Utjecaj mjernih postupaka na rezultat mjerenja srednjeg promjera navoja

Šimunović, Vedran

Doctoral thesis / Disertacija

2014

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:235:951767

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Vedran Šimunović

UTJECAJ MJERNIH POSTUPAKA NA REZULTAT MJERENJA SREDNJEG PROMJERA NAVOJA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2014.



University of Zagreb
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Vedran Šimunović

INFLUENCE OF MEASUREMENT PROCEDURES ON MEASUREMENT RESULTS OF PITCH DIAMETER

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2014.

Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Vedran Šimunović

UTJECAJ MJERNIH POSTUPAKA NA REZULTAT MJERENJA SREDNJEG PROMJERA NAVOJA

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof.dr.sc. Vedran Mudronja

Zagreb, 2014.



University of Zagreb
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Vedran Šimunović

INFLUENCE OF MEASUREMENT PROCEDURES ON MEASUREMENT RESULTS OF PITCH DIAMETER

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Prof.dr.sc. Vedran Mudronja

Zagreb, 2014.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:	621.88.082:531.7:006.78
Ključne riječi:	Srednji promjer navoja, Utjecaji na mjerni rezultat, Mjerna nesigurnost, Monte Carlo metoda, Mjerenje paralelnih navoja
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Dr.sc. Vedran Mudronja, red. prof.
Broj stranica:	150
Broj slika:	123
Broj tablica:	42
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	38
Datum obrane:	23. Travnja 2014.
Povjerenstvo:	Dr.sc. Milan Opalić, red. prof. – predsjednik Dr.sc. Vedran Mudronja, red. prof. – mentor Dr.sc. Slobodan Bakula, JP Elektroprivreda, HZHB d.d., Mostar, BiH – član
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Zahvala

Prije svega, želio bih se zahvaliti mentoru dr. sc. Vedranu Mudronji, red. prof. koji je bio moj voditelj i savjetnik kroz cijeli tijek ovog istraživanja.
Također se želim zahvaliti dr. sc. Biserki Runje, izv. prof. na korisnim savjetima i velikoj pomoći koju mi je pružila. Veliko hvala dragim kolegama i kolegici Gorani Baršić, Đoki Rušnovu i Marku Katiću za svu bezrezervnu pomoć i za svu prijateljsku potporu koja mi puno znači. Hvala svim djelatnicima Nacionalnog laboratoriju za duljinu bez kojih izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Na kraju, veliko hvala roditeljima i sestri Tini kojima posvećujem ovaj rad.

Sažetak

Cilj ovog istraživanja je odrediti na koji način veličine korištene za izračun srednjeg promjera navoja utječu na njegov konačni iznos te predložiti pouzdan proračun nesigurnosti rezultata mjerenja dobivenih različitim mjernim postupcima. Istraživanje obuhvaća ispitivanje paralelnih navoja kontaktnim metodama s naglaskom na metodu s tri valjčića za određivanje srednjeg promjera navojnih čepova te metode za određivanje srednjeg promjera navojnih prstena upotrebom T-ticala i mjernih čeljusti. Posebno se istražuje utjecaj temperature i utjecaj dimenzije mjernog elementa na izmjerenu vrijednost srednjeg promjera navojnih mjerila. Rezultati mjerenja uz pripadajuće nesigurnosti su verificirani kroz međulaboratorijsku usporedbu EURAMET.L-S21 koja je pokrenuta i vođena od strane Nacionalnog laboratorija za duljinu Republike Hrvatske. Rezultati istraživanja ukazali su na nedostatke dosadašnje mjeriteljske prakse i postupka prijave CMC vrijednosti u CIPM MRA KCDB bazu podataka. Ovim radom su predložene izmjene kojima bi se međusobno uskladili postupci i upute za mjerenje srednjeg promjera navoja i olakšala provedba usporedbi i prijave mjeriteljskih sposobnosti na području mjerenja navoja.

Temeljem ovog istraživanja Nacionalni laboratorij za duljinu Republike Hrvatske se priključio vodećim svjetskim institutima na području mjerenja navoja kroz objavu CMC vrijednosti.

Summary

This research investigates the effects of measured quantities on determination of pitch diameter final value and suggests the reliable uncertainty budget for the results obtained from different measurement procedures. Mechanical probing measurements are used for the determination of parallel thread gauges pitch diameter, where three wire method is used for the plug gauges, while both T-sphere and V-jag methods are used for thread ring gauges respectfully. Effects of temperature and probe geometries on measured pitch diameter values are particularly emphasised within the scope of this work. Measurement results with corresponding uncertainties were evaluated within EURAMET supplementary comparison, which was initiated and piloted by National Laboratory for Length in Croatia. This research has shown that comparison procedures and procedures for registration of CMC's in the CIPM MRA KCDB should be changed by the means of calibration categories. It is shown that measurement results within categories of Pitch diameter and Simple pitch diameter must be comparable and therefore only two categories should be considered in the future comparisons and CMC's registrations. Measurements with the additional methods (V-jag method and measurement of axial-profile) were performed and compared with SCRV value of EURAMET.L-S21 comparison. Results of pitch diameter obtained from the measurement of axial profile did not shown good comparability and therefore extended researched should be carried out. Results of Pitch diameter obtained with the V-jag has shown good comparability and this method can be used for pitch diameter calibration at the height level of measurement uncertainties.

Sadržaj:

1 Uvod 1
1.1 Motivacija rada 1
1.2 Ciljevi i hipoteza istraživanja 3
1.3 Metodologija rada 4
2 Definicije i pojmovi 6
2.1 Zavojnica navoja 6
2.2 Navoj vijka 7
2.3 Profili navoja 9
2.4 Promjeri navoja 11
2.5 Korak i uspon navoja 15
3 Umjeravanje srednjeg promjera navoja 17
3.1 Granična mjerila za srednji promjer navoja 17
3.2 Kategorije umjeravanja srednjeg promjera navoja 18
3.2.1 Kategorija 1a – mjerenje jednostavnog srednjeg promjera 19
3.2.2 Kategorija 1b – mjerenje jednostavnog srednjeg promjera i kuta navoja 19
3.2.3 Kategorija 2a – mjerenje srednjeg promjera i koraka navoja 19
3.2.4 Kategorija 2b – mjerenje srednjeg promjera, koraka navoja i kuta navoja 19
3.2.5 Kategorija 3 – mjerenje funkcionalnog srednjeg promjera, koraka navoja i kutova profila navoja 19
3.3 Mjerne metode 20
3.3.1 Mjerenje srednjeg promjera 21
3.3.2 Mjerenje koraka navoja 25
3.3.3 Mjerenje kuta navoja 27
3.3.4 Ostale mjerne metode 28
3.3.5 Mjerenje konusnih navoja 30
3.4 Matematički modeli i mjerne nesigurnosti 31
3.4.1 Korekcija nalijeganja valjčića 31
3.4.2 Korekcija zbog utjecaja mjerne sile 33
3.4.3 Računanje funkcionalnog srednjeg promjera 33
3.4.4 Odabir optimalnog promjera mjernih elemenata 34
3.4.5 Mjerna nesigurnost 34
4 Mjerni sustav 36
4.1 Univerzalni mjerni uređaj Microrep Joint DMS680 36
4.1.1 Umjeravanje srednjeg promjera navojnih čepova metodom s tri valjčića 36
4.1.2 Umjeravanje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s T-ticalom 37
4.1.3 Umjeravanje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s mjernim čeljustima 38
4.1.4 Mjerenje koraka navoja 40

4.2 Modificirani 2D mjerni uređaj Carl Zeiss 40
4.2.1 Mjerenje koraka i kuta navoja 42
4.3 Vektorsko-numerički model 43
4.3.1 Provjera vektorsko-numeričkog modela pomoću Catia softvera 50
5 Analiza utjecajnih elemenata 53
5.1 Numeričke simulacije 53
5.2 Utjecaj pogreške kuta na srednji promjer navoja 55
5.2.1 Vanjski navoji 56
5.2.2 Unutarnji navoji 60
5.3 Utjecaj pogreške koraka na srednji promjer navoja 62
5.4 Utjecaj promjera mjernog elementa na srednji promjer navoja 66
5.5 Utjecaj koraka navoja na teorijsku udaljenost korijena navoja r_p 70
5.6 Utjecaj temperature 72
5.6.1 Utjecaj temperature na srednji promjer vanjskih navoja 72
5.6.2 Utjecaj temperature na srednji promjer unutarnjih navoja 73
5.6.3 Utjecaj temperature na kut i korak navoja 74
5.6.4 Model utjecaja temperature na dimenzije vanjskih navoja 75
6 Mjerne nesigurnosti 78
6.1 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim valjčićima 78
6.1.1 Nesigurnost kuta navoja 79
6.1.2 Nesigurnost mjerenja koraka navoja 82
6.1.3 Nesigurnost zbog utjecaja mjernog elemenata 83
6.1.4 Nesigurnost korekcije nalijeganja mjernog elementa 84
6.1.5 Nesigurnost korekcije mjerne sile 84
6.1.6 Nesigurnost zbog predmeta mjerenja 84
6.1.7 Nesigurnost ponovljivosti mjernog sustava 84
6.1.8 Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja 84
6.1.9 Nesigurnost zbog utjecaja temperature 84
6.1.10 Nesigurnost zbog utjecaja mjernih kapica 86
6.1.11 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera vanjskih metričkih navoja 86
6.2 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s T-ticalom 88
6.2.1 Nesigurnost kuta navoja 89
6.2.2 Nesigurnost mjerenja koraka navoja 91
6.2.3 Nesigurnost zbog utjecaja mjernog elemenata 93
6.2.4 Nesigurnost korekcije nalijeganja mjernog elementa 93
6.2.5 Nesigurnost korekcije mjerne sile 93

6.2.6 Nesigurnost zbog predmeta mjerenja 93
6.2.7 Ponovljivost mjernog sustava 93
6.2.8 Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja 93
6.2.9 Nesigurnost zbog utjecaja temperature 94
6.2.10 Nesigurnost mjerenja s mjernim prihvatom i T-ticalom 95
6.2.11 Nesigurnost umjeravanja unutarnjeg cilindra 95
6.2.12 Nesigurnost mjere referentnog prstena T-ticalom 95
6.2.13 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera unutarnjih metričkih navoja 96
6.3 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim čeljustima 98
6.3.1 Nesigurnost kuta navoja 99
6.3.2 Nesigurnost mjerenja kuta navoja 100
6.3.3 Nesigurnost veličine *n* 101
6.3.4 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera unutarnjih metričkih navoja 105
6.3.5 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera vanjskih metričkih navoja 105
7 EURAMET.L-S21 107
7.1 Tehnički protokol 107
7.1.1 Sudionici usporedbe 107
7.1.2 Opis mjernih sredstava 107
7.1.3 Postupak mjerenja 108
7.1.4 Mjerni izvještaj 109
7.2 Analiza rezultata mjerenja 110
7.3 Rezultati mjerenja 112
7.4 Veza usporedbe EURAMET.L-S21 i CIPM MRA KCDB baze podataka 127
8 Rezultati mjerenja – ostale metode 132
9 Zaključak 135
10 Reference 137
11 Životopis 139
12 Biography 139
13 Prilog1 140
14 Prilog 2 150

Popis slika:

Slika 2-1 Zavojnica navoja 7
Slika 2-2 Simetrični navoj 8
Slika 2-3 Asimetrični navoj 8
Slika 2-4 Jednovojni vanjski desni navoj....8
Slika 2-5 Jednovojni unutarnji desni navoj....8
Slika 2-6 Jednovojni vanjski lijevi navoj....9
Slika 2-7 Viševojni vanjski desni navoj 9
Slika 2-8 Osnovni trokutni oblik i osnovni profil navoja....11
Slika 2-9 Radionički profil 11
Slika 2-10 Radionički profil 11
Slika 2-11 Profil navoja 11
Slika 2-12 Promjeri navoja....14
Slika 2-13 Jednostavni srednji promjer 14
Slika 2-14 Funkcionalni srednji promjer....14
Slika 2-15 *m* - udaljenost središta mjernih elemenata....15
Slika 2-16 Korak navoja i korak izražen preko dva boka navoja....16
Slika 2-17 Uspon i uspon izražen preko dva boka navoja 16
Slika 3-1 Granična mjerila za srednji promjer 17
Slika 3-2 Metoda s tri valjčića....22
Slika 3-3 Metoda s T-ticalom....22
Slika 3-4 Stezna naprava za mjerke s V-utorom....23
Slika 3-5 Primjer postavljanja nulte vrijednosti pomoću mjerki s V-utorom....23
Slika 3-6 Mjerenje srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima 23
Slika 3-7 Mjerenje srednjeg promjera upotrebom mjernih nožića....25
Slika 3-8 2D mjerni uređaj (mjerenje pomaka laserskim interferencijskim sustavom) 26
Slika 3-9 Program za analizu podataka snimljenih 2D mjernim uređajem 26
Slika 3-10 Profil navoja snimljen 2D mjernim uređajem s aksijalnim postupkom i postupkom projiciranja 26
Slika 3-11 Mjerenje koraka unutarnjih navoja 27
Slika 3-12 Mjerenje kuta metodom aksijalnog presjeka 27
Slika 3-13 Mjerenje kuta metodom projiciranja 27
Slika 3-14 Uređaj za mjerenje aksijalnog profila navoja 29
Slika 3-15 Mjerenje navoja sa CMM-om s T-ticalom 29
Slika 3-16 Mjerenje profila navoja s CMM-om metodom....30
Slika 3-17 Mjerenje srednjeg promjera konusnih vanjskih navoja 30
Slika 3-18 Udaljenost središta elemenata ticala 31
Slika 3-19 Korekcija nalijeganja valjčića 32
Slika 4-1 Univerzalni mjerni uređaj Joint DMS 680....36
Slika 4-2 Mjerenje vanjskog navoja....37
Slika 4-3 Određivanje konstante T-ticala 37
Slika 4-4 Mjerenje referentnog prstena....37
Slika 4-5 Mjerenje navojnog prstena T-ticalom 38

