

Mjerenje koraka navoja

Dizdar, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:568357>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Dizdar

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović, dipl. ing.

Student:

Marko Dizdar

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Vedranu Šimunoviću na ukazanoj prilici te pomoći i stručnom vodstvu prilikom izrade ovoga rada.

Velika zahvala ide i mojoj obitelji bez čije pomoći i podrške ne bih završio ovaj studij.

Marko Dizdar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske 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 / 23 - 6 / 1
Ur. broj:	15 - 1703 - 23 -

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO DIZDAR**

Mat. br.: 0035193641

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje koraka navoja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement of the thread pitch**

Opis zadatka:

Umjeravanje navojnih kontrolnika složen je mjeriteljski zadatak s obzirom na njihovu kompleksnu geometriju. Najznačajnija dimenzija navoja njegov je srednji promjer koji se uobičajeno mjerni pomoću 1D mjernih uređaja. Za ispravno određivanje srednjeg promjera potrebno je poznavati korak navoja. U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a koristi se kontaktna metoda mjerenje koraka navoja. Glavni zadatak ovog rada je ispitati primjenjivost optičke metode mjerenja koraka navoja primjenom alatnog mikroskopa.

U radu je potrebno:

1. Opisati navojne kontrolnike za ispitivanje unutarnjeg navoja.
2. Opisati metode mjerenja koraka navoja.
3. Provesti mjerenja kontaktnom metodom primjenom 1D mjernog uređaja.
4. Provesti mjerenja optičkom metodom primjenom alatnog mikroskopa.
5. Analizirati rezultate i donijeti zaključak.

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

Zadatak zadan:
17. studenog 2022.

Rok predaje rada:
19. siječnja 2023.

Predviđeni datum obrane:
23. siječnja do 27. siječnja 2023.

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
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. MJERITELJSTVO	2
2.1. Mjeriteljska infrastruktura.....	5
2.2. Hrvatska mjeriteljska infrastruktura.....	6
2.3. Dimenzijsko mjeriteljstvo	8
3. NAVOJ.....	10
3.1. Definicije i pojmovi	10
3.2. Metrički navoj	11
3.3. Kategorije umjeravanja	15
3.3.1. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera (1a).....	16
3.3.2. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera i kuta navoja (1b).....	16
3.3.3. Mjerenje srednjeg promjera i koraka navoja (2a)	16
3.3.4. Mjerenje srednjeg promjera, koraka i kuta navoja (2b)	16
3.3.5. Mjerenje funkcionalnog srednjeg promjera, koraka i kutova profila navoja (3) ...	17
4. NAVOJNI KONTROLNICI	18
4.1. Kontrolnici za ispitivanje unutarnjeg navoja	18
5. METODE MJERENJA KORAKA NAVOJA	19
5.1. 2D optički mjerni uređaji	20
5.2. Univerzalni mjerni uređaj.....	20
5.3. Ostale metode	21

6. OPTIČKI MJERNI SUSTAVI.....	22
6.1. Vizijski sustavi	23
7. MJERENJE KORAKA NAVOJA OPTIČKOM METODOM.....	26
7.1. Optički 2D sustav Carl Zeiss Jena.....	26
7.1.1. Odabir rasvjete	27
7.2. Postupak mjerenja	31
7.2.1. Mjerenje 1. metodom	34
7.2.1.1. Rezultati mjerenja	36
7.2.2. Mjerenje 2. metodom	38
7.2.2.1. Rezultati mjerenja	39
8. MJERENE KORAKA NAVOJA KONTAKTNOM METODOM	41
8.1. Univerzalni mjerni uređaj DMS 680	41
8.2. Postupak mjerenja	43
8.2.1. Rezultati mjerenja	43
9. ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	44
10. ZAKLJUČAK	47
LITERATURA.....	49
PRILOZI.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	Lanac sljedivosti [1]	3
Slika 2.	Regionalne mjeriteljske organizacije [2].....	3
Slika 3.	Organizacija Hrvatskoga nacionalnog mjeriteljskog sustava [4]	8
Slika 4.	Set graničnih mjerki [7].....	9
Slika 5.	Spoj vijka i matice [8]	10
Slika 6.	Profil navoja [10].....	12
Slika 7.	Navojni kontrolnici [15].....	18
Slika 8.	Metoda aksijalnog presjeka(lijevo) i metoda projiciranja(desno) [13]	20
Slika 9.	Univerzalni mjerni uređaj.....	20
Slika 10.	MasterScanner metoda [16].....	21
Slika 11.	CMM metoda [17].....	21
Slika 12.	Profilni projektor [19]	22
Slika 13.	„Pametne“ kamere [16]	23
Slika 14.	Utjecaj optičkog sustava na prikaz slike [15].....	24
Slika 15.	Različite vrste osvjetljenja [17]	25
Slika 16.	Telecentrična leća [18]	25
Slika 17.	Carl Zeiss Jena alatni mikroskop.....	26
Slika 18.	Navojni kontrolnik	27
Slika 19.	Frontalna prstenolika rasvjeta	28
Slika 20.	Prikaz dobiven frontalnom rasvjetom	29
Slika 21.	Prikaz dobiven osvjetljenjem alatnog mikroskopa.....	29
Slika 22.	Prikaz dobiven pločastim LED osvjetljenjem.....	30
Slika 23.	LED osvjetljenje uz primjenu zelenog filtera.....	30
Slika 24.	Prikaz s odabranim osvjetljenjem.....	31
Slika 25.	Milimetarska skala	32
Slika 26.	Prikaz milimetarske skala.....	33
Slika 27.	Određivanje veličine piksela	33
Slika 28.	Navojni kontrolnik	34
Slika 29.	Definirani pravci pomoću softvera MerOpt	35
Slika 30.	Mjerenje koraka navoja	38
Slika 31.	Univerzalni mjerni uređaj.....	41
Slika 32.	Dijagram vrijednosti koraka navoja za navojni čep M12 x 1,75.....	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Standardne dimenzije navoja [12].....	13
Tablica 2. Kategorije umjeravanja prema EURAMET cg-10 [13]	15
Tablica 3. Mjerne metode [10]	19
Tablica 4. Specifikacije kamere [26].....	32
Tablica 5. Rezultati mjerenja 1. metodom – strana „ide“	35
Tablica 6. Rezultati mjerenja 1. metodom – strana „ne ide“	36
Tablica 7. Rezultati mjerenja 2. metodom – strana „ide“	38
Tablica 8. Raspon mjerenja 2. metodom – strana „ne ide“	39
Tablica 9. Tehničke specifikacije[29]	41
Tablica 10. Raspon mjerenja[29]	41
Tablica 11. Strana „ide“	42
Tablica 12. Strana „ne ide“	42
Tablica 13. Usporedni prikaz rezultata mjerenja.....	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
P	mm	Korak navoja
A	°	Kut uspona zavojnice
D	mm	Nazivni promjer unutarnjeg navoja
d	mm	Nazivni promjer vanjskog navoja
D_1	mm	Mali promjer unutarnjeg navoja
d_1	mm	Mali promjer vanjskog navoja
D_2	mm	Srednji promjer unutarnjeg navoja
d_2	mm	Srednji promjer vanjskog navoja
β, γ	°	Kutovi profila navoja
m	mm	Udaljenost središta mjernih elemenata
w	mm	Normirani težinski faktor
\bar{x}	mm	Aritmetička sredina
\bar{x}_w	mm	Ponderirana sredina

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
PTB	<i>Physikalisch- Technische Bundesanstalt</i> – Fizičko tehnički savezni institut
LNE	<i>Laboratoire national de métrologie et d'essais</i> – Nacionalni laboratorij za mjerenja i ispitivanja
EURAMET	<i>Association Européenne des Instituts Nationaux de Métrologie</i> – Europsko udruženje nacionalnih mjeriteljskih instituta
PTB	<i>Physikalisch- Technische Bundesanstalt</i> – Fizičko tehnički savezni institut
LNE	<i>Laboratoire national de métrologie et d'essais</i> – Nacionalni laboratorij za mjerenja i ispitivanja
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i> – Međunarodni ured za utege i mjere
CIPR	<i>Comité International des Poids et Mesures</i> – Međunarodni odbor za utege i mjere
CGPM	<i>Conférence Générale des Poids et Mesures</i> – Opća konferencija za utege i mjere
CMM	<i>Coordinate measuring machine</i> – Koordinatni mjerni uređaj

SAŽETAK

Za kontrolu navoja u industriji koriste se različiti navojni kontrolnici složene geometrije. Tijekom vremena uslijed dugotrajnog korištenja dolazi do njihovog trošenja te ih je potrebno periodično umjeravati. Najznačajnija dimenzija navoja, njegov srednji promjer, obično se mjeri kontaktnom metodom pomoću 1D mjernih uređaja. Europska organizacija nacionalnih mjeriteljskih instituta EURAMET u svom vodiču EURAMET cg-10 navodi različite kategorije umjeravanja. Kako bi se mogao odrediti srednji promjer navoja prema kategorijama 2a, 2b i 3, potrebno je izmjeriti i korak navoja.

U okviru ovog diplomskog rada opisan je navoj te navojni kontrolnici za kontrolu unutarnjeg navoja. Također u teorijskom dijelu rada dan je prikaz mjeriteljske infrastrukture te su opisane metode mjerenja koraka navoja s naglaskom na optičke sustave.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je mjerenje koraka navoja u laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na alatnom mikroskopu te univerzalnom 1D mjernom uređaju te su uspoređeni rezultati mjerenja.

Ključne riječi: navoj, korak navoja, srednji promjer navoja, navojni kontrolnici, optički sustavi

SUMMARY

Various thread gauges with complex geometry are used for thread control in industry. Over time, as a result of long-term use, they wear out and they need to be calibrated periodically. The most important dimension of a thread, its pitch diameter, is usually measured by the contact method using 1D measuring devices. The European Association of National Metrology institutes EURAMET lists different calibration categories in its guide EURAMET cg-10. In order to be able to determine the pitch diameter according to categories 2a, 2b and 3, it is necessary to measure thread pitch.

In this thesis the thread and the thread gauges for internal thread are described. Also, in the theoretical part of the thesis, a brief description of the metrological infrastructure is given, and methods of thread pitch measurement are described, with an emphasis on optical systems.

In the experimental part of the thesis, thread pitch is measured in the laboratory for precise length measurements at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture using a tool microscope and a universal 1D measuring device, and the results are compared.

Key words: screw thread, pitch, pitch diameter, screw thread gauge, optical systems

1. UVOD

Kada govorimo o mjeriteljstvu kao o znanosti treba spomenuti kako se ono kroz povijest razvijalo u okviru mnogih drugih znanstvenih područja poput astronomije ili geodezije sve do 18. stoljeća kada su se počeli razvijati mjerni instrumenti. Važna prekretnica za ovo znanstveno područje bila je (uz definiranje etalona duljine) i pojava industrijske revolucije za vrijeme koje su se pojavili brojni instrumenti, ali i industrijski proizvodi koji su se počeli masovno proizvoditi i koji su imali izmjenjive dijelove koje je trebalo sistematizirati i standardizirati. Tu svakako treba spomenuti i neke od najčešćih strojnih elemenata koji se koriste u industriji: vijak i maticu. Oni zajedno čine vijčani spoj, a njihov osnovni dio čini navoj preko kojeg se prenose spojne sile. Postoji više vrsta navoja, te su njihovi oblici i dimenzije standardizirani prema određenim normama. Za kontrolu navoja koriste se različiti navojni kontrolnici kao što su navojni čepovi, navojni prstenovi te kontrolni češljevi za brzu kontrolu navoja. Norma ISO 1502:1996 specificira izradu i korištenje navojnih kontrolnika za kontrolu metričkih navoja. Kako bi se osigurala sljedivost, odnosno pouzdanost mjernih rezultata, potrebno je uspostaviti odnos mjerene veličine s referentnom veličinom etalona na višoj razini. S obzirom da su navojni kontrolnici tijekom dugotrajnog korištenja podložni trošenju, potrebno ih je periodično umjeravati. Najznačajnija dimenzija navoja je srednji promjer koji se uobičajeno mjeri kontaktnom metodom pomoću 1D mjernih uređaja. Europska mjeriteljska regionalna organizacija EURAMET 2012. godine izdala je najnovije izdanje vodiča za umjeravanje EURAMET cg-10, odnosno postupke određivanja srednjeg promjera navoja s ciljem povećanja jednakosti i međusobnog priznanja rezultata umjeravanja od strane različitih laboratorija. EURAMET cg-10 navodi kategorije umjeravanja navojnih kontrolnika. Kako bi se mogao odrediti srednji promjer navoja prema kategorijama 2a, 2b i 3 potrebno je poznavati, odnosno izmjeriti i korak navoja. U teorijskom dijelu ovoga rada opisana je mjeriteljska infrastruktura, navojni kontrolnici za kontrolu unutarnjeg navoja te su obrađene metode mjerenja koraka navoja. U eksperimentalnom dijelu rada u laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta Strojarnstva i brodogradnje ispitana je primjenjivost optičke metode mjerenja koraka navoja primjenom alatnog mikroskopa te su rezultati mjerenja uspoređeni s onima dobivenim kontaktnom metodom.

