

# Mjerenje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s mjernim čeljustima

---

**Pavličić, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:538713>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Luka Pavličić**

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić

Student:

Luka Pavličić

Zagreb, 2016. godina

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

Posebno bi se zahvalio svojim mentorima Doc. dr. sc. Goranu Baršić i Dr. sc. Vedranu Šimunoviću na savjetima pri izradi rada

Za kraj bi se zahvalio svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom ovih godina studiranja.

Luka Pavličić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

LUKA PAVLIČIĆ

Mat. br.: 0035185770

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Mjerenje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s mjernim  
čeljustima

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Measurement of pitch diameters of thread rings using V-jag method

Opis zadatka:

1. Opisati metode mjerenja etalonskih navojnih prstena, s naglaskom na mjeriteljske mogućnosti Nacionalnog laboratorija za duljinu na području mjerenja navoja.
2. Izračune preporučene uputom EURAMET cg-10 *Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing* prilagoditi metodi s mjernim čeljustima.
3. Izvršiti mjerenja srednjeg promjera etalonskih navojnih prstena metodom s mjernim čeljustima.
4. Provesti analizu ostvarenih rezultata mjerenja te donijeti zaključke o prednostima i nedostacima metode mjerenja s mjernim čeljustima.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

**Sadržaj**

Sadržaj .....	I
Popis slika .....	III
Popis tablica .....	IV
Popis oznaka.....	V
1. UVOD .....	1
2. NAVOJI .....	2
2.1. Zavojnica i navoj .....	2
2.2. Vijak i matica.....	4
2.3. Definicija srednjeg promjera navoja.....	6
2.3.1. Jednostavni srednji promjer navoja.....	6
2.3.2. Srednji promjer navoja $d_2$ .....	6
2.4. Mjerenje srednjeg promjera navoja .....	7
2.4.1. Granična mjerila za srednji promjer navoja .....	7
2.5. Vrste navoja .....	8
2.5.1. Metrički navoj .....	9
3. MJERNE METODE .....	10
3.1. Mjerenje srednjeg promjera.....	12
3.1.1. Metoda s tri valjčića .....	12
3.1.2. Metoda s T-ticalom .....	13
3.1.3. Metoda s mjernim čeljustima .....	14
3.1.4. Ručne mjerne metode.....	15
3.1.5. Optičke metode za mjerenje srednjeg promjera navoja .....	15
4. PROVEDBA MJERENJA U LABORATORIJU .....	16
4.1. Postupak mjerenja metodom s T-ticalom .....	16
4.1.1. Rezultati mjerenja metodom s T-ticalom .....	21
4.2. Postupak mjerenja metodom s mjernim čeljustima.....	25

4.2.1.	Rezultati mjerjenja metodom s mjernim čeljustima (V-utor) .....	27
4.3.	Postupak mjerjenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET) .....	29
4.3.1.	Rezultati mjerjenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET).....	32
5.	Mjerne nesigurnosti .....	34
5.1.	Nesigurnost rezultata mjerjenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s T-ticalom .....	34
5.1.1.	Nesigurnost mjerjenja s mjernim prihvatom i T-ticalom .....	36
5.1.2.	Nesigurnost mjere referentnog prstena T-ticalom.....	36
5.2.	Nesigurnost rezultata mjerjenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim čeljustima.....	37
5.2.1.	Nesigurnost veličine $n$ .....	38
5.3.	Usporedba rezultata .....	40
5.4.	Grafički prikaz srednje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera .....	41
6.	ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA .....	43	

**Popis slika**

Slika 1. Zavojnica.....	2
Slika 2. a) jednovojni navoj, b) dvovojni navoj, c) trovojni navoj .....	3
Slika 3. Primjer profila navoja .....	3
Slika 4. Spoj vijka i matice.....	4
Slika 5. Profil navoja.....	6
Slika 6. Granična mjerila za srednji promjer.....	7
Slika 7. Osnovni profili navoja .....	8
Slika 8. Metrički navoj .....	9
Slika 9. Razlika između finog i normalnog metričkog navoja .....	9
Slika 10. Metoda s tri valjčića .....	12
Slika 11. Mikrometar s nastavacima te mjerjenje promjera vanjskog navoja.....	15
Slika 12. Uređaj za provedbu mjerjenja metodom s T-ticalom.....	16
Slika 13. Referentni prsten .....	18
Slika 14. Mjerenje kontrolnog prstena s T-ticalom.....	18
Slika 15. Uređaj za provedbu mjerjenja metodom s mjernim čeljustima .....	25
Slika 16. Stezna naprava za mjerke s V-utorom .....	25
Slika 17. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima .....	26
Slika 18. Mjerenje metodom s mjernim čeljustima.....	29
Slika 19. Određivanje udaljenosti između mjernih kuglica .....	30
Slika 20. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M24 m max x3 ....	41
Slika 21. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M30 x 1,5 .....	41

**Popis tablica**

Tablica 1. Metode koje se koriste za mjerjenje srednjeg promjera navoja .....	11
Tablica 2. Tablica standardnih vrijednosti mjernih elemenata.....	17
Tablica 3. Kategorija umjeravanja 1a .....	36
Tablica 4. Sastavnice mjernih nesigurnosti veličine $n$ .....	38
Tablica 5. Kategorija umjeravanja 2a .....	39
Tablica 6. Usporedba rezultata .....	40

## Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$P_h$	mm	Uspon
$\varphi$	°	Kut uspona
$\alpha$	°	Kut navoja
$P$	mm	Korak navoja
$d_D$	mm	Promjer mjernog elementa
$L$	mm	Izmjerena duljina
$B, \gamma$	°	Kutevi profila navoja
$D_2$	mm	Jednostavni srednji promjer
$A_I$	mm	Korekcija nalijeganja mjernih valjčića
$A_2$	mm	Korekcija nalijeganja mjerne sile
$m$	mm	Udaljenost središta mjernih elemenata
$F$	N	Mjerna sila
$C$	mm	Konstanta T-ticala
$\Delta x$	mm	Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju
$D_{2naz}$	mm	Nazivni srednji promjer navoja
$(a+b)$	mm	Konstanta mjerki s V urezom
$a_{jag}$	°	Kut utora mjerki s V utorom
$D_{ref}$	mm	Promjer referentnog prstena
$n$	mm	Udaljenost središta mjernog elementa u osi mjerjenja metodom s mjernim čeljustima

## 1. UVOD

Navojni sklop jedan je od nezaobilaznih dijelova u strojarstvu. Navojnu geometriju nema smisla promatrati samu za sebe već je potrebno uvijek razmatrati vijak i maticu kao jedan funkcionalni sklop.

Od samih početaka izrade navoja javila se potreba za standardizacijom kako bi se omogućila zamjenjivost navojnih elemenata. U tom smislu, geometrija i tolerancije današnjih navoja strogo su propisane međunarodnim normama i stručnim tehničkim uputama, kao i metode mjerena karakterističnih veličina navoja. Navoji su tako definirani oblikom profila, kutem, korakom i promjerima (mali, veliki i srednji promjer). Glavna veličina koja se koristi u proračunima strojarskih konstrukcija svakako je srednji promjer navoja. Drugim riječima, ako je srednji promjer navoja u granicama tolerancije za očekivati je funkcionalnost navojnog sklopa.

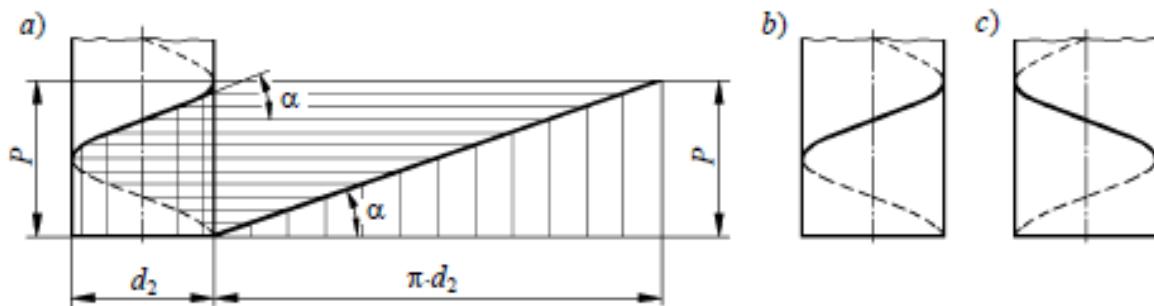
Ovaj rad usmjeren je na metode mjerena i proračuna jednostavnog srednjeg promjera navojnih kontrolnika za vanjski navoj (navojnih prstena). U sklopu ovog rada provedeno je niz mjerena s dvije različite metode (metodom s T-ticalom i metodom s mjernim čeljustima) te su se koristila tri načina računa za određivanje mjere jednostavnog srednjeg promjera. Na kraju rada provedena je analiza mjernih rezultata i iznesen je zaključak.

## 2. NAVOJI

### 2.1. Zavojnica i navoj

Navoj je osnovni dio vijka i matice preko kojega se prenose sile. Temelj svakog navoja je zavojnica koja nastaje obavljanjem kosog pravca oko cilindra promjera  $d_2$ , slika 1.a). Desna zavojnica se dobije obavljanjem pravca oko cilindra u smjeru kazaljke na satu (desni navoj) slika 1.b), dok se lijeva zavojnica dobije obavljanjem u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (lijevi navoj) slika 1.c).

[1]



Slika 1. Zavojnica

a) nastanak zavojnice, b) desna zavojnica, c) lijeva zavojnica

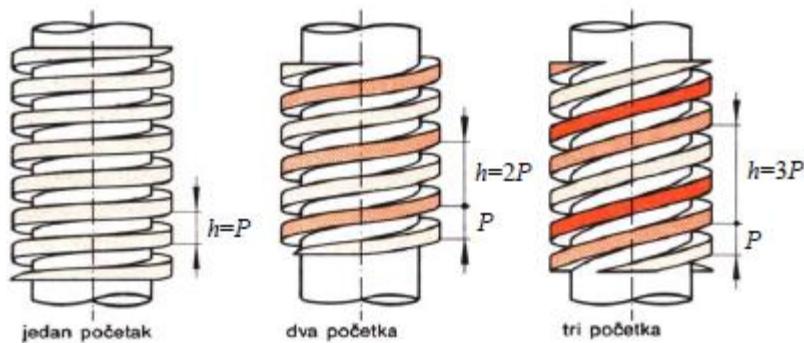
Udaljenost između dvije točke zavojnice koje leže na istoj osi naziva se korak navoja  $P$ . Kut nagiba obavljenog pravca, koji je jednak kutu između tangente zavojnice i normalne ravnine na njezinu os, naziva se kut uspona navoja, te prema slici 1 za njega vrijedi:

$$\tan \alpha = \frac{P}{\pi \cdot d^2}$$

gdje je:

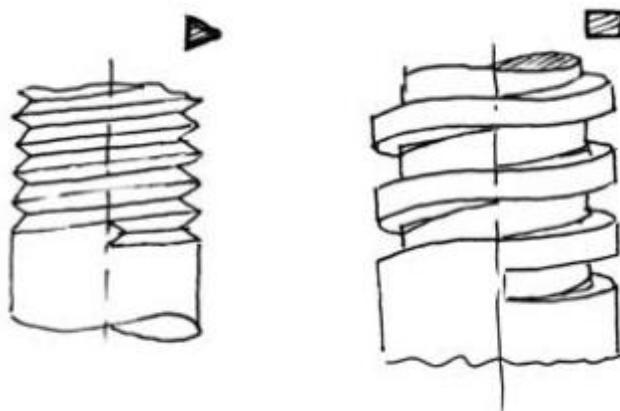
$\alpha$	-	kut uspona zavojnice (navoja) °
$P$	-	korak zavojnice (navoja), mm
$d_2$	-	promjer zavojnice (srednji promjer navoja), mm

Ako se oko cilindra obavlja jedna ili više paralelnih zavojnica dobije se dvovojsna ili višovojsna zavojnica (slika 2). [3]



Slika 2.  
a) jednovojni navoj, b) dvovojsni navoj, c) trovojski navoj

Kada bi po navojnoj liniji oko cilindra namatali žice trokutastog, pravokutnog ili drugih presjeka, dobili bi navoje trokutastog, pravokutnog ili drugih profila zuba,(slika 3.) [3].