Slika 4-6 Postavljanje početnog položaja mjerkama s V-utorom....39
Slika 4-7 Mjerenje navoja metodom s mjernim čeljustima....39
Slika 4-8 Mjerenje koraka unutarnjih navoja....40
Slika 4-9 Mjerenje koraka vanjskih navoja....40
Slika 4-10 2D mjerni uređaj Carl Zeiss....40
Slika 4-11 Optički sustav....41
Slika 4-12 Mjerni program MerOpt....41
Slika 4-13 Slika mjerenja navoja 2D mjernim uređajem....42
Slika 4-14 Negativi navojnih prstena izrađeni u akrilnoj masi....42
Slika 4-15Obrada podataka u programu MerOpt....43
Slika 4-16 Shema jednog boka profila navoja....44
Slika 4-17 Dodir mjernog elementa i navoja....45
Slika 4-18 Određivanje početnih uvjeta....47
Slika 4-19 Blok dijagram programa za izračun srednjeg promjera....48
Slika 4-20 Dodir mjernog elementa s vanjskim i unutarnjim navojem....49
Slika 4-21 Verifikacija programa za izračun srednjeg promjera....49
Slika 4-22 3D model navoja d_2 = 97,9242 mm....51
Slika 4-23 Dodir mjernog elementa i navoja....51
Slika 4-24 3D model s koordinatama dodirnih točaka....52
Slika 5-1 Blok dijagram programa za simulacije....54
Slika 5-2 Utjecaj pogreške kuta profila od $\alpha/2$ = ±0,1˚na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima)....56
Slika 5-3 Doprinos pogreške kuta profila od $\alpha/2$ = ±0,1˚ na srednji promjer metričkih navoja (Monte Carlo)....57
Slika 5-4 Razdioba srednjeg promjera navoja M 30 x 1....57
Slika 5-5 Doprinos pogreške kuta na srednji promjer navoja s korakom od 1 mm....58
Slika 5-6 Doprinosi zbog pogreške kuta na srednji promjer navoja M 30 x 1....59
Slika 5-7 Odstupanje srednjeg promjera metričkih navoja ako je kut profila unutar granica dopuštenog odstupanja (metoda s tri valjčića)....59
Slika 5-8 Doprinos pogreške kuta profila od $\beta = \gamma$ = ±0,1˚na srednji promjer *S* navoja....60
Slika 5-9 Doprinos pogreške kuta profila od $\alpha/2$ = ±0,1˚na srednji promjer unutarnjih navoja (primjenom metoda s T-ticalom i s mjernim čeljustima)....61
Slika 5-10 Odstupanje srednjeg promjera metričkih navoja ako je kut profila unutar granica dopuštenih odstupanja (metoda s T-ticalom)....61
Slika 5-11 Odstupanje srednjeg promjera metričkih navoja ako je kut profila unutar granica dopuštenih odstupanja (metoda s mjernim čeljustima)....62
Slika 5-12 Razdioba srednjeg promjera navoja M 30 x 1....63
Slika 5-13 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±1 µm na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima)....63
Slika 5-14 Doprinosi pogreške koraka na srednji promjer navoja M 30 x 1....64
Slika 5-15 Doprinos pogreške koraka navoja na srednji promjer navoja....65
Slika 5-16 Doprinos pogreške koraka navoja od 1 µm na srednji promjer *S* navoja....65
Slika 5-17 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±1 µm na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s T-ticalom)....66

Slika 5-18 Razdioba srednjeg promjera navoja M30x1 67
Slika 5-19 Utjecaj pogreške promjera mjernog elementa od ±0,5 µm na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima) 68
Slika 5-20 Doprinosi pogreške promjera mjernog elementa na srednji promjer navoja M 30 x 1 68
Slika 5-21 Utjecaj pogreške promjera mjernog elementa od ±0,5 µm na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s T-ticalom) 69
Slika 5-22 Doprinos pogreške promjera mjernog elementa od 0,5 µm na srednji promjer *S* navoja 69
Slika 5-23 Teorijski trokutni profil navoja 70
Slika 5-24 Srednji promjer i jednostavni srednji promjer navoja 70
Slika 5-25 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±10 µm na polumjer r_P metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima) 71
Slika 5-26 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±10 µm na polumjer r_P *S* navoja (mjerna metoda s valjčićima) 71
Slika 5-27 Dimenzija navoja M 6 x 1 (visina navoja je 9 mm) 75
Slika 5-28 Mreža konačnih elemenata "mesh" 76
Slika 5-29 Deformacija navoja u smjeru osi x zbog porasta temperature za 1 ˚C 76
Slika 5-30 Deformacija navoja u smjeru osi y zbog porasta temperature za 1 ˚C 76
Slika 5-31 Deformacija navoja u smjeru osi z zbog porasta temperature za 1 ˚C 77
Slika 6-1 Doprinos mjerenja kuta metričkih navoja (metoda s tri valjčića) 81
Slika 6-2 Doprinos koraka na srednji promjer navoja (Monte Carlo) 83
Slika 6-3 Doprinos utjecaja zbog pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja (metoda s T-ticalom) 91
Slika 6-4 Doprinos koraka na srednji promjer navoja (Monte-Carlo) 92
Slika 6-5Procijenjeno standardno odstupanje temperaturne korekcije za metričke navoje (metoda s T-ticalom) 94
Slika 6-6 Doprinos utjecaja zbog pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja (metoda s mjernim čeljustima, 2b kategorija umjeravanja) 100
Slika 6-7 Doprinos utjecaja zbog pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja (metoda s mjernim čeljustima , 1b kategorija umjeravanja) 100
Slika 6-8 Prvi član koeficijenta osjetljivosti c_p - metrički navoji 101
Slika 6-9 Utjecaj temperature na srednji promjer navoja – metoda s mjernim čeljustima 103
Slika 6-10 koeficijenti osjetljivosti c_n za metričke navoje 105
Slika 7-1 Mjerna mjesta – navojni prsten 108
Slika 7-2 Mjerna mjesta – navojni čep 109
Slika 7-3 Izvještaj o mjerenju 109
Slika 7-4 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1a 113
Slika 7-5 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1b 114
Slika 7-6 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2a 115
Slika 7-7 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2b 116
Slika 7-8 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Korak navoja 117
Slika 7-9 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Kut navoja 118
Slika 7-10 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1a 120
Slika 7-11 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1b 121

Slika 7-12 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Srednji promjer 2a 122
Slika 7-13 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Srednji promjer 2b 123
Slika 7-14 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Korak navoja 124
Slika 7-15 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Kut navoja 125
Slika 7-16 Jednostavni srednji promjer – navojni čep M 12 x 1,75 128
Slika 7-17 Jednostavni srednji promjer – navojni prsten M 18 x 2,5 129
Slika 7-18 Srednji promjer – navojni čep M 12 x 1,75 130
Slika 7-19 Srednji promjer – navojni prsten M 18 x 2,5 131
Slika 8-1 Odstupanja rezultata mjerenja vanjskih navoja dobivenih s Masterscanner uređajem od referentne vrijednosti usporedbe EURAMET.L-S21 (SRCV) 133
Slika 8-2 Odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih navoja dobivenih s Masterscanner uređajem od referentne vrijednosti usporedbe EURAMET.L-S21 (SRCV) 133
Slika 8-3 Odstupanja rezultata mjerenja dobivenih s metodom s mjernim čeljustima od referentne vrijednosti usporedbe EURAMET.L-S21 (SRCV) 134

Popis tablica:

Tablica 2-1 Karakteristična zavojnica navoja - definicije 6
Tablica 2-2 Navoj vijka - definicije 7
Tablica 2-3 Profil navoja – definicije 9
Tablica 2-4 Promjeri navoja – definicije 11
Tablica 2-5 Korak navoja – definicije 15
Tablica 3-1 Kategorije umjeravanja prema EURAMET cg-10, v10.0 18
Tablica 3-2 Metode koje se koriste za mjerenje srednjeg promjera navoja 21
Tablica 4-1 Rezultati srednjeg promjera izračunati Berndtovim i numeričkim modelom 50
Tablica 4-2 Mjere vanjskog navoja nazivnog srednjeg promjera d_2 = 97,9242 mm 51
Tablica 4-3 Koordinate dodirnih točaka dobiveni računom na v-n modelu i mjerenjem na 3D modelu 52
Tablica 6-1 Nesigurnost rezultata mjerenja kuta navoja na 2D mjernom uređaju „Carl Zeiss“ 81
Tablica 6-2 Nesigurnost rezultata koraka navoja na 2D mjernom uređaju Carl Zeiss 83
Tablica 6-3 Sastavnice mjerne nesigurnosti zbog utjecaja temperature 85
Tablica 6-4 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1b kategorija umjeravanja 86
Tablica 6-5 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1a kategorija umjeravanja 86
Tablica 6-6 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2b kategorija umjeravanja 87
Tablica 6-7 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2a kategorija umjeravanja 87
Tablica 6-8 Nesigurnost rezultata mjerenja kuta unutarnjih navoja na 2D mjernom uređaju Carl Zeiss 90
Tablica 6-9 Nesigurnost rezultata koraka navoja na 2D mjernom uređaju Carl Zeiss 92
Tablica 6-10 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1b kategorija umjeravanja 96
Tablica 6-11 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1a kategorija umjeravanja 97
Tablica 6-12 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2b kategorija umjeravanja 97
Tablica 6-13 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2a kategorija umjeravanja 98
Tablica 6-14 Sastavnice mjernih nesigurnosti veličine n 104

Tablica 6-15 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2b kategorija umjeravanja.....105
Tablica 6-16 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2a kategorija umjeravanja.....106
Tablica 7-1 Mjerna sredstva 107
Tablica 7-2 Mjerna sredstva 108
Tablica 7-3 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1a.....112
Tablica 7-4 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1b.....114
Tablica 7-5 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2a.....115
Tablica 7-6 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2b.....116
Tablica 7-7 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Korak navoja.....117
Tablica 7-8 Rezultati mjerenja navojnog prstena (SRCV - ponderirana sredina) – Kut navoja.....118
Tablica 7-9 Rezultati mjerenja navojnog prstena (SRCV - aritmetička sredina) – Kut navoja.....119
Tablica 7-10 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1a 120
Tablica 7-11 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1b 121
Tablica 7-12 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Srednji promjer 2a 122
Tablica 7-13 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Srednji promjer 2b 123
Tablica 7-14 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Korak 124
Tablica 7-15 Rezultati mjerenja navojnog čepa (SRCV - ponderirana sredina) – Kut navoja 125
Tablica 7-16 Rezultati mjerenja navojnog čepa (SRCV - aritmetička sredina) – Kut navoja 126

Popis oznaka:

P_h - Uspon, mm

φ - Kut uspona, $^\circ$

α - Kut navoja, $^\circ$

P - Korak navoja, mm

β,γ - Kutovi profila navoja, $^\circ$

d_D - Promjer mjernog elementa, mm

L - Izmjerena duljina, mm

d_{2s} - Jednostavni srednji promjer vanjskih navoja, mm

d_2 - Srednji promjer vanjskih navoja, mm

D_{2s} - Srednji promjer unutarnjih navoja, mm

D_2 - Jednostavni srednji promjer unutarnjih navoja, mm

A_1 - Korekcija nalijeganja mjernih valjčića, mm

A_2 - Korekcija mjerne sile, mm

m - Udaljenost središta mjernih elemenata, mm

m_{teo} - Teorijska udaljenost između središta mjernih elemenata, mm

C - Konstanta T-ticala, mm

F - Mjerna sila, N

Δx - Utvrđena razlika podešene vrijednosti i izmjerene vrijednosti na navoju, mm

D_{2naz} - Nazivni srednji promjer navoja, mm

$(a+b)$ - Konstanta mjerki s V urezom, mm

α_{jag} - Kut utora mjerki s V-utorom, ˚

D_{ref} - Promjer referentnog prstena, mm

n - Udaljenost središta mjernog elementa u osi mjerenja metodom s mjernim čeljustima, mm

r_p - Teorijski promjer korijena navoja, mm

Δt_A - Razlika između temperature okoliša i 20 ˚C, ˚C

Δt_r - Razlika između temperature referentnog prstena i okolišne temperature, ˚C

Δt_i - Razlika između temperature mjernog uređaja i okolišne temperature, ˚C

Δt_r - Razlika između temperature referentnog prstena i okolišne temperature, ˚C

Δt_n - Razlika između temperature navojnog čepa i okolišne temperature, ˚C

Δt_L - Razlika između temperature navojnog prstena i okolišne temperature, ˚C

w - Normirani težinski faktor ponderirane sredine, mm/mm

$\bar{x}_w$ - Ponderirana sredina, mm

$\bar{x}$ - Aritmetička sredina, mm

x_{ref} - Referentna vrijednost, mm

En - Statistička konzistentnost rezultata mjerenja, mm/mm

R_B - Omjer Birgovog testa, mm/mm

Uvod

1.1 Motivacija rada

Laboratorij za precizna mjerenja duljinu (u nastavku Laboratorij) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu ujedno je i Nacionalni laboratorij za duljinu Republike Hrvatske te predstavlja najvišu razinu u hrvatskom mjeriteljstvu dužina. Laboratorij njeguje pedesetogodišnju praksu umjeravanja navojnih mjerila. Prvi voditelj Laboratorija, prof. dr. sc. Ivan Hercigonja, izradio je doktorsku disertaciju upravo iz ovog područja [1], koja je ujedno i prva disertacija iz područja tehničkih znanosti u Republici Hrvatskoj. Uz dva nacionalna i sedam umjernih laboratorija, Laboratorij je 1997. godine sudjelovao u međunarodnoj usporedbi LABCOM. Uspoređivali su se rezultati mjerenja srednjeg promjera graničnih mjerila unutarnjih i vanjskih navoja[1]. Ostvareni su vrlo dobri rezultati, a sama usporedba ukazala je da bi rezultati mjerenja srednjeg promjera navoja mogli biti usporedivi i na EURAMET razini.

Radi potvrđivanja mogućnosti umjeravanja navojnih graničnih mjerila na razini svjetskih mjeriteljskih instituta, Laboratorij je pokrenuo proces prijave CMC vrijednosti u MRA CIPM KCDB bazu podataka. Postupak prijave otvorio je čitav niz pitanja koja proizlaze iz nedostatka tehničkih uputa i preporuka te općenito manjka znanstvenih istraživanja na ovom području.

Prijavljene CMC vrijednosti za karakteristične veličine navoja (11 svjetskih instituta) nisu nikad provjerene međulaboratorijskom usporedbom, već su odobrene temeljem dokumentacije. Međutim, bez provedbe međunarodne usporedbe na razini RMO-a(EURAMET-a) ne može tvrditi da je postignuta usporedivost rezultata mjerenja srednjeg promjera između nacionalnih mjeriteljskih instituta. Swiss Callibration Service SCS i Length&Optics Section of the Swiss Federal Office of Metrology OFMET su 1995. godine organizirali međunarodnu usporedbu EAL Interlaboratory Comparison M19 – Calibration of Screw Thread [2] u kojoj je sudjelovalo 39 laboratorija. Ovom usporedbom su utvrđene značajne razlike u dobivenim rezultatima i prije objave konačnog izvještaja, pokrenute su brojne rasprave s ciljem objavljivanja jedinstvene preporuke kojom bi se uskladile postojeće definicije srednjeg promjera kao i postupci mjerenja[2]. EA Committee 2 je 2001. godine objavio prvo izdanje preporuke za umjeravanje paralelnih navoja - Guide EA 10/10, dok se kasnija izdanja objavljuje EURAMET pod naslovom EURAMET/cg-10 [3]. Ova uputa izdvaja tri različite kategorije umjeravanja srednjeg promjera navoja[3] i objedinjuje općenite smjernice za mjerenje (određivanje) srednjeg promjera navoja kontaktnim metodama te smjernice za određivanje mjernih nesigurnosti s ciljem usklađivanja mjernih postupaka i postizanja usporedivost rezultata mjerenja unutar istih kategorija umjeravanja. Većina nacionalnih mjeriteljskih instituta koristi kontaktne metode, koje su i predložene navedenim dokumentom, i to metodu s T-ticalom za unutarnje navoje i metodu s tri valjčića za vanjske navoje. Bitno ograničenje

[1] Granična mjerila za vanjski navoj - M35x1,5 i UNI ISO 228/2 (55°).
Granična mjerila za unutarnji navoj – M20x1,5 i M35x1,5.

[2] Mjerni postupak: podroban opis mjerenja u skladu s jednim ili više mjernih načela i danom mjernom metodom, na temelju mjernog modela i uključujući svaki izračun kako bi se dobio mjerni rezultat.

