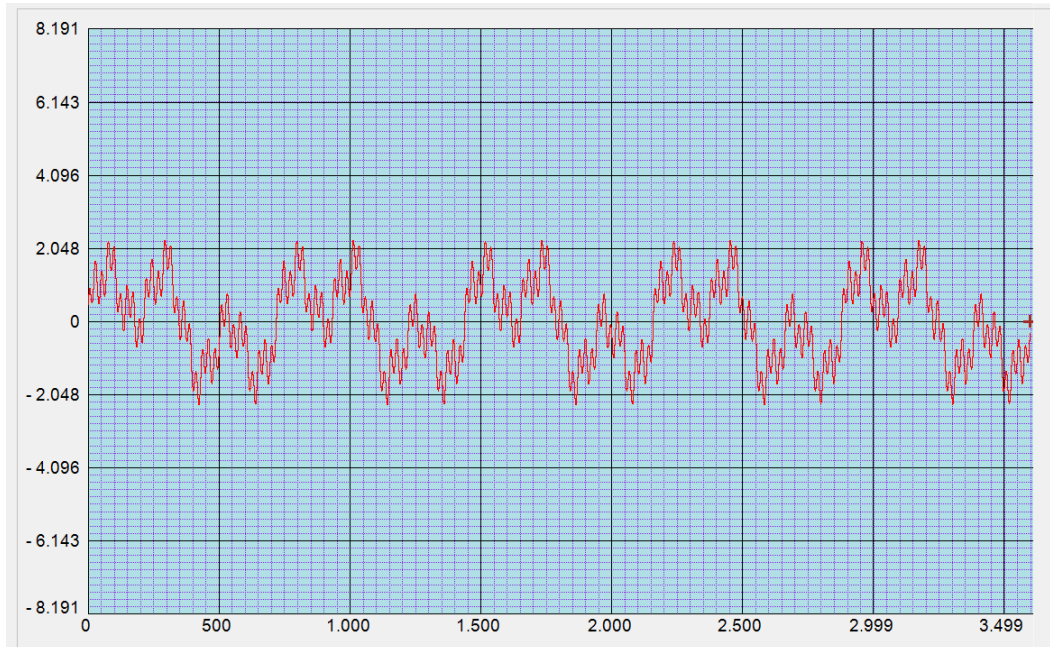


Slika 47 Izgled različitih harmonika [4]

Na ovoj teorijskoj podlozi o harmonijskoj analizi dobivenog profila temelji se definiranje profila etalona koji se mogu generirati pomoću signal generatora i piezo aktuatora. Za generiranje profila korišten je program *AFG Arbitrary Waveform*. Dobiveni zapisi prebacuju se na osciloskop pomoću USB prijenosnika te se profili mogu naknadno uređivati. Brojčane oznake na osima u korištenom programu nisu toliko relevantne jer se pomoću signal generatora mogu mijenjati i prilagođavati frekvencije i amplitude. Stoga se isti profili mogu koristiti za ispitivanje i umjeravanje različitih mjernih područja prilagođavanjem veličina amplituda i frekvencija.