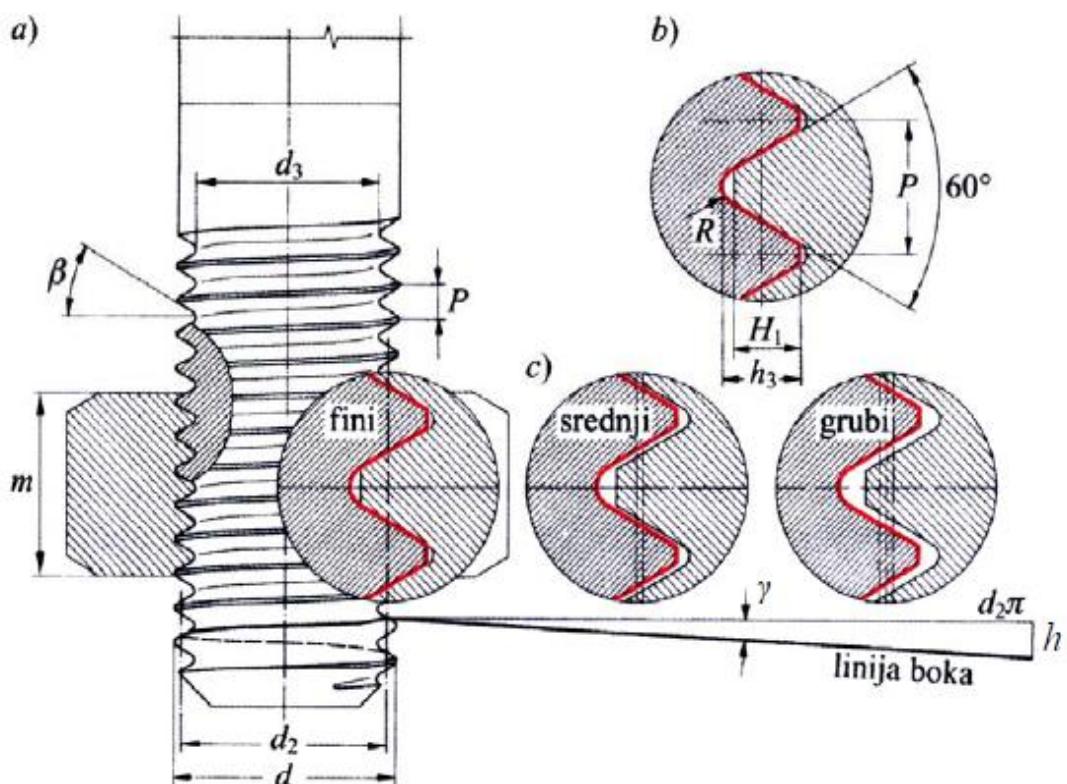


Slika 3. Primjer profila navoja

Lijevo (trokutasti profil) - desno (pravokutni profil)

## 2.2. Vijak i matica

Vijak ima vanjski navoj, izrađen na vanjskoj površini cilindra. Matica ima unutarnji navoj izrađen u cilindričnom provrtu. Unutarnji navoj može biti izrađen i u provrtu u nekom strojnom dijelu. Kako bi se vijak mogao spojiti s maticom, navoje vijka i matice moraju biti usklađeni. Glavna dimenzija navoja je nominalan promjer navoja a to je uvijek vanjski promjer navoja, te je označen s  $d$  za vijke i  $D$  za matice [4].



Slika 4. Spoj vijka i matice

Značenje veličina sa slike 4. je kako sljedi:

a) Vijak i matica:

$d$  - vanjski promjer vijka, mm

$d_2$  - srednji promjer navoja (bokova), mm

$d_3$  - promjer korijena navoja vijka (promjer jezgre), mm ; za metričke navoje je:

$$d_3 = d - 1,22687 \cdot P$$

$P$  - korak navoja (udaljenost između dva susjedna zupca), mm

$\beta$  - kut nagiba boka zuba (kut profila), °

$D_1$  - unutarnji promjer navoja matice, mm

$m$  - visina matice, mm

$h$  - uspon navoja, mm

$\gamma$  - kut uspona, °

b) Profil metričkog ISO navoja:

$H_1$  - nosiva dubina navoja, mm

$h_3$  - dubina navoja, mm

$R$  - polumjer zaobljenja u korijenu navoja, mm

c) Prema kvaliteti izrade, vijci i matice se dijele na sljedeće klase (DIN 267)

F - fina

A - srednja - za opću upotrebu

B - srednje gruba

C - gruba

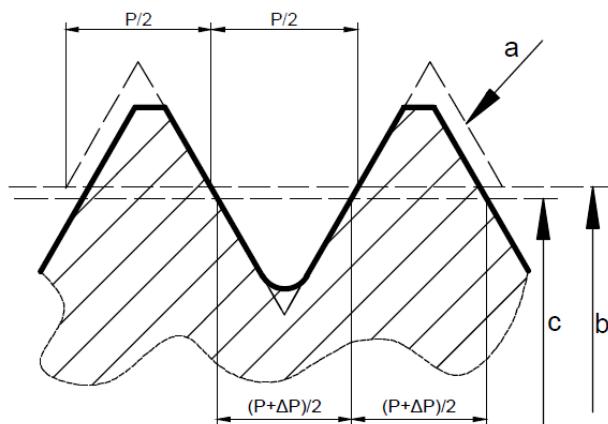
## 2.3. Definicija srednjeg promjera navoja

### 2.3.1. Jednostavni srednji promjer navoja

Jednostavni srednji promjer navoja (slika 5b). je promjer srednjeg cilindra ili konusa koji siječe stvarni navoj tako da je širina jednog navognog utora (mjerena paralelno sa središnjom osi navoja) jednaka polovici osnovnog korak navoja. Obično se mjeri metodama s mjernim valjčićima ili mjernim kuglicama. Kod konusnih navoja srednji promjer se mijenja duž središnje osi navoja. Kod teorijskih navoja jednostavni srednji promjer jednak je srednjem promjeru navoja. [2].

### 2.3.2. Srednji promjer navoja $d_2$

Srednji promjer navoja (slika 5c) izvedena je veličina koja ovisi o parametrima koji određuju navoj(kut profila, korak, uspon) i o veličinama karakterističnim za pojedinu mjernu metodu (mjerna sila, mjerni elementi). Srednji promjer navoja nije moguće izravno izmjeriti, već ga je potrebno izračunati prema definiciji: "*promjer zamišljenog cilindra, čiji plašt siječe profil navoja tako da širina navognog grebena i utora budu jednake.*" [2].



**Slika 5. Profil navoja**

gdje je :

- a - Teorijski navoj
- b - Jednostavni srednji promjer navoja
- c - Srednji promjer navoja

## 2.4. Mjerenje srednjeg promjera navoja

Metode mjerenja navoja koji se razmatraju u ovom završnom radu odnose se na mjerenje jednostavnog srednjeg promjera navojnih prstena za simetrične navoje.

Rezultati prikazani u radu dobiveni su razmatranjem metričkih navoja, međutim principi i spoznaje se mogu bez ograničenja primijeniti na mjerenje cilindričnih i konusnih navoja s ravnim bokovima

### 2.4.1. Granična mjerila za srednji promjer navoja

Granična mjerila služe za kontrolu promjera navoja, te razlikujemo granična mjerila za kontrolu malog, srednjeg i velikog promjera. Takva mjerila prilikom korištenja moraju odgovarati navoju koji se kontrolira te sadrže stranu "ide" i "ne ide". Prilikom kontrole pojedinog navoja u slučaju njegove ispravnosti spoj će ostvariti strana "ide", pri čemu strana "ne ide" ne smije ostvariti spoj kako bi mogli reći da je navoj valjan. Granična mjerila imaju propisane tolerancije srednjeg promjera, kuta i koraka navoja. Granična mjerila za srednji promjer navoja najčešće su u obliku navojnih prstena za provjeru vanjskih navoja i u obliku navojnih čepova za provjeru unutarnjih navoja, (Slika 6.).

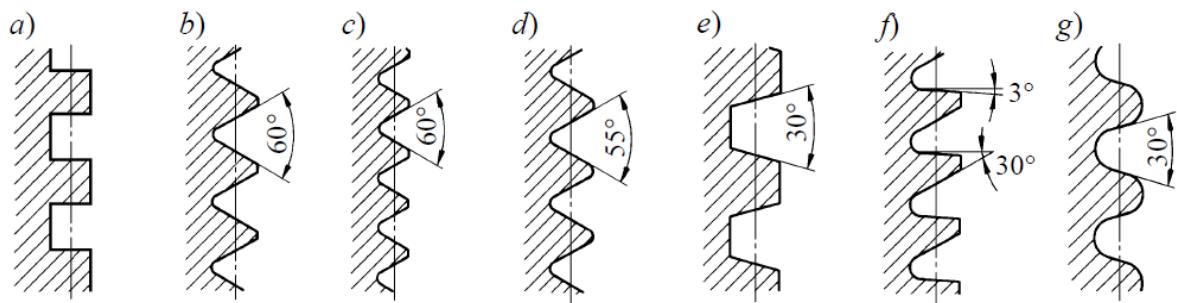


Slika 6. Granična mjerila za srednji promjer

Tijekom korištenja mjerila se troše te je potrebno kontrolirati njihovu ispravnost, to se može vršiti protumjerilima ili umjeravanjem. Protumjerila su granična mjerila, ali puno bolje kvalitete te manjih toleransijskih odstupanja [2].