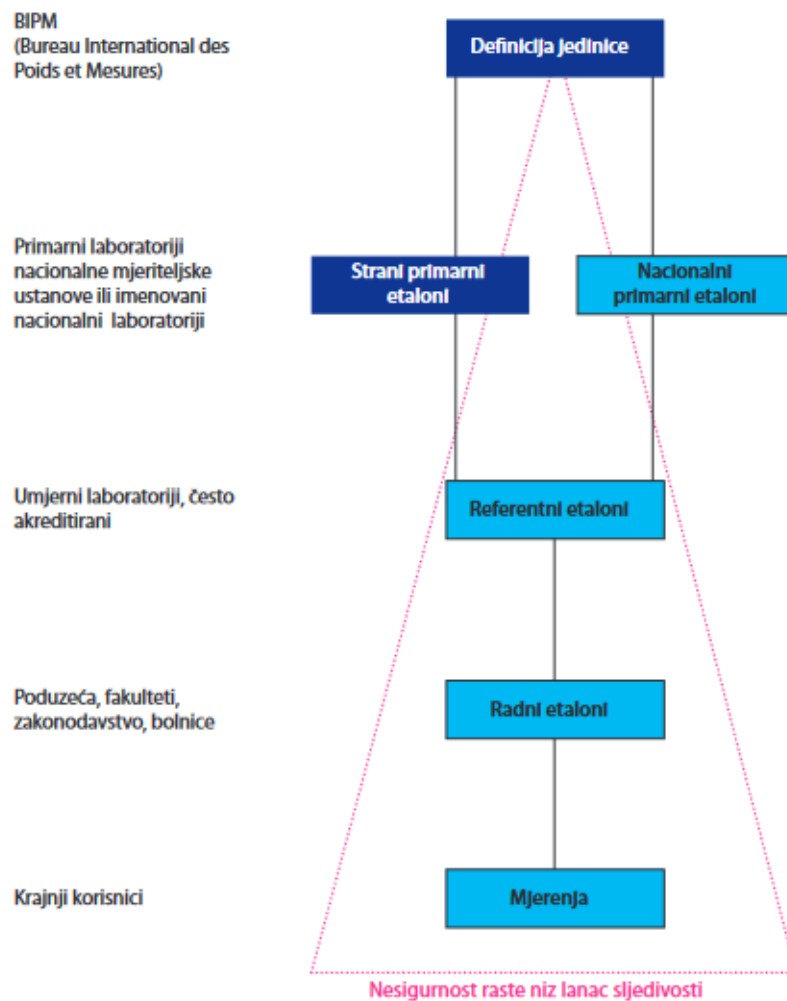
2. MJERITELJSTVO

Mjeriteljstvo je znanost koja se bavi mjerenjem te kao takva ima tri glavna zadatka:

- Definiranje mjernih jedinica koje su međunarodno priznate (npr. metra).
- Ostvarenje mjernih jedinica različitim znanstvenim metodama.
- Utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prosljeđivanju toga znanja (npr. dokumentirani odnos između mikrometarskog vijka u trgovini tehničkom robom i primarnog laboratorija za optičko mjerenje duljine).

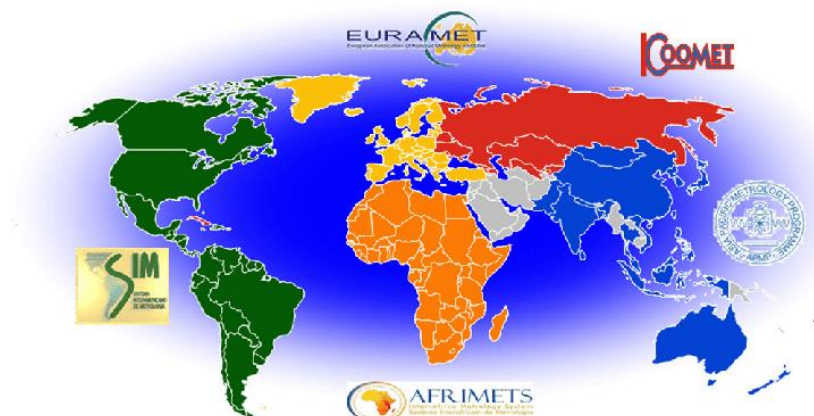
Kada govorimo o lancu sljedivosti govorimo o lancu usporedbi od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Mjerna nesigurnost mjera je kakvoće mjernog rezultata koja omogućuje da se mjerni rezultati uspoređuju s drugim rezultatima, etalonima, referencijama ili specifikacijama. Mjerni etalon definira se kao materijalna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav koji služi za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice ili jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca.

Može se reći da sljedivost općenito osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini, koji u konačnici završavaju s primarnim etalom. Umjeravanje mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti [1].



Slika 1. Lanac sljedivosti [1]

Postoje brojni nacionalni mjeriteljski instituti koji osiguravaju sljedivost unutar pojedinih zemalja kao što su PTB u Njemačkoj ili LNE u Francuskoj. Na globalnoj razini oni su povezani u regionalne mjeriteljske organizacije (Slika 2.).



Slika 2. Regionalne mjeriteljske organizacije [2]

Regionalne mjeriteljske organizacije imaju važnu ulogu koja uključuje:

- Olakšavanje sljedivosti SI jedinica.
- Koordinaciju usporedbi nacionalnih mjernih etalona.
- Izradu zajedničkih osvrta na tehničke kompetencije i sustave kvalitete.
- Suradnju u mjeriteljskim istraživanjima i razvoju.
- Provođenje zajedničkih vježbi i konzultacija [2].

U Europi kao regionalna mjeriteljska organizacija djeluje EURAMET (*Association Européenne des Instituts Nationaux de Métrologie*). Republiku Hrvatsku u organizaciji EURAMET do 2019. godine predstavljao je Hrvatski mjeriteljski institut, a od 2019. predstavlja ju Državni zavod za mjeriteljstvo kojemu je je Hrvatski mjeriteljski institut u međuvremenu pripojen.

1875. godine u Parizu potpisan je tzv. „Dogovor o metru“. Tim dogovorom stvorena je trajna znanstvena ustanova Međunarodni ured za utege i mjere BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*). Svake četiri godine održava se Opća konferencija za utege i mjere CGPM (*Conférence Générale des Poids et Mesures*). Na toj konferenciji razmatra se i provjerava djelatnost koju obavljaju nacionalne mjeriteljske ustanove kao i BIPM te se donose preporuke o novim odrednicama i svim bitnim pitanjima iz djelokruga BIPM-a.

CGPM bira predstavnike za Međunarodni odbor za utege i mjere CIPM (*Comité International des Poids et Mesures*) koji se sastaje svake godine i koji nadzire BIPM te surađuje s drugim međunarodnim mjeriteljskim organizacijama

CIPM MRA Sporazum je sporazum o međusobnome priznavanju između nacionalnih mjeriteljskih ustanova. Sastoji se od dva dijela:

- Prvi dio koji se odnosi na priznavanje potvrda o umjeravanju i mjerenju nacionalnih mjeriteljskih ustanova.
- Drugi dio koji je vezan uz uspostavljanje stupnja jednakosti nacionalnih etalona.

Svaka država ima jednog potpisnika CIPM MRA, međutim i druge mjeriteljske ustanove koje su nositelji nacionalnih etalona također mogu sudjelovati u CIPM MRA preko potpisnika.

CIPM MRA ima za cilj:

- Osigurati sigurni temelj vladama za šire sporazume vezane uz međunarodnu trgovinu, komercijalu i poslove u zakonskome uređivanju.
- Ostvarivanje istovrijednosti nacionalnih mjernih etalona.
- Osiguravanje međusobnog priznavanja potvrda o mjerenju i umjeravanju.

Ti ciljevi ostvaruju se kroz:

- Ispitivanje mogućnosti mjerenja i umjeravanja nacionalnih mjernih instituta sudionika (Calibration and Measurement Capabilities – CMC's).
- Dokazivanjem osposobljenosti nacionalnog mjernog instituta sudionika te preispitivanjem sustava kvalitete.
- Sudjelovanjem nacionalnih mjernih instituta u međunarodnim usporedbama etalona.

Rezultati prethodno navedenih postupaka su izjave o mjernim mogućnostima (CMC's) svih nacionalnih mjernih instituta sudionika kao i rezultati usporedbi koji se objavljuju u BIPM-ovoj bazi podataka javno dostupnoj na internetu.

Baza podataka ključnih usporedbi KCDB (BIPM key comparison database) sastoji se od četiri dijela koji čine dodatke CIPM MRA:

- Dodatak A: Popis nacionalnih mjernih instituta.
- Dodatak B: Rezultati ključnih i dopunskih usporedbi.
- Dodatak C: Mogućnosti mjerenja i umjeravanja (CMC) nacionalnih mjernih instituta sudionika.
- Dodatak D: Popis ključnih usporedbi [1].

2.1. Mjeriteljska infrastruktura

Mjeriteljstvo se u osnovi može podijeliti na:

- Zakonsko mjeriteljstvo
- Znanstveno mjeriteljstvo
- Industrijsko mjeriteljstvo
- Temeljno mjeriteljstvo.

Zakonsko mjeriteljstvo uređeno je zakonom i raznim propisima čiji je cilj uspostaviti povjerenje u rezultate mjerenja u području primjene zakonitih mjerenja, odnosno zaštititi građane od posljedica pogrešnih mjerenja kako u službenim i trgovačkim prostorima tako i u radnom okolišu, zaštiti na radu i sigurnosti.

Znanstveno mjeriteljstvo bavi se problemima svih zajedničkih mjeriteljskih pitanja bez obzira na veličinu koja se mjeri. Uključuje opće teorijske i praktične probleme vezane uz mjerne jedinice, mjerne pogreške i nesigurnosti.

Industrijsko mjeriteljstvo obuhvaća upravljanje mjernim procesima, postupcima umjeravanja, razdobljima umjeravanja, upravljanje postupcima u industriji radi osiguranja usklađenosti sa zahtjevima za njihovu uporabu.

Temeljno mjeriteljstvo podrazumijeva najvišu razinu točnosti u određenom području. Sukladno tome može se opisati kao najviša grana znanstvenog mjeriteljstva [3].

2.2. Hrvatska mjeriteljska infrastruktura

Hrvatsku mjeriteljsku infrastrukturu čine sljedeće bitne sastavnice:

- Državni zavod za mjeriteljstvo
- Umjerni nacionalni laboratoriji
- Hrvatska akreditacijska agencija (HAA)
- Hrvatski zavod za norme (HZN).

Državni zavod za mjeriteljstvo organizacija je zadužena za obavljanje mjeriteljskih aktivnosti u skladu sa Zakonom o mjeriteljstvu. Najvažnije aktivnosti uključuju: donošenje mjeriteljskih odluka, provedba mjeriteljskog nadzora, obavljanje mjeriteljskih aktivnosti i predstavljanje Republike Hrvatske u međunarodnim mjeriteljskim organizacijama. Državni zavod za mjeriteljstvo član je:

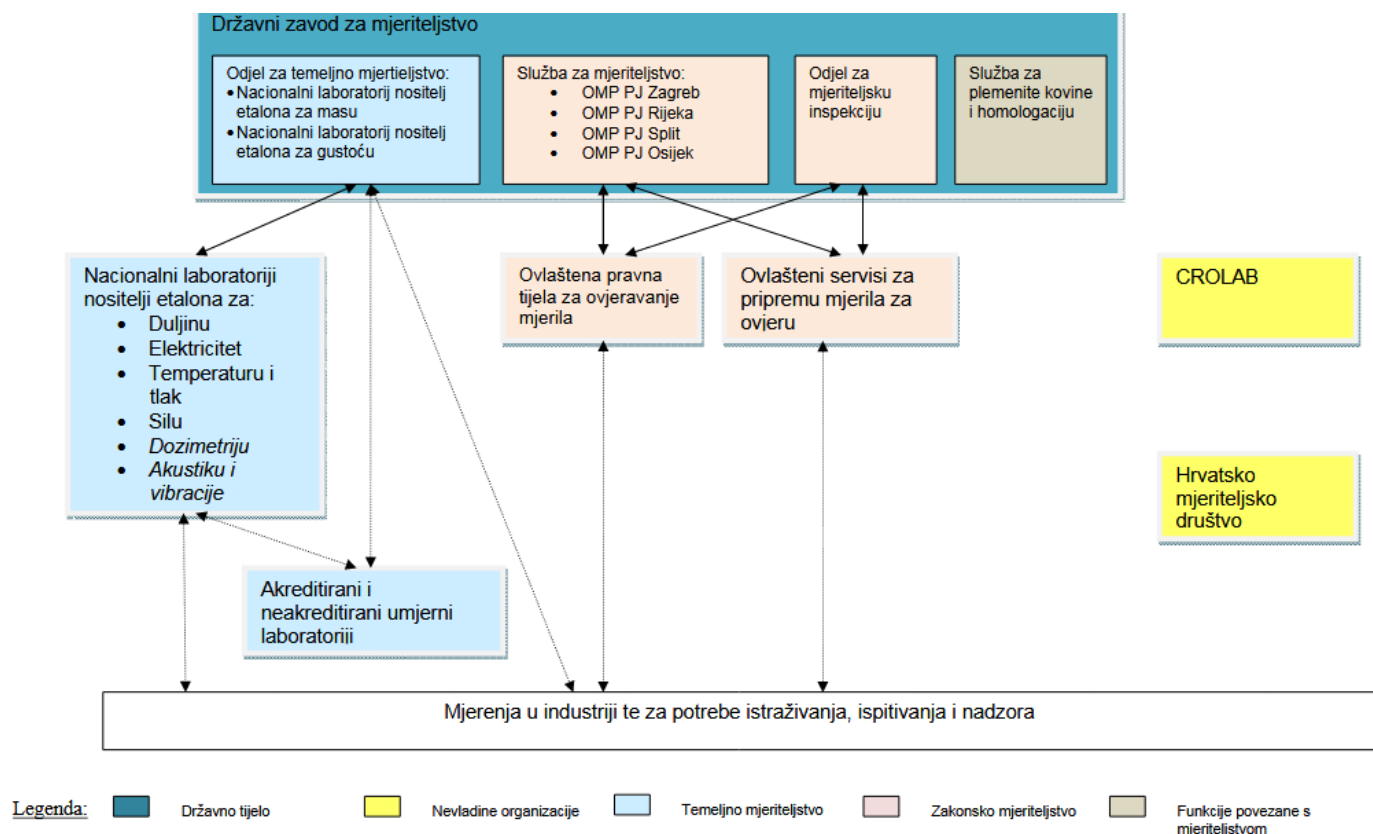
- Međunarodne organizacije za zakonsko mjeriteljstvo (OIML)
- Europskog saveza nacionalnih mjeriteljskih instituta (EURAMET)
- Suradnje u mjeriteljstvu DUNAMET
- Opće konferencije za utege i mjere (CGPM)
- Europske suradnje u zakonskom mjeriteljstvu (WELMEC).

Umjerni nacionalni laboratoriji nositelji su nacionalnih etalona te imaju zadatak ostvariti, čuvati i održavati državne etalone te osigurati sljedivost na najvišu moguću razinu. Svi nacionalni laboratoriji imaju međunarodnu akreditaciju za odgovarajuće područje u kojem djeluju.