[3] Ova uputa izdvaja tri definicije srednjeg promjera (srednji promjer, jednostavan srednji promjer i funkcionalni srednji promjer) prema kojima su određene kategorije umjeravanja navojnih graničnih mjerila.

ovih metoda leži u činjenici da se srednji promjer navoja izračunava iz geometrijskog dodira mjernog elementa i boka profila navoja prema Berndtovim izrazima [4], gdje se pretpostavlja navoj s idealno ravnim bokovima, bez geometrijskih odstupanja te korakom i kutom profila koji su ujednačeni duž čitavog navoja. Nesigurnost umjeravanja srednjeg promjera ovisi o nizu utjecaja koji proizlaze iz mjerne metode (dimenzije i oblika mjernog elementa, mjerne sile), mjernog uređaja, odnosno mjernog postupka, nesavršenosti navojnog graničnog mjerila (odstupanja u kutu profila i koraku navoja) geometrijske nesavršenosti boka navoja. S obzirom da spreg svih ovih utjecaja može značajno proširiti mjernu nesigurnost, postavlja se pitanje koju razinu mjernih nesigurnosti je moguće postići korištenjem ovih metoda.

Posljednjih desetak godina razvijaju se nove mjerne metode i uređaji od kojih je možda najznačajniji uređaj Masterscanner proizvođača IAC [5]. Ovaj uređaj može snimiti profil navoja u aksijalnom presjeku iz kojeg se izračunava korak, kut profila, srednji promjer navoja te odstupanje od ravnosti bokova profila navoja. Prednost ovog uređaja je u tome što se srednji promjer određuje iz stotine snimljenih podataka, za razliku od konvencionalnih metoda koje se temelje na dodiru u desetak točaka. Ovim postupkom se srednji promjer navoja određuje strogo prema definiciji, tako da geometrijska odstupanja profila navoja, odstupanje koraka i kuta profila ne utječe na rezultat mjerenja srednjeg promjera. S obzirom da je ovaj uređaj relativno nov na tržištu, Nacionalni mjeriteljski instituti ga još ne koriste za umjeravanja na najvišoj razini.

1.2 Ciljevi i hipoteza istraživanja

Ciljevi ovog istraživanja su:

- **Istražiti utjecaj mjernih postupaka**, koji se koriste za umjeravanje srednjeg promjera navoja na razini nacionalnih instituta, **na rezultat mjerenja i mjernu nesigurnost srednjeg pomjera navoja te odrediti pripadajuće korekcije**.
- **Predložiti model za korekciju rezultata srednjeg promjera navoja zbog utjecaja temperature.**
- **Odrediti kritične dimenzije mjernog elementa** primjenom kontaktnih metoda: metoda s T-ticalom, metoda s mjernim čeljustima i metoda s mjernim valjčićima, **kod kojih dolazi do značajnog povećanja mjerne nesigurnosti.**
- **Modificirati metodu s čeljustima** za mjerenje srednjeg promjera unutarnjih navoja **s ciljem smanjenja mjerne nesigurnosti na razinu metode s T-ticalom.**
- **Izraditi tehnički protokol** sukladno preporukama dokumenta EURAMET/cg-10/v.02 [3] **temeljem kojeg će se inicirati EURAMET međunarodna usporedba**.
- Na temelju rezultata istraživanja **objaviti CMC vrijednosti u CIPM MRA KCDB bazu podataka.**

Hipoteza: **Određivanjem utjecajnih elemenata na rezultat mjerenja srednjeg promjera navoja** dobiven različitim mjernim postupcima, **moguće je postići usporedivost rezultata mjerenja unutar i između različitih kategorija umjeravanja.**

Ovim istraživanjem osigurana je mogućnost umjeravanja srednjeg promjera navoja na svjetskoj razini mjernih nesigurnosti unutar hrvatskog mjeriteljskog sustava. Inicirana predloženim istraživanjem, provedena je prva EURAMET međulaboratorijska usporedba u predmetnom području čime je stvoren temelj za prijavu i provjeru prijavljenih CMC vrijednosti za navoj u CIPM MRA KDCB bazi na razini europskih nacionalnih mjeriteljskih laboratorija.

1.3 Metodologija rada

Metode mjerenja navoja koje se razmatraju u ovom istraživanju odnose se na mjerenje srednjeg promjera simetričnih i asimetričnih unutarnjih i vanjskih navoja. 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.

Istraživanje je razdvojeno u tri glavna dijela. Prvi dio se odnosi na računalne simulacije utjecaja odstupanja kuta profila i koraka navoja na vrijednost srednjeg promjera navoja. Razvijen je matematički model pogodan za određivanje srednjeg promjera simetričnih i asimetričnih cilindričnih navoja kontaktnim metodama [6]: metodom s T-ticalom i metodom sa čeljustima za vanjske te metodom s tri valjčića za unutrašnje navoje. Ovaj model se ne temelji na Berndtovim formulacijama, nego je korišten vektorski pristup kojim se numeričkim putem dolazi do rješenja. Ovim načinom je izbjegnuta potreba za naknadnom korekcijom mjernog rezultata zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa u profil navoja (eng. *rake correction*) [7]. Uz navedene utjecaje kuta i koraka navoja, provedena je i simulacija u cilju određivanja kritičnih dimenzija mjernih elemenata kod kojih dolazi do značajnog porasta mjerne nesigurnosti. Mjerni element odgovarajućeg promjera odabire se iz standardne garniture mjernih elemenata koja pokriva već unaprijed definirane promjere. Ovisno o koraku navoja, ovi promjeri mogu u manjoj ili većoj mjeri odstupati od optimalnih i značajno doprinijeti povećanju mjerne nesigurnosti. Simulacija je izvedena za metričke navoje standardnih koraka prema normi ISO 724:1993 [8]. Temeljem rezultata predloženo je proširenje postojećih garnitura mjernih elemenata koji se koriste za tri prethodno navedene metode. Pregledom novije literature i važećih dokumenata [9] [3] [10], ustanovljeno je da se ne navodi značajniji utjecaj temperature na vrijednost srednjeg promjera navoja, niti temperaturni doprinos mjernoj nesigurnosti. Primjerice, pri umjeravanju cilindričnih čepova i prstena određena je temperaturna korekcija kao i temperaturni doprinos mjernoj nesigurnosti [11]. Prema poznatim linearnim modelima koji se koriste za određivanje korekcije rezultata mjerenja promjera prstena i čepova, ustanovljena je temperaturna korekcija za navojna granična mjerila koja je provjerena metodom konačnih elemenata. Utjecaj mjerne sile određen je prema Hertzovom modelu dodira koji se predlaže u literaturi [4] [3] [12].

U drugom dijelu istraživanja pristupilo se mjerenjima i određivanju mjerne nesigurnosti. Mjeren je srednji promjer, kut profila i korak navoja metričkih navojnih graničnih mjerila[4]. Odabrana su tri mjerila za unutarnji navoj i tri mjerila za vanjski navoj uobičajene klase točnosti (strana ide) [13]. Mjerenja su provedena u Laboratoriju i u umjernom laboratoriju Trescal s.r.l iz Italije.

Za određivanje srednjeg promjera korištena je metoda s T-ticalom za unutarnje navoje i metoda s tri valjčića za vanjske navoje na univerzalnom mjernom uređaju Microrep Joint DMS680. Ove dvije metode koriste se pri umjeravanju navojnih graničnih mjerila na najvišoj razini.

Kut profila vanjskih navoja mjeren je optičkom metodom pomoću 2D mjernog uređaja (alatnog mikroskopa). Kut profila unutarnjih navoja mjerio se na isti način, uz prethodno uzimanje otiska unutarnjeg navoja. Da bi se alatni mikroskop mogao iskoristiti za ovu primjenu na prihvatljivoj razini točnosti, uređaj je modificiran. Ugrađene su nove mjerne skale, digitalna kamera i mjerni

[4] Vanjski navoj: GO M6x1 6H,GO M12x1,75 6H, GO M36x1,5 6H
Unutarnji navoj: GO M18x2,5 6g, GO M42x4,5 6g, GO M30x1,5 6g

softver. Pomak mjernih osi dodatno se ispitivao interferencijskim laserskim sustavom. Korak unutarnjih i vanjskih navoja mjeren je univerzalnim mjernim uređajem s nastavkom za mjerenje koraka. Mjerenja svih navedenih veličina provedena su i u Trescal s.r.l laboratoriju gdje je korišten uređaj za mjerenja aksijalnog profila navoja (Masterscanner). S obzirom da se mjerio metrički navoj s malim odstupanjem kuta profila navoja, nisu ustanovljene značajne razlike između rezultata mjerenja dobivenih ovim metodama. Račun srednjeg promjera provodio se u skladu s EURAMET uputom [3].

Uz navedena mjerenja, srednji promjer unutarnjih navoja dodatno je mjeren metodom s mjernim čeljustima koja je dugi niz godina upotrebljavana za mjerenje srednjeg promjera navojnih prstena dok nije zamijenjena metodom s T-ticalom. Ovo istraživanje ukazalo je na nedostatke u računu srednjeg promjera koji se koristio uz metodu s mjernim čeljustima [14]i utvrđeno je sustavno odstupanje rezultata u odnosu na rezultate dobivene metodom s T-ticalom. Koristeći razvijeni vektorsko-numerički matematički model uz metodu s mjernim čeljustima, sustavno odstupanje rezultata je uklonjeno i postignuto je vrlo dobro slaganje s rezultatima mjerenja dobivenih metodom s T-ticalom. Ovo istraživanje pokazalo je da je upotreba metode sa čeljustima potpuno opravdana za mjerenje srednjeg promjera unutrašnjih navoja na najvišoj razini.

Proračun mjernih nesigurnosti proveden je u skladu sa EURAMET/cg-10/v.02 dokumentom prema GUM [15] smjernicama. Račun mjerne nesigurnosti obuhvaća sve kategorije umjeravanja vanjskih i unutarnjih navoja koje se predlažu EURAMET uputom [3], međutim, navedena literatura nudi isključivo opće smjernice za proračun nesigurnosti i to samo za dvije metode: metodu s valjčićima i metodu s T-ticalom. Utjecaji koji su obrađeni u prvom dijelu istraživanja (kuta, koraka, temperature, mjernog elementa) zajednički su za sve metode koje se koriste u Laboratoriju i temeljem simulacija je određen doprinos ovih utjecaja na mjernu nesigurnost. Ostale sastavnice procijenjene su za svaku od metoda zasebno. Uz postupak određivanja mjernih nesigurnosti prema GUM-u proveden je i proračun prema Monte Carlo metodi [16] [17].

Treći dio istraživanja odnosi se na provjeru dobivenih rezultata kroz međulaboratorijsku usporedbu. S obzirom da ovakva usporedba nikad nije provedena na razini nacionalnih mjeriteljskih instituta (EURAMET-a) izrađen je tehnički protokol [18] koji sadrži detaljne informacije i upute prema kojima se provodi usporedba. Protokol je predstavljen na EURAMET godišnjem sastanku 2011. u Švicarskoj. Odlučeno je da se pokrene ovakva usporedba pod nazivom EURAMET.L-S21 Comparison of parallel thread gauges koju će voditi Laboratorij. Na usporedbu, koja je započela u ožujku 2012. godine, prijavilo se deset nacionalnih mjeriteljskih instituta. Predviđeno je da svaki laboratorij koji sudjeluje u usporedbi odabere kategoriju po kojoj će provesti umjeravanje i prema istoj prijavi mjerne rezultate. Analiza rezultata izvedena je u skladu s EURAMET praksom i temeljem rezultata usporedbe izdvojene su preporuke za objedinjenje kategorija umjeravanja pri vođenju usporedbi mjerenja i postupku registracije CMC vrijednosti u CIPM MRA bazu podataka.

Definicije i pojmovi

U dostupnoj literaturi mogu se pronaći različiti prijevodi termina i definicija koji se primjenjuju na za opisivanje navojne geometrije što vrlo često dovodi do nejasnog ili čak pogrešnog tumačenja pojedinih veličina navoja. Terminologija koja se koristi u europskim zemljama propisana je normom ISO 5408:2009 Screw Threads Vocabulary [20]. Ova norma predlaže termine i definicije koje se primjenjuju na cilindrične (paralelne) i konusne navoje (simetrične i asimetrične navoje) na engleskom i francuskom jeziku. S ciljem zadržavanja odgovarajućih termina i oznaka, ovim radom je ponuđen prijevod dijelova ove norme na hrvatski jezik. Pojedine definicije su proširene radi usklađivanja s EURAMET cg-10 v2.0 uputom [3] i napisane u kurzivu.

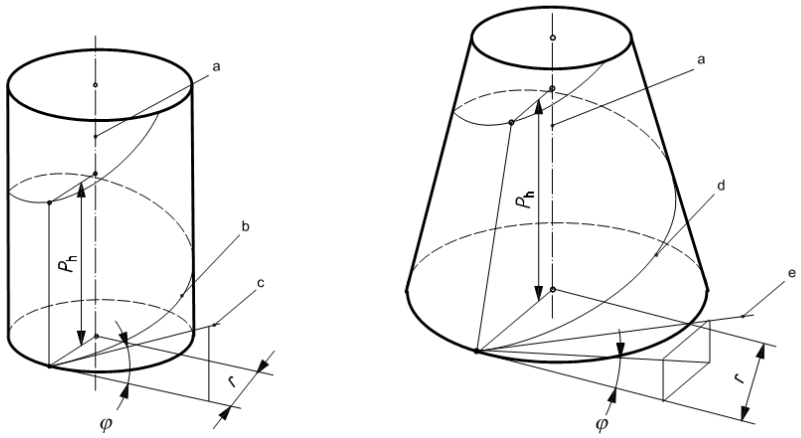
2.1 Zavojnica navoja

Zavojnica navoja je osnova geometrije svakog navoja, a karakteriziraju je oblik (cilindrična ili konusna), uspon i promjer. U tablici 2-1 opisani su pojmovi koji se odnose na zavojnicu navoja.

Tablica 2-1 Karakteristična zavojnica navoja - definicije

Zavojnica navoja (Helix)	Krivulja na površini cilindra ili konusa gdje je omjer puta u aksijalnom smjeru i kuta zakreta oko središnje osi konstantan (Slika 2-1).
Uspon (Lead) P_h - metrički navoji L - navoji u imperijalnom sustavu mjera (eng. *inch screw threads*)	Aksijalna udaljenost između dvije susjedne točke iste zavojnice koje leže na istoj osi, to jest aksijalni put koji točka napravi prateći **zavojnicu navoja** za puni okret navoja oko njegove središnje osi (Slika 2-1 i Slika 2-17). *l - umnožak koraka navoja P s brojem navojnih utora unutar jednog okreta navoja n (n > 1 za viševojne navoje) .*[5]
Kut uspona (Lead angle) Φ - metrički navoji λ - navoji u imperijalnom sustavu mjera (eng. *inch screw threads*)	Kut nagiba pravca obavijenog oko cilindra ili konusa, koji je jednak kutu između tangente zavojnice i normalne ravnine na os cilindra ili konusa (Slika 2-1). Za metričke navoje računa se prema: $$\tan(\varphi) = \frac{P_h}{2 \cdot \pi \cdot r}$$ Za cijevne navoje računa se prema: $$\tan(\lambda) = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r}$$ Za konusne navoje kut uspona se mijenja s različitim pozicijama duž osi navoja.