## 2.5. Vrste navoja

Profilni navoja dijele se na plosnate i trokutaste. Profil plosnatog navoja je kvadrat zato se takav navoj naziva i kvadratni navoj, (slika 7a). Navoji kojima je teorijski profil trokut dijele se na više vrsta: metrički navoj, cjevasti (Whithworthov) navoj, trapezni navoj, pilasti navoj, obli navoj itd., (slike 7b do 7g). [1]



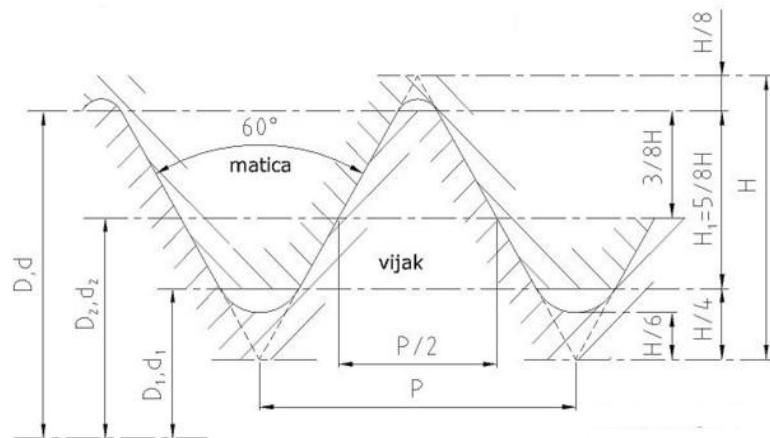
**Slika 7. Osnovni profili navoja**

a) kvadratni navoj b) metrički normalni navoj c) metrički fini navoj d) cjevasti (Withworthov) navoj e) trapezni navoj f) pilasti navoj g) obli navoj

### 2.5.1. Metrički navoj

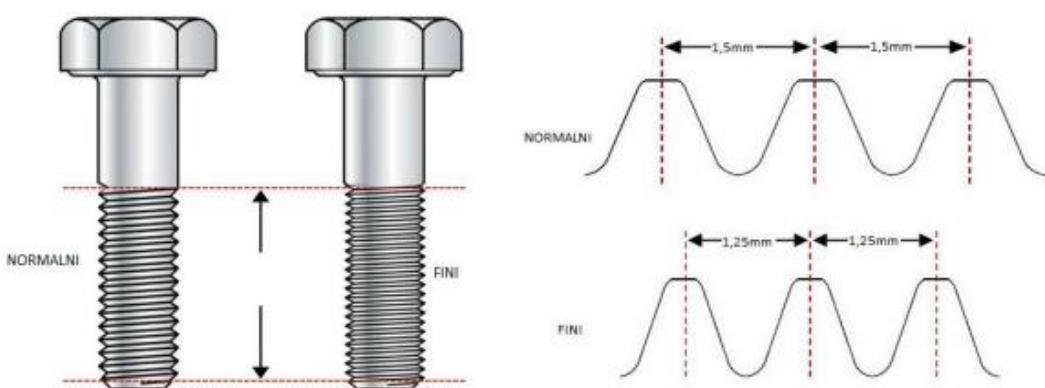
Metrički navoj definiran je i opisan normom ISO 68-1:1998.

Ima teorijski profil istostraničnog trokuta s kutom profila navoja od  $60^\circ$ , (slika 8.). Normalni metrički navoj se upotrebljava u općoj strojogradnji kod vijaka i matica, odnosno poželjno je koristiti ovu vrstu metričkog navoja gdje god je moguće. Fini metrički navoj se koristi u specijalnim slučajevima kada je potrebna velika sigurnost od odvijanja, kod kratkih vijaka, tankostjenih cijevi ili preciznih pomaka vijka u aksijalnom smjeru. Normalni metrički navozi označavaju se slovom M i nazivnim promjerom navoja  $d$  u mm, npr. M 20. Kod finih metričkih navoja uz oznaku se još dodaje i veličina koraka  $P$  u mm, npr. M 20 x 1,5. Ako se radi o lijevom navoju, oznaci navoja dodaje se i međunarodna oznaka LH (left-hand) npr. M 20 x 1,5 L



Slika 8. Metrički navoj

Razlika između normalnog i finog metričkog navoja vidi se na slici 9.



Slika 9. Razlika između finog i normalnog metričkog navoja

### 3. MJERNE METODE

Za izračunavanje srednjeg promjera navoja prema svim kategorijama umjeravanja potrebno je izmjeriti karakterističnu udaljenost  $m$  ( pr. udaljenost središta valjčića se označava s  $m$  kod metode s tri valjčića) koja ovisi o metodi te kuti i koraku navoja, za što je potrebno koristiti niz uređaja i metoda.

Prema EURAMET uputi [6] izdvojene su dvije metode: metoda s tri valjčića za mjerjenje srednjeg promjera vanjskih i metoda s T-ticalom za mjerjenje srednjeg promjera unutarnjih navoja. Gotovo svi nacionalni mjeriteljski instituti koriste ove dvije metode uz primjenu univerzalnih mjernih uređaja ili trokoordinatnih mjernih uređaja s opremom za mjerjenje navoja. U tablici 1. prikazane su metode i mjerni uređaji koji se najčešće koriste pri određivanju srednjeg promjera navoja [2].

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

Tablica 1. Metode koje se koriste za mjerjenje srednjeg promjera navoja

### 3.1. Mjerenje srednjeg promjera

#### 3.1.1. Metoda s tri valjčića

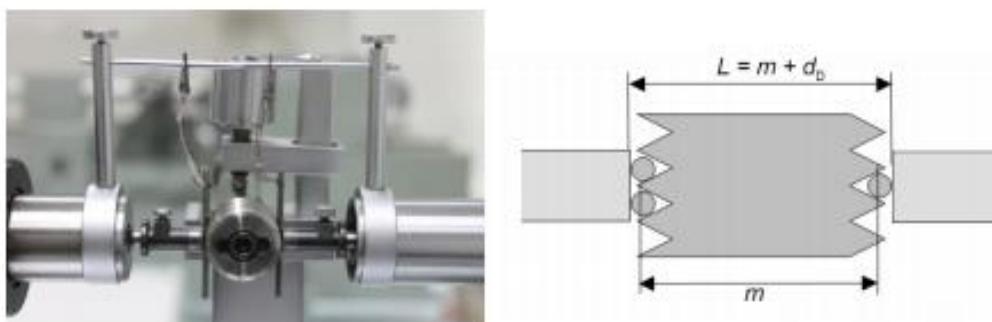
Metoda s tri valjčića smatra se najpouzdanijom metodom za mjerenje srednjeg promjera vanjskih navoja. Mjerenje se provodi na univerzalnom mjernom uređaju ili upotrebom ručnih mjerila (mikrometara). Mjeri se udaljenost preko tri valjčića u dva međusobno okomita presjeka, (slika 10) [5]. Odabir valjčića odgovarajućeg promjera vrši se prema koraku i kutovima boka navoja.

Izračun iznosa srednjeg promjera navoja se provodi prema sljedećem izrazu:

$$d_2 = L - d_D \left( \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} + 1 \right) + \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A_1 + A_2$$

gdje je :

- |          |   |  |
|----------|---|--|
| $d_2$    | - | Srednji promjer vanjskih navoja, mm        |
| $L$      | - | Mjera dobivena preko valjčića, mm          |
| $d_d$    | - | Promjer mjernih valjčića, mm               |
| $\alpha$ | - | Kut profila navoja, °                      |
| $P$      | - | Korak navoja, mm                           |
| $A_1$    | - | Korekcija nalijeganja mjernih valjčića, mm |
| $A_2$    | - | Korekcija o mjerne sile, mm                |



Slika 10. Metoda s tri valjčića

### 3.1.2. Metoda s T-ticalom

Metoda s T-ticalom smatra se najpouzdanijom metodom za mjerjenje srednjeg promjera unutarnjih navoja. Mjerenje se provodi na univerzalnom mjernom uređaju koji uključuje sve potrebne nastavke za provedbu metode s T-ticalom.

Detaljnije objašnjenje metode kao i postupak mjerjenja bit će prikazan u poglavlju 4.1. ovog rada.

Srednji promjer navoja računa se prema izrazu:

$$D_2 = m + d_D \left( \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2$$

gdje je :

$D_2$	-	Srednji promjer unutarnjih navoja, mm
$m$	-	Udaljenost između središta kuglica, mm
$d_D$	-	promjer valjčića
$\alpha$	-	Kut navoja °
$P$	-	Korak navoja, mm
$A_1$	-	Korekcija nalijeganja valjčića, mm
$A_2$	-	Korekcija mjerne sile, mm
$L$	-	Mjera dobivena t-ticalom, mm
$L_{12}$	-	Mjera dobivena t-ticalom, između pozicija 1 i 2 mm
$L_{23}$	-	Mjera dobivena t-ticalom, pozicija 2 i 3, mm
$C$	-	Konstanta T - ticala

### 3.1.3. Metoda s mjernim čeljustima

Metoda s mjernim čeljustima provodi se korištenjem univerzalnog mjernog uređaja uz pomoć ravnih kapica.

Ova metoda nije prihvaćena od većine instituta, odnosno nije metoda čiji bi se rezultati prihvatili kao pouzdani.

U dalnjem radu detaljnije je pojašnjen postupak mjerenja te sam opis metode, a kroz rezultate mjerenja koji su dani bit će vidljivo da se ovom metodom može pouzdano utvrditi srednji promjer navoja.

Srednji promjer računa se prema izrazu:

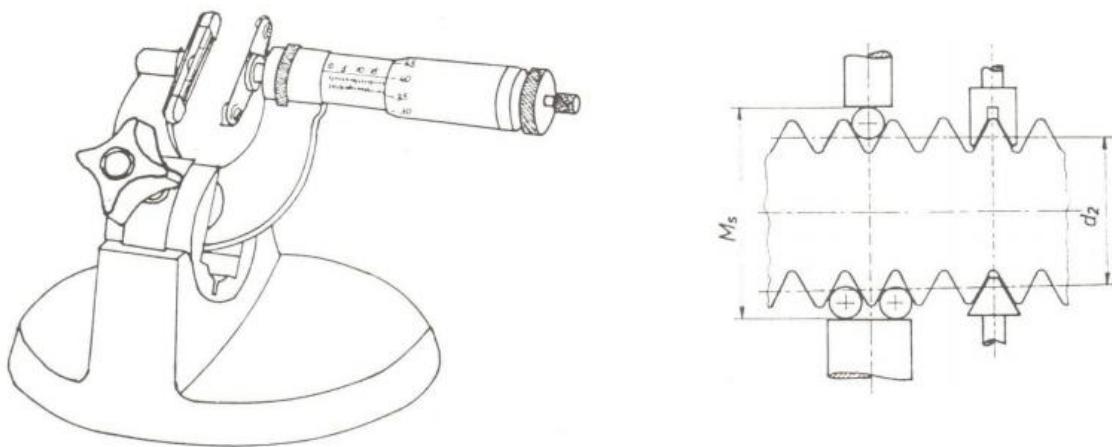
$$D_2 = E + (a + b) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\frac{p^2}{8}}{D_{naz} - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{d_D}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} + \Delta x$$

gdje je:

$D_2$	-	Izmjerena vrijednost srednjeg promjera unutarnjeg navoja, mm
$D_{naz}$	-	Nazivni srednji promjer navoja, mm
$E$	-	Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki, mm
$(a+b)$	-	Konstanta mjerki s V-utorom
$P$	-	Korak navoja, mm
$\alpha$	-	Kut navoja, °
$d_D$	-	Promjer mjernih kuglica, mm
$\Delta x$	-	Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju x, mm

### 3.1.4. Ručne mjerne metode

Od ručnih mjerila, ako se radi o manjim točnostima, može se koristiti za mjerjenje srednjeg promjera vanjskog navoja mikrometar s posebnim nastavcima u obliku konusa i žlijeba kao što je prikazano na slici 15. Na točnost ovakvog mjerjenja utječe pogreška kuta profila kao i pogreška koraka navoja jer u tom slučaju mjerni nastavci ne naliježu točno na bok navoja te treba računati s pogreškama od 0,025 do 0,2 mm. Prethodno je potrebno izvršiti podešavanje mikrometra sa odgovarajućim kontrolnim nastavcima.