U sustavu trenutno djeluju slijedeći nacionalni laboratoriji nositelji etalona:

- Nacionalni laboratorij za duljinu (u okviru Fakulteta strojarstva i brodogradnje – FSB)
- Laboratorij za procesna mjerenja (u okviru FSB-a)
- Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (u okviru FSB-a)
- Primarni laboratorij za elektromagnetske veličine (u okviru Fakulteta elektrotehnike i računarstva – FER)
- Laboratorij za masu (u okviru Državnog zavoda za mjeriteljstvo – DZM)
- Laboratorij za gustoću (u okviru DZM-a)
- Sekundarni standardni dozimetrijski laboratorij (u okviru Instituta Ruđer Bošković-IRB)
- Samostalna služba za umjerni laboratorij (u okviru Državnog hidrometeorološkog zavoda - DHMZ).

Hrvatska akreditacijska agencija (HAA) osnovana je na temelju Zakona o akreditaciji (Narodne novine br. 158/2003) te je sa samostalnim radom započela 1. srpnja 2005. godine. Pridružena je članica Međunarodne organizacije za akreditaciju laboratorija (ILAC) te je punopravna članica Europske organizacije za akreditaciju (EA). HAA zajedno sa mrežom akreditiranih tijela za ocjenu sukladnosti predstavlja osnovu za provedbu tehničkog zakonodavstva, ocjenu sukladnosti proizvoda, procjenu stanja zaštite okoliša, zaštite zdravlja i zaštite potrošača odnosno zajedno osiguravaju provedbu nadzora nad tržištem u Republici Hrvatskoj [4] [5].



Slika 3. Organizacija Hrvatskoga nacionalnog mjeriteljskog sustava [5]

2.3. Dimenzijsko mjeriteljstvo

Dimenzijsko mjeriteljstvo predstavlja znanost i primjenu geometrijskog mjerenja duljine, volumena, ravnosti, zaobljenosti površine itd. Sve do 18. st. razvoj mjernih instrumenata je bio uglavnom ograničen na područje astronomije i geodetskih mjerenja. Godine 1820. definiran je etalon duljine, metar, što je predstavljalo značajan korak prema razvoju mjerenja u industriji. Industrijska revolucija dovela je do masovne proizvodnje i posljedično do uvođenja izmjenjivih dijelova proizvoda što je bila važna prekretnica u razvoju dimenzijskog mjeriteljstva. Proizvode koje su do tada proizvodili pojedini obrtnici u linijskom proizvodnom procesu sada je proizvodilo više obrtnika od kojih je svaki bio odgovoran za pojedinu specifičnu komponentu. Konačni proizvod bi se potom napravio sklapanjem pojedinih komponenti. Kako bi se osiguralo da svi dijelovi proizvoda međusobno odgovaraju, bilo je potrebno uskladiti sve dijelove, stoga su mjerene njihove dimenzije.

Značajna prekretnica u standardizaciji mjerenja bio je izum graničnih mjerki Carla Edvarda Johanssona 1896. godine (Slika 4.) kao i izum interferometra Alberta Abrahama Michelsona oko 1880. godine. Ovo je omogućilo umjeravanje mehaničkih etalona sa mjernom nesigurnosti od oko $0,03 \mu\text{m}$. Od tada slijedi konstantan razvoj u mogućnosti obavljanja dimenzijskih mjerenja, što je omogućilo proizvodnju dijelova čvršćih tolerancija [6].



Slika 4. Set graničnih mjerki [7]

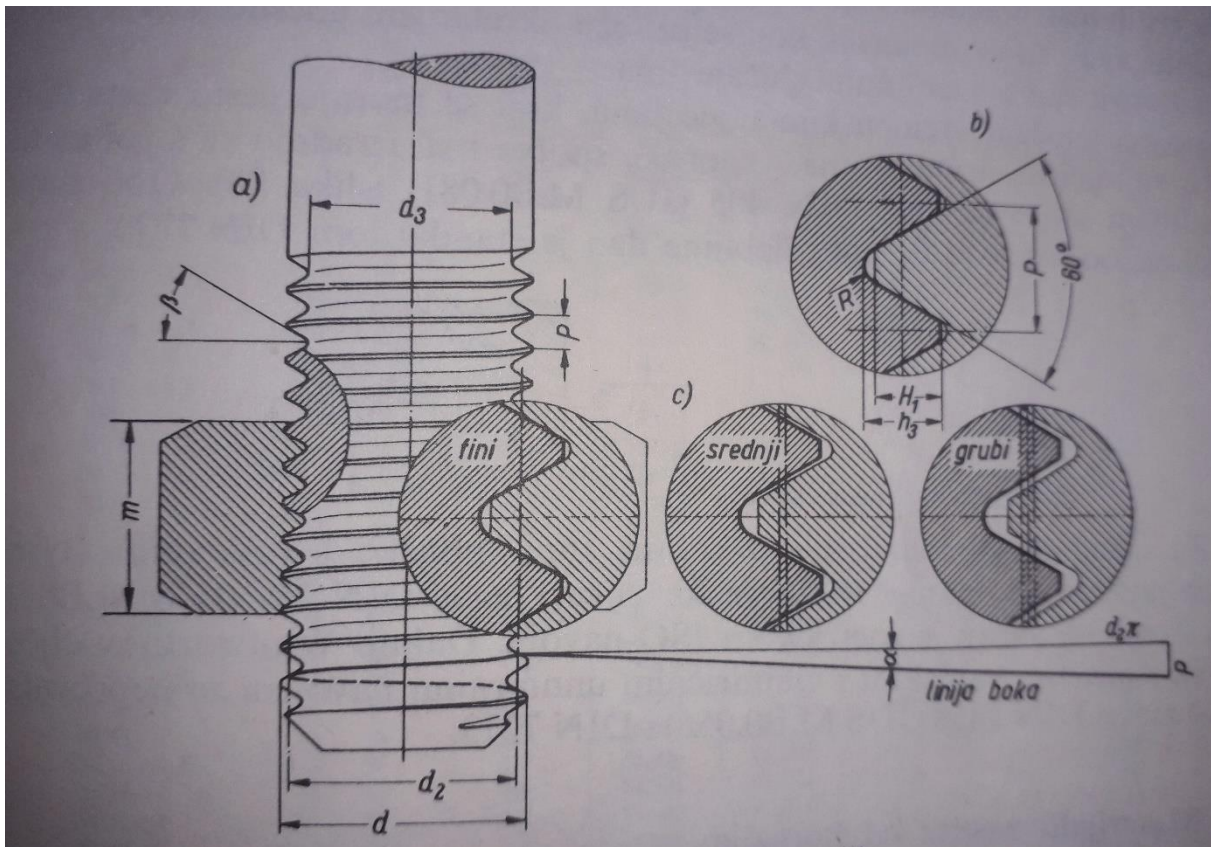
Razvoj standarda duljine dostigao je novu prekretnicu 1983. godine kada je metar definiran u odnosu na brzinu svjetla i kada su dane praktične smjernice kako osigurati sljedivost primjenom lasera prema definiranim uvjetima (BIPM 1984.).

Najnovija istraživanja uključuju razvoj frekventnog češlja koji omogućuje povezanost između etalona vremena i stabilizirane laserske frekvencije, kao i primjena računalne tomografije kod geometrijskih dijelova koja omogućava beskontaktno, nerazorno mjerenje značajki čak i unutar samog predmeta mjerenja [6].

3. NAVOJ

3.1. Definicije i pojmovi

Navoj, kao osnovni dio vijka ima profil koji se usponom P ovija oko cilindrične jezgre promjera d_3 (Slika 5.). Ploha koja nastaje razvijanjem jednog navoja na srednjem promjeru d_2 zajedno s normalom na os cilindra tvori kut uspona α



Slika 5. Spoj vijka i matice [8]

Metrički ISO navoj (Slika 5.) izvodi se u razredima tolerancija:

- Fino f – kod navoja velike točnosti, male zračnosti.
- Srednje m – za opću uporabu.
- Grubo g – ako nema zahtjeva za točnost.

Postoje normalni i fini navoj. Fini navoji, za razliku od normalnih, imaju manju dubinu navoja h_3 i uz to manji uspon P .

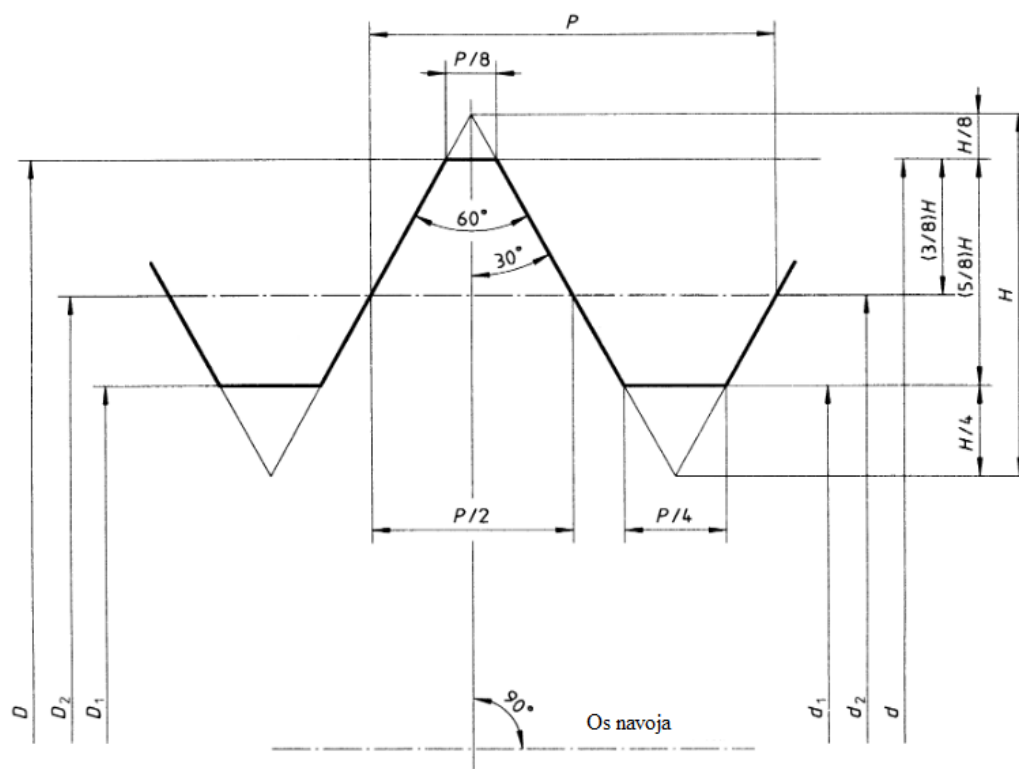
Uobičajeno se koriste desni navoji koji se pritežu okretanjem u smjeru kazaljke na satu, dok se lijevi navoji pritežu okretanjem u smjeru obrnutom od kazaljke na satu [8].

Definicije povezane sa navojem vijka:

- Korak navoja može se definirati kao udaljenost između istovjetnih točaka na dva susjedna grebena koje pritom leže na pravcu paralelnom sa središnjom osi navoja.
- Uspón navoja aksijalni je pomak vijka za jedan puni okret oko središnje osi.
- Vanjski promjer je promjer zamišljenog cilindra koji dira vrhove navoja, a mjeri se pod pravim kutom prema središnjoj osi navoja.
- Unutarnji promjer je promjer zamišljenog cilindra koji dira korijene navoja, a mjeri se pod pravim kutom prema središnjoj osi navoja.
- Srednji promjer navoja može se definirati kao promjer kod kojega je širina navojnog utora jednaka širini navojnog grebena. Također, srednji promjer navoja mjeri se pod pravim kutom u odnosu na središnju os navoja [9].
- Jednostavni srednji promjer definira se kao promjer srednjeg cilindra koji siječe stvarni navoj na način da je širina jednog navojnog utora jednaka polovici osnovnog koraka navoja [10].

3.2. Metrički navoj

Metrički navoj karakterizira profil jednakokraničnog trokuta s kutom profila navoja koji iznosi 60° . Općenito se najviše upotrebljavaju normalni metrički navoji, dok se fini metrički navoji upotrebljavaju u specifičnim slučajevima kod strožih zahtjeva na sigurnost elemenata gdje je potrebna veća sigurnost od odvijanja. Norma ISO 262: 1998 opisuje standardne dimenzije vijaka nazivnog promjera od 1 do 64 mm (Tablica 1.) za metričke navoje opće namjene definirane normom ISO 68-1:1998 (Slika 6.).



Slika 6. Profil navoja [11]

Gdje je:

D – nazivni promjer unutarnjeg navoja

d – nazivni promjer vanjskog navoja

D_1 – mali promjer unutarnjeg navoja

d_1 – mali promjer vanjskog navoja

D_2 – srednji promjer unutarnjeg navoja

d_2 – srednji promjer vanjskog navoja

H - visina navoja

P – korak navoja [11].

Tablica 1. Standardne dimenzije navoja [12]

Nazivni promjer D, mm		Korak navoja P, mm		
Prvi red prioriteta	Drugi red prioriteta	Normalni	fini	
1		0,25		
1,2		0,25		
	1,4	0,3		
1,6		0,35		
	1,8	0,35		
2		0,4		
2,5		0,45		
3		0,5		
	3,5	0,6		
4		0,7		
5		0,8		
6		1		
	7	1		
8		1,25	1	
10		1,5	1,25	1
12		1,75	1,5	1,25
	14	2	1,5	
16		2	1,5	

Nazivni promjer D, mm		Korak navoja P, mm		
Prvi red prioriteta	Drugi red prioriteta	Normalni	Fini	
	18	2,5	2	1,5
20		2,5	2	1,5
	22	2,5	2	1,5
24		3	2	
	27	3	2	
30		3,5	2	
	33	3,5	2	
36		4	3	
	39	4	3	
42		4,5	3	
	45	4,5	3	
48		5	3	
	52	5	4	
56		5,5	4	
	60	5,5	4	
64		6	4	

3.3. Kategorije umjeravanja

Kada govorimo o umjeravanju navojnih kontrolnika, najznačajnija veličina je srednji promjer navoja. U tu svrhu 2012. godine EURAMET je izdao posljednju verziju vodiča naziva EURAMET cg-10 s ciljem međusobne potvrde rezultata umjeravanja dobivenih od strane različitih laboratorija. Kako bi se srednji promjer navoja mogao odrediti prema određenim kategorijama (Tablica 2.) bitno je izmjeriti i korak navoja.