[5] Definicija prema EURAMET cg-10 v2.0 [3].



a) cilindrična zavojnica **b) konusna zavojnica**

a Središnja os
b Cilindrična zavojnica
c Tangenta na cilindričnu zavojnicu
d Konusna zavojnica
e Tangenta na konusnu zavojnicu

Slika 2-1 Zavojnica navoja

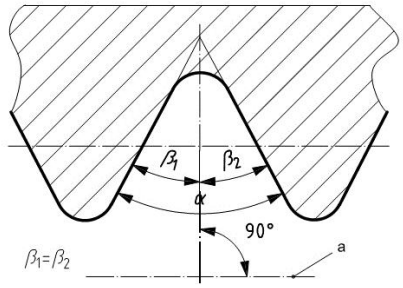
2.2 Navoj vijka

Ako se skup točaka osnovnog trokutnog profila u prostoru giba po zavojnicama koje imaju isti korak i zajedničku os, dobiva se navojna površina. Tijelo koje je omeđeno zavojnom površinom s jedne i cilindrom ili konusom sa suprotne strane naziva se navoj vijka. Navoji vijka mogu biti različiti i navedeni su u tablici 2-2.

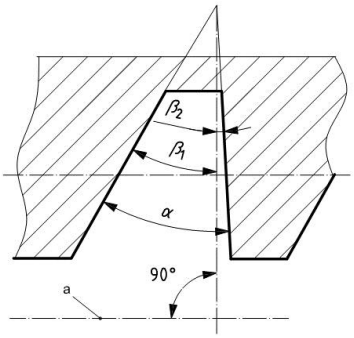
Tablica 2-2 Navoj vijka - definicije

Navoj vijka (Screw thread)	Navoj vijka dobiva se kontinuiranim vođenjem navojnog grebena oko cilindrične ili konusne jezgre po karakterističnoj zavojnici.
Cilindrični navoj (Cylindrical thread)	Navoj dobiven vođenjem oko cilindrične jezgre.
Konusni navoj (Taper Thread)	Navoj dobiven vođenjem oko konusne jezgre.
Simetrični navoj (Symmetrical thread)	Navoj kod kojeg su kutovi susjednih bokova navoja jednaki (Slika 2-2).
Vanjski navoj (External thread)	Navoj formiran oko vanjske površine cilindrične ili konusne površine (Slika 2-4).
Unutarnji navoj (Internal thread)	Navoj formiran s unutarnje površine cilindrične ili konusne površine (Slika 2-5).
Jednovojni navoj (Single-start thread)	Navoj s jednim početkom (Slika 2-4, Slika 2-5 i Slika 2-6).

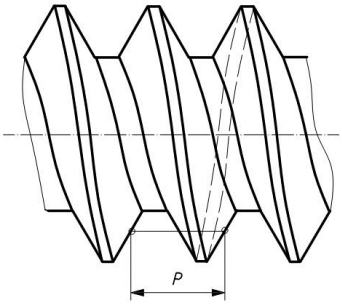
	Kod jednovojnih navoja korak je jednak usponu.
Viševojni navoj (Multi-start thread)	Navoj s više početaka (Slika 2-7). Kod jednovojnih navoja korak je jednak usponu podijeljenim s brojem početaka.
Desni navoj (Right-hand thread)	Navoj koji se uvrće u ili na odgovarajući par u smjeru kazaljke na satu (Slika 2-4 i Slika 2-5).
Lijevi navoj (Left-hand thread)	Navoj koji se uvrće u ili na odgovarajući par u smjeru obrnuto od kazaljke na satu (Slika 2-6).
Početak navoja (Thread start)	Dio navoja koji je potpuno formiran u korijenu, ali nije potpuno formiran vrh profila. Nalazi se na ulaznom dijelu navojnog vijka.



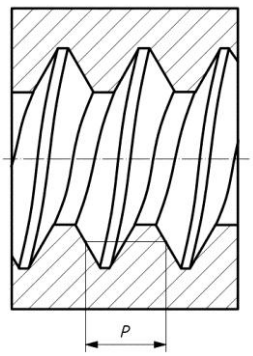
Slika 2-2 Simetrični navoj



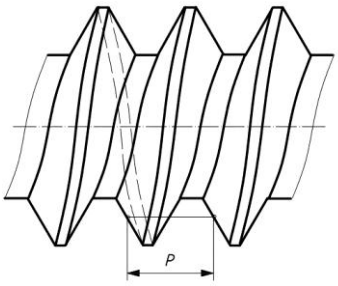
Slika 2-3 Asimetrični navoj



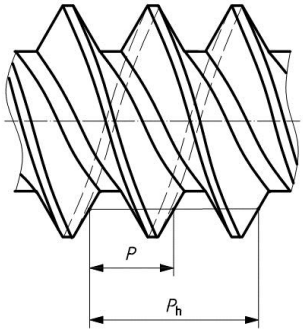
Slika 2-4 Jednovojni vanjski desni navoj



Slika 2-5 Jednovojni unutarnji desni navoj



Slika 2-6 Jednovojni vanjski lijevi navoj



Slika 2-7 Viševojni vanjski desni navoj

2.3 Profili navoja

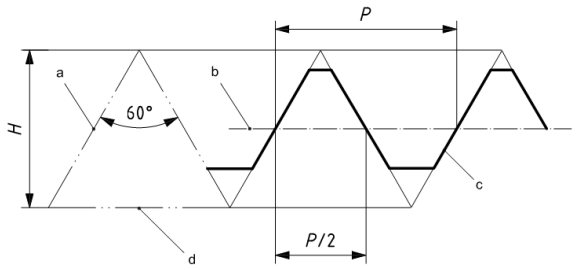
Profil navoja predstavlja oblik navoja u njegovom aksijalnom presjeku, odnosno u ravnini koja prolazi kroz središnju os navoja. U sljedećoj tablici ponuđene su definicije pojmova koji se koriste za opisivanje profila navoja.

Tablica 2-3 Profil navoja – definicije

Osnovni trokutni oblik (Fundamental triangle)	Trokut čiji su vrhovi određeni s tri sjecišta pravaca dobivenih produljenjem bokova **osnovnog profila navoja** (Slika 2-8).
Visina osnovnog trokutnog oblika (Fundamental triangle height) *H*	Radijalna udaljenost između osnovice profila i nasuprotnog vrha **osnovnog trokutnog oblika**.
Profil navoja (Profile of thread)	Oblik navoja u aksijalnom presjeku.
Osnovni profil (Basic profile)	Teorijski profil navoja u aksijalnom presjeku, definiran s teorijskim dimenzijama, kutovima i skraćenjima profila (Slika 2-8).
Radionički profil (Design profile)	Oblik unutarnjih i vanjskih navoja u aksijalnom presjeku koji se temelji na osnovnom profilu, a uključuje oblik vrha i korijena navoja (polumjere i poravnanja) (Slika 11).
Bok navoja (Flank)	Dio navojne površine koja je određena s jednim bokom **osnovnog trokutnog oblika** koji nije paralelan sa središnjom osi profila navoja (Slika 2-11).
Susjedni bokovi (Adjacent flanks)	**Bokovi navoja** nastali iz dva boka **osnovnog trokutnog oblika** koji nisu paralelni sa **središnjom osi profila navoja**.

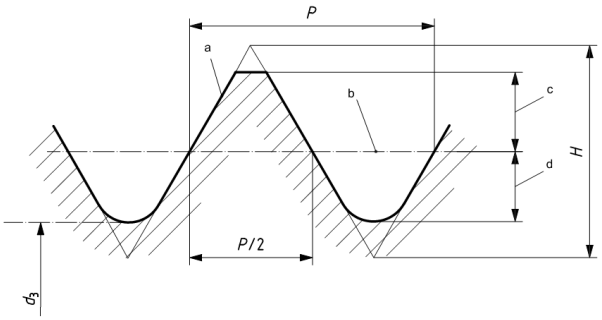
Odgovarajući bokovi (Homologous flanks)	**Bokovi navoja** koji leže na istoj **zavojnici**.
Navojni greben (Ridge)	Puni dio navoja između dva **susjedna boka navoja** (Slika 2-11).
Navojni utor (Groove)	Prazni prostor između dva **susjedna boka navoja** (Slika 2-11).
Vrh profila navoja (Crest)	Površina na vrhu **navojnog grebena** koja spaja dva **susjedna boka** (Slika 2-11).
Korijen (Root)	Površina na dnu **navojnog utora** koja spaja dva **susjedna boka** (Slika 2-11).
Visina navoja (Thread height)	Radijalna udaljenost između vrha profila navoja i korijena navoja (Slika 2-11).
Kut profila navoja (Flank Angle) β - metrički navoji. α- navoji u imperijalnom sustavu mjera – simetrični navoji. α_1i α_2 - navoji u imperijalnom sustavu mjera –asimetrični navoji.	Kut između jednog **boka navoja** i ravnine okomite na središnju os navoja u aksijalnom presjeku (Slika 2-2, Slika 2-3 i Slika 2-11). *β, γ Kutovi između individualnih bokova (vodećeg i pratećeg) i osi okomite na središnju os navoja koji leže u aksijalnom presjeku.*[6]
Kut navoja (Thread angle) α - metrički navoji. 2α - navoji u imperijalnom sustavu mjera, simetrični navoji. (α_1+ α_2) - navoji u imperijalnom sustavu mjera, asimetrični navoji.	Kut između dva **susjedna boka navoja** u aksijalnom presjeku. Simboli za kut navoja predstavljaju kombinaciju simbola za kutove boka navoja (Slika 2-2, Slika 2-3 i Slika 2-11).

[6] Definicija prema EURAMET cg-10 v2.0 [3].



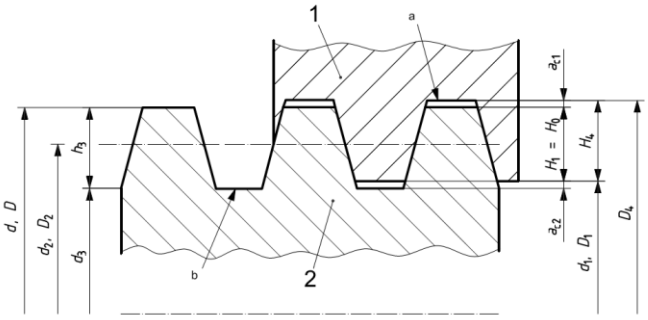
a Osnovni trokutni oblik
b Središnja os profila
c Osnovni profil
d Osnovica profila

Slika 2-8 Osnovni trokutni oblik i osnovni profil navoja



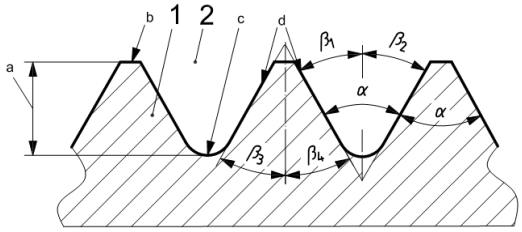
a Radionički profil
b Središnja os profila
c Addendum
d Dedendum

Slika 2-9 Radionički profil



1 Unutarnji navoj
2 Vanjski navoj
a Radionički profil unutarnjeg navoja
b Radionički profil vanjskog navoja

Slika 2-10 Radionički profil



1 Navojni greben
2 Navojni utor
a Visina navoja
b Vrh profila navoja
c Korijen navoja
d Bok navoja

Slika 2-11 Profil navoja

2.4 Promjeri navoja

Uz kut i korak navoja, tri promjera bitno karakteriziraju navoj: srednji promjer, veliki promjer i mali promjer. U nastavku su navedene definicije ovih promjera i pojmovi koji se primjenjuju uz karakterizaciju i mjerenje navoja.

Tablica 2-4 Promjeri navoja – definicije

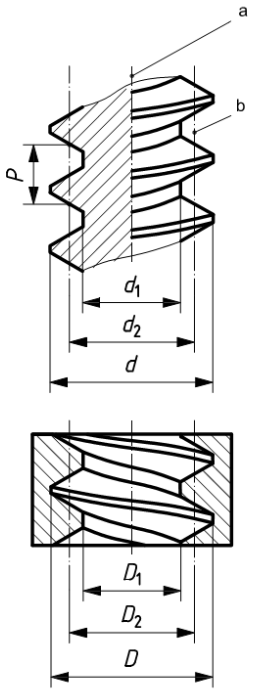
Nazivni promjer (Nominal diameter) *D* - unutarnji navoji. *d* - vanjski navoji.	Promjer koji se koristi za označavanje navoja. Za navoje koji se koriste za vijčanu vezu ili prijenos sile, veliki promjer se uzima kao nazivni. Za cijevne navoje, nazivna dimenzija cijevi odgovara nazivnom promjeru navoja.

Veliki promjer (Major diameter) *D, d* D_4 - metrički navoji.	Promjer zamišljene cilindrične ili konusne površine koja tangira vrh profila vanjskih i/ili korijen unutarnjih navoja. Kod konusnih navoja veliki promjer se mijenja duž središnje osi navoja. Ako je veliki promjer radioničkog profila unutarnjeg navoja različit od velikog promjera osnovnog profila, veliki promjer radioničkog profila se označava s D_4 (Slika 2-10 i Slika 2-12).
Mali promjer (Minor diameter) D_1, d_1 *i* d_3	Promjer zamišljene cilindrične ili konusne površine koja tangira korijen vanjskih i/ili vrh profila unutarnjih navoja. Kod konusnih navoja mali promjer se mijenja duž središnje osi navoja. Ako je mali promjer radioničkog profila unutarnjeg navoja različit od malog promjera osnovnog profila, veliki promjer radioničkog profila se označava s d_3 (Slika 2-9, Slika 2-10 i Slika 2-12).
Srednji cilindar (Pitch cylinder)	Zamišljeni cilindar čija površina sječe paralelni navoj tako da širine navojnog grebena i navojnog utora budu jednake.
Srednji konus (Pitch cone)	Zamišljeni konus čija površina sječe paralelni navoj tako da širine navojnog grebena i navojnog utora budu jednake.
Središnja os profila (Pitch line)	Os srednjeg cilindra ili konusa.
Srednji promjer navoja (Pitch diameter)	Promjer srednjeg cilindra ili konusa (Slika 2-12). Promjer zamišljenog cilindra (srednjeg cilindra) koji sječe profil navoja na način da širina navojnog utora i navojnog grebena budu jednake[7]. Kod konusnih navoja srednji promjer se mijenja duž središnje osi navoja.
Jednostavan srednji promjer (Simple pitch diameter) D_{2s}, d_{2s}	Promjer srednjeg cilindra ili konusa (Slika 2-12) koji siječe stvarni navoj tako da je širina jednog navojnog utora (mjerena paralelno sa središnjom osi navoja) jednaka polovici osnovnog *(nazivnog)*[8] koraka navoja. Obično se mjeri metodama s mjernim valjčićima ili mjernim kuglicama (Slika 2-13). Kod konusnih navoja srednji promjer se mijenja duž središnje osi navoja. Kod teorijskih navoja jednostavni srednji promjer jednak je srednjem promjeru navoja.

[7] Definicija prema EURAMET cg-10 v2.0.
[8] Proširenje definicije prema.