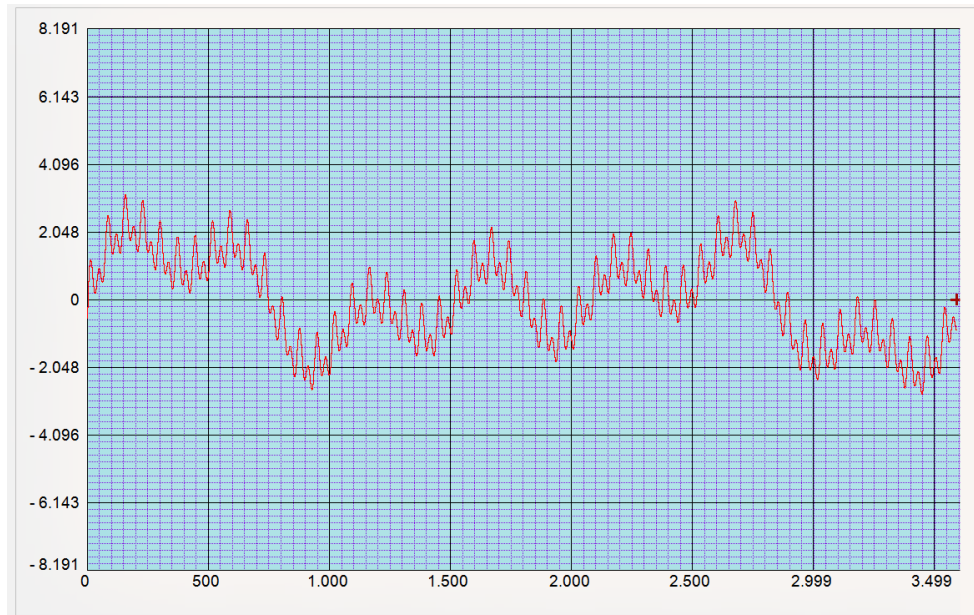
Prvi prijedlog Multi-wave etalona, MWS broj 1 (Slika 48), predstavlja superponirane harmonike od 5 UPR, 15 UPR, 50 UPR i 150 UPR. Budući da se na signal generatoru prilagođavaju amplitude i frekvencije, u ovim primjerima nisu konkretno definirane te vrijednosti, nego samo njihovi odnosi. Tako su za 5 UPR i 15 UPR odabrane nominalne amplitude, a za ostale harmonike polovica iznosa nominalne amplitude. Iako Multi-wave etaloni nisu standardizirani, ipak se navedeni harmonici najčešće pojavljuju u različitim izvedbama MWS-a jer su ovi harmonici standardizirani u normama kao granične vrijednosti

za primjenu filtera pri ispitivanju kružnosti. Harmonici većeg reda su odabrani s manjim amplitudama kako bi se ispitala sposobnost softverske podrške za profile s harmonicima različitih amplituda jer se kod stvarnih ispitnih uzoraka pojavljuju, uz različite harmonike, i različite amplitude.