Slika 11. Mikrometar s nastavcima te mjerjenje promjera vanjskog navoja

### 3.1.5. Optičke metode za mjerjenje srednjeg promjera navoja

Optičke metode mjerena srednjeg promjera vanjskih navoja zahtijevaju primjenu 2D mjernih uređaja. Preduvjet ovih metoda je da kvaliteta površine navoja bude što bolja (brušeni navoj). Koriste se dvije mjerne metode: metoda aksijalnog presjeka i metoda sa slikom sjene. Uz metodu aksijalnog presjeka koriste se parovi nožica koji svojim oštricama naliježu na bok navoja u aksijalnom presjeku. Na određenom razmaku od oštice ugravirana je paralelna linija koja služi za viziranje. Naime, zbog zavojite geometrije navoja bok navoja nije vidljiv u aksijalnom presjeku i os objektiva potrebno je zakrenuti za kut uspona navoja.

Srednji promjer navoja  $d_2$  dobije se kao razlika očitanja na prednjoj i stražnjoj strani istovrsnih bokova navoja duž y osi 2D mjernog uređaja. [2]

## 4. PROVEDBA MJERENJA U LABORATORIJU

Mjerenja su izvršena u Nacionalnom laboratoriju za duljinu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

U svrhu izrade ovog završnog rada mjerenja su provedena nad dva kontrolna prstena:

- 1.) M24 m max x 3
- 2.) M30 x 1,5

Mjerenje se vršilo kako bi se odredio jednostavni srednji promjer navoja pojedinog prstena, svaki prsten mjerio se metodom s T-ticalom i metodom s mjernim čeljustima, kako bi se na kraju moglo odrediti kolika su odstupanja pojedine metode te kako bi se dokazalo da se s obje metode pouzdano može utvrditi jednostavni srednji promjer navoja.

U nastavku ovog rada bit će prikazan postupak računanja pojedinom metodom te usporedba rezultata mjerenja.

### 4.1. Postupak mjerenja metodom s T-ticalom

Metoda s T-ticalom kao što je ranije spomenuto provodi se univerzalnom mjernom uređaju koji na sebi uključuje sve potrebne nastavke za provedbu metode s T-ticalom.



Slika 12. Uređaj za provedbu mjerenja metodom s T-ticalom

Prije početka mjerenja potrebno je odrediti promjer  $d_D$  mjernog elementa, pravilan odabir promjera jedan je od ključnih elemenata koji može značajno pridonijeti mjernoj nesigurnosti.

Odabir ticala odgovarajućeg promjera provodi se prema koraku i kutovima boka navoja, prema sljedećoj jednadžbi:

$$d_0 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

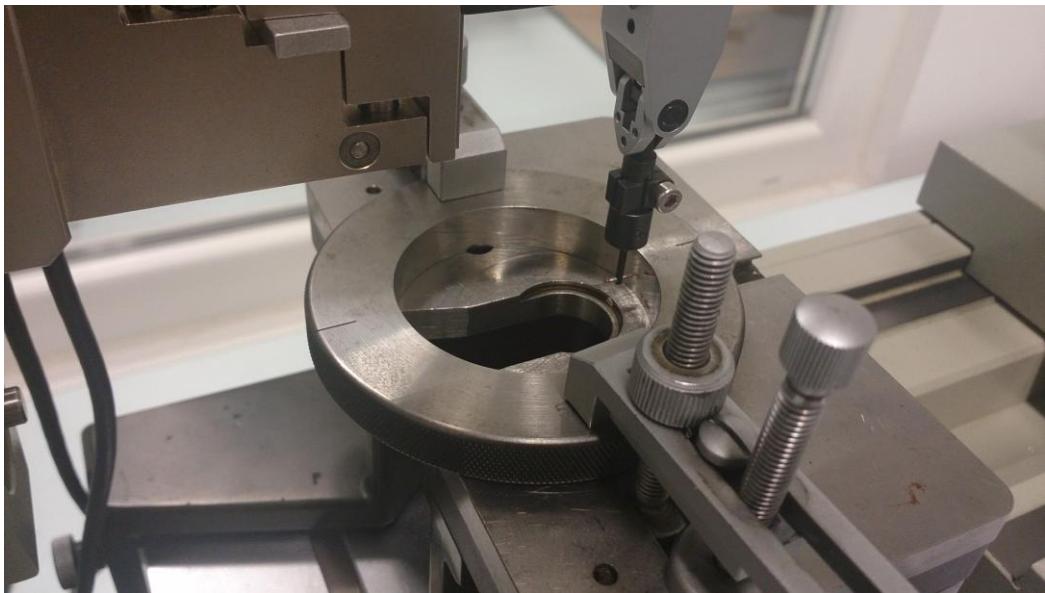
Nakon računanja promjera mjernog elementa  $d_0$ , iz tablice 2 odabiremo prvu najbližu tabličnu vrijednost  $d_D$ .

Redni broj	Mjerni valjčići $d_D$ , mm	Promjer T-ticala	Konstanta T-ticala $C$ , mm	Promjer mjernih kuglica $d_D$ , mm
1	0,17	0,335	0,5	0,8
2	0,195	0,455	0,5	1,35
3	0,22	0,53	0,8	1,8
4	0,25	0,62	1	2,3
5	0,29	0,725	1	3,1
6	0,335	0,895	1,2	
7	0,39	1,1	2	
8	0,455	1,35	1,7	
9	0,53	1,65	2,5	
10	62	2,05	3	
11	0,725	2,55	3,3	
12	0,895	3,2	5	
13	1,1	4	4,7	
14	1,35			
15	1,65			
16	2,05			
17	2,55			
18	3,2			
19	4			
20	5,05			
21	6,35			

**Tablica 2. Tablica standardnih vrijednosti mjernih elemenata**

Prilikom mjerjenja ovom metodom na početku je potrebno odrediti konstantu  $C$ , ona se utvrđuje prije svakog mjerjenja uz pomoć referentnog prstena (etalon za unutarnji promjer), (slika 13.). Tijekom određivanja konstante vršimo 3 mjerjenja od kojih kao mjerodavnu uzimamo aritmetičku sredinu ponovljenih rezultata.

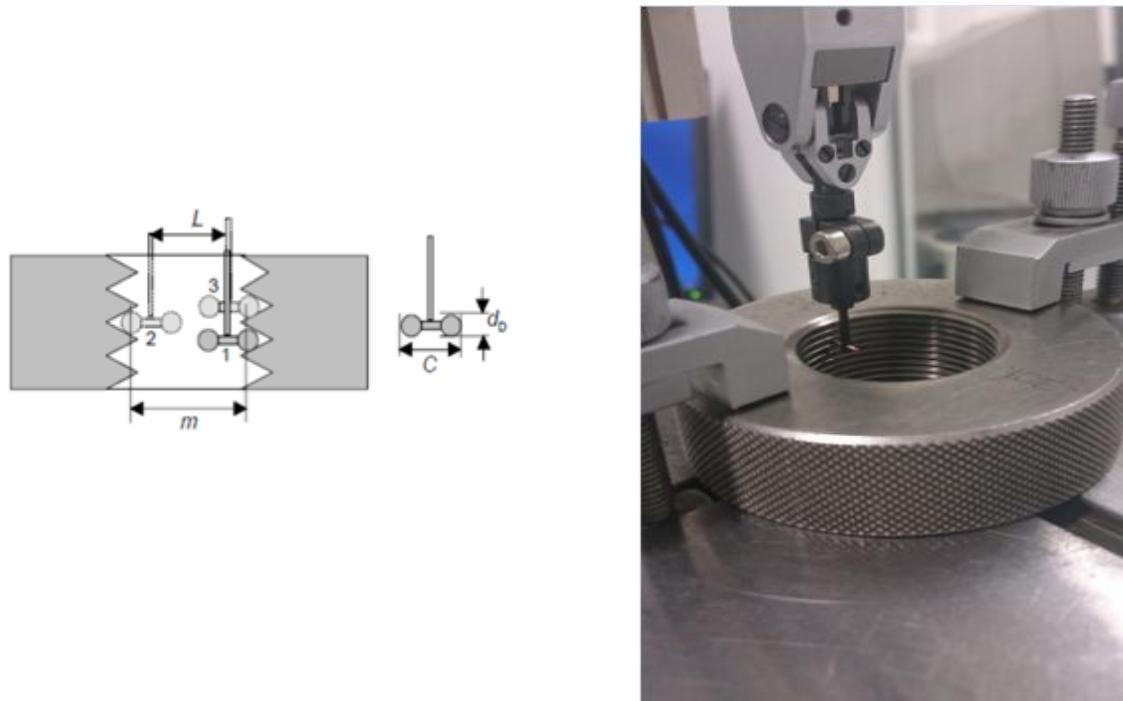
$$C = d_{ref} - \bar{x}$$



**Slika 13. Referentni prsten**

Nakon određivanja konstante pomoću referentnog prstena na univerzalnom jednoosnom uređaju, na isti uređaj postavlja se kontrolni prsten.

U položaju 1. ticalom ulazimo u jedan utor navoja u kojem postavljamo ishodišnu nulu nakon čega prelazimo na drugu stranu prstena i ulazimo u drugi utor (položaj 2) gdje očitavamo hod ticala, povratak u točku 3 vršimo kao kontrolu odstupanja položaja 3 od položaja 1. Ovakav postupak provodi se 3 puta za svaku seriju mjerena.