Prema EURAMET-u korak navoja definira se kao udaljenost mjerena paralelno s osi navoja između odgovarajućih točaka na susjednim navojnim formama u istoj aksijalnoj ravnini na istoj strani s obzirom na os.

Tablica 2. Kategorije umjeravanja prema EURAMET cg-10 [13]

	Parametar	Izmjereno	Pretpostavljeno	Uzeto u obzir kod sastavnice nesigurnosti
1	Jednostavni srednji promjer			
1a	m	+	-	+
	α	-	Unutar tolerancije	+(Tolerancijsko polje)
	P	Nazivna vrijednost	-	-
1b	m	+	-	+
	α	+	-	+
	P	Nazivna vrijednost	-	-
2	Srednji promjer			
2a	m	+	-	+
	α	-	Unutar tolerancije	+(Tolerancijsko polje)
	P	+	-	+
2b	m	+	-	+
	α	+	-	+
	P	+	-	+
3	Funkcionalni srednji promjer			
3	m	+	-	+
	β, γ	+	-	+
	P	+	-	+

3.3.1. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera (1a)

Jednostavni srednji promjer navoja računa se preko udaljenosti m (korigiranog zbog mjerne sile i utjecaja nalijeganja mjernog elementa) i iz pretpostavljenih nazivnih vrijednosti koraka i kuta navoja. Udaljenost m predstavlja udaljenost središta mjernih elemenata, odnosno to je karakteristična veličina dobivena mjernom metodom.

Sastavnica nesigurnosti mora uključivati: nesigurnost mjerenja promjera, nesigurnost mjernog elementa te nesigurnost kuta navoja. Kut navoja se ne mjeri već se umjesto toga pretpostavlja da je unutar dozvoljenih tolerancija. Kutu navoja pridružuje se njegova nazivna vrijednost uz pretpostavku trokutaste razdiobe mogućih vrijednosti. Ako je tolerancijsko polje $\pm a$ (ukupno $2a$), standardna mjerna nesigurnost iznosi $a\sqrt{3}$. Za korak navoja se uzima nazivna vrijednost i kao takva se smatra konstantnom [10].

3.3.2. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera i kuta navoja (1b)

U usporedbi sa 1a, direktno mjerenje kuta navoja može dati pouzdanije rezultate mjerenja srednjeg promjera navoja uz potencijalno manju mjernu nesigurnost [10].

3.3.3. Mjerenje srednjeg promjera i koraka navoja (2a)

Srednji promjer računa se preko udaljenosti m (korigiranog zbog mjerne sile i utjecaja nalijeganja mjernog elementa) i uz pretpostavku nazivne vrijednosti koraka i kuta navoja.

Sastavnica mjerne nesigurnosti mora uključivati: nesigurnost mjerenja promjera, nesigurnost koraka, nesigurnost mjernog elementa te nesigurnost kuta navoja. Kut navoja se ne mjeri već se umjesto toga pretpostavlja da je unutar granica tolerancije. Kutu navoja se pridodaje nazivna vrijednost uz pretpostavku da je razdioba mogućih vrijednosti trokutasta. Ako je tolerancijsko polje $\pm a$ standardna nesigurnost iznosi $a\sqrt{3}$ [10].

3.3.4. Mjerenje srednjeg promjera, koraka i kuta navoja (2b)

U usporedbi s 2a direktno mjerenje kuta navoja može dati pouzdanije mjerne rezultate srednjeg promjera navoja povezane s mogućom manjom mjernom nesigurnosti [10].

3.3.5. Mjerenje funkcionalnog srednjeg promjera, koraka i kutova profila navoja (3)

Funkcionalni srednji promjer navoja računa se preko udaljenosti m (korigiranog zbog mjerne sile i zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa), izmjerenog koraka i iz izmjerenih kutova profila navoja. Za detaljnije umjeravanje također bi u obzir trebale biti uzete varijacije u kutu uspona.

Sastavnica mjerne nesigurnosti mora sadržavati: nesigurnost mjerenja promjera, nesigurnost mjernog elementa, nesigurnost koraka navoja kao i mjernu nesigurnost kutova profila navoja [10].

4. NAVOJNI KONTROLNICI

S obzirom na sve veće zahtjeve u proizvodnom okruženju vrlo je bitno da svi vijčani dijelovi budu pregledani na adekvatan način pomoću navojnih kontrolnika. Odabir odgovarajuće opreme za preglede ključan je sa stajališta kontrole kvalitete. Kriva metoda ili alat mogu dovesti do netočnih rezultata mjerenja i tako utjecati na cijenu i funkcionalnost pregledanih dijelova. Navojni kontrolnici za metričke ISO navoje specificirani su normom ISO 1502: 1996. Bez obzira na alat ili metodu važno je da rezultati mjerenja budu usporedivi. U slučaju dvojbi, koriste se kontrolnici preporučeni u normi ISO 1502: 1996.

Mjerila za kontrolu vanjskog navoja najčešće imaju oblik prstena, dok mjerila za kontrolu unutarnjeg navoja imaju oblik čepa [14].

4.1. Kontrolnici za ispitivanje unutarnjeg navoja

Navojni kontrolnici za ispitivanje unutarnjeg navoja sastoje se od dvije strane. Strana „ide“ izrađena je na minimalnu mjeru navoja, dok je strana „ne ide“ izrađena na maksimalnu mjeru navoja. Za unutarnji navoj koji se kontrolira strana „ide“ mora lako ostvariti spoj s navojem, a strana „ne ide“ ne smije ostvariti spoj. Na stranama kontrolnog čepa su otisnute oznake „ide“, odnosno „ne ide“ te se one razlikuju po tome što je navoj strane „ide“ nešto duži.



Slika 7. Navojni kontrolnici [15]

5. METODE MJERENJA KORAKA NAVOJA

Korak kao i kut navoja bitne su veličine za izračunavanje srednjeg promjera navoja. Mjerenje tih veličina može biti kontaktno ili beskontaktno. Kada govorimo o metodama, postoji više metoda kojima se može mjeriti korak navoja (Tablica 3.). Te metode uključuju: mjerenje pomoću univerzalnog mjernog uređaja, mjerenje oblika pomoću profilometra te mjerenje putem optičkih sustava.

Tablica 3. Mjerne metode [10]

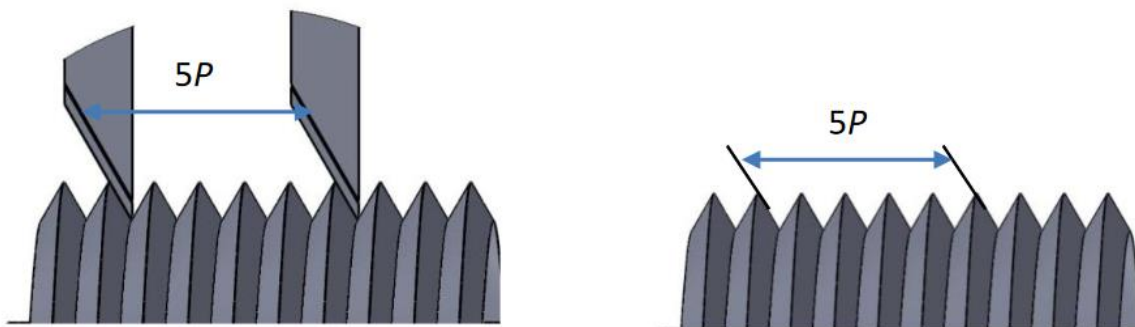
Mjerna metoda	Mjerni uređaj	Vanjski navoj	Unutarnji navoj	Srednji promjer	Kut	Korak
Metoda s T – ticalom	Univerzalni mjerni uređaj (T- ticalo) CMM	-	+	+	-	-
Metoda s mjernim čeljustima	Univerzalni mjerni uređaj	-	+	+	-	-
Metoda s mjernim valjčićima	Univerzalni mjerni uređaj (mjerni valjčići)	+	-	+	-	-
Mjerenje koraka navoja	Univerzalni mjerni uređaj (poluga za mjerenje koraka navoja)	+	+	-	-	+
Skeniranje profila navoja	MasterScanner CMM	+	+	+	+	+
Mjerenje oblika navoja	Profilometri	+	+	-	+	+
Metoda aksijalnog presjeka (mjerni nožići)	2D optički mjerni uređaj	+	Preko otiska	+	+	+
Metoda s projiciranjem slike	2D optički mjerni uređaj	+	Preko otiska	+	+	+

5.1. 2D optički mjerni uređaji

Mjerenje koraka navoja pomoću 2D optičkog mjernog uređaja može se vršiti postupkom projiciranja ili aksijalnog presjeka pomoću mjernih nožica.

Kako bi oznake na mjernim nožicama bile vidljive kod metode aksijalnog presjeka preporuča se primjena pozadinskog osvjetljenja kao i osvjetljenja pod malim kutom. Dva nožića postavljaju se s razmakom od pet navojnih utora te se mjeri udaljenost između njih.

Postupkom projiciranja dobiva se određeni prikaz mjernog predmeta na temelju kojeg se pomoću odgovarajućeg softvera mogu odrediti karakteristične točke te mjeriti udaljenost između njih. Kod unutarnjih navoja mjerenje koraka vrši se preko otiska [10].



Slika 8. Metoda aksijalnog presjeka (lijevo) i metoda projiciranja (desno) [10]

5.2. Univerzalni mjerni uređaj

Mjerenje koraka navoja kontaktnim putem vrši se na univerzalnom 1D mjernom uređaju. Za mjerenje se koristi nastavak s polugom za mjerenje koraka. Jednostavnim pomicanjem nastavka po osi paralelno uzdužnoj osi navoja mogu se mjeriti koraci navoja [10].



Slika 9. Univerzalni mjerni uređaj

6. OPTIČKI MJERNI SUSTAVI

Zahtjevi za sve preciznijim mjerenjima doveli su do značajnijeg usavršavanja metoda i postupaka mjerenja i mjernih sustava. Najpreciznija mjerenja duljina postižu se primjenom različitih optičkih mjernih sustava, kao što su koordinatni i višekoordinatni mjerni sustavi, projektori, mjerni mikroskopi, interferometri itd. Optički mjerni uređaji koji se najviše koriste u određivanju geometrijskih karakteristika proizvoda su mjerni mikroskopi i profilni projektori. Direktno mjerenje veličina vrši se pomoću mikroskopa i profilnih projektor, odnosno optičkih komparatora i to za mjerenje duljina, određivanje stanja površina i metalurške analize mikrostruktura. Osim toga mikroskopi se koriste i za precizno pozicioniranje dijelova pri čemu se koriste i drugi mjerni instrumenti. Od uvođenja profilnih projektor 1920. godine do danas profilni projektori se nisu značajno promijenili osim što se povećala preciznost i brzina rada [18].



Slika 12. Profilni projektor [19]

U odnosu na mikroskope projektori imaju određene prednosti:

- Veće vidno polje, što omogućava mjerenje veće površine bez naknadnog pozicioniranja radnog komada.
- Mjerenje na zaslonu se može izvesti sa jednostavnim instrumentima, što isključuje kupovinu komplicirane mjerne konfiguracije.
- Lako je registriranje mjernih rezultata npr. fotografiranjem.
- Lakše je obaviti mjerenje samom mjeritelju i pritom je manji umor.

Princip rada mikroskopa i projektora bazira se na uvećanju predmeta koji se mjeri ili kontrolira kako bi se uočile ili izmjerile neke karakteristike. Slika mjerenog objekta se optički uvećava, prikazuje na zaslonu i promatra kroz okular mikroskopa. Sa oba ova uređaja mogu se brzo i ekonomično odrediti dvodimenzionalne koordinate mjernih objekata sa jednom mjernom ravninom. S obzirom na to da se optički instrumenti koriste za precizna mjerenja, projicirana slika bi trebala biti čista, oštra i dimenzijski točna. Mehanički i elektronički elementi bi trebali biti kompatibilni s glavnim optičkim sustavom.

Općenito govoreći optički sustav treba imati slijedeće bitne značajke:

- Izvor svjetla.
- Sustav leća koji usmjerava svjetlo od radnog komada do optičkog sustava.
- Prikladno postolje ili stol za pozicioniranje radnog komada koji omogućuje pomicanje u dvije osi i rotaciju oko vertikalne osi.
- Okular ili odgovarajući zaslon za primanje slike.
- Uređaje za mjerenje i snimanje gdje god su potrebni [18].

6.1. Vizijski sustavi

Vizijski sustav može biti bilo koji sustav koji prima vizualnu informaciju koja se zatim kompjuterski analizira s ciljem određivanja proizvodnog procesa. Takav sustav se najčešće sastoji od izvora svjetlosti kako bi se naglasila svojstva, optike za sliku, video kamere, digitalizatora i računalnog sustava sa softverom za analizu. Prema konsenzusu u industriji, vizijski sustav se odnosi samo na primjenu ove tehnologije u proizvodnom okruženju koje je bilo glavni oslonac za ovu tehnologiju u zadnjih 25 i više godina.

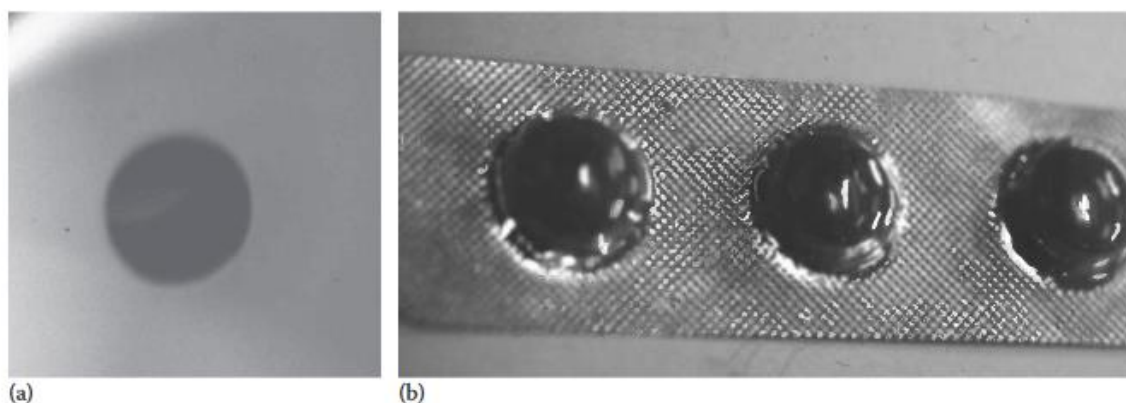
Kombinacija tehnologije kamera i kompjutera dovela je do pojave tzv. „pametnih“ kamera. Te kamere imaju ugrađene procesore koji mogu provoditi čitav niz operacija, mjerenja i zatim prenositi rezultate preko internetske veze [20].