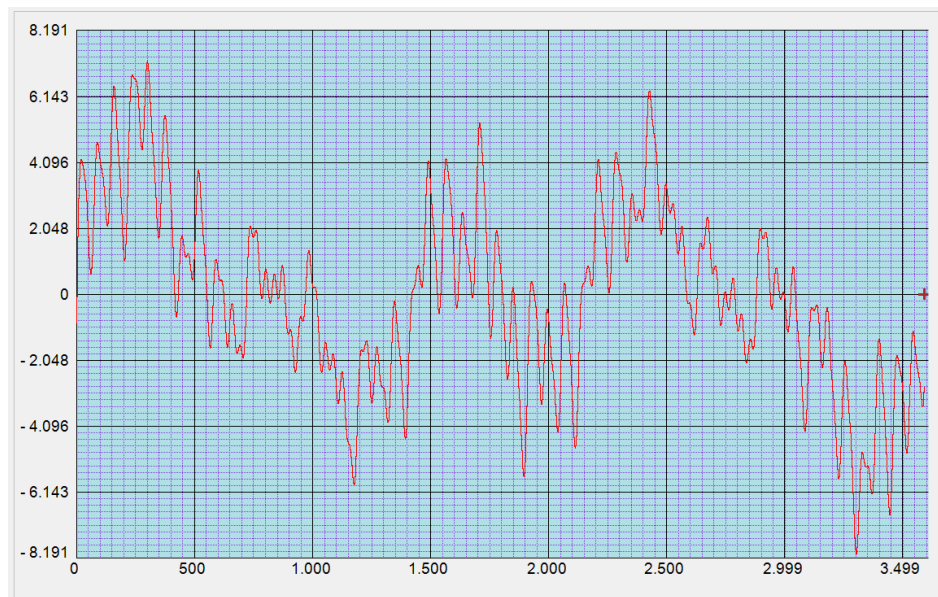


Slika 48 MWS broj 1

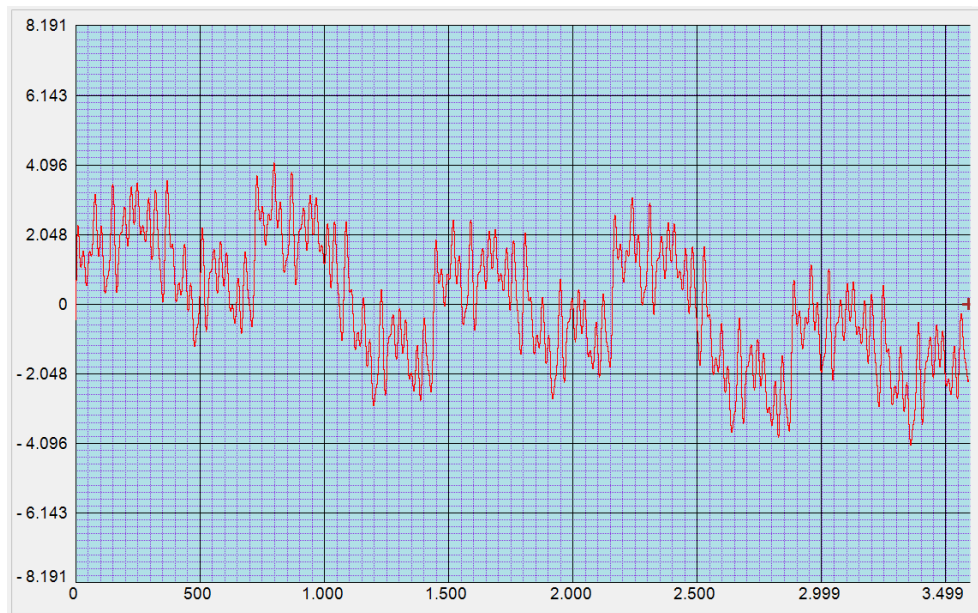
MWS broj 2 (Slika 49) sastoji se od harmonika 2 UPR, 3 UPR i 7 UPR nominalne amplitude te od harmonika 50 UPR i 100 UPR polovice nominalne amplitude. Tri niža harmonika nalaze se u sklopu profila jer su povezani s karakterističnim greškama pri proizvodnji predmeta (Tablica 4). Upravo zbog toga se niži harmonici češće pojavljuju te je dobro ispitati koliko dobro su detektirani od strane ispitivanog uređaja. Pretpostavka je da što je više valova superponirano pri generiranju jednog profila, to je teže uređaju raspoznati od kojih se sve harmonika sastoji promatrani profil. Zato ovaj profil ima jedan harmonik više nego prethodni, a idući primjeri etalona će imati još više harmonika.

**Slika 49 MWS broj 2**

Nadalje, treći prijedlog MWS-a (Slika 50) sastoji se od harmonika 2 UPR, 3 UPR i 5 UPR nominalne amplitude, od harmonika 15 UPR, 30 UPR, 49 UPR, 51 UPR polovice nominalne amplitude te od harmonika 100 UPR s 0,25 nominalne amplitude. Kao što je navedeno za MWS broj 2, niži harmonici su odabrani jer se često pojavljuju pri ispitivanju kružnosti te je još veći broj različitih harmonika u odnosu na prethodne. U ovom primjeru pojavljuju se harmonici od 49 UPR i 51 UPR, koji su viši harmonici, a približnih su vrijednosti, kako bi se vidjelo koliko je uređaj sposoban razlikovati takve više harmonike približnih vrijednosti.

**Slika 50 MWS broj 3**

U četvrtom primjeru Multi-wave etalona (Slika 51) prisutni su harmonici od 1 UPR i 2 UPR nominalne amplitude, harmonik od 5 UPR 1,5 nominalne amplitude te harmonici 15 UPR, 20 UPR, 50 UPR, 60 UPR, 80 UPR, 100 UPR i 150 UPR polovice nominalne amplitude (0,5 nominalne amplitude). Ovaj profil sastoji se od 10 različitih harmonika, što je u stvarnosti jako izgledno da će se pojaviti. Odabran je i jedan harmonik s većom amplitudom od nominalne te 7 harmonika s amplitudom manjom od nominalne.



Slika 51 MWS broj 4

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu definirano je što je kružnost, što je odstupanje od kružnosti te je objašnjeno zašto postoji potreba za mjerenjem kružnosti. Opisani su najčešće korišteni uređaji i metode za mjerenje odstupanja od kružnosti, kao i uređaj MMQ-3 koji se koristi u LFSB. Nadalje, navedeni su najčešće korišteni etaloni za osiguravanje sljedivosti pri umjeravanju takvih uređaja. Prethodno navedeno služi kao teorijska podloga za upućivanje u daljnje obrađenu problematiku, koja je temelj ovog rada.