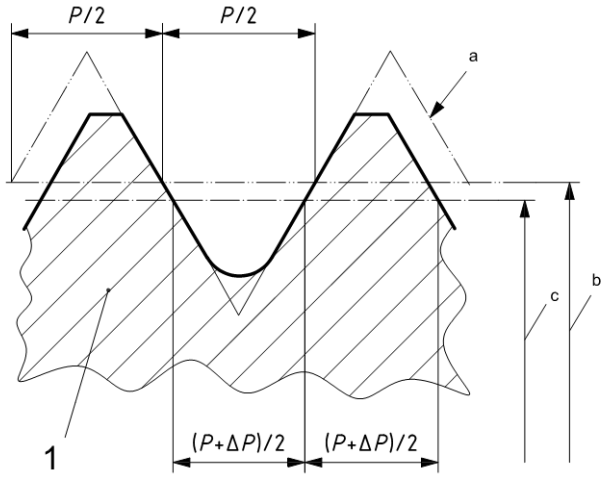
Funkcionalni srednji promjer (Virtual pitch diameter)	**Srednji promjer** idealnog navoja (zamišljenog) s danim **osnovnim profilom** koji tvori savršen sklop (bez preklopa i zračnosti) s realnim navojem unutar definirane duljine preklopa u području bokova navoja te vrhovima profila navoja koji su slobodni (Slika 2-14). *Srednji promjer zamišljenog navoja idealnog koraka i kuta profila, slobodan na korijenu i vrhu profila, s ravnim bokovima po cijeloj duljini koji bi tvorio savršen sklop s realnim navojem unutar definirane duljine preklopa. Ovaj promjer uključuje zbirnu posljedicu varijacije uspona (koraka), kuta bokova navoja, cilindričnosti, ravnosti i kružnosti.*[9] Kod konusnih navoja funkcionalni srednji promjer mijenja se duž središnje osi navoja.
Os srednjeg promjera (Axis of pitch diameter)	Središnja os navoja, os srednjeg cilindra ili konusa(Slika 2-12).
Udaljenost središta mjernih elemenata (Indicated value) *m*	*Karakteristična veličina dobivena mjernom metodom.*[9] *Primjer:* *m je udaljenost središta mjernih elemenata ako se koristi metoda s T-ticalom (Slika 2-15).*

[9] Definicija prema EURAMET cg-10 v2.0.



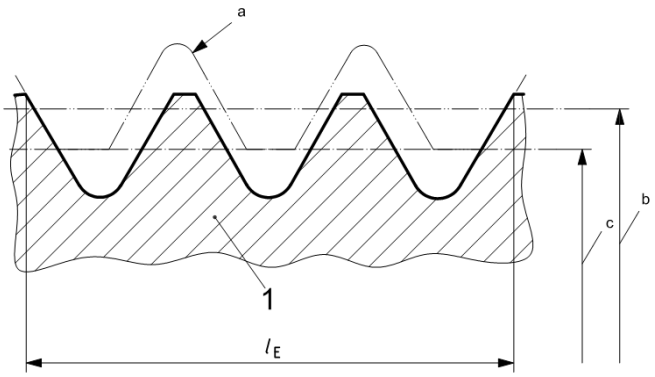
a Središnja os navoja
b Središnja os profila

Slika 2-12 Promjeri navoja



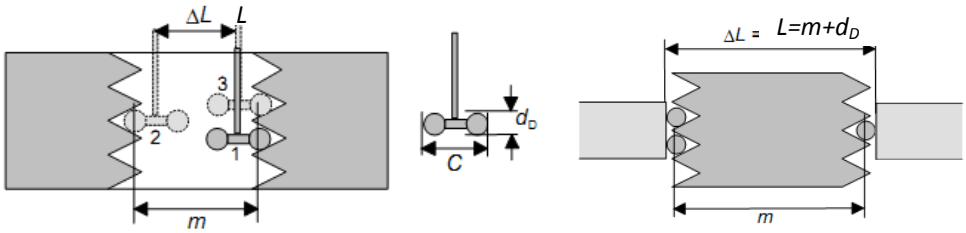
1 Realni navoj s pogreškom kuta
a Teorijski navoj
b Jednostavni srednji promjer
c Srednji promjer

Slika 2-13 Jednostavni srednji promjer



1 Realni navoj
l_E Duljina preklopa
a Idealni unutarnji navoj
b Funkcionalni srednji promjer
c Srednji promjer

Slika 2-14 Funkcionalni srednji promjer



L	*očitanje mjernog uređaja*
C	*konstanta T-ticala*
d_D	*promjer mjernog elementa*
m	*udaljenost središta mjernih elemenata*

Slika 2-15 *m* - udaljenost središta mjernih elemenata

2.5 Korak i uspon navoja

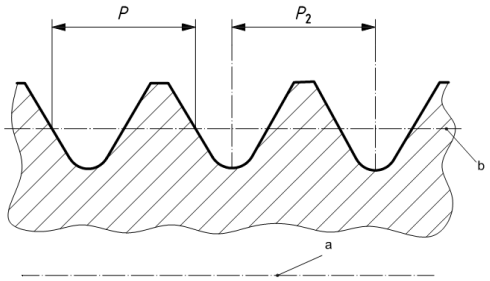
Uz kut i srednji promjer, korak navoja je odredbena veličina navoja. Poznavanje koraka je nužni uvjet da bi se odredio srednji promjer navoja, stoga je mjerenje koraka nezaobilazan dio mjerenja srednjeg promjera navoja.

Tablica 2-5 Korak navoja – definicije

Korak (Pitch) *P*	Aksijalna udaljenost između sjecišta **središnje osi profila** s dva istovrsna **boka navoja** susjednog navojnog grebena/utora (Slika 2-16). *Udaljenost, izmjerena paralelno s središnjom osi navoja, između odgovarajućih točaka na susjednim navojnim formama u istoj aksijalnoj ravnini na istoj strani od osi.*[10]
Korak izražen preko dva boka navoja (Two-flank pitch) P_2	Aksijalna udaljenost između simetrale navojnog utora i simetrale susjednog navojnog utora na središnjoj osi profila navoja. Najčešće se određuje umetanjem kuglica ili valjčića optimalnog promjera u profil navoja (Slika 2-16). Ovako definiran korak koristi se isključivo za simetrične navoje gdje je simetrala navojnog utora okomita na središnju os navoja.
Uspon (Lead) P_h metrički navoji *L* navoji u imperijalnom sustavu mjera (*inch screw threads*)	Aksijalna udaljenost između dvije susjedne točke iste zavojnice koje leže na istoj osi, odnosno aksijalni put i koji točka napravi prateći **karakterističnu zavojnicu** za puni okret navoja oko središnje osi (Slika 2-1 i Slika 2-17).
Uspon izražen preko dva boka navoja (Two-flank lead)	Aksijalna udaljenost između simetrale navojnog utora i simetrale slijedećeg istog navojnog utora na središnjoj osi profila navoja. Najčešće se određuje

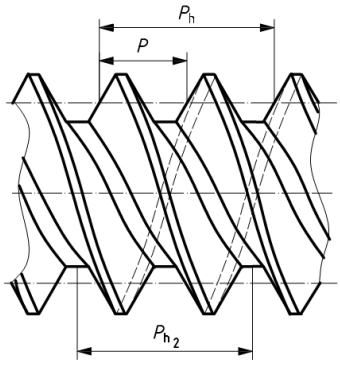
[10] Definicija prema EURAMET cg-10 v2.0.

Ph_2	umetanjem kuglica ili valjčića optimalnog promjera u profil navoja (Slika 2-17). Ovako definiran uspon koristi se isključivo za simetrične navoje gdje je simetrala navojnog utora okomita na središnju os navoja.
Kumulativno odstupanje koraka navoja ΔP_Σ	Mjere se koraci navoja preko navojnih grebena unutar definirane duljine. Kumulativno odstupanje koraka navoja je odstupanje koraka od nazivne vrijednosti čija je iznos najveći.



a Središnja os navoja
b Središnja os profila

Slika 2-16 Korak navoja i korak izražen preko dva boka navoja



Slika 2-17 Uspon i uspon izražen preko dva boka navoja

Umjeravanje srednjeg promjera navoja

Metode mjerenja navoja koji se razmatraju u ovom istraživanju odnose se na mjerenje srednjeg promjera graničnih navojnih prstena i čepova za simetrične i asimetrične 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.

3.1 Granična mjerila za srednji promjer navoja

Granična mjerila svojevrstan su „alat“ za kontrolu promjera navoja i razlikuju se granična mjerila za mali, veliki i srednji promjer. Ova mjerila odgovaraju navoju koji se kontrolira i sadrže stranu „ide“ i „ne ide“. Ako je promjer koji se provjerava unutar zahtijevanih granica, strana „ide“ mora ostvariti spoj s kontroliranim navojem dok strana „ne ide“ ne smije. Za granična mjerila propisane su tolerancije srednjeg promjera, kuta i koraka navoja.

Granična mjerila za srednji promjer navoja najčešće su u obliku navojnih čepova za provjeru unutarnjih navoja i navojnih prstena za provjeru vanjskih navoja. Slika 3-1.



Slika 3-1 Granična mjerila za srednji promjer

Tijekom korištenja, strana „ide“ graničnih mjerila se troši i potrebna je kontrola mjerila koja se može izvesti protumjerilima ili umjeravanjem. Protumjerila su također granična mjerila, ali bolje kvalitete izrade i užih tolerancija.

3.2 Kategorije umjeravanja srednjeg promjera navoja

Svaki navoj može se opisati s pet karakterističnih veličina: korak, kut profila, mali i veliki promjer te srednji promjer navoja. Srednji promjer navoja jedina je od navedenih veličina koju nije moguće izravno izmjeriti, nego se određuje matematički prema modelu za pojedine mjerne metode. Uobičajenim metodama mjeri se udaljenost preko valjčića ili udaljenost središta dviju kuglica u dodiru s navojnom površinom, a nakon toga se iz geometrijskih relacija izračunava srednji promjer. Za određivanje srednjeg promjera potrebno je poznavati vrijednosti koraka i kuta navoja, dimenzije mjernih elemenata te mjernu silu. Vrijednosti koraka i kuta navoja mogu se pretpostaviti nazivnima ili ih je potrebno utvrditi dodatnim mjerenjima što ovisi o kategoriji umjeravanja.

Kategorije umjeravanja srednjeg promjera navoja uglavnom se odnose na metodu s T-ticalom i metodu s valjčićima i određuju obujam mjerenja koja je potrebno provesti radi određivanja iznosa srednjeg promjera. Ove kategorije razdvojene su prema definicijama srednjeg promjera opisane u poglavlju 2.4. Mjerni rezultati i mjerne nesigurnosti mogu se uspoređivati ako pripadaju istoj kategoriji, ipak rezultati dobiveni prema različitim kategorijama umjeravanja morali bi pokazivati međusobnu konzistentnost unutar određenog intervala pouzdanosti proizašlog iz pripadajućih mjernih nesigurnosti. Kategorije umjeravanja prikazane su u tablici 3-1.

Tablica 3-1 Kategorije umjeravanja prema EURAMET cg-10, v10.0

	Veličina	Izmjereno	Pretpostavljeno	Sastavnica 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	✓	-	✓

***simbol *m* odnosi se na udaljenost središta mjernih elemenata (Tablica 2-4)**

3.2.1 Kategorija 1a – mjerenje jednostavnog srednjeg promjera

Jednostavni srednji promjer izračunava se iz udaljenosti *m* (korigiranog zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa i mjerne sile), **nazivnog koraka navoja** i **nazivnog kuta navoja**. Osnovne sastavnice mjerne nesigurnosti su: nesigurnost mjerenja promjera, nesigurnost mjernog elementa, nesigurnost kuta navoja. Kut navoja se ne mjeri, nego se pretpostavlja da se nalazi unutar granica tolerancije. Za izračun srednjeg promjera koristi se njegova nazivna vrijednost uz nesigurnost od $a/\sqrt{3}$, gdje je ±*a* tolerancijsko polje (ukupno *2a*). Korak navoja se ne mjeri i pretpostavlja se da odgovara nazivnoj vrijednosti stoga se smatra da je konstantan.

3.2.2 Kategorija 1b – mjerenje jednostavnog srednjeg promjera i kuta navoja

Jednostavni srednji promjer izračunava se iz udaljenosti *m* (korigiranog zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa i mjerne sile), **nazivnog koraka navoja** i **izmjerenog kuta navoja**.
Mjerenjem kuta navoja mogu se postići pouzdaniji rezultati mjerenja srednjeg promjera navoja uz potencijalno manju mjernu nesigurnost.

3.2.3 Kategorija 2a – mjerenje srednjeg promjera i koraka navoja

Srednji promjer izračunava se iz udaljenosti *m* (korigiranog zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa i mjerne sile), **izmjerenog koraka navoja** i **nazivnog kuta navoja**. Osnovne sastavnice mjerne nesigurnosti su: nesigurnost mjerenja promjera, nesigurnost mjernog elementa, nesigurnost koraka navoja i nesigurnost kuta navoja. Kut navoja se ne mjeri već se pretpostavlja da se nalazi unutar granica tolerancije. Za izračun srednjeg promjera koristi se njegova nazivna vrijednost uz nesigurnost od $a/\sqrt{3}$, gdje je ±*a* tolerancijsko polje (ukupno *2a*).

3.2.4 Kategorija 2b – mjerenje srednjeg promjera, koraka navoja i kuta navoja

Srednji promjer izračunava se iz udaljenosti *m* (korigiranog zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa i mjerne sile) **izmjerenog koraka navoja** i **izmjerenog kuta navoja**.
Mjerenjem kuta navoja postižu se pouzdaniji rezultati mjerenja srednjeg promjera navoja uz potencijalno manju mjernu nesigurnost.

3.2.5 Kategorija 3 – mjerenje funkcionalnog srednjeg promjera, koraka navoja i kutova profila navoja

Funkcionalni srednji promjer izračunava se iz udaljenosti *m* (korigiranog zbog utjecaja nalijeganja mjernog elementa i mjerne sile), **izmjerenog koraka navoja** i **izmjereni kutovi profila navoja**. Za opsežnija umjeravanja, morala bi se uzeti u obzir "pijanost" navoja (varijacije kuta uspona). Osnovne sastavnice mjerne nesigurnosti su: nesigurnost mjerenja promjera, nesigurnost mjernog elementa, nesigurnost koraka navoja i nesigurnost mjerenja kutova profila navoja.

3.3 Mjerne metode

Za izračunavanje srednjeg promjera navoja prema svim kategorijama umjeravanja (Poglavlje 3.2) potrebno je izmjeriti karakterističnu udaljenost m[11] koja ovisi o metodi mjerenja te kutu i koraku navoja, za što je potrebno koristiti niz uređaja i metoda. Iako se srednji promjer ne može neposredno izmjeriti nijednom metodom, uobičajeno je metode za mjerenje karakteristične veličine nazivati metodama za mjerenje srednjeg promjera.

Prema EURAMET uputi [3] izdvojene su dvije metode: metoda s tri valjčića za mjerenje srednjeg promjera vanjskih i metoda s T-ticalom za mjerenje 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 mjerenje navoja.

Korak i kut navoja mjere se s kontaktnim ili optičkim metodama. Kontaktne metode izvode se na uređajima za mjerenje oblika (profilometrima) ili univerzalnim mjernim uređajima opremljenim nastavcima za mjerenje kuta navoja. Optičke metode odnose se na upotrebu alatnih mikroskopa ili profil projektora i koriste se za mjerenje kuta i koraka vanjskih navoja. Unutarnji navoji također se mogu mjeriti optički, ali posredno, uzimanjem otiska. Uz konvencionalne metode i uređaje, kroz posljednjih deset godina je razvijen uređaj za mjerenje (skeniranje) profila navoja u aksijalnom presjeku Masterscanner, kojim je moguće istovremeno izmjeriti sve karakteristične veličine navoja. Iako ovaj uređaj posjeduje niz najvećih svjetskih proizvodnih tvrtki, vrlo rijetko se koristi za umjeravanje navoja na najvišoj razini[12]. Razina točnosti i procjena nesigurnosti rezultata mjerenja dobivenih ovim uređajem predmet su najnovijih istraživanja [9]. U tablici 3-2 su prikazane metode i mjerni uređaji koji se najčešće koriste pri određivanju srednjeg promjera navoja.