Slika 13. „Pametne“ kamere [21]

Većina industrijskih kamera danas koristi CCD senzore (Charged Couple Device). To je visoko osjetljivi detektor fotona. Podijeljen je u veliki broj svjetlosno osjetljivih malih područja odnosno piksela koji se mogu koristiti kako bi se stvorio prikaz određenog područja od interesa [22].

Osvjetljenje i optika su naširoko prepoznati kao značajan prvi korak u uspješnoj primjeni vizije. Čista slika čini razliku između kvalitetnog i nekvalitetnog prikaza. Slika 14. prikazuje kako optički sustav može producirati iskoristivu sliku (a) od one neiskoristive (b) za mjerenja.



Slika 14. Utjecaj optičkog sustava na prikaz slike [20]

Postoje brojne stvari koje je potrebno uzeti u obzir kod primjene optičkog sustava kao što su mehaničke vibracije, postavljanje te ograničenja prostora. Ipak, odabir ispravnog osvjetljenja i optike vode uspješnoj primjeni. Zadnjih godina pojavili su se brojni alati na tržištu. Što se tiče osvjetljenja oni uključuju:

- Koaksijalnu rasvjetu
- Kupolastu rasvjetu
- Uzdužnu rasvjetu
- Prstenoliku rasvjetu.

Možda najkorisniji napredak je korištenje LED rasvjete. Veći intenzitet svjetla i duži životni vijek posljednjih godina su ih napravile dobrom alternativom halogenim žaruljama koje emitiraju toplinu i imaju kraći vijek trajanja.



Slika 15. Različite vrste osvjetljenja [23]

Korištenjem nove rasvjete napravljene posebno za vizijske sustave pojavile su se i razne konfiguracije osvjetljenja koje će pomoći istaknuti značajke od interesa i prigušiti značajke koje nisu od interesa.

Također, napredak u vizijskim sustavima kao mjeriteljskom oruđu je dostupnost i telecentričnih leća (Slika 16.) koje prikazuju sliku čije uvećanje se ne mijenja za male pomake u udaljenosti od objekta. To znači da sustav može biti tolerantniji na promjene u poziciji dijelova pod inspekcijom [20].



Slika 16. Telecentrična leća [24]

Mjerenje pomoću optičkih mjernih uređaja počinje postavljanjem objekta na mjerni stol, postavljanjem odgovarajućih parametara te zatim samim mjerenjem gdje se pomoću kamere dobiva digitalni prikaz mjernog objekta. Nakon dobivanja odgovarajućeg prikaza obavlja se analiza dobivene slike s ciljem detekcije rubova mjernog objekta. Rubovi se mogu definirati kao značajne lokalne promjene intenziteta. Taj proces često se obavlja korištenjem algoritama koji traže promjene gradijenta. Promjene intenziteta unutar određenog prikaza mogu se pripisati geometrijskim značajkama samog mjernog predmeta, ali na njih također utječu i druge značajke kao što je upotrijebljeno osvjetljenje. Tehnike kojima se osigurava prikladno osvjetljenje mjernog predmeta uključuju:

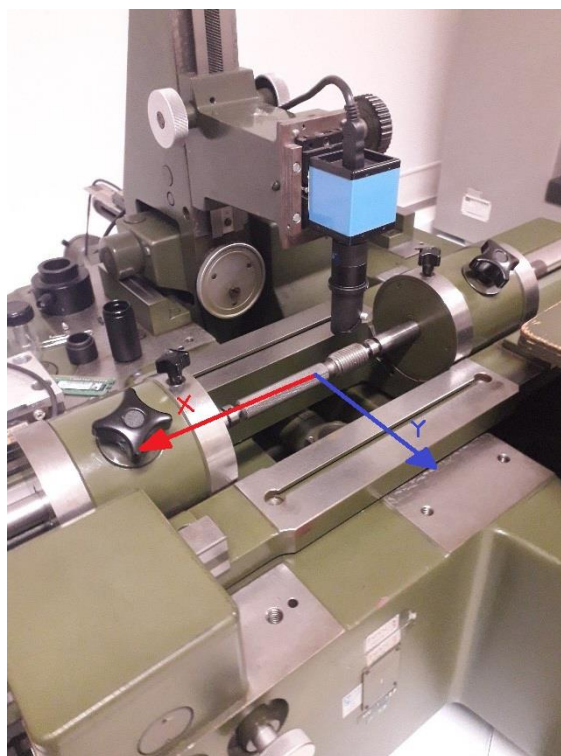
- Stražnje osvjetljenje
- Difuzno osvjetljenje
- Usmjereni osvjetljenje
- Osvjetljenje tamnog polja [25].

7. MJERENJE KORAKA NAVOJA OPTIČKOM METODOM

Mjerenje koraka navoja obavljeno je u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Laboratorij je utemeljen 1959. godine, ima status nacionalnog laboratorija za duljinu te je nositelj državnog etalona za duljinu. Sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025: 2017 laboratorij je akreditiran u području umjeravanja etalona i mjernih uređaja duljine, hrapavosti i kuta.

7.1. Optički 2D sustav Carl Zeiss Jena

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje posjeduje alatni mikroskop Carl Zeiss Jena (Slika 17.). Optički dio čine crno-bijela kamera proizvođača Imaging source te različiti objektivni. Na dvije osi mjernog sustava ugrađene su mjerne skale Renishaw tip RGH22Y30F61. Pomicanjem mjernog predmeta po vodilicama u smjeru x osi te optičkog sustava u smjeru y osi uz pomoć dva vijka mogu se mjeriti dimenzije predmeta na razini mikrometra. Cijeli sustav povezan je na računalo te se uz pomoć softvera MerOpt mogu pohranjivati koordinate točaka te vršiti mjerenja kao i obrada rezultata.

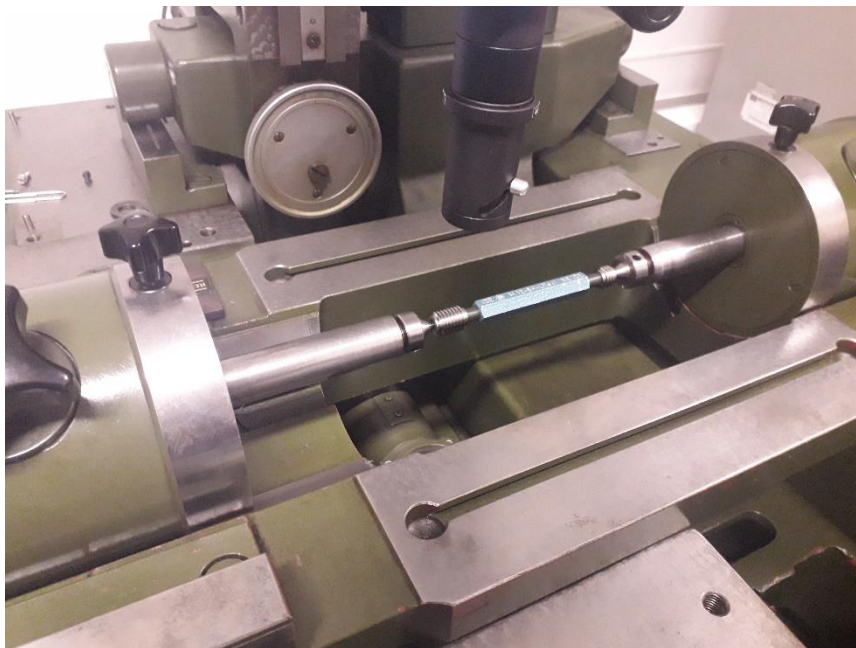


Slika 17. Carl Zeiss Jena alatni mikroskop

7.1.1. Odabir rasvjete

Prilikom postavljanja optičkog sustava treba voditi računa o izboru prikladnih komponenti kako bi se dobila što bolja slika te kako bi rezultati mjerenja bili što precizniji i točniji. Jedan od bitnih parametara je i izbor odgovarajuće rasvjete optičkog sustava. Rasvjeta se odabire ovisno o značajkama koje su bitne za mjerenje. Ovisno o tome da li je to detekcija ruba, očitavanje određene skale ili npr. analiza površine, odabir odgovarajuće rasvjete značajan je faktor u postavljanju optičkog sustava.

U okviru ovog diplomskog rada bit će ispitana primjenjivost optičke metode mjerenja koraka navoja primjenom alatnog mikroskopa. Kao predmet mjerenja odabran je navojni kontrolnik koji se koristi za ispitivanje unutarnjeg navoja (Slika 18.).



Slika 18. Navojni kontrolnik

S obzirom na složenu geometriju kontrolnika te njegovu površinu, odabir odgovarajuće rasvjete bitan je faktor u dobivanju što pouzdanijih rezultata mjerenja. Cilj je dobiti sliku koja daje što vjerniji prikaz samog predmeta koji se mjeri.

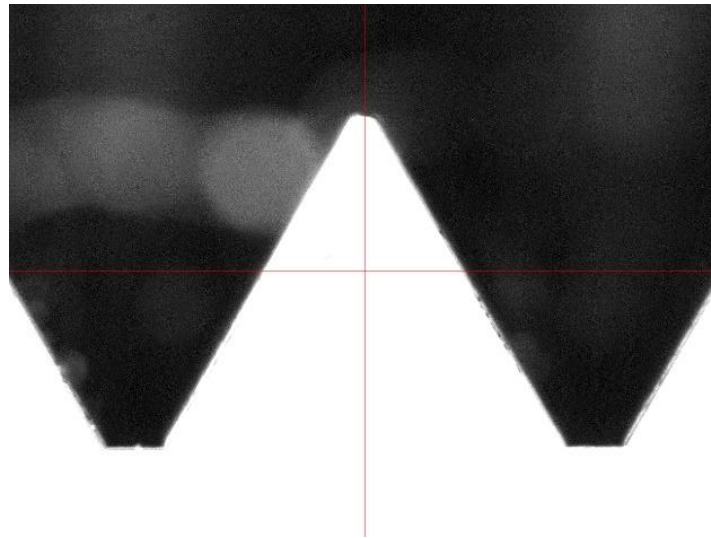
U tu svrhu u laboratoriju za precizna mjerenja FSB-a isprobani su različiti tipovi rasvjete kako bi se dobio što bolji prikaz kontrolnika. Kako bi se dobili oštri rubovi, također je potrebno zakrenuti kameru i objektiv optičkog sustava za kut uspona navoja.

Za frontalnu rasvjetu korištena je prstenolika rasvjeta modela LTZGK070-15-3-W-24V tvrtke Opto-e. Takva rasvjeta postavlja se oko objektiva na određenoj udaljenosti od predmeta mjerenja (Slika 19.).



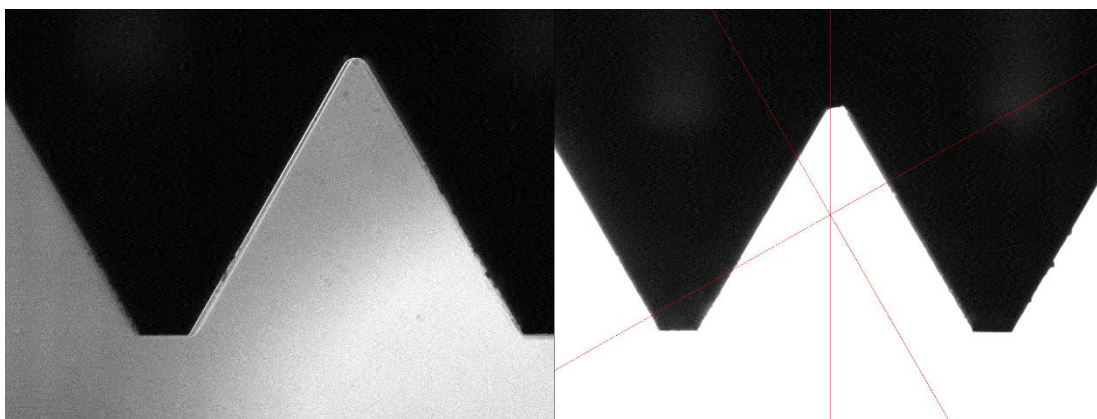
Slika 19. Frontalna prstenolika rasvjeta

Na slici dobivenoj tom rasvjetom vidljiva je pojava određenih refleksija koje mogu utjecati na rezultate mjerenja. To bi se moglo riješiti kupolastom rasvjetom, međutim dostupna kupolasta rasvjeta premalih je dimenzija za objektiv te se nije moglo postići potpuno izoštrjenje slike stoga se ta rasvjeta nije isprobavala.



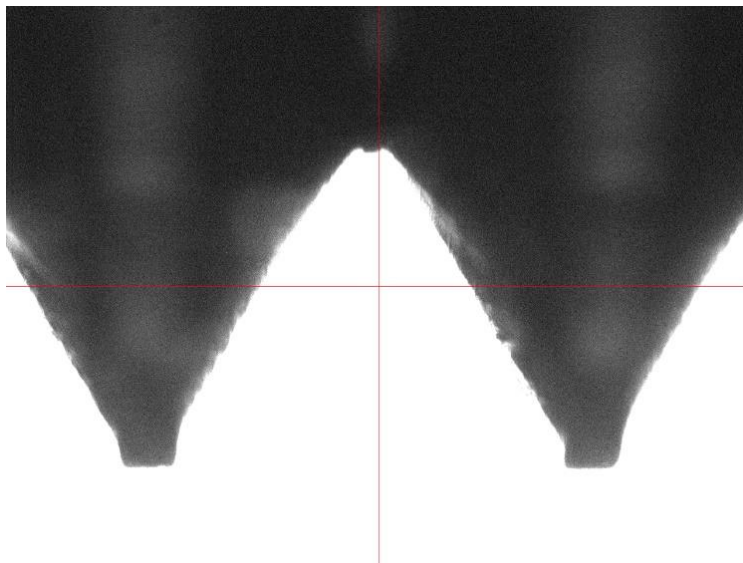
Slika 20. Prikaz dobiven frontalnom rasvjetom

Alatni mikroskop Carl Zeiss Jena koji se koristi u laboratoriju za precizno mjerenja dužina FSB-a ima vlastito osvjetljenje postavljeno s donje strane predmeta koji se mjeri te se može podesiti na dvije razine intenziteta. Takvo osvjetljenje daje kvalitetnu sliku predmeta te se rubovi mogu jasno definirati (Slika 21.).