Naime, cilj ovog rada bio je prijedlog metode za dinamičko umjeravanje uređaja za mjerenje kružnosti MMQ-3 budući da statičko umjeravanje, koje se već provodi, nije dostatno. Temeljem pronalaska, čitanja i proučavanja preko pedeset recentnijih znanstvenih radova, odabrana je nekolicina takvih radova koji daju uvid u različite načine provođenja umjeravanja uređaja za mjerenje kružnosti. Također je tablično prikazan određen broj radova ovakve i usko povezane tematike te može poslužiti za detaljnije upućivanje u temu i buduće proučavanje.

Uzimajući u obzir detaljno proučenu literaturu te mogućnosti LFSB-a, predložen je dinamički način umjeravanja uređaja MMQ-3. Kao osnovni element za dinamičko umjeravanje odabran je piezo aktuator. Isti je korišten i za statičko umjeravanje te je već pokazao dovoljno dobre performanse i rezultate. Uz to, korištenjem piezo aktuatora mogu se generirati različite izvedbe etalona. Budući da je piezo aktuator ograničen brojem točaka koje može generirati, povezivanje sa signal generatorom bi omogućilo znatno veći broj točaka te samim time i detaljnije opisane profile etalona, kao i veći broj mogućnosti definiranja raznovrsnih etalona. Predloženo je simuliranje Flick etalona korištenjem matematičkih jednadžbi koje opisuju taj profil te simuliranje Multi-wave etalona. Za Multi-wave etalone karakteristično je da nisu standardizirani te se profil simulira tako da se kombiniraju različiti harmonici, ovisno o informacijama koje želimo dobiti i ovisno o tome što se želi ispitati. Stoga je u radu predloženo više Multi-wave etalona.

Eksperimentalnom provedbom ovako predloženog dinamičkog umjeravanja uređaja vjerojatno bi se došlo do još nekih saznanja te bi se profili mogli prilagoditi po potrebi. Također, provedba ovako predloženog dinamičkog umjeravanja uređaja može poslužiti kao temelj za opsežnije određivanje mjerne nesigurnosti promatranog uređaja te, eventualno, unapređenje uređaja i smanjenje mjerne nesigurnosti.

LITERATURA

- [1] Runje B. Mjerenje oblika i dimenzija. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009.
Available from:
https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2009_10076_MOIDpredavanja.pdf [cited 2020 May 4]
- [2] Dugandžić M. Statičko umjeravanje ticala uređaja za mjerenje kružnosti [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [3] Farago FT, Curtis MA. Handbook of Dimensional Measurement. 5th ed. SAD: Industrial Press Inc.; 2013.
- [4] Smith GT. Industrial Metrology: Surfaces and Roundness. Velika Britanija: Springer; 2002.
- [5] Šimunović V. Analiza utjecaja digitalnog filtra na veličinu odstupanja od kružnosti [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2007.
- [6] ISO 12181-1:2011: Geometrical product specifications (GPS) – Roundness - Part 1: Vocabulary and parameters of roundness. Francuska: International Organization for Standardization; 2011.
- [7] Runje B. Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014. Available from: https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja_TTM.pdf [cited May 12]
- [8] Howarth P, Redgrave F. Measurement – in short. 3rd ed. Danska: EURAMET; 2008.
- [9] Jusko O, Lüdicke F. Novel multi-wave standards for the calibration of form measuring instruments. Proc. 1st EuSPEN, Vol.2, p. 299–302, ISBN 3-8265-6085-X. Bremen; 1999.
- [10] Jusko O, Bosse H, Flack D, Hemming B, Pisani M, Thalmann R. A comparison of sensitivity standards in form metrology - Final results of the EURAMET project 649. Measurement Science and Technology. London: IOP. Vol.23, No.5; 2012.
- [11] Neugebauer M. Uncertainty analysis for roundness measurements by the example of measurements on a glass hemisphere. Measurement Science and Technology. London: IOP. Vol.12, No.1; 2001.