[11] Primjerice, udaljenost središta valjčića se označava s m kod metode s tri valjčića

[12] Nacionalni institut Narodne Republike Kine 2012 godine objavio je CMC vrijednosti za mjerenje navoja s Masterscanner uređajem u CIPM MRA KDCB bazi podataka.

Tablica 3-2 Metode koje se koriste za mjerenje srednjeg promjera navoja

Mjerne metode	Mjerni uređaji	Vanjski navoji	Unutarnji navoji	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)	√	√	-	-	√
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	√	√	√

3.3.1 Mjerenje srednjeg promjera

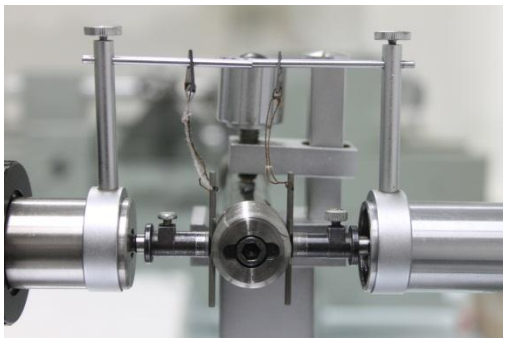
3.3.1.1 Metoda s tri valjčića

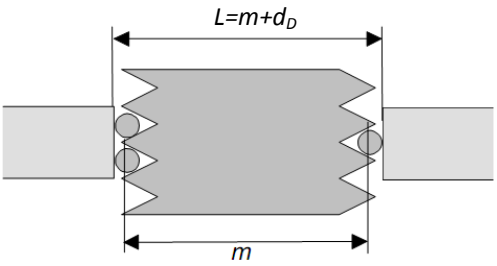
Metoda s tri valjčića smatra se najpouzdanijom metodom za mjerenje srednjeg promjera vanjskih navoja. Mjerenje se provodi na univerzalnom mjernom uređaju ili upotrebom ručnih mjerila (mikrometarskim vijcima). Mjeri se udaljenost preko tri valjčića u dva međusobno okomita presjeka (Slika 3-2). Izračun iznosa srednjeg promjera se provodi prema izrazu 3.1.
Odabir valjčića odgovarajućeg promjera vrši se prema koraku i kutovima boka navoja.

$$d_2 = L - d_D\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 1\right) + \frac{P}{2}\cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A_1 + A_2 \qquad (3.1)$$

gdje je:

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





Slika 3-2 Metoda s tri valjčića

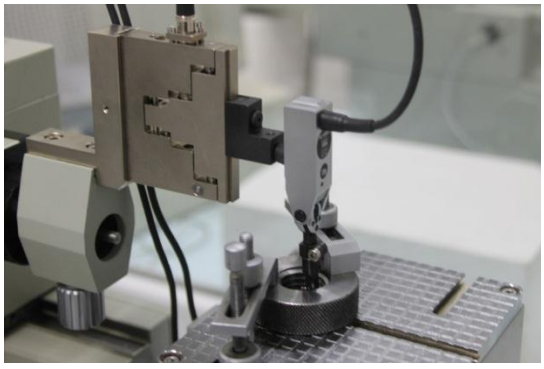
3.3.1.2 Metoda s T-ticalom

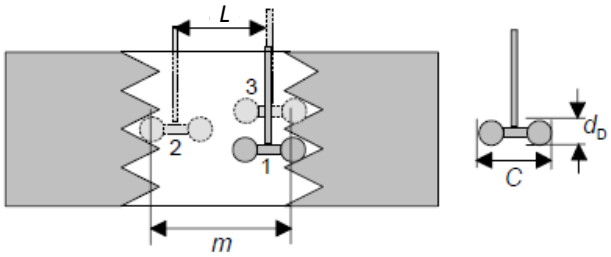
Metoda s T-ticalom smatra se najpouzdanijom metodom za mjerenje srednjeg promjera unutarnjih navoja.

Mjerenje se provodi na univerzalnom mjernom uređaju (u rjeđim slučajevima na trokoordinatnim mjernim uređajima CMM) koji je opremljen nastavkom za mjerenje unutrašnjih navoja (T-ticalom). T-ticalo se sastoji od dvije kuglice istog promjera d_D međusobno postavljene na poznatom razmaku *C.* Razmak *C* utvrđuje se prije svakog mjerenja uz pomoć referentnog prstena (etalon za unutarnji promjer). Kod ove metode navoj je potrebno učvrstiti tako da os mjerenja bude okomita na središnju os navoja. Mjereni promjer *L* predstavlja srednju vrijednost razmaka između pozicija 1 i 2 (Slika 3-3) i računa se prema izrazu:

$$L = \frac{L_{12} + L_{23}}{2} \qquad (3.2)$$

Odabir ticala odgovarajućeg promjera provodi se prema koraku i kutovima boka navoja.





$$m = L + C - d_D$$

Slika 3-3 Metoda s T-ticalom

Srednji promjer navoja računa se prema izrazu:

$$D_2 = m + d_D\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) - \frac{P}{2}\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2 \qquad (3.3)$$

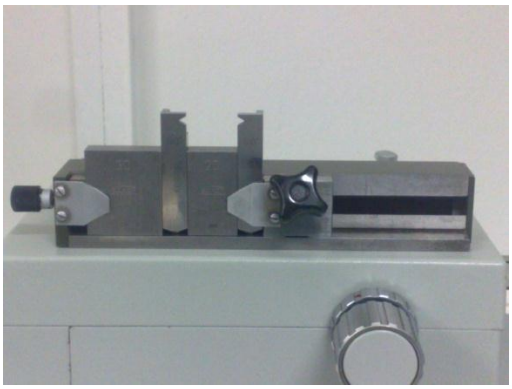
gdje je:

D_2	-	Srednji promjer unutarnjih navoja, mm
m	-	Udaljenost između središta kuglica Δ, mm
d_D	-	Promjer valjčića, mm
α	-	Kut navoja, °
P	-	Korak navoja, mm
A_1	-	Korekcija nalijeganja valjčića, mm
A_2	-	Korekcija mjerne sili, 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

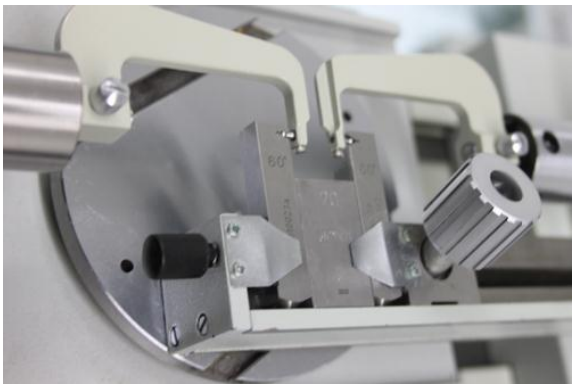
3.3.1.3 Metoda s mjernim čeljustima

Mjerenje srednjeg promjera unutarnjih navoja provodi se na univerzalnom mjernom uređaju uz primjenu mjernih čeljusti s mjernim kuglicama odgovarajućeg promjera.

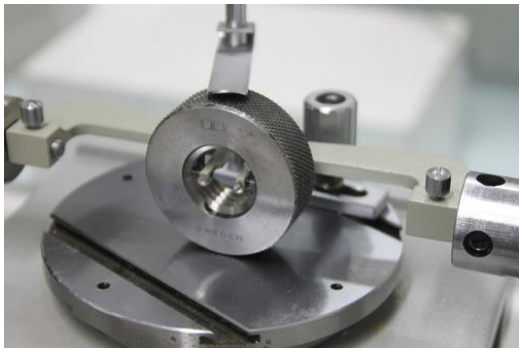
Ova metoda je usporedna metoda mjerenja gdje se početna mjera postavljena pomoću mjerki s V-utorom (Slika 3-4 i Slika 3-5) uspoređuje s veličinom navoja. Utvrđuje se razlika Δx (Slika 3-6) i pomoću izraza 3.4 se izračunava srednji promjer.



Slika 3-4 Stezna naprava za mjerke s V-utorom



Slika 3-5 Primjer postavljanja nulte vrijednosti pomoću mjerki s V-utorom



Slika 3-6 Mjerenje srednjeg promjera metodom s mjernim čeljustima

$$D_2 = E + (a+b) - \frac{P}{2}\cdot \mathrm{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\frac{P^2}{8}}{D_{naz} - \frac{P}{2}\cdot \mathrm{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{d_D}{2\cdot sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} + \Delta x \qquad (3.4)$$

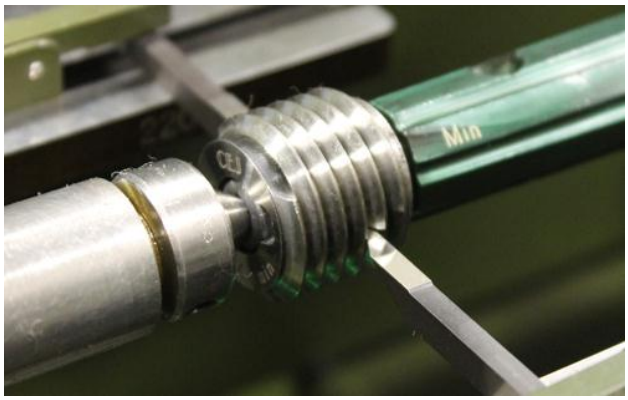
gdje je:

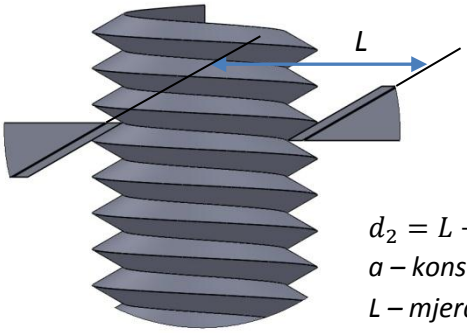
D_2	-	Izmjerena vrijednost srednjeg promjera unutarnjeg navoja, mm
D_{2naz}	-	Nazivni srednji promjer navoja, mm
E	-	Kombinacija planparalelnih graničnih mjerki
$(a+b)$	-	Konstanta mjerki sa V-utorom
P	-	Korak navoja, mm
α	-	Kut navoja, °
d_D	-	Promjer mjernih kuglica, mm
Δx	-	Utvrđena razlika podešene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

3.3.1.4 Optičke metode za mjerenje srednjeg promjera navoja

Optičke metode mjerenja 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 oštrice 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.





$d_2 = L - 2 \cdot a$

a – konstanta mjernih nožića

L – mjera dobivena preko nožića

Slika 3-7 Mjerenje srednjeg promjera upotrebom mjernih nožića

Uz navedenu metodu može se primjenjivati i postupak sa slikom sjene [21]. Postupak sa slikom sjene odvija se na isti način kao i kod metode s mjernim nožićima, s tim da se ne vizira ugravirana linija nožića, nego direktno bok navoja.

3.3.2 Mjerenje koraka navoja

Mjerenje koraka navoja nužno je za određivanje srednjega promjera navoja prema kategorijama umjeravanja 2a, 2b i 3 (Tablica 3-1 Kategorije umjeravanja prema EURAMET cg-10, v10.0).
Mjerenje koraka može se provoditi mehaničkim postupkom pomoću univerzalnog mjernog uređaja, uređajima za mjerenje oblika (profilometrima) ili optičkim metodama na 2D mjernim uređajima.

3.3.2.1 Mjerenje koraka vanjskih navoja optičkom metodom

Mjerenje koraka vanjskog navoja provodi se primjenom 2D mjernih uređaja optičkim postupkom projiciranja ili metodom aksijalnog presjeka uz upotrebu mjernih nožića. Mjerenje koraka optičkim postupkom provodi se na oba boka navoja preko jednog ili više zavoja.
Središnja os navoja podešava se s *x* osi mjernog uređaja. Odgovarajuća optika koja se postavlja na digitalnu kameru odabire se prema visini navojnog grebena.
Za metodu s projiciranjem, preporučuje se primjena pozadinskog osvjetljenja kako bi se zakretanjem kamere za kut uspona navoja postigla jasna slika bokova navoja (Slika 3-10).

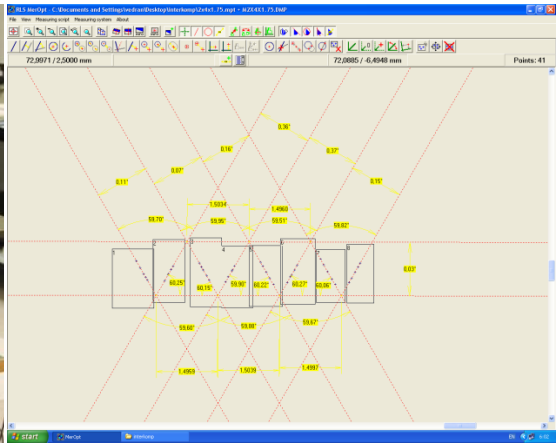
Mjerenje se provodi na dva načina:

- Zakretanjem nitnog križa na kameri za kut boka navoja te translacijom navoja u smjeru osi x od prvog prema petom odgovarajućem boku navoja očitava se mjera koja odgovara peterostrukoj vrijednosti koraka navoja. Korak navoja izražava se kao srednja vrijednost koraka izmjerenog preko na pet navojnih grebena[13] (zavoja).
- Viziranjem boka navoja pomoću nitnog križa na kameri (pomicanjem *x* i *y* osi uređaja) pohranjuje se veći broj koordinata točaka koje leže na bokovima navoja. Programom za obradu podataka izračunava se korak preko pet uzastopna navojna grebena (Slika 3-10). Ova metoda pokazala je znatno manje rasipanje rezultata u odnosu na prethodno naveden način mjerenja.

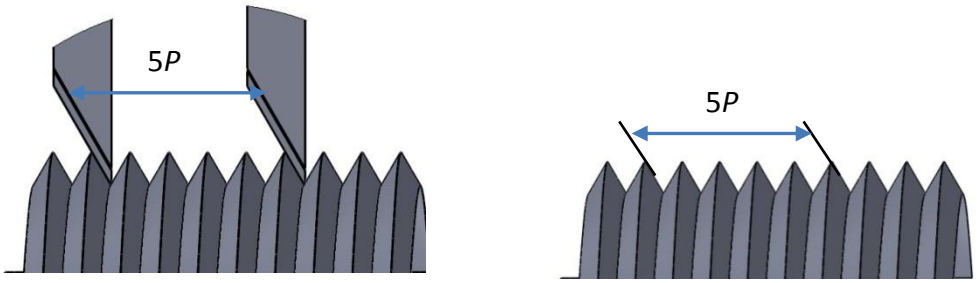
Za metodu aksijalnog presjeka preporuča se pozadinsko osvjetljenje i osvjetljenje pod malim kutom upadne svjetlosti kako bi oznake na mjernim nožićima bile jasno vidljive. Mjeri se udaljenost između dva nožića koja se postavljaju s razmakom od pet navojnih utora.