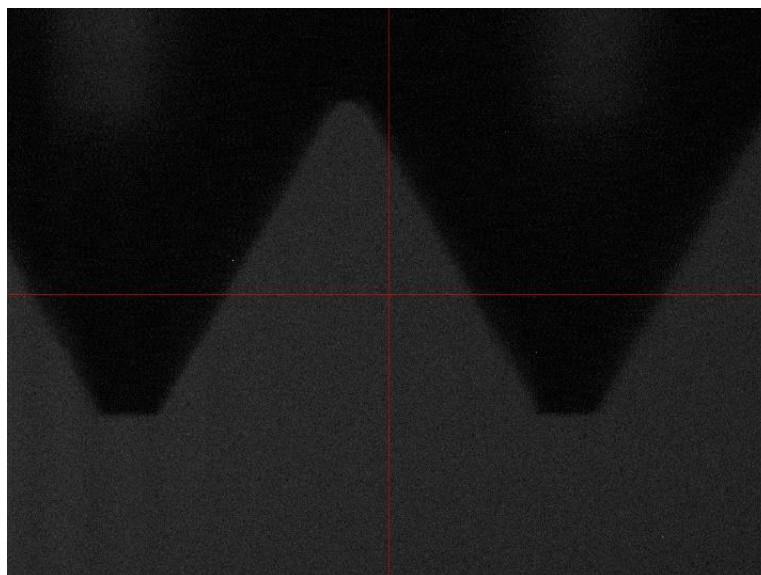
Slika 21. Prikaz dobiven osvjetljenjem alatnog mikroskopa

Također kao izvor svjetlosti isprobano je i pločasto LED osvjetljenje, međutim takvo osvjetljenje postavljeno čak i na najmanji intenzitet daje preveliko zasićenje (eng. *blur*) kao i pojavu nepoželjne refleksije te nije moguće precizno definirati rubove.



Slika 22. Prikaz dobiven pločastim LED osvjetljenjem

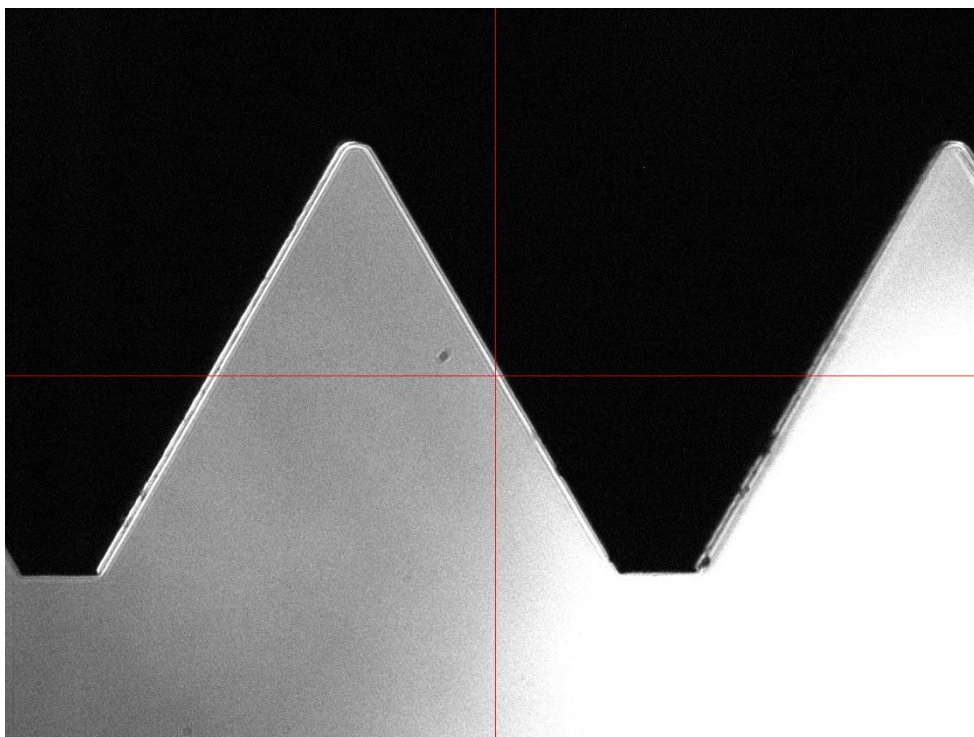
Prigušenje osvjetljenja može se postići uz pomoć zelenog filtera čime se smanjuje zasićenje (eng. *blur*), ali takva svjetlost postaje nehomogena što također može utjecati na rezultate mjerenja.



Slika 23. LED osvjetljenje uz primjenu zelenog filtera

Pokušaj izolacije pozadinskog osvjetljenja pokazao je da rasvjeta unutar laboratorija nema značajni utjecaj na prikaz mjernog predmeta. Isprobavanje različitih tipova rasvjete također je pokazalo da osvjetljenje pod malim kutom izaziva pojavu sjena i refleksije te pomicanjem optičkog sustava po osi y primjetna je razlika u kvaliteti prikaza s gornje i donje strane navoja.

Uzimajući sve faktore u obzir kao najprikladnije rješenje odabrano je pozadinsko osvjetljenje alatnog mikroskopa postavljeno na slabiji intenzitet (Slika 24.).



Slika 24. Prikaz s odabranim osvjetljenjem

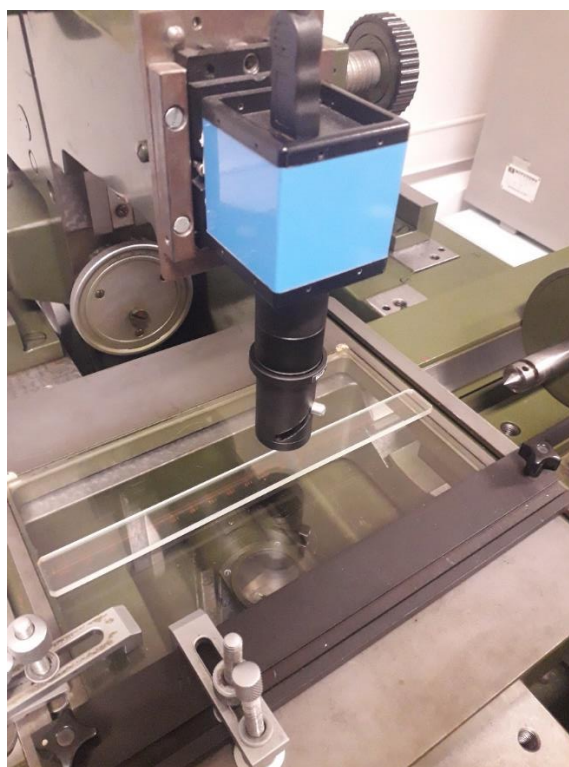
7.2. Postupak mjerenja

Mjerenje koraka navoja obavljeno je na alatnom mikroskopu Carl Zeiss Jena metodom projiciranja. Kao optički sustav alatnog mikroskopa korišteni su kamera tipa DMK 41AF02 proizvođača Imaging Source specifikacija navedenih u Tablici 4., podesivi makro objektiv tipa MC3-03X te osvjetljenje alatnog mikroskopa koje se nalazi s donje strane mjernog predmeta. Objektiv dolazi s nastavcima koji omogućuju različiti raspon uvećanja.

Tablica 4. Specifikacije kamere [26]

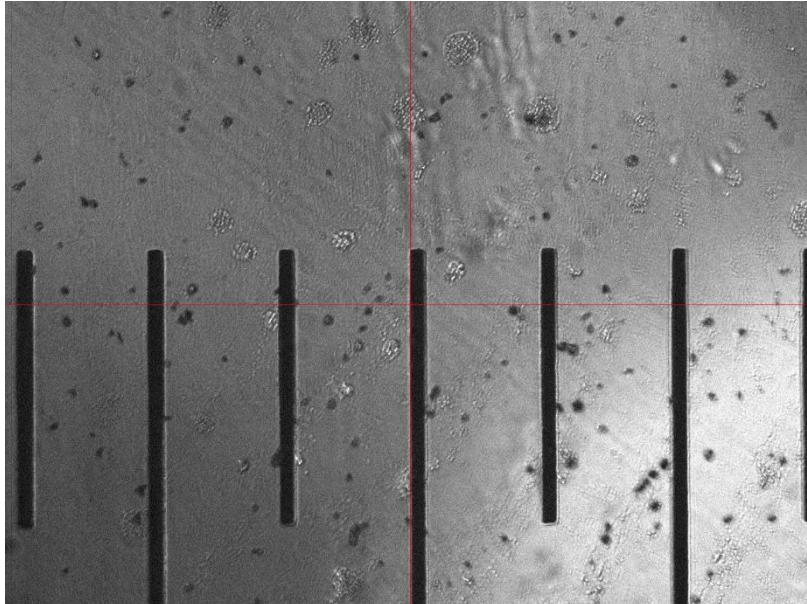
Dimenzije	50,6 mm x 50,6 mm x 56 mm
Veličina piksela	4,65 μm
Rezolucija	1,280 x 960 (1,2MP)
Vrsta senzora	½ inčni CCD(Sony ICX205AL)
Masa	265g

Prije mjerenja objektiv i kamera zakrenuti su za kut uspona navoja. Dobivanjem odgovarajuće slike predmeta objektiv se fiksira te se na postolje postavlja milimetarska skala (Slika 25.).



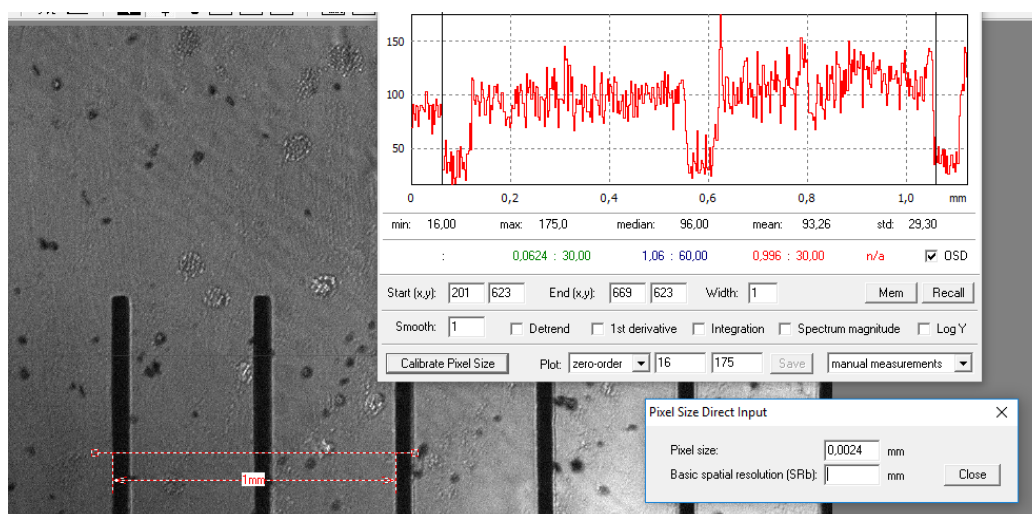
Slika 25. Milimetarska skala

Milimetarska skala postavlja se ispod fiksiranog objektiva kako bi se moglo odrediti vidno polje te uvećanje objektiva (Slika 26.).



Slika 26. Prikaz milimetarske skala

Na dobivenoj slici pomoću softvera „ISee!“ određena je veličina piksela. Definiranjem udaljenosti od jednog milimetra u softveru se pojavljuje okvir unutar kojega se mogu precizno odrediti granice mjerenja (Slika 27.). Jednostavnim klikom na opciju kalibracije može se odrediti veličina piksela koja se definira kao omjer jednog milimetra i broja piksela unutar tog milimetra.



Slika 27. Određivanje veličine piksela

Množenjem veličine piksela te dimenzija slike dobiveno je vidno polje koje iznosi 3,072 mm x 2,304 mm. Uvećanje objektiva, određeno iz odnosa veličine senzora i vidnog polja iznosi 1,93 ~ 2x.