**Slika 14. Mjerenje kontrolnog prstena s T-ticalom**

Mjera dobivena T-ticalom računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$L = \frac{L_{12} + L_{23}}{2}$$

gdje je :

$L$	-	Mjera dobivena t-ticalom, mm
$L_{12}$	-	Mjera dobivena t-ticalom, između pozicija 1 i 2 mm
$L_{23}$	-	Mjera dobivena t-ticalom, pozicija 2 i 3, mm

Nakon određivanja mjere dobivene T-ticalom ( $L$ ), računamo udaljenost između središta kuglica ( $m$ ) prema sljedećoj jednadžbi:

$$m = L + C - d_D$$

gdje je:

$m$	-	Udaljenost između središta kuglica, mm
$L$	-	Mjera dobivena t-ticalom, mm
$C$	-	Konstanta T - ticala
$d_D$	-	Promjer mjernih kuglica, mm

Izračunatom udaljenosti između središta kuglica  $m$  više nije potrebno vršiti nikakva mjerenja na postavljenom prstenu.

Zadnji korak prije računanja jednostavnog srednjeg promjera unutarnjih navoja  $D_2$  jest određivanje korekcije nalijeganja valjčića  $A_1$ , te korekcije mjerne sile  $A_2$ .

Korekcija nalijeganja valjčića računa se prema:

$$A_1 = \frac{d_D}{2} \cdot \left( \frac{P}{\pi \cdot D_{2naz}} \right)^2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

dok se korekcija mjernih sila računa prema:

$$A_2 = 4W_0$$

$$W_0 = \sqrt[3]{\frac{9F^2}{8d_D} \cdot \left( \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right)^2}$$

gdje je:

$W_0$	-	Deformacija za slučaj dodira kugle i ravne površine, mm <sup>2</sup>
$\nu_i$	-	Poissonov koeficijent
$F$	-	Mjerna sila, N
$E_i$	-	Modul elastičnosti, N/mm <sup>2</sup>
$d_D$	-	Promjer mjernog elementa, mm

Konačno nakon provedenog cijelog prijašnjeg proračuna možemo izračunati srednji promjer navoja prema jednadžbi:

$$D_2 = m + d_D \left( \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2$$

gdje je :

$D_2$	-	Srednji promjer unutarnjih navoja, mm
$m$	-	Udaljenost između središta kuglica, mm
$d_D$	-	Promjer valjčića
$\alpha$	-	Kut navoja °
$P$	-	Korak navoja, mm
$A_1$	-	Korekcija nalijeganja valjčića, mm
$A_2$	-	Korekcija mjerne sile, mm

Takav ćemo postupak ponoviti 3 puta za svaki mjerni prsten, u dalnjem radu bit će priložene tablice u kojima su vidljivi rezultati mjerjenja, te konačne vrijednosti dobivene upravo prema prikazanom načinu proračuna.

#### 4.1.1. Rezultati mjerenja metodom s T-ticalom

U priloženim tablicama u nastavku rada dane su vrijednosti pojedinih veličina upravo onim redom kojim smo u prethodnom poglavlju pojasnili način mjerenja te proračun jednostavnog srednjeg promjera navoja.

##### 4.1.1.1. Prsten M24 m max x 3

ULAZNI PODACI		
M24 m max x 3		
$d_{ref}$	13,9992	mm
$\pi$	3,141592654	
$P$	3	mm
$d_D$	1,65	mm
$D_2$	22,051	mm
$d_0$	1,732050808	mm
$\alpha$	60	°
$\alpha/2$	30	°
$v_1$	0,28	
$v_2$	0,25	
$E_1$	200000	N/mm <sup>2</sup>
$E_2$	400000	N/mm <sup>2</sup>
$F$	0,1	N

1. serija mjerenja

Mjerenje konstante	
1	$x = 2,4100$
2	$x = 2,4098$
3	$x = 2,4092$

Broj mjerena	Položaj ticala		
	1	2	3
1	-0,0004	-0,0031	11,4009
2	-0,0001	-0,0007	11,4017
3	0,0002	-0,0005	11,402

IZLAZNI PODACI		
$\bar{x}$	2,409667	mm
$C$	11,58953	mm
$L_1$	11,40245	mm
$L_2$	11,40205	mm
$L_3$	11,40225	mm
$\bar{L}$	11,40225	mm
$m$	21,34178	mm
$W_0$	6,91E-05	mm <sup>2</sup>
$A_2$	0,000276	mm <sup>2</sup>
$A_1$	0,002321	mm <sup>2</sup>
$D_2$	22,0457	mm

## 2. serija mjerena

Mjerenje konstante	
1	$x = 2,4094$
2	$x = 2,4098$
3	$x = 2,4096$

Položaj ticala			
Broj mjerena	1	2	3
1	-0,0002	-0,0033	11,3988
2	0,0000	-0,0006	11,4011
3	0,0005	-0,001	11,4002

IZLAZNI PODACI		
$\bar{x}$	2,4096	mm
$C$	11,5896	mm
$L_1$	11,40045	mm
$L_2$	11,4014	mm
$L_3$	11,4007	mm
$\bar{L}$	11,40085	mm
$m$	21,34045	mm
$W_0$	6,91E-05	mm <sup>2</sup>
$A_2$	0,000276	mm <sup>2</sup>
$A_1$	0,002321	mm <sup>2</sup>
$D_2$	22,0444	mm

## 3. serija mjerena

Mjerenje konstante	
1	$x = 2,4092$
2	$x = 2,4096$
3	$x = 2,4095$

Položaj ticala			
Broj mjerena	1	2	3
1	-0,0003	0	11,4015
2	-0,0001	-0,0006	11,401
3	0,0002	-0,0002	11,4009

IZLAZNI PODACI		
$\bar{x}$	2,409433	mm
$C$	11,58977	mm
$L_1$	11,4015	mm
$L_2$	11,4013	mm
$L_3$	11,401	mm
$\bar{L}$	11,40127	mm
$m$	21,34103	mm
$W_0$	6,91E-05	mm <sup>2</sup>
$A_2$	0,000276	mm <sup>2</sup>
$A_1$	0,002321	mm <sup>2</sup>
$D_2$	22,0450	mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerena, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s T-ticalom, prsten M24 m max x 3).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerena:

$$\bar{D}_2 = 22,0450 \text{ mm}$$

#### 4.1.1.2. Prsten M30 x 1,5

ULAZNI PODACI		
M30 x 1,5		
$d_{ref}$	49,9988	mm
$\pi$	3,141593	
$P$	1,5	mm
$d_D$	0,895	mm
$D_2$	29,026	mm
$d_0$	0,866025	mm
$\alpha$	60	°
$\alpha/2$	30	°
$v_1$	0,28	
$v_2$	0,25	
$E_1$	200000	N/mm <sup>2</sup>
$E_2$	400000	N/mm <sup>2</sup>
$F$	0,1	N

1. serija mjerena

Mjerenje konstante	
1	$x = 44,3753$
2	$x = 44,3751$
3	$x = 44,3752$

Položaj ticala			
Broj mjerena	1	2	3
1	-0,0013	0,0009	23,8049
2	-0,002	0,0021	23,8068
3	-0,0013	0,0020	23,8079

IZLAZNI PODACI		
$\bar{x}$	44,3752	mm
$C$	5,6236	mm
$L_1$	23,80445	mm
$L_2$	23,80575	mm
$L_3$	23,8069	mm
$\bar{L}$	23,8057	mm
$m$	28,5343	mm
$W_0$	8,47E-05	mm <sup>2</sup>
$A_2$	0,000339	mm <sup>2</sup>
$A_1$	0,000182	mm <sup>2</sup>
$D_2$	29,0251	mm

## 2. serija mjerena

Mjerenje konstante	
1	$x = 44,3755$
2	$x = 44,3754$
3	$x = 44,3755$

Položaj ticala			
Broj mjerena	1	2	3
1	-0,0013	-0,0018	23,8028
2	-0,0020	0,0012	23,8057
3	-0,0013	0,0025	23,8065

IZLAZNI PODACI		
$\bar{x}$	44,37547	mm
$C$	5,623333	mm
$L_1$	23,8037	mm
$L_2$	23,8051	mm
$L_3$	23,80525	mm
$\bar{L}$	23,80468	mm
$m$	28,53302	mm
$W_0$	8,47E-05	mm <sup>2</sup>
$A_2$	0,000339	mm <sup>2</sup>
$A_1$	0,000182	mm <sup>2</sup>
$D_2$	29,0238	mm

## 3. serija mjerena

Mjerenje konstante	
1	$x = 44,3752$
2	$x = 44,3752$
3	$x = 44,3752$

Položaj ticala			
Broj mjerena	1	2	3
1	-0,0001	0,0025	23,8098
2	-0,0004	0,0025	23,8103
3	0,0000	0,0013	23,8102

IZLAZNI PODACI		
$\bar{x}$	44,3752	mm
$C$	5,6236	mm
$L_1$	23,80855	mm
$L_2$	23,80905	mm
$L_3$	23,80955	mm
$\bar{L}$	23,80905	mm
$m$	28,53765	mm
$W_0$	8,47E-05	mm <sup>2</sup>
$A_2$	0,000339	mm <sup>2</sup>
$A_1$	0,000182	mm <sup>2</sup>
$D_2$	29,0284	mm

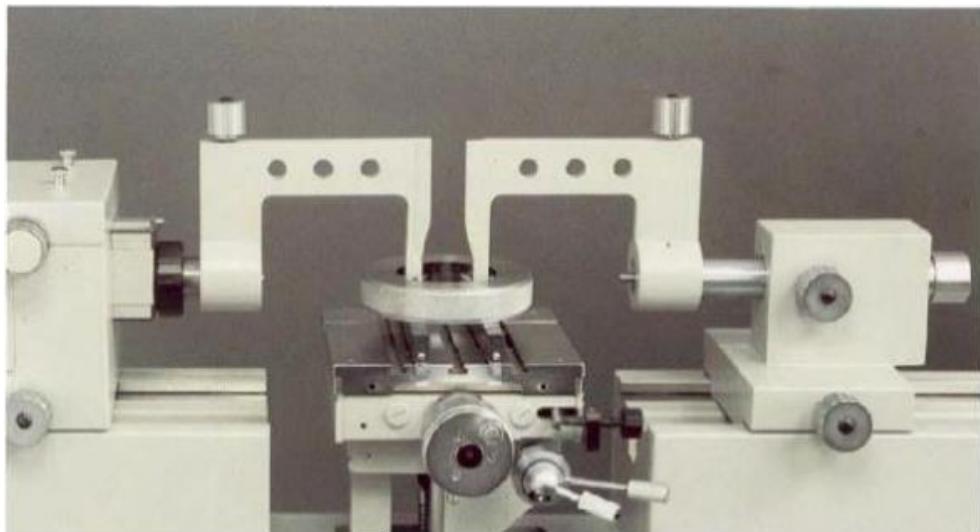
Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerena, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s T-ticalom, prsten M30 x 1,5).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerena:

$$\bar{D}_2 = 29,0258 \text{ mm}$$

#### 4.2. Postupak mjerjenja metodom s mjernim čeljustima

Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima provodi se na univerzalnom mjernom uređaju uz primjenu mjernih čeljusti s mjernim kuglicama odgovarajućeg promjera, (slika 15.). [5]



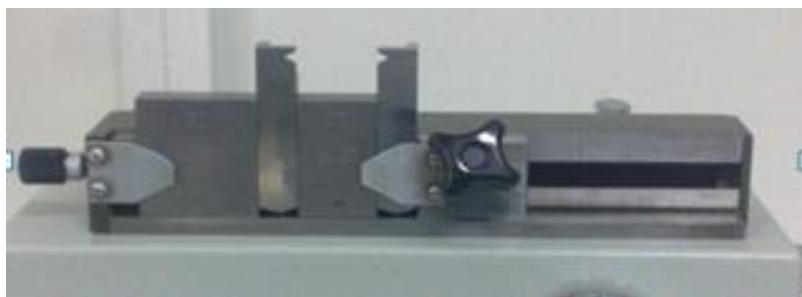
**Slika 15. Uređaj za provedbu mjerjenja metodom s mjernim čeljustima**

Odgovarajući promjer mjernih kuglica dobije se iz jednadžbe:

$$d_0 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

nakon čega uzimamo prvu najbližu standardnu vrijednost promjera mjerne kuglice prema tablici 2.