Slika 3-8 2D mjerni uređaj (mjerenje pomaka laserskim interferencijskim sustavom)



Slika 3-9 Program za analizu podataka snimljenih 2D mjernim uređajem



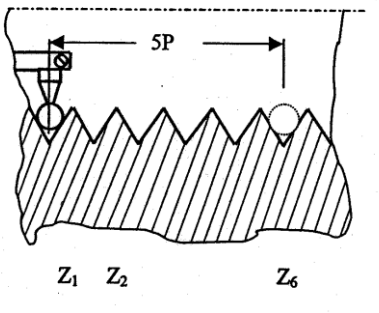
Slika 3-10 Profil navoja snimljen 2D mjernim uređajem s aksijalnim postupkom i postupkom projiciranja

3.3.2.2 Mjerenje koraka navoja kontaktnom metodom

Mjerenje koraka unutarnjeg navoja pomoću univerzalnog mjernog uređaja prikazano je slikom 3-11. Za ovo mjerenje je potrebno koristiti nastavak s polugom za mjerenje koraka. Iako izbor promjera mjernog elementa nije kritičan, poželjno je da mjerni element dodiruje navoj u blizini srednjeg promjera.

[13] Razmak od pet zavoja predstavlja uobičajenu duljinu nošenja navoja, međutim, korak se može izračunati i preko manjeg broja zavoja.



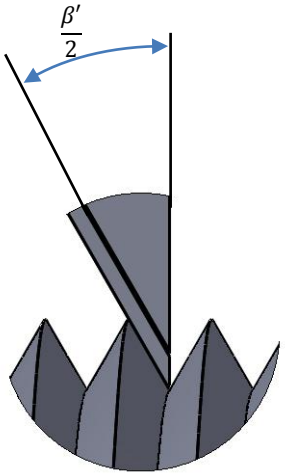


Slika 3-11 Mjerenje koraka unutarnjih navoja

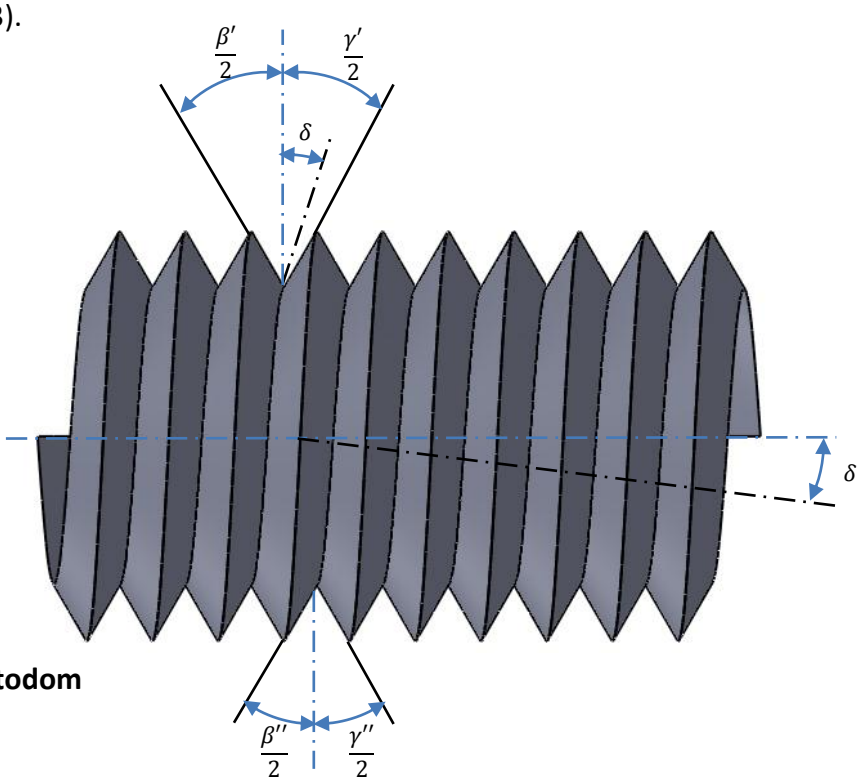
Istom metodom može se mjeriti i korak vanjskih navoja.

3.3.3 Mjerenje kuta navoja

Mjerenje kuta navoja nužno je za određivanje srednjega promjera navoja prema kategorijama umjeravanja 1b, 2b i 3 (Tablica 3-1 Kategorije umjeravanja prema EURAMET cg-10, v10.0).
Mjerenje kuta profila vanjskog navoja provodi se metodom projiciranja (Slika 3-13) ili metodom aksijalnog presjeka uz korištenje mjernih nožića (Slika 3-12 i Slika 3-7) na 2D mjernom uređaju. Pri mjerenju kuta profila mjeri se polovica kuta $\beta'/2$ i $\beta''/2$ za lijevi bok, a $\gamma'/2$ i $\gamma''/2$ za desni bok na obje strane navoja (Slika 3-13).



Slika 3-12 Mjerenje kuta metodom aksijalnog presjeka



Slika 3-13 Mjerenje kuta metodom projiciranja

Kutovi profila navoja se računaju iz:

$$\frac{\beta}{2} = \frac{\frac{\beta'}{2} + \frac{\beta''}{2}}{2} \quad i \quad \frac{\gamma}{2} = \frac{\frac{\gamma'}{2} + \frac{\gamma''}{2}}{2} \tag{3.5}$$

Kut navoja se računaju prema izrazu:

$$\alpha = \frac{\beta + \gamma}{2} \tag{3.6}$$

Za određivanje kuta između središnje osi navoja i osi mjerenja koristi se izraz:

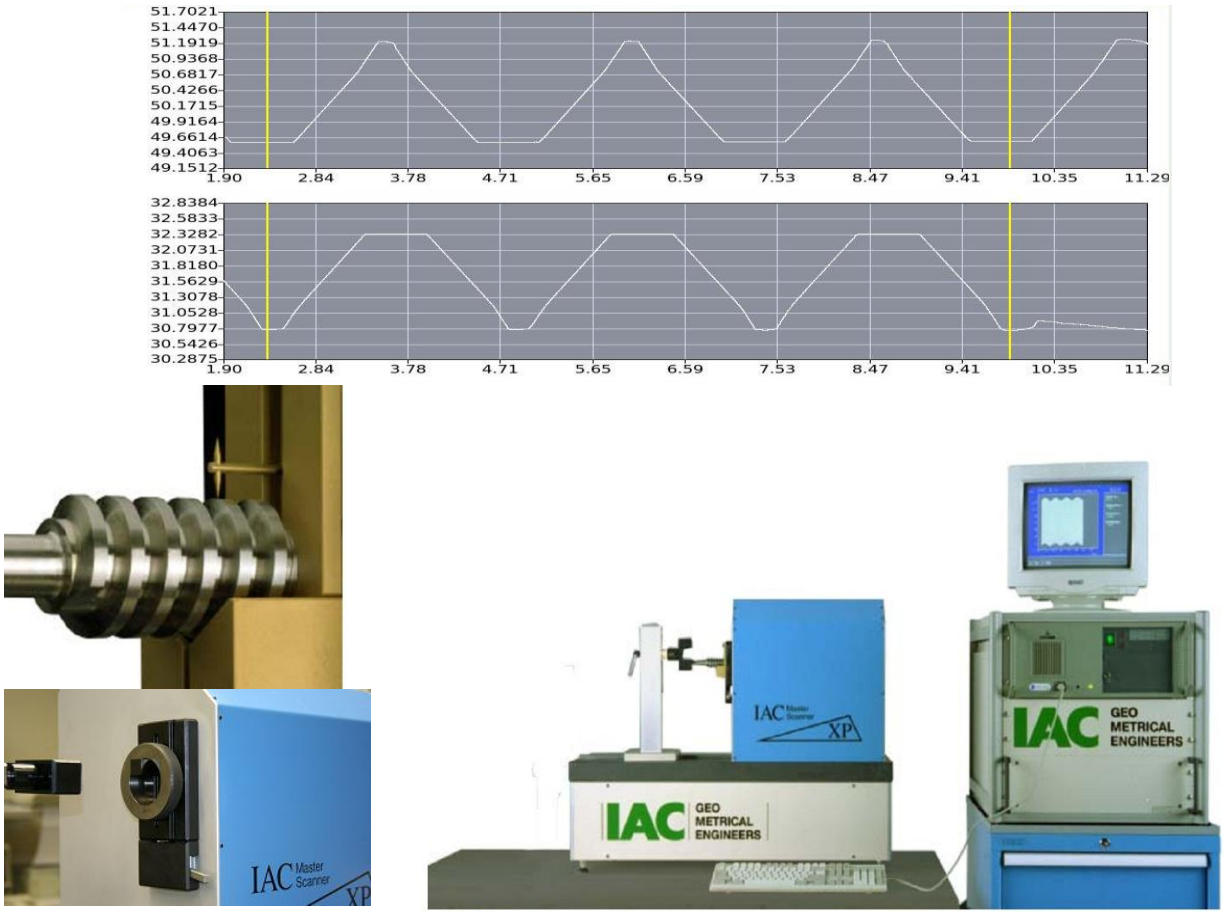
$$\delta = \left| \frac{\frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2}}{2} \right| \tag{3.7}$$

Mjerenje koraka unutarnjih navoja može mjeriti navedenim metodama uz uzimanje otiska ili rezanjem navoja.

3.3.4 Ostale mjerne metode

3.3.4.1 Mjerenje profila navoja

Mjerenje aksijalnog profila uobičajena je metoda za mjerenje koraka i kuta vanjskih i unutarnjih navoja. Mjerenje se izvodi na uređajima za mjerenje oblika opremljenih s nastavcima za prihvat navoja i garniturom ticala različitih promjera. Ovim uređajima nije moguće odrediti srednji promjer, već isključivo oblik profila jedne strane navoja. 1995. godine tvrtka IAC Geometrische Ingenieurs B.V. proizvela je uređaj MasterScanner [5] kojim je moguće snimiti (skenirati) koordinate točaka s dva nasuprotna profila navoja u ravnini koja prolazi kroz os navoja (u aksijalnom presjeku). Softverskim algoritmima izračunava se srednji promjer, mali i veliki promjer, kut i korak navoja kao i odstupanja bokova navoja od pravocrtnosti. Važno je naglasiti da se srednji promjer određuje iz stotine snimljenih podataka, za razliku od konvencionalnih metoda koje se temelje na dodiru u desetak točaka. Ovim postupkom srednji promjer navoja se određuje strogo prema definiciji, tako da geometrijska odstupanja profila navoja, odstupanje koraka i kuta profila ne utječu na rezultat mjerenja srednjeg promjera.



Slika 3-14 Uređaj za mjerenje aksijalnog profila navoja

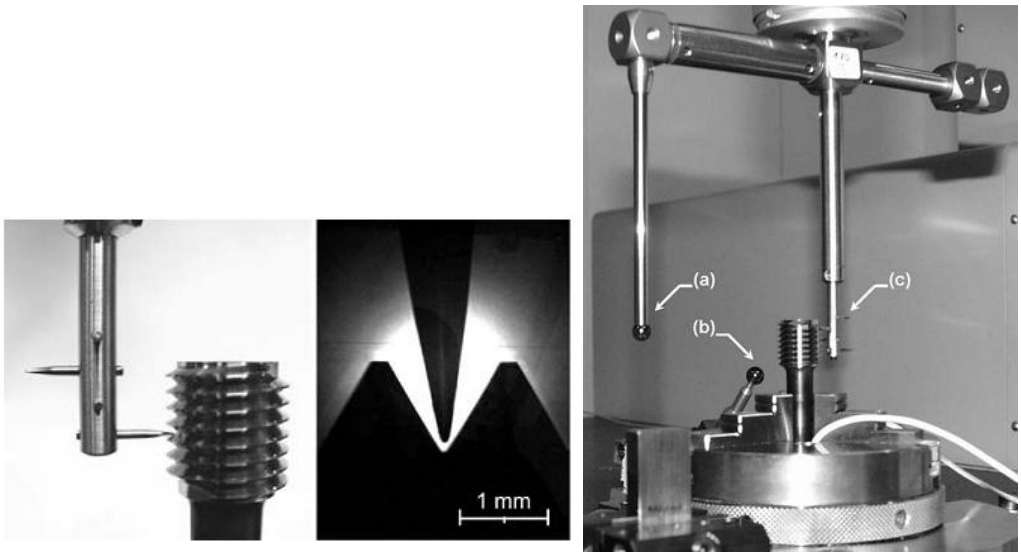
3.3.4.2 Trokoordinatna mjerenja

Trokoordinatni mjerni uređaji (CMM) manjih dimenzija i visoke točnosti sve više se koriste za mjerenje srednjeg promjera vanjskih i posebice unutarnjih navoja [22]. Korištenjem ticala vrlo malih dimenzija trokoordinatnim mjernim uređajem može se izmjeriti kut i korak navoja.



Slika 3-15 Mjerenje navoja sa CMM-om s T-ticalom

U novijoj literaturi predlaže se metoda skeniranja profila navoja uz korištenje trookordinatnog mjernog uređaja [23]. Ova metoda također se temelji na principu „skeniranja“ profila objašnjenog u poglavlju 3.3.4.1.

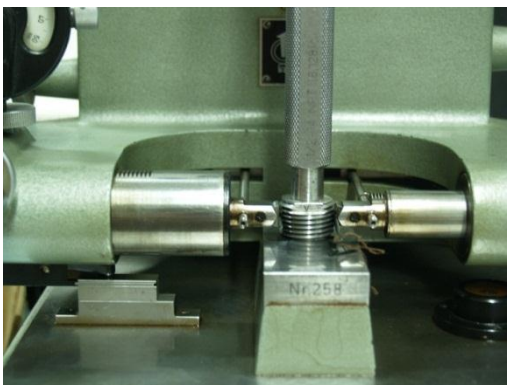


(a) ticalo za podešavanje
(b) kugla za umjeravanje ticala
(c) ticalo u obliku igle

Slika 3-16 Mjerenje profila navoja s CMM-om metodom

3.3.5 Mjerenje konusnih navoja

Principi mjerenja i mjerne metode opisane u ovom poglavlju mogu se primijeniti za mjerenje srednjeg promjera konusnih navoja. Srednji promjer (i ostali karakteristični promjeri tablica 2-4) se mijenja duž središnje osi navoja stoga presjek mjerenja, odnosno udaljenost od najmanjeg promjera navoja, mora biti definiran. Primjenom metoda sa skeniranjem aksijalnog profila navoja ne postoji razlika u mjerenju konusnih i cilindričnih navoja, dok se kod ostalih metoda provodi korekcija rezultata zbog kuta konusa (svođenje srednjeg promjera s mjesta mjerenja na traženi/definirani presjek). Mjerenje vanjskih navoja metodom s valjčićima može se izvesti na uređajima za mjerenje konusa(umjesto univerzalnih mjernih uređaja) (Slika 3-17) na isti način kao mjerenje cilindričnih navoja opisanog u poglavlju 3.3.1.1. Korak i kut vanjskih navoja mogu se odrediti optičkim metodama, ali je potrebno poznavati kut konusa navoja. Za mjerenje kuta i koraka unutarnjih navoja uobičajeno je koristiti uređaje za mjerenje oblika (profilometre).



Slika 3-17 Mjerenje srednjeg promjera konusnih vanjskih navoja

3.4 Matematički modeli i mjerne nesigurnosti

Matematički izrazi opisani u ovom poglavlju mogu se primijeniti na mjerenje srednjeg promjera kontaktnim metodama.