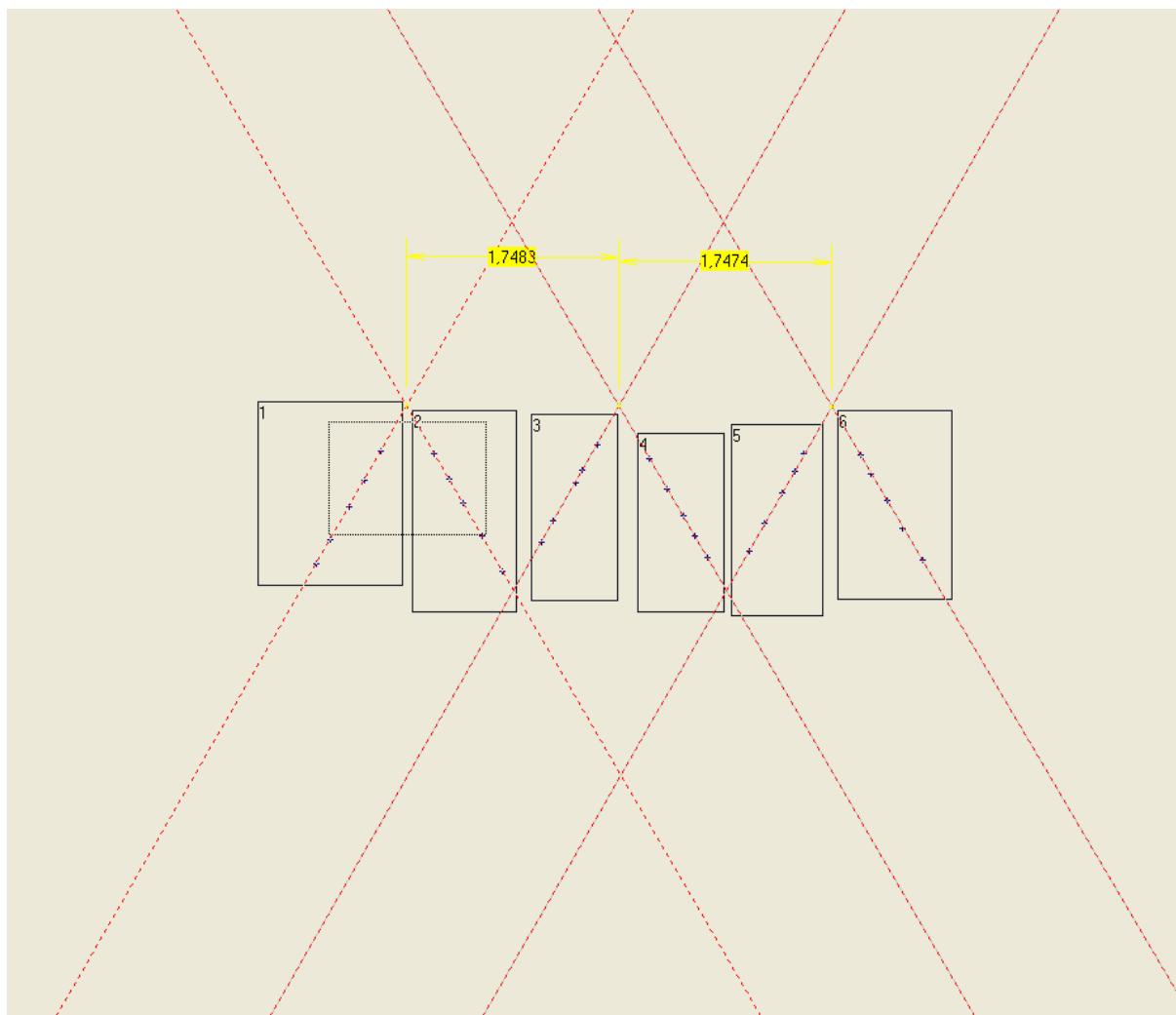
Mjerenje koraka navoja izvedeno je na lijevom navojnom kontrolniku M12x1,75 - 6H. Prilikom mjerenja na alatnom mikroskopu u obzir je uzeto 5 navojnih grebena sa strane „ide“ i 5 navojnih grebena sa strane „ne ide“ na način kako je prikazano na slici uzimanjem 3 navojna grebena s gornje strane te dva navojna grebena s donje strane slike.



Slika 28. Navojni kontrolnik

7.2.1. Mjerenje 1. metodom

Prvo mjerenje koraka navoja napravljeno je metodom uzimanja točaka na bokovima navoja. Zakretanjem nitnog križa sa svakog boka navojnog grebena uzeto je po 5 točaka. U softveru MerOpt pomoću pohranjenih točaka definirana su dva pravca sa sjecištem u vrhu navojnog grebena (Slika 29.). Korak navoja izražen je kao udaljenost između dva sjecišta susjednih grebena navoja.



Slika 29. Definirani pravci pomoću softvera MerOpt

Napravljena su tri ponovljena mjerenja na 5 navojnih grebena sa strane „ide“ i strane „ne ide“ graničnog kontrolnika na način kako je opisano u prethodnom poglavlju. Dobiveni rezultati mjerenja prikazani su u tablici te je izračunata aritmetička sredina.

7.2.1.1. Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja koraka navoja uzimanjem pravaca na boku navoja prikazani su u Tablici 5. i Tablici 6.

Tablica 5. Rezultati mjerenja koraka navoja – strana „ide“

Gornja strana			
Mjerenje	$P/ \text{ mm}$	$P/ \text{ mm}$	\bar{P}/mm
1.	1,7483	1,7474	1,7478
2.	1,7467	1,7504	1,7485
3.	1,7453	1,7553	1,7503
$\bar{P}/ \text{ mm}$	1,7467	1,7510	$\bar{P} = 1,7488$
Donja strana			
Mjerenje	$P/ \text{ mm}$	-	
1.	1,7488	-	
2.	1,7516	-	
3.	1,7530	-	
\bar{P}/mm	1,7511	-	

Srednja vrijednost ponovljenih mjerenja, te između dva susjedna izmjerena koraka navoja određuje se prema:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{P}_i}{n} \quad (7.1)$$

Uvrštavanjem prosječnih vrijednosti iz Tablice 5. u jednadžbu (7.1):

$$\bar{P} = \frac{1,7467 + 1,7510 + 1,7511}{3} \quad (7.2)$$

dobije se:

$$\bar{P} = 1,7496 \text{ mm} \quad (7.3)$$

Tablica 6. Rezultati mjerenja koraka navoja – strana „ne ide“

Gornja strana			
Mjerenje	P/mm	P/mm	\bar{P}/mm
1.	1,7500	1,7468	1,7484
2.	1,7530	1,7429	1,7479
3.	1,7449	1,7514	1,7481
\bar{P}/mm	1,7493	1,7470	$\bar{\bar{P}} = 1,7481$
Donja strana			
Mjerenje	P/mm	-	
1.	1,7486	-	
2.	1,7499	-	
3.	1,7448	-	
\bar{P}/mm	1,7477	-	

Uvrštavanjem pojedinačnih srednjih vrijednosti iz Tablice 6. u jednadžbu (7.1):

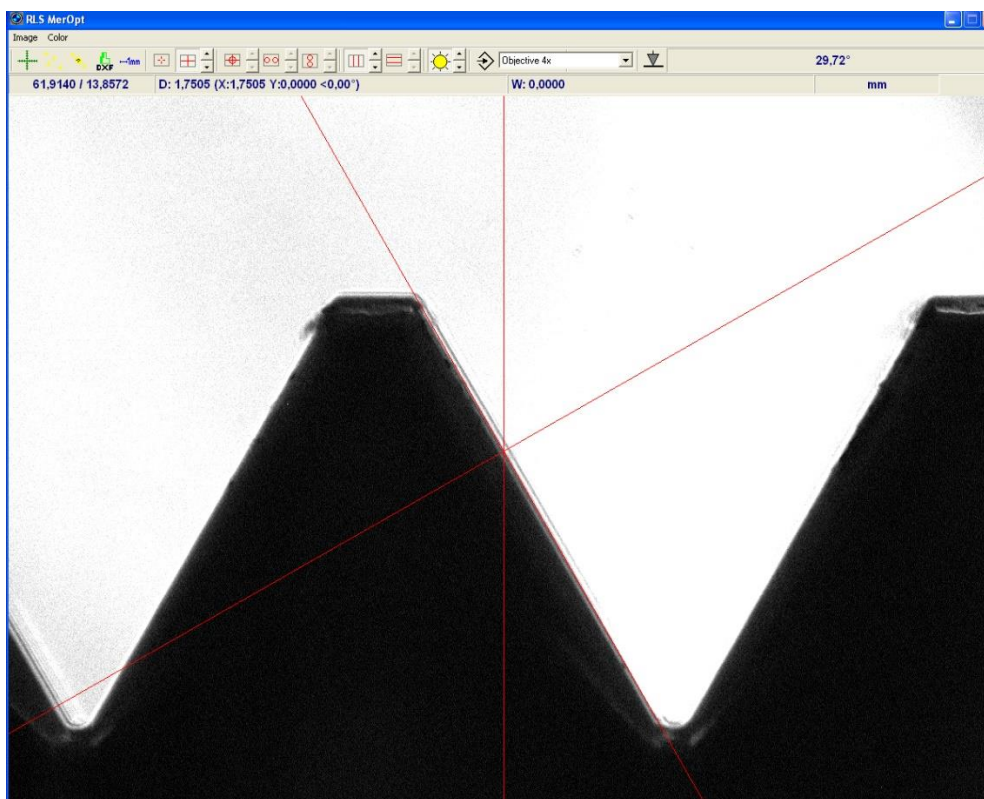
$$\bar{P} = \frac{1,7493 + 1,7470 + 1,7477}{3} \quad (7.4)$$

dobije se:

$$\bar{P} = 1,748 \text{ mm} \quad (7.5)$$

7.2.2. Mjerenje 2. metodom

Drugi postupak mjerenja napravljen je metodom pohranjivanja točke na boku navoja te translacijom u smjeru osi x do prvog slijedećeg odgovarajućeg boka navoja. Pomak se mjeri preko softvera MerOpt (Slika 30.).



Slika 30. Mjerenje koraka navoja

Korak navoja izražen je kao udaljenost između pohranjenih točaka na dva susjedna navojna grebena. Kao i kod prethodne metode u obzir je uzeto 5 navojnih grebena sa strane „ide“ i 5 navojnih grebena sa strane „ne ide“ na način opisan u poglavlju . Napravljena su tri ponovljena mjerenja za 5 odabranih točaka na strani „ide“ i strani „ne ide“

7.2.2.1. Rezultati mjerenja

Tablica 7. Rezultati mjerenja koraka navoja – strana „ide“

Gornja strana			
Mjerenje	$P/ \text{ mm}$	P/mm	$\bar{P}/ \text{ mm}$
1.	1,7505	1,7502	1,7503
2.	1,7503	1,7506	1,7504
3.	1,7504	1,7513	1,7508
$\bar{P}/ \text{ mm}$	1,7504	1,7507	$\bar{\bar{P}} = 1,7505$
Donja strana			
Mjerenje	$P/ \text{ mm}$	-	
1.	1,7503	-	
2.	1,7508	-	
3.	1,7509	-	
$\bar{P}/ \text{ mm}$	1,7506	-	

Kao i kod 1. metode zbrajaju se srednje vrijednosti ponovljenih mjerenja prema jednadžbi(7.1):

$$\bar{P} = \frac{1,7504 + 1,7507 + 1,7506}{3} \quad (7.6)$$

Srednja vrijednost iznosi:

$$\bar{P} = 1,7505 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Tablica 8. Rezultati mjerenja koraka navoja – strana „ne ide“

Gornja strana			
Mjerenje	$P/ \text{ mm}$	$P/ \text{ mm}$	$\bar{P} / \text{ mm}$
1.	1,7492	1,7480	1,7486
2.	1,7483	1,7491	1,7487
3.	1,7485	1,7484	1,74845
$\bar{P} / \text{ mm}$	1,7486	1,7485	$\bar{\bar{P}} = 1,7485$
Donja strana			
Mjerenje	$P/ \text{ mm}$	-	
1.	1,7522	-	
2.	1,7515	-	
3.	1,7510	-	
$\bar{P} / \text{ mm}$	1,7515	-	

Uvrštavanjem srednjih vrijednosti izmjerenih veličina na strani „ne ide“ u jednadžbu (7.1):

$$\bar{P} = \frac{1,7486 + 1,7485 + 1,7515}{3} \quad (7.8)$$

dobije se ukupna srednja vrijednost:

$$\bar{P} = 1,7495 \text{ mm} \quad (7.9)$$

8. MJERENJE KORAKA NAVOJA KONTAKTNOM METODOM

Mjerenje koraka navoja kontaktnom metodom obavljeno je na 1D univerzalnom mjernom uređaju DMS 680 (Slika 31.) koji će biti opisan u slijedećem poglavlju.



Slika 31. Univerzalni mjerni uređaj

8.1. Univerzalni mjerni uređaj DMS 680

Univerzalni mjerni uređaj DMS 680 precizni je jednodimenzionalni mjerni instrument za direktno i usporedno ispitivanje duljine različitih tipova graničnih mjerki. Osim navojnih čepova na njemu se također mogu mjeriti i unutarnji navoji prstena, umjeravati mikrometri, granične mjerke, komparatori itd. Ovaj uređaj karakterizira visoka točnost dobivena:

- Konstantnom mjernom silom.
- Podesivim radnim stolom za jednostavno lociranje točke inverzije.
- Direktnim očitavanjem s računala softverom pomoću kojeg se vrše mjerenja.
- Skalom proizvođača Heidenhain s točnošću od $0,2 \mu\text{m}$.
- Potpunom usklađenošću s Abbe-ovim principom mjerenja [29].

Tablica 9. Tehničke specifikacije [29]

Sustav očitavanja mjerne jedinice	Direktno očitavanje na računalu mm/inch promjenjivo
Raspon mjerenja	
Apsolutni	100 mm
Usporedni	680 mm
Rezolucija	
Standardna	0,1 μm
Opcionalna	0,01 μm
Mjerna sila	0 N – 11 N
Radni stol	
Radna površina	160 x 160 mm
Vertikalni pomak(z os)	100 mm
Horizontalni pomak (y os)	25 mm
Rotacija(oko y osi)	$\pm 3^\circ$
Rotacija(oko z osi)	$\pm 4^\circ$
Nosivost	11 kg
Ukupne dimenzije	1300 mm x 400 mm x 480 mm

Tablica 10. Raspon mjerenja [29]

Vanjska površina	0 - 680 mm
Unutarnja površina	1 - 480 mm
Vanjski navoj	0 - 200 mm
Unutarnji navoj	3 - 400 mm

8.2. Postupak mjerenja

Prije samog početka mjerenja navojni kontrolnik M12x1,75 se postavlja na v-prizmu te se poravnava u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini. Na univerzalni mjerni uređaj dodaje se nastavak za mjerenje koraka navoja s ticalom promjera 1,35 mm. Jednostavnim pozicioniranjem ticala između dva navojna grebena, resetiranjem mjerne skale programa te pomicanjem do prvog slijedećeg navojnog grebena mjeri se korak navoja. Kao i kod prethodnih mjerenja napravljena su tri ponovljena mjerenja.

8.2.1. Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja koraka navoja kontaktnom metodom prikazani su u Tablici 11. i Tablici 12.