Nakon određivanja promjera mjerne kuglice na uređaj postavljamo steznu napravu za mjerke s V-utorom (slika 16.), te postavljamo nultu vrijednost.



**Slika 16. Stezna naprava za mjerke s V-utorom**

Ovo je usporedna metoda mjerjenja gdje se početna mjera postavljena pomoću mjerki s V-utorom uspoređuje s veličinom navoja.

Prednost ove metode jest činjenica da se navoj pod utjecajem mjerne sile sam postavi u mjerni položaj. Kako bi se omogućilo slobodno gibanje navoja, koristi se okretni mjerni stolić, (slika 17.).



**Slika 17. Mjerenje jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima**

Nakon mjerjenja utvrđuje se razlika  $\Delta x$  te pomoću sljedeće jednadžbe računamo srednji promjer.

Vrijednost  $\Delta x$  je aritmetička sredina dobivenih mjera dvaju susjednih utora.

$$D_2 = E + (a + b) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\frac{p^2}{8}}{D_{2naz} - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{d_D}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} + \Delta x$$

gdje je:

$D_2$	-	Izmjerena vrijednost srednjeg promjera unutarnjeg navoja, mm
$D_{2naz}$	-	Nazivni srednji promjer navoja, mm
$E$	-	Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki
$(a+b)$	-	Konstanta mjerki s V-utorom
$P$	-	Korak navoja, mm
$\alpha$	-	Kut navoja, °
$d_D$	-	Promjer mjernih kuglica, mm
$\Delta x$	-	Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju $x$ , mm

Takav ćemo postupak ponoviti 3 puta za svaki mjerni prsten, u dalnjem radu bit će priložene tablice u kojima su vidljivi rezultati mjeranja, te konačne vrijednosti dobivene upravo prema prikazanom načinu proračuna.

#### 4.2.1. Rezultati mjeranja metodom s mjernim čeljustima (V-utor)

U priloženim tablicama u nastavku rada dane su vrijednosti pojedinih veličina upravo onim redom kojim smo u prethodnom poglavlju pojasnili način mjeranja te proračun jednostavnog srednjeg promjera navoja.

##### 4.2.1.1. Prsten M24 m max x 3

ULAZNI PODACI		
$d_D$	1,8	mm
$D_{2naz}$	22,051	mm
$a+b$	6,112	mm
$P$	3	mm
$\alpha$	60	°
$\alpha/2$	30	°
$\pi$	3,141593	

1. mjerjenje		2. mjerjenje		3. mjerjenje	
$E$	20	$E$	20	$E$	30
$\Delta x_1$	-1,4148	$\Delta x_1$	-1,415	$\Delta x_1$	-11,415
$\Delta x_2$	-1,4146	$\Delta x_2$	-1,4148	$\Delta x_2$	-11,4149
$\bar{\Delta x}$	-1,4147	$\bar{\Delta x}$	-1,4149	$\bar{\Delta x}$	-11,41495
$D_2$	22,0440 mm	$D_2$	22,0438 mm	$D_2$	22,0437 mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjeranja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima, prsten M24 m max x 3).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjeranja:

$$\bar{D}_2 \quad | \quad 22,0438 \text{ mm}$$

#### 4.2.1.2. Prsten M30 x 1.5

ULAZNI PODACI		
$d_D$	0,8	mm
$D_2$	29,026	mm
$a+b$	6,112	mm
$P$	1,5	mm
$\alpha$	60	°
$\alpha/2$	30	°
$\pi$	3,141593	

1. mjerjenje

$E$	30
$\Delta x_1$	-5,7773
$\Delta x_2$	-5,7773

2. mjerjenje

$E$	30
$\Delta x_1$	-5,7774
$\Delta x_2$	-5,7774

3. mjerjenje

$E$	20
$\Delta x_1$	4,2245
$\Delta x_2$	4,225

$\bar{\Delta x}$	-5,7773
$D_2$	29,0256 mm

$\bar{\Delta x}$	-5,7774
$D_2$	29,0255 mm

$\bar{\Delta x}$	4,22475
$D_2$	29,0277 mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerjenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima, prsten M30 x 1,5).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerjenja:

$\bar{D}_2$	29,0263 mm
-------------	------------

#### 4.3. Postupak mjerjenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET)

Postupak mjerjenja metodom s mjernim čeljustima također je proveden na univerzalnom mjernom uređaju kao i prethodni postupci.

Za proračun jednostavnog srednjeg promjera korištene su mjere koje smo dobili prethodnom metodom, dok će sam proračun bit proveden nešto drugačije.

Specifičnost ovog načina je u tome što ćemo račun provesti prema EURAMET uputi [6] ali prilagođeno metodi s mjernim čeljustima.

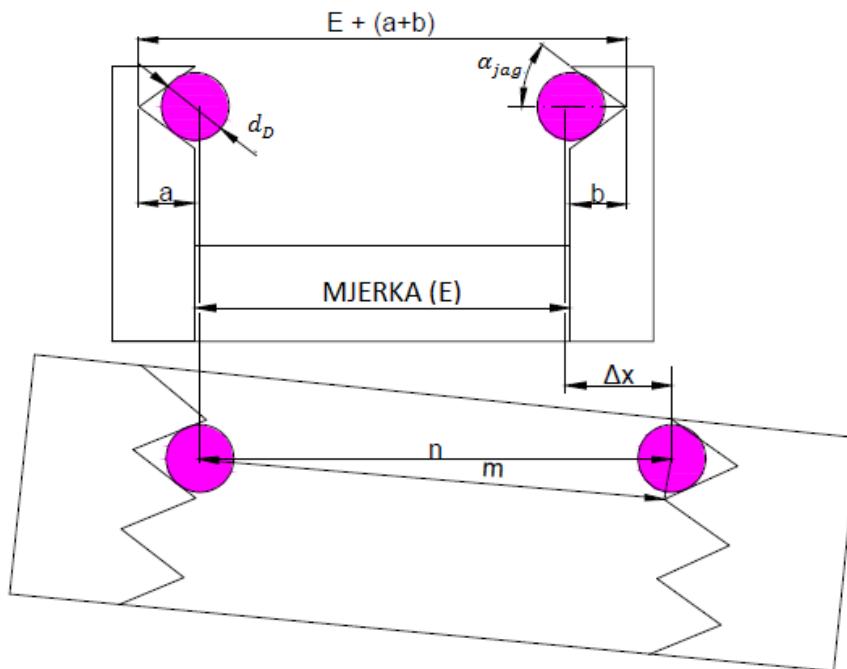
Kod ovakvog načina proračuna ne izvodi se korekcija nalijeganja mjernih elemenata u navoju (zbog jednakosti geometrije V-utora mjerke i navoja), što u konačnici daje različit iznos jednostavnog srednjeg promjera nego što je ranije dobiven metodom s mjernim čeljustima, također prilikom ovakvog načina proračuna nije potrebna korekcija mjerne sile (ista sila djeluje na navoj i na mjerke).



Slika 18. Mjerenje metodom s mjernim čeljustima

Jednostavni srednji promjer može se računati prema jednadžbi koja je dana u poglavlju 3.1.2 ali uz poneke preinake.

Udaljenost između središta mjernih elemenata  $m$  dobije se iz vrijednosti  $\Delta x$  tako da se računa u smjeru okomitom na središnju os navoja



**Slika 19. Određivanje udaljenosti između mjernih kuglica**

Iz modela proizlazi:

$$n = E + (a + b) + \Delta x - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)}$$

gdje je:

$n$	-	Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerena, mm
$E$	-	Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki, mm
$(a+b)$	-	Konstanta mjerki s V-utorom, mm
$d_D$	-	Promjer mjernih kuglica, mm
$\Delta x$	-	Razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju, mm
$\alpha_{jag}$	-	Kut utora V-mjerki °

nakon dobivene vrijednosti  $n$  konačno možemo dobiti i udaljenost između središta mjernih kuglica:

$$m = \sqrt{n^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}$$

gdje je:

- $n$  - Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerena, mm
- $m$  - Udaljenost između središta mjernih kuglica u smjeru okomitom na središnji os navoja, mm
- $P$  - Korak navoja, mm

Na samome kraju računamo jednostavni srednji promjer prema :

$$D_2 = m + d_D \left( \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

gdje je :

- $m$  - Udaljenost između središta mjernih kuglica u smjeru okomitom na središnji os navoja
- $d_D$  - Promjer mjernih kuglica
- $\alpha$  - Kut navoja °
- $P$  - Korak navoja, mm

Takav ćemo postupak ponoviti 3 puta za svaki mjerni prsten, u dalnjem radu bit će priložene tablice u kojima su vidljivi rezultati mjerena, te konačne vrijednosti dobivene upravo prema prikazanom načinu proračuna.

### 4.3.1. Rezultati mjerjenja metodom s mjernim čeljustima (EURAMET)

U priloženim tablicama u nastavku rada dane su vrijednosti pojedinih veličina upravo onim redom kojim smo u prethodnom poglavlju pojasnili način mjerjenja te proračun jednostavnog srednjeg promjera navoja.