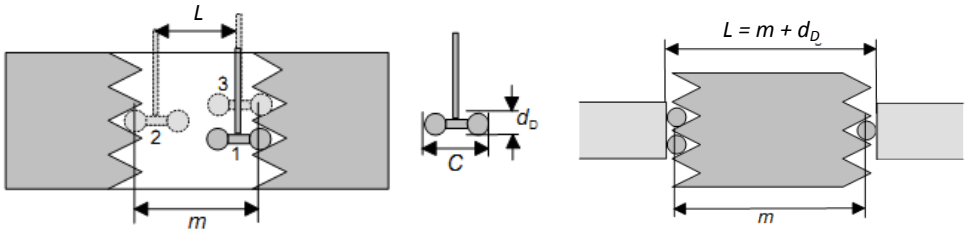
Srednji promjer navoja određuje se pomoću promjera m (razmak između središta mjernih elemenata koji dodiruju ispitivani navoj), poznatog koraka P, kuta navoja α i promjera d_D korištenih mjernih elemenata. Za simetrični navoj iz geometrijskih odnosa uz $\beta = \gamma = \alpha/2$, vrijedi:

$$d_2, D_2 = m \mp d_D\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) \pm \frac{P}{2}\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \mp A_1 \pm A_2 \qquad (3.8)$$

gdje je:

- d_2, D_2 - Vrijednost srednjeg promjera, mm
- m - Udaljenost između središta mjernih elemenata, mm
- d_D - Promjer valjčića ili kuglice, mm
- α - Kut navoja, °
- P - Korak navoja, mm
- A_1 - Korekcija nalijeganja valjčića ili kuglice, mm
- A_2 - Korekcija mjerne sile, mm

U izrazu 3.8 gornji znak se odnosi na vanjski navoj (d_2), a donji znak se odnosi na unutarnji navoj (D_2).



Slika 3-18 Udaljenost središta elemenata ticala

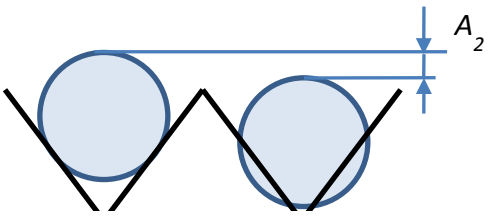
3.4.1 Korekcija nalijeganja valjčića

U jednadžbama 3.1, 3.3 i 3.8 član A_1 predstavlja korekciju uslijed nalijeganja mjernog valjčića/kuglice u profil navoja. Ovi izrazi izvedeni su prema idealiziranom prikazu aksijalnog presjeka navoja u kojem su bokovi navoja u dodiru s mjernim elementom. Isto tako, presjek mjernog valjčića prikazuje se kao kružnica. Budući da geometrija navoja proizlazi iz zavojnice koraka P, dodirne točke navoja i mjernog elementa ne nalaze se u aksijalnom presjeku navoja, nego u ravnini pomaknutoj od osi navoja.

U stvarnom prikazu aksijalnog presjeka navoja dodirne točke mjernog elementa i navoja nisu vdljive, a presjek mjernog valjčića je eliptičan. Osim toga postoji uočljiv pomak kuglice prema osi navoja koji nije zanemariv i za njegovu veličinu je potrebno korigirati iznos srednjeg promjera. Ta korekcija se naziva korekcija nalijeganja mjernih elemenata i označava se s A_1.

Za simetrične navoje s manjim kutom uspona i blažim kutom navoja ova korekcija se računa prema izrazu 3.9:

$$A_1 = \frac{d_D}{2} \cdot \left(\frac{P}{\pi \cdot D_2}\right)^2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{3.9}$$



Slika 3-19 Korekcija nalijeganja valjčića

Jednadžbe od 3.10 do 3.12 temelje se na Berndtovoj teoriji [4] i ovim jednadžbama se izračunava srednji promjer asimetričnih navoja. Ovi izrazi već sadrže korekciju zbog nalijeganja mjernih elemenata u profil navoja, a do rješenja se dolazi iterativnim putem:

$$d_2, D_2 = m \cdot \cos(\theta) \mp d_D \cdot \frac{\cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} \cdot \sqrt{1 - \frac{m^2 \cdot \sin^2(\theta)}{{d_D}^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}} \pm \left(\frac{l}{n} - \frac{2 \cdot l \cdot \theta}{\pi}\right) \cdot \frac{\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)} \tag{3.10}$$

Pomoćni kut ϑ se određuje pomoću iteracije:

$$\theta_k = \arcsin\left(\frac{d_D \cdot l}{\pi \cdot m} \cdot \frac{\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{m^2 \cdot \sin^2(\theta_{k-1})}{d_D^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}}}{\cos(\theta_{k-1}) \mp \sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right) \cdot \frac{d_D}{m} \cdot \sqrt{1 - \frac{m^2 \cdot \sin^2(\theta_{k-1})}{d_D^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}}} \right) \tag{3.11}$$

s početnom vrijednosti:

$$\theta_1 = \frac{d_D \cdot l}{\pi \cdot m^2} \cdot \frac{\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right) \cdot \left(1 \mp \sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right) \cdot \frac{d_D}{m}\right)} \tag{3.12}$$

$l = n \cdot P$ predstavlja uspon viševojnog navoja. U jednadžbama 3.10, 3.11 i 3.12 gornji znak se odnosi na vanjski navoj (d_2), a donji znak na unutarnji navoj (D_2).

3.4.2 Korekcija zbog utjecaja mjerne sile

Veličina deformacije mjernih elemenata, prouzrokovane mjernom silom prilikom umjeravanja srednjeg promjera, ovisi o mjernom postupku. Kod postupaka umjeravanja gdje je početno podešavanje mjernog uređaja izvedeno pomoću etalonskog prstena ili etalonskih mjerki (planparalelnih graničnih mjerki ili mjerki s V-urezom) elastična deformacija može se djelomično ili potpuno zanemariti. Deformacija se procjenjuje prema Hertzovom modelu kontakta kuglice na ravnu površinu. U slučaju kontakta mjernog valjčića i navoja, deformacija se može izračunati prema istom izrazu, s obzirom da se dodirne točke valjčića i navoja ne mijenjaju ako se umjesto valjčića koriste kuglice istog promjera:

$$W_0 = \sqrt[3]{\frac{9F^2}{8d_D}\left(\frac{(1-v_1{}^2)}{E_1} + \frac{(1-v_2{}^2)}{E_2}\right)^2} \qquad (3.13)$$

gdje je:

- W_0 - Deformacija za slučaj dodira kugle i ravne površine
- v_i - Poissonov koeficijent
- F - Mjerna sila
- E_i - Modul elastičnosti
- d_D - Promjer mjernog elementa

U slučaju dodira mjernog elementa s navojem, koji ima oblik V utora (uz pojednostavljenja), mjerna sila je $F/[2\sin(\frac{\alpha}{2})]$. Gledano u smjeru mjerne sile, deformacija elementa i navoja je $1/\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ puta veća u smjeru normalnom na bok navoja. Iz toga slijedi izraz za izračun deformacije u V-utoru:

$$W_{V0} = [\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)]^{-\frac{5}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot W_0 \qquad (3.14)$$

Ukupna deformacija kuglice koja dodiruje navoj u dvije točke iznosi $A_2 = 2 \cdot W_{V0} = 4 \cdot W_0$.
Jednadžbe 3.13 i 3.14 izvedene su prema modelu gdje V-utor odgovara kutu simetričnih navoja. U slučaju asimetričnih navoja, stvarna deformacija odstupat će od deformacije izračunate prema ovim izrazima.

3.4.3 Računanje funkcionalnog srednjeg promjera

Za određivanje funkcionalnog srednjeg promjera rezultat mjerenja mora biti korigiran zbog odstupanja koraka δP (izmjerena vrijednost kumulativnog odstupanja koraka navoja na duljini nošenja navoja). Korigira se rezultat mjerenja jednostavnog srednjeg promjera navoja. Korekcija rezultata mjerenja računa se prema izrazu:

$$\delta D_P = \pm\frac{|\delta P|}{\tan(\alpha/2)} \qquad (3.15)$$

gornji znak zbrajanja odnosi se na vanjske, a donji na unutarnje navoje.

Za određivanje funkcionalnog srednjeg promjera, srednji promjer mora se korigirati i zbog odstupanja kuta navoja $\delta\alpha$. Korekcija se primjenjuje na jednostavni srednji promjer, a računa se prema:

$$D_\alpha = \pm 0{,}625 \cdot P \cdot (|\delta\beta| + |\delta\gamma|) \qquad (3.16)$$

gornji izraz vrijedi samo za metričke navoje gdje je $\alpha/2$ =30˚.

3.4.4 Odabir optimalnog promjera mjernih elemenata

Pravilan odabir promjera d_D mjernih elemenata jedan je od ključnih elementa koji može značajno pridonijeti mjernoj nesigurnosti. Ako nije odabran odgovarajući promjer mjernog elementa, greške kuta navoja postaju vrlo značajan faktor pri određivanju srednjeg promjera navoja, pogotovo prema kategorijama 1a i 2a. Promjer mjernih elemenata za simetrične navoje određuje se prema izrazu:

$$d_0 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \qquad (3.17)$$

Promjer mjernih elemenata za asimetrične navoje određuje se prema izrazu:

$$d_0 = P \cdot \frac{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\tan(\beta) + \tan(\gamma)} \cdot \frac{2}{\cos(\beta) + \cos(\gamma)} \qquad (3.18)$$

3.4.5 Mjerna nesigurnost

Proračun nesigurnosti preuzet je iz EURAMET upute cg-10 v.2.0 i izrađen je u skladu s JGCM 100:2008 [15].

Varijanca mjerene nesigurnosti:

$$u^2(D_2, d_2) = u^2(m) + c^2{}_{d_D} u^2(d_D) + c^2{}_P u^2(P) + c^2{}_{\alpha/2} u^2(\alpha/2) + u^2(A_1) + u^2(A_2) + u^2(\delta B) \qquad (3.19)$$

gdje je:

- $u(m)$ - Nesigurnosti zbog mjernog postupka (procjenjuje se na isti način kao i kod kontrolnih prstena/čepova) i uključuje doprinose: utjecaj promjera mjernog elementa, pogreška mjernog uređaja, temperaturni utjecaj, utjecaj prekretnih točaka i ostale utjecaje koji se odnose na mjernu metodu.
- $u(d_D)$ - Nesigurnosti proizašle iz umjeravanja promjera mjernih elemenata. Pripadajući koeficijent osjetljivosti određuje se prema:

$$c_{d_D} = \frac{1}{sin(\frac{\alpha}{2})} + 1, \qquad za\ vanjske\ navoje \qquad (3.20)$$

$$c_{d_D} = \frac{1}{sin(\frac{\alpha}{2})} - 1, \qquad za\ unutarnje\ navoje$$

$u(P)$ - Nesigurnosti mjerenja koraka navoja.
Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_P = \frac{cot(\frac{\alpha}{2})}{2} \qquad (3.21)$$

$u(\alpha/2)$ - Nesigurnosti mjerenja kuta navoja.
Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot sin^2(\alpha/2)} = \frac{cos(\alpha/2)}{sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0) \qquad (3.22)$$

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 mjerenja (odstupanje od oblika) i ostalih doprinosa koji do sada nisu uzeti u obzir ovim računom

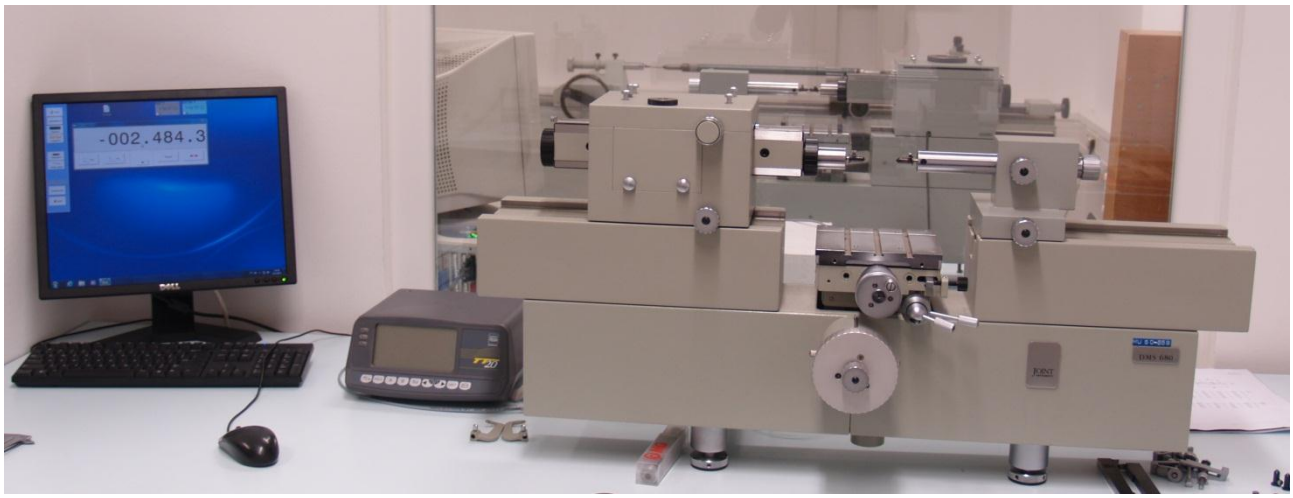
Navedene sastavnice nisu dovoljne za određivanje ukupnog doprinosa mjernoj nesigurnosti. Svaka metoda ima svoje specifičnosti koje se trebaju individualno odrediti, međutim, nabrojane sastavnice svakako bi trebale biti uključene u svaku procjenu mjerne nesigurnosti. Prikazani proračun mjerne nesigurnosti odgovara rezultatu mjerenja srednjeg promjera (2a i 2b kategorija umjeravanja) navoja metodama s T-ticalom i mjernim valjčićima. Ukoliko se u proračunu izostavi član $c^2{}_P u^2(P)$ onda će proračun odgovarati mjernoj nesigurnosti jednostavnog srednjeg promjera (kategorije umjeravanja 1a i 2a). Ako se kut navoja ne mjeri (kategorije umjeravanja 1a i 2a) smatra se da je njegova vrijednost unutar dopuštenih granica odstupanja (prema važećim normama). Ako su granice dopuštenog odstupanja $\pm a$ i ako je za pretpostaviti da će moguće vrijednosti kuta navoja slijediti pravokutnu razdiobu, nesigurnost koraka $u(\alpha/2)$ će tada biti jednaka $a/\sqrt{3}$.
Pri mjerenju funkcionalnog srednjeg promjera (kategorija umjeravanja 3) među navedene sastavnice je potrebno dodati i doprinose zbog odstupanja kuta $u(\delta D_\alpha)$ koraka $u(\delta D_p)$ duž navoja s pripadajućim koeficijentima osjetljivosti.

Mjerni sustav

U ovom poglavlju opisane su metode i uređaji za mjerenje srednjeg promjera vanjskih i unutarnjih navoja koji se koriste u Laboratoriju. Za umjeravanje srednjeg promjera navojnih graničnih mjerila koristi se univerzalni mjerni uređaj Microrep Joint DMS 680 primjenom metode s T-ticalom, metode s valjčićima i metode s mjernim čeljustima. Optičkim metodama na modificiranom alatnom mikroskopu Carl Zeiss mjere se kut i korak vanjskih te kut unutarnjih navoja. Korak unutarnjih navoja mjeri se kontaktnom metodom na mjernom uređaju Microrep Joint DMS 680 s nastavkom za mjerenje koraka navoja.

4.1 Univerzalni mjerni uređaj Microrep Joint DMS680