Tablica 11. Strana „ide“

Mjerenje	$P/$ mm
1.	1,7500
2.	1,7503
3.	1,7502
$\bar{P}/$ mm	1,7501

Tablica 12. Strana „ne ide“

Mjerenje	$P/$ mm
1.	1,7477
2.	1,7478
3.	1,7476
$\bar{P}/$ mm	1,7477

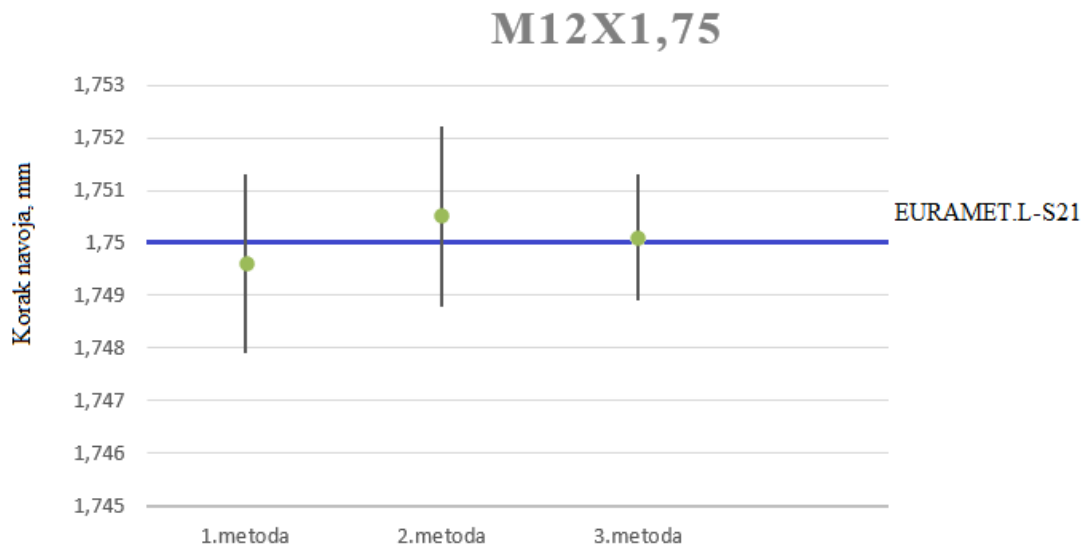
9. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

U Tablici 13. dan je prikaz usporednih rezultata mjerenja koraka navoja dobivenih optičkom i kontaktnom metodom.

Tablica 13. Usporedni prikaz rezultata mjerenja

M12 x 1,75		
Optička metoda		Kontaktna metoda
1. metoda	2. metoda	3. metoda
\bar{P} / mm	\bar{P} / mm	\bar{P} / mm
Strana „ide“		
1,7496	1,7505	1,7501
Strana „ ne ide“		
1,7480	1,7495	1,7477

Za stranu „ide“ navojnog kontrolnika u dijagramu na slici (Slika 32.) prikazani su rezultati mjerenja uz proširenu mjernu nesigurnost usporedno s referentnom vrijednosti navedenom u EURAMET.L-S21 [27]. Vrijednosti mjernih nesigurnosti za mjerenje koraka navoja optičkom i kontaktnom metodom na uređajima opisanima u prethodnim poglavljima preuzete su iz KCDB baze podataka [28] te za optički mikroskop u području mjerenja od 0,25 mm do 6 mm proširena mjerna nesigurnost iznosi 1,7 μ m, dok je za univerzalni mjerni uređaj za potrebe rada preuzeta proširena mjerna nesigurnost za mjerenje navojnih prstenova u području od 0,6 mm do 6 mm te ona iznosi 1,2 μ m.



Slika 32. Dijagram vrijednosti koraka navoja za navojni čep M12 x 1,75

Za stranu „ne ide“ navojnog kontrolnika EURAMET.L-S21 ne navodi referentnu vrijednost. Stoga se ona u ovom slučaju računa kao ponderirana sredina. Najprije je potrebno odrediti konstantu C prema izrazu:

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_i)}} \quad (9.1)$$

Gdje „ i “ predstavlja svaku pojedinačnu metodu, a n broj metoda mjerenja. Konstanta C u ovom slučaju iznosi:

$$C = 1,803 \cdot 10^{-7} \text{ mm} \quad (9.2)$$

Za svaku metodu mjerenja normirani težinski faktor w_i računa se prema izrazu:

$$w_i = C \cdot \frac{1}{u^2(x_i)} \quad (9.3)$$

gdje je $u(x_i)$ standardna mjerna nesigurnost svake pojedinačne metode preuzeta iz KCDB baze podataka.

Referentna vrijednost određuje se kao ponderirana vrijednost prema izrazu:

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (9.4)$$

Za navedene metode mjerenja referentna vrijednost iznosi:

$$\bar{x}_w = 1,7481 \text{ mm} \quad (9.5)$$

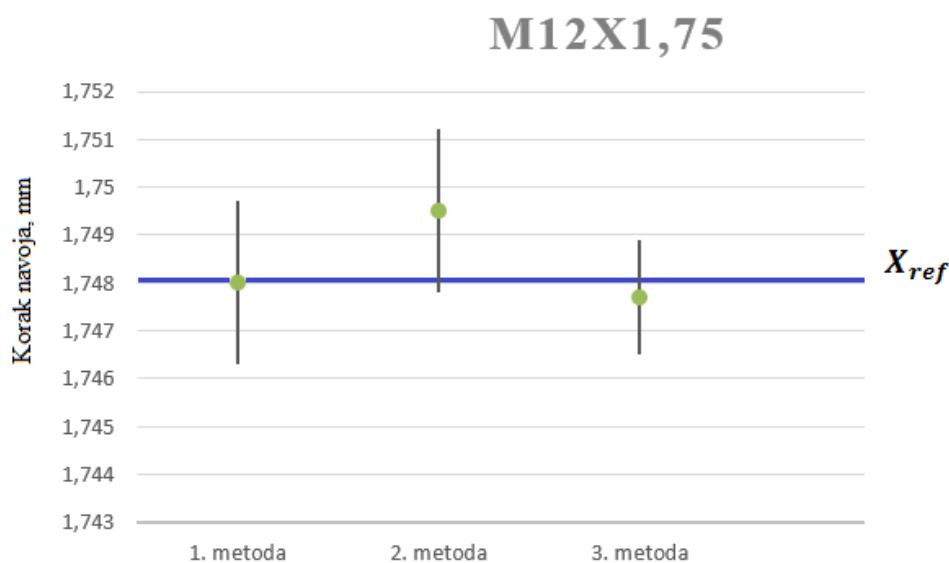
Nesigurnost ponderirane sredine može se odrediti prema izrazu:

$$u(\bar{x}_w) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_i)}}} \rightarrow u(x_{ref}) \quad (9.6)$$

te ona iznosi:

$$u(\bar{x}_w) = 4,2463 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (9.10)$$

U dijagramu na slici prikazani su usporedni rezultati mjerenja strane „ne ide“ navojnog kontrolnika te je označena i izračunata referentna vrijednost. Vrijednosti mjernih nesigurnosti kao i u prethodnom slučaju preuzete su iz KCDB baze podataka.



Slika 33. Vrijednosti koraka navoja za navojni čep M12 x 1,75- strana „ne ide“

10. ZAKLJUČAK

Umjeravanje navojnih kontrolnika predstavlja složen mjeriteljski zadatak prvenstveno zbog njihove kompleksne geometrije. U okviru ovog diplomskog rada opisani su navojni kontrolnici za mjerenje unutarnjeg navoja te su prikazane metode mjerenja koraka navoja s naglaskom na optičke metode. Prilikom postavljanja optičkog sustava isprobane su različite vrste osvjetljenja kako bi se dobio najprikladniji prikaz mjernog predmeta uzevši u obzir njegovu geometriju te reflektirajuću površinu. Može se zaključiti kako rasvjeta ima značajan utjecaj na dobivanje odgovarajuće slike predmeta. Isprobana prstenolika rasvjeta modela LTZGK070-15-3-W-24V tvrtke Opto-e korištena za frontalno osvjetljenje pokazala je pojavu određenih refleksija koje mogu utjecati na rezultate mjerenja. Dostupna kupolasta rasvjeta kojom bi se mogao riješiti taj problem premalih je dimenzija u odnosu na odabrani objektiv optičkog sustava te se njome nije moglo postići potpuno izoštrjenje slike. Isprobano komercijalno pločasto LED osvjetljenje tvrtke Opto-e dalo je preveliki intenzitet osvjetljenja te je u takvim uvjetima nemoguće precizno odrediti rubove boka navoja. Iz navedenih razloga za potrebe mjerenja odabrana je rasvjeta alatnog mikroskopa postavljena na najmanji intenzitet pomoću zelenog filtera koja se pokazala kao najbolje rješenje.

S obzirom na kvalitetu slike odabrano je uvećanje 2x te je izabran podesivi makro objektiv tipa MC3-03X kao i kamera proizvođača Imaging source tipa DMK 41AF02. S obzirom na to da je dostupan objektiv s promjenjivim uvećanjem, pomoću staklene mjerne skale izračunato je vidno polje i stvarno uvećanje sustava za mjerenje. Mjerenje koraka navoja pomoću optičkog sustava obavljeno je na dva načina opisana u radu te su obje metode uspoređene s kontaktnom metodom mjerenja obavljenom na univerzalnom 1D mjernom uređaju. Mjerenje na ovom uređaju standardno se koristi za kontrolnike za unutarnji navoj odnosno navojne prstenove, ali u ovom radu ista metoda primijenjena je na kontrolnik za kontrolu vanjskog navoja. Mjerenje se ponavljalo više puta kako bi se osiguralo da je navoj dobro postavljen na mjernom uređaju odnosno da bi se izbjegla značajna kosinus pogreška (problem s poravnanjem). Kako bi se mogla napraviti usporedba rezultata, mjerne nesigurnosti preuzete su iz KCDB baze podataka. Za optičku metodu preuzeta proširena mjerna nesigurnost iznosi 1,7 μm za područje mjerenja od 0,25 do 6 mm, dok za kontaktnu metodu proširena mjerna nesigurnost iznosi 1,2 μm u području mjerenja od 0,6 do 6 mm. Referentna vrijednost za stranu „ide“ bila je dostupna upravo za mjerenje koraka navoja koji je korišten u ovom radu, u usporedbi Euramet. L-S21,

dok je za stranu „ne ide“ izračunata kao težinska srednja vrijednost temeljem tri provedene metode.

Dobiveni rezultati pokazuju da su sve tri metode pokazale dobro slaganje rezultata i svakako su sve primjenjive za mjerenje koraka navojnih kontrolnika za unutarnji navoj. Na temelju analize dobivenih rezultata mjerenja preporuča se 1. metoda provedena na optičkom sustavu metodom projiciranja opisana u poglavlju 7.2.1. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da postoji prostor za postizanje bolje razine mjerne nesigurnosti, ali svakako bi bilo potrebno provesti detaljnija istraživanja u tom smjeru.

LITERATURA

- [1] Horwath P., Redgrave F. Metrology in short. Denmark: EURAMET; 2008.
- [2] Fanton, Jean-Pierre. A brief history of metrology: Past, present and future. International Journal of Metrology and Quality Engineering; 2019.
- [3] O mjeriteljstvu: <https://dzm.gov.hr/istaknute-teme/zakonsko-mjeriteljstvo/o-mjeriteljstvu/431>, Pristupljeno: 25.11.2022.
- [4] Runje, B. Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.
- [5] Nacionalna strategija za mjeriteljstvo (2007 – 2013): https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/Europski%20i%20me%C4%91unarodni%20dokumenti-----Europska%20suradnja/2008-02-20_mjeriteljska_strategija_hrzmjstl.pdf, Pristupljeno: 17.12.2022.
- [6] Leach R., Ferruci M., Haitjema H. Dimensional Metrology. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer; 2020.
- [7] Mitutoyo: History of the Gage Block: <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/E12016-History-of-The-Gage-Block.pdf>, Pristupljeno: 20.12.2022.
- [8] K. H. Decker. Elementi strojeva. Zagreb: Tehnička knjiga; 2006.
- [9] Simmons C., Maguire M., Phelps N., Manual of Engineering Drawing, : Technical Product Specification and Documentation to British and International Standards, Elsevier; 2012.
- [10] Šimunović, V. Utjecaj mjernih postupaka na rezultat mjerenja srednjeg promjera navoja [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014.
- [11] ISO 262:1998 ISO general purpose metric screw threads- Selected sizes for screws, bolts and nuts
- [12] ISO 68-1:1998 ISO general purpose screw threads – Basic profile – Part 2: Metric screw threads
- [13] EURAMET, Calibration Guide cg-10 v2.1 Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing; 2012.
- [14] Choosing and using the right thread gage: <https://www.qualitymag.com/articles/90996-choosing-and-using-the-right-thread-gage?v=preview>, Pristupljeno: 19.12.2022.
- [15] Thread plug gauges: <https://www.tanfel.com/products/metrology-thread-plug-gauges>, Pristupljeno: 10.1.2023.

- [16] Zhao Y., Qu X.H., Tian Y., Lu.R.J., Liu H.G. Investigation on the Metrology of Conical Thread Gauge. KEM. 2016; 693:150–154.
- [17] Carmignato S., De Chiffre L. A New Method for Thread Calibration on Coordinate Measuring Machines. CIRP Annals. 2003; 52(1):447-448.
- [18] Zaimović-Uzunović N., Lemeš S., Daut D., Softić A. Proizvodna mjerenja. Zenica: Univerzitet u Zenici; 2009.
- [19] Profile projector: https://dyengineers.com/?page_id=599, Pristupljeno: 20.12. 2022.
- [20] Harding, K. Handbook of Optical Dimensional Metrology, CRC Press, Taylor and Francis group, LLC, Boca Raton. Florida; 2013.
- [21] Industrial cameras: <https://www.opto-e.com/products/industrial-cameras>, Pristupljeno: 20.9.2022.
- [22] Lighting: <https://www.opto-e.com/products/lighting>, Pristupljeno: 20.9.2022.
- [23] What is a CCD detector:
<https://www.horiba.com/bra/scientific/technologies/detectors/what-is-a-ccd-detector> , Pristupljeno: 9.1.2023.
- [24] Optics: <https://www.opto-e.com/products/optics>, Pristupljeno:20.9.2022.
- [25] Harmatys, W., Gaška, A., Gaška, P., Gruza, M., & Sładek, J. A. Assesment of Background Illumination Influence on Accuracy of Measurements Performed on Optical Coordinate Measuring Machine Equipped with Video Probe. Sensors. 2021; 21(7), 2509.
- [26] DMK 41AF02: <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/firewire-400-monochrome/dmk41af02> , Pristupljeno: 10.1.2023.
- [27] Šimunović V., Mudronja V. Final report on EURAMET.L-S21:“Supplementary comparison of parallel thread gauges“. Metrologia. 2015; 52(1A).
- [28] KCDB: <https://www.bipm.org/kcdb/>, Pristupljeno: 7.1.2023.
- [29] Microrep – DMS 680 Universal Length Measuring System User Manual

PRILOZI

I. CD-R disk