#### 4.3.1.1. Prsten M24 m max x 3

M24 max x3		
ULAZNI PODACI		
$d_D$	1,8	mm
$D_2$	22,051	mm
$a+b$	6,112	mm
$P$	3	mm
$\alpha$	60	°
$\alpha/2$	30	°
$\pi$	3,141593	

1. mjerjenje

$E$	20
$\Delta x_1$	-1,4148
$\Delta x_2$	-1,4146

2. mjerjenje

$E$	20
$\Delta x_1$	-1,415
$\Delta x_2$	-1,4148

3. mjerjenje

$E$	30
$\Delta x_1$	-11,415
$\Delta x_2$	-11,4149

$\bar{\Delta x}$	-1,4147
$n$	21,0973
$m$	21,043908
$D_2$	22,0458 mm

$\bar{\Delta x}$	-1,4149
$n$	21,0971
$m$	21,04371
$D_2$	22,04563 mm

$\bar{\Delta x}$	-11,415
$n$	21,09705
$m$	21,04366
$D_2$	22,0455 mm

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerjenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima (EURAMET), prsten M24 m max x 3).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerjenja:

$\bar{D}_2$	22,0457 mm
-------------	------------

### 4.3.1.2. Prsten M30 x 1.5

M30x1,5		
ULAZNI PODACI		
$d_D$	0,8	mm
$D_2$	29,026	mm
$a+b$	6,112	mm
$P$	1,5	mm
$\alpha$	60	°
$\alpha/2$	30	°
$\pi$	3,141593	

1. mjerjenje

$E$	30
$\Delta x_1$	-5,7773
$\Delta x_2$	-5,7773

2. mjerjenje

$E$	30
$\Delta x_1$	-5,7774
$\Delta x_2$	-5,7774

3. mjerjenje

$E$	20
$\Delta x_1$	4,2245
$\Delta x_2$	4,225

$\bar{\Delta x}$	-5,7773
$n$	28,7347
$m$	28,72491
$D_2$	29,0259 mm

$\bar{\Delta x}$	-5,7774
$n$	28,7346
$m$	28,72481
$D_2$	29,0258 mm

$\bar{\Delta x}$	4,22475
$n$	28,73675
$m$	28,72696
$D_2$	29,0279 mm

$\bar{D}_2$	29,0265 mm
-------------	------------

Na temelju dobivenih vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za pojedinu seriju mjerjenja, možemo izračunati aritmetičku sredinu koju ćemo kod usporedbe rezultata koristiti kao vrijednost koja je dobivena opisanom metodom (metoda s mjernim čeljustima (EURAMET), prsten M30 x 1,5).

Jednostavni srednji promjer temeljem 3 serije mjerjenja:

$\bar{D}_2$	29,0265 mm
-------------	------------

## 5. Mjerne nesigurnosti

### 5.1. Nesigurnost rezultata mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s T-ticalom

Matematički model mjerenja srednjeg promjera:

$$D_2 = l + (D_{r20} - D) + d_D \cdot \left( \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} - 1 \right) - \frac{P}{2} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2 + \delta B + \\ + \delta l_x - \delta l_T + \delta l_{T-Dev}$$

gdje je:

$D_2$	-	Srednji promjer navoja, mm
$D_{r20}$	-	Promjer referentnog prstena na temperaturi od 20 °C, mm
$D$	-	Očitana mjera referentnog prstena, mm
$C$	-	Konstanta T-ticala, mm
$l$	-	Očitana mjera navojnog prstena ( $L = l + \delta l_x + \delta l_A - \delta l_T$ ), mm
$d_D$	-	Promjer mjernog valjčića, mm
$\alpha/2$	-	Polovina kuta navoja, mm
$P$	-	Korak navoja, mm
$A_1$	-	Korekcija nalijeganja mjernog valjčića u utor navoja, mm
$A_2$	-	Korekcija zbog mjerne sila, mm
$\delta B$	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja, mm
$\delta l_x$	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm
$\delta l_T$	-	Temperaturna korekcija, mm
$\delta l_{T-Dev}$	-	Korekcija mjerjenja s T-ticalom, mm

Sastavljena varijanca srednjeg promjera navoja:

$$u^2(D_2) = c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_{D_{r20}}^2 \cdot u^2(D_{r20}) + c_D^2 \cdot u^2(D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \\ \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B) \\ + c_l^2 \cdot u^2(l) + c_{\delta l_x}^2 \cdot u^2(\delta l_x) + c_{\delta l_T}^2 \cdot u^2(\delta l_T) + c_{\delta l_{T-Dev}}^2 \\ \cdot u^2(\delta l_{T-Dev})$$

gdje je:

- $u(d_D)$  - Nesigurnosti promjera mjernih elemenata. Pripadajući koeficijent osjetljivosti određuje se prema:

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} - 1$$

- $u(P)$  - Nesigurnosti mjerjenja koraka navoja

Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_P = \frac{\operatorname{ctg}(\frac{\alpha}{2})}{2}$$

- $u(\alpha/2)$  - Nesigurnosti mjerjenja kuta navoja

Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot \cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot \sin^2(\alpha/2)} = \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$$

Faktor osjetljivosti značajno ovisi o razlici stvarnog i optimalnog promjera mjernog elementa

- $u(A_1)$  - Nesigurnosti zbog utjecaja računa korekcije nalijeganja mjernog elementa u profil navoja

- $u(A_2)$  - Nesigurnosti zbog utjecaja mjerne sile

- $u(\delta B)$  - Nesigurnosti zbog utjecaja predmeta mjerjenja (odstupanje od oblika) i ostalih doprinosa koji do sada nisu do uzeti u obzir ovim računom.

- $u(l)$  - Nesigurnost ponovljivosti mjernog sustava

- $u(\delta l_x)$  - Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja

- $u(\delta l_T)$  - Nesigurnost zbog utjecaja temperature

- $u(D_{r20})$  - Nesigurnost umjeravanja unutarnjeg promjera

- $u(D)$  - Nesigurnost mjerjenja referentnog prstena T-ticalom

- $\delta(l_{T-Dev})$  - Nesigurnost mjerjenja s mjernim prihvatom i T-ticalom

Koeficijenti osjetljivosti koji su jednaki 1 navedeni su kako slijedi:

$$c_D = c_{A_1} = c_{A_2} = c_{\delta B} = c_l = c_{\delta l_x} = c_{\delta l_T} = c_{\delta l_{T-Dev}} = 1$$

### 5.1.1. Nesigurnost mjerjenja s mjernim prihvatom i T-ticalom

Model nesigurnosti:

$$u^2(\delta l_{T-Dev}) = u^2(\delta l_{res}) + u^2(\delta t_{pon})$$

gdje je:

- |                     |   |
|---------------------|---|
| $u(\delta l_{res})$ | - Nesigurnost očitanja, $\mu\text{m}$               |
| $u(\delta l_{pon})$ | - Ponovljivost mjerjenja s T-ticalom, $\mu\text{m}$ |

### 5.1.2. Nesigurnost mjere referentnog prstena T-ticalom

Sastavljena varijanca:

$$u^2(D) = u^2(\delta l_x) + u^2(\delta t_{T-Dev})$$

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| $u(\delta l_x)$       | - Nesigurnost umjeravanja univerzalnog mjernog uređaja, $\mu\text{m}$ |
| $u(\delta t_{T-Dev})$ | - Nesigurnost mjerjenja s T-ticalom, $\mu\text{m}$                    |

Ulazna veličina	Iznos mjerne nesigurnosti $u$ , $\mu\text{m}$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti $C$	Doprinos mjernoj nesigurnosti $\mu\text{m}$
$d_D$	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
$\alpha/2$	Tolerancijsko polje	Pravokutna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	1,2
$A_1$	-	-	-	-
$A_2$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$\delta B$	0,25	Pravokutna	1	0,25
$l$	0,2	Normalna	1	0,2
$\delta l_x$	$0,16+1,7 \cdot L$	Normalna	1	$0,16+1,7 \cdot L$
$D_{r20}$	0,3	Normalna	1	0,3
$D$	0,26	Normalna	1	0,26
$\delta l_T$	0,7		1	0,7
$\Delta l_{T-Dev}$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$u_c(D_2)$	$\sqrt{2,89 \cdot L^2 + 0,544 \cdot L + 2,358} \approx 1,53 + 0,23 \cdot L \mu\text{m}, L \text{ u m}$			

Tablica 3. Kategorija umjeravanja 1a

Iznosi mjerne nesigurnosti za pojedini prsten:

Prsten M24 m max x 3

$$u_c(D_2) = 1,535 \text{ } \mu\text{m}$$

$$U(D_2) = 2u_c = 3,070 \text{ } \mu\text{m}$$

Prsten M30 x 1.5

$$u_c(D_2) = 1,5367 \text{ } \mu\text{m}$$

$$U(D_2) = 2 u_c = 3,0734 \text{ } \mu\text{m}$$

## 5.2. Nesigurnost rezultata mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim čeljustima

Matematički model mjerenja jednostavnog srednjeg promjera:

$$D_2 = m + d_D \cdot \left( \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) - \frac{P}{2} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2 + \delta B$$

$$m = \sqrt{\left( E + (a+b) - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T \right)^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}$$

gdje je:

$D_2$	-	Srednji promjer navoja, mm
$D_{r20}$	-	Promjer referentnog prstena na temperaturi od 20 °C, mm
$E$	-	Duljina referentne planparalelne granične mjerke, mm
$a+b$	-	Konstanta mjerke s v utorom, mm
$l$	-	Očitana mjera navojnog prstena ( $\Delta x = l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T$ ), mm
$d_D$	-	Promjer mjernog valjčića, mm
$\alpha/2$	-	Polovina kuta navoja, mm
$\alpha_{jag}/2$	-	Polovina kuta utora v-mjerki, mm
$P$	-	Korak navoja, mm
$A_1$	-	Korekcija nalijeganja mjernog valjčića u utor navoja, mm
$A_2$	-	Korekcija zbog mjerne sila, mm
$\delta B$	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja, mm
$\delta l_x$	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm

- $\delta l_T$  - Temperaturna korekcija, mm  
 $\delta l_E$  - Ponovljivost stezanja kombinacije planparalelne granične mjerke i mjerki s V utorom  
 $m$  - Udaljenost središta mjernih kuglica, mm  
 $n$  - Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerena, mm

Sastavljena varijanca srednjeg promjera navoja  $u(D_2)$ :

$$u^2(d_2) = c_m^2 \cdot u^2(m) + c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) \\ + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B)$$

Sastavnice mjerne nesigurnosti iste su kao i kod metode s T-ticalom.