- [12] Thalmann R, Spiller J. A primary roundness measuring machine. Recent developments in traceable dimensional measurements III. Proc. SPIE 5879 58790E; 2005.
- [13] Roundness Measurement Errors and Effects. Taylor Hobson. Available from:
<https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/learning%20zone/training%20material/roundness%20measurement%20errors%20and%20effects.pdf?la=en> [cited 2020 June 3]
- [14] Barbosa FAA, Nader G, Higuti RT, Kitano C, Silva E CN. A simple interferometric method to measure the calibration factor and displacement amplification in piezoelectric flextensional actuators. Sba Controle & Automação. Vol.21, No.6; 2010.
- [15] Haitjema H. Traceable dynamic calibration of probes of roundness and roughness testers in the nanometric region using a digital piezo transducer. NCSL workshop and symposium The impact of metrology on Global Trade. Dallas, Texas, USA; Vol.1, p. 303-312; 1995.
- [16] Haitjema H. Dynamic probe calibration in the μm region with nanometric accuracy. Precision Engineering. Vol.19, Issues 2–3, p. 98-104; 1996.
- [17] Haitjema H, Kotte GJ. Dynamic probe calibration up to 10 kHz using laser interferometry. Measurement. Vol.21, Issue 3, p. 107-111; 1997.
- [18] Liang R, Jusko O, Luedicke F, Neugebauer M. A novel piezo vibration platform for probe dynamic performance calibration. Measurement Science and Technology. London:IOP. Vol.12, No.9; 2001.
- [19] Sacconi A, Picotto GB, Pasin W. The IMG C Calibration Setup for Microdisplacement Actuators. IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. Vol. 48, No. 2; 1999.
- [20] Thalmann R, Spiller J, Kueng A, Jusko O. Calibration of Flick standards. Measurement Science and Technology. London:IOP. Vol.23, No.9; 2012.
- [21] ISO 12181-2:2011: Geometrical product specifications (GPS) - Roundness - Part 2: Specification operators. Francuska: International Organization for Standardization; 2011.
- [22] Widmaier T, Kuosmanen P, Hemming B, Esala V P, Brabandt D, Haikio J. New material standards for traceability of roundness measurements of large scale rotors. Conference: 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium. Germany; 2014.

- [23] Haitjema H, Rosielle N, Kotte G, Steijaert H. Design and calibration of a parallel-moving displacement generator for nano-metrology. *Measurement Science and Technology*. London:IOP. Vol.9, No.7; 1998.
- [24] Picotto GB. Interferometric calibration of microdisplacement actuators. Recent developments in traceable dimensional measurements II. *Proc. SPIE 5190*; 2003.
- [25] Thalmann R. Basics of highest Accuracy Roundness Measurement. *Simposio de Metrología*. Mexico; 2006.
- [26] Marçal LAP, Leão JVF, Nader G, Higuti RT, Kitano C, Silva ECN. Analysis of Linearity and Frequency Response of a Novel Piezoelectric Flexensional Actuator Using a Homodyne Interferometer and the J1–J4 Method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol.56, No.3; 2007.
- [27] Buajareern J, Phuaknoi P, Somthong T, Tonmueanwai A. Development of the Probe Calibration System for the Roundness Measuring Machine. *The Journal of Industrial Technology*. Vol 9, No.1; 2013.
- [28] Spragg RC. Accurate Calibration of Surface Texture and Roundness Measuring Instruments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Conference Proceedings*; 1967.
- [29] Haitjema H, Bosse H, Frennberg M, Sacconi A, Thalmann R. International comparison of roundness profiles with nanometric accuracy. *Metrologia*. Vol.33, No.1; 1996.
- [30] P-620.Z –P-622.Z PI Hera Precision Z-Stage. Available from:
http://www.pi-usa.us/products/PDF_Data/P620_Z_Precision_Piezo_Nano-Positioning-Stage.pdf [cited 2020 June 4]
- [31] E-625 Piezo Servo Controller, User Manual, Version 1.7.0; 2013. Available from:
https://static.physikinstrumente.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/user_manuals/E-625_Cx_UserManual_PZ166E170.pdf?_ga=2.127838477.1644631157.1518819274-399638639.1518119356 [cited 2020 June 8]
- [32] MDO-2000E Specifications, GW INSTEK. Available from:
<https://www.gwinstek.com/en-global/products/downloadSeriesSpec/1512>