### 5.2.1. Nesigurnost veličine $n$

Veličina  $n$  izračunava se prema:

$$n = E + (a + b) - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T$$

Sastavljena varijanca je :

$$u^2(n) = c_E^2 u^2(E) + c_{(a+b)}^2 u^2(a+b) + c_{d_D}^2 u^2(d_D) + c_{\alpha_{jag}/2}^2 u^2(\alpha_{jag}/2) \\ + c_{\Delta l}^2 u^2(l) + c_{\delta l_E}^2 u^2(\delta l_E) + c_{\delta l_T}^2 u^2(\delta l_T)$$

Koeficijenti osjetljivosti jednaki jedinici navedeni su kako slijedi:

$$c_E = c_{(a+b)} = c_{\alpha_{jag}/2} = c_l = c_{\delta l_E} = c_{\delta l_T} = 1$$

Ulagana veličina	Iznos mjerne nesigurnosti $u$ , $\mu\text{m}$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos mjernoj nesigurnosti, $\mu\text{m}$
$d_D$	0,35	Normalna	2	0,7
$\alpha_{jag}/2$	0,0032°	Normalna	10,73mm/rad	0,6
$a+b$	0,75	Normalna	1	0,75
$E$	0,05	Normalna	1	0,05
$\delta l_x$	0,17	Normalna	1	0,17
$\delta l_E$	0,05	Normalna	1	0,05
$\Delta l_T$	0,06	Normalna	1	0,06
$l$	0,15	Normalna	1	0,15
$u_c(n)$			<b>1,21 <math>\mu\text{m}</math></b>	

Tablica 4. Sastavnice mjernih nesigurnosti veličine n

Koeficijent osjetljivosti  $c_n$  izračunat je prema:

$$c_n = \frac{n}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{P}{2}\right)^2}}$$

Ulazna veličina	Iznos mjerne nesigurnosti $u$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos mjerne nesigurnosti $\mu\text{m}$
$d_D$	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
$\alpha/2$	Tolerancijsko polje	Normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,8
$A_1$	-	-	-	-
$A_2$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$\delta B$	0,25	Pravokutna	1	0,25
$\Delta n$	1,21	Normalna	0,12	0,15
$u_c(D_2)$			0,926 $\mu\text{m}$	

**Tablica 5. Kategorija umjeravanja 2a**

Kod metode sa mjernim čeljustima standardna merna nesigurnost jednaka je za oba prstena te za obje metode proračuna jednostavnog srednjeg promjera.

$$u_c(D_2) = 0,926 \mu\text{m}$$

dok je proširena merna nesigurnost:

$$U(D_2) = 2u_c = 1,852 \mu\text{m}$$

Matematički model i proračun mjerne nesigurnosti preuzet je iz literature [2]

### 5.3. Usporedba rezultata

U tablici 6. prikazane su srednje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera koje su dobivene nakon mjerjenja navojnih prstena pojedinom metodom po 3 puta.

Rezultat mjerjenja jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima na prstenu M24 m max x 3, kada se u obzir uzme mjerna nesigurnost, nije usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom s T-ticalom (referentna mjerna metoda). Kada rezultate mjerjenja metodom s mjernim čeljustima prilagodimo preporukama iz EURAMET *cg-10 v2.1* upute rezultat mjerjenja srednjeg promjera je usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom s T-ticalom.

Prilikom mjerjenja nije uočen nikakav nedostatak metode s mjernim čeljustima, a kao glavna prednost bi se mogla navesti jednostavnost i brži postupak mjerjenja nego metodom s T-ticalom.

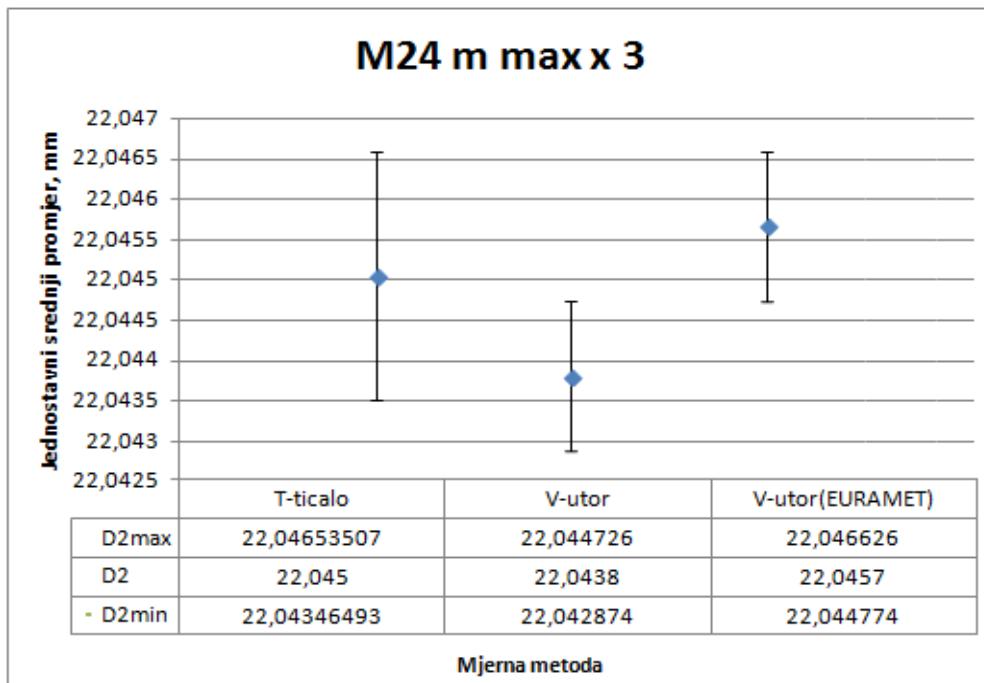
M24m max x 3			
	T-ticalo	V-utor	V-utor (EURAMET)
$D_2$	22,04575161	22,043977	22,04583
$D_2$	22,04441828	22,043779	22,04563
$D_2$	22,04500161	22,043729	22,04558
$\overline{D_2}$	22,04505717	22,04382833	22,04568

M30 x 1,5			
	T-ticalo	V-utor	V-utor (EURAMET)
$D_2$	29,0251048	29,02566	29,02587
$D_2$	29,023821	29,02556	29,02577
$D_2$	29,0284548	29,02771	29,02792
$\overline{D_2}$	29,02579353	29,02631	29,02652

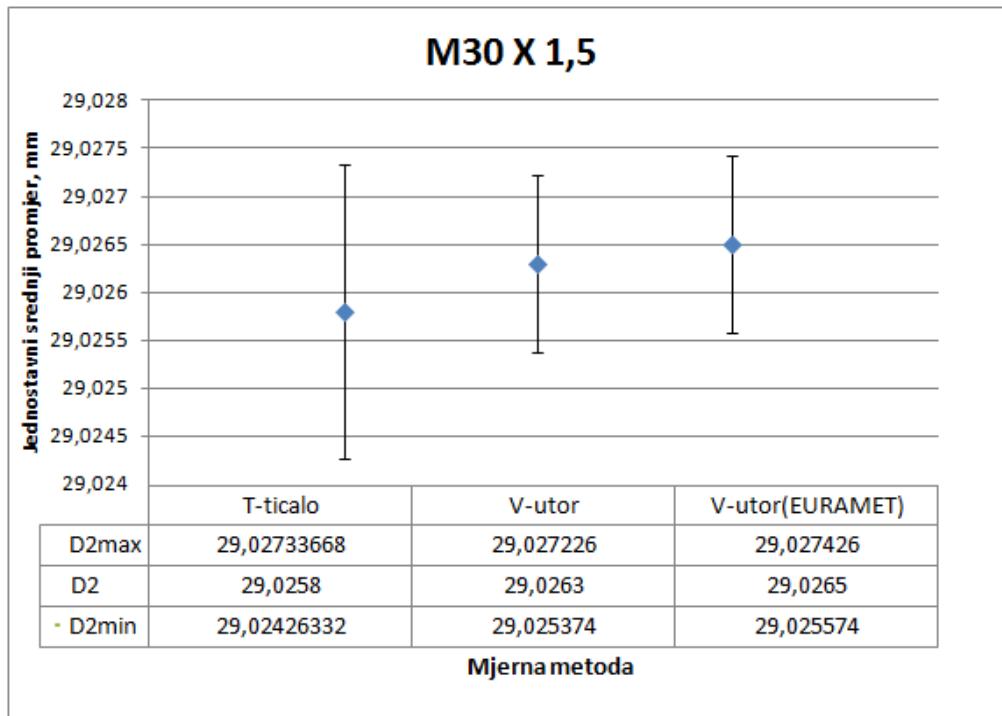
**Tablica 6. Usporedba rezultata**

#### 5.4. Grafički prikaz srednje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera

U dijagramima na slici 20. i 21. prikazane su aritmetičke sredine jednostavnog srednjeg promjera uz proširenu mjernu nesigurnost za pojedinu metodu odnosno pojedini prsten.



Slika 20. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M24 m max x3



Slika 21. Dijagram vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera za prsten M30 x 1,5

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu ukratko je objašnjen pojam jednostavnog srednjeg promjera navoja, te su prikazane različite metode (metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima, metoda s mjernim valjčićima, mjerenje koraka navoja, skeniranje profila navoja, mjerenje oblika zavoja, metoda aksijalnog presjeka, metoda s projiciranjem slike) kojima se isti može odrediti.

Pojedine metode mjerenja jednostavnog srednjeg promjera su detaljnije objašnjene (metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima, metoda s mjernim valjčićima, optičke mjerne metode, ručne mjerne metode) te su su provedena i laboratorijska mjerenja u svrhu dobivanja vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera.

Laboratorijska mjerenja provedena su na univerzalnom jednoosnom mjernom uređaju, uz korištenje različitih steznih i mjernih prihvata, ovisno o primjenjenoj mjernoj metodi (metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima, metoda s mjernim čeljustima uz primjenu EURAMET *cg-10 v2.1* upute). Metoda s mjernim čeljustima je metoda koja je već dugo poznata, no od većine mjeriteljskih instituta nije prihvaćena, a kao mjerodavna metoda koristi se metoda s T-ticalom.

Mjerenja su izvršena na dva različita navojna promjera kako bi se utvrdilo da li su metode usporedive neovisno o nazivnom promjeru. Rezultat mjerenja jednostavnog srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima na prstenu M24 m max x 3, kada se u obzir uzme mjerna nesigurnost, nije usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom sa T-ticalom (referentna mjerna metoda). Kada rezultate mjerenja metodom s mjernim čeljustima prilagodimo preporukama iz EURAMET *cg-10 v2.1* upute rezultat mjerenja srednjeg promjera je usporediv s rezultatom srednjeg promjera ostvaren metodom sa T-ticalom.

Provadena laboratorijska mjerenja opisana u ovom radu potvrdila su prikladnost metoda s mjernim čeljustima uz primjenu EURAMET *cg-10 v2.1* upute kao pouzdane metode za određivanje vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera navoja.

Kako je sama provedba mjerenja metodom s mjernim čeljustima puno brža od metode s T-ticalom, koja između ostalog zahtjeva i veću vještinu samog mjeritelja, možemo govoriti o smanjenju vremena i ukupnih resursa za provedbu mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja uz ostvaren pouzdan mjerni rezultat.

## LITERATURA

- [1] Damir Jelaska *Elementi strojeva* Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2006.
- [2] Vedran Šimunović, *Utjecaj mjernih postupaka na rezultat mjerjenja srednjeg promjera navoja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2014.
- [3] Božidar Križan, Saša Zelenika, *Vijčani spojevi* (pomoćni materijali za kolegij "konstrukcijski elementi I"), Tehnički fakultet Rijeka, 2007.
- [4] K. H. Decker: *Elementi strojeva*, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
- [5] Filip Novak, *Utjecaj mjerne sile na rezultate mjerjenja vanjskih i unutarnjih promjera*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2014.
- [6] EURAMET, Calibration Guide cg-10 v2.1 Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing, 2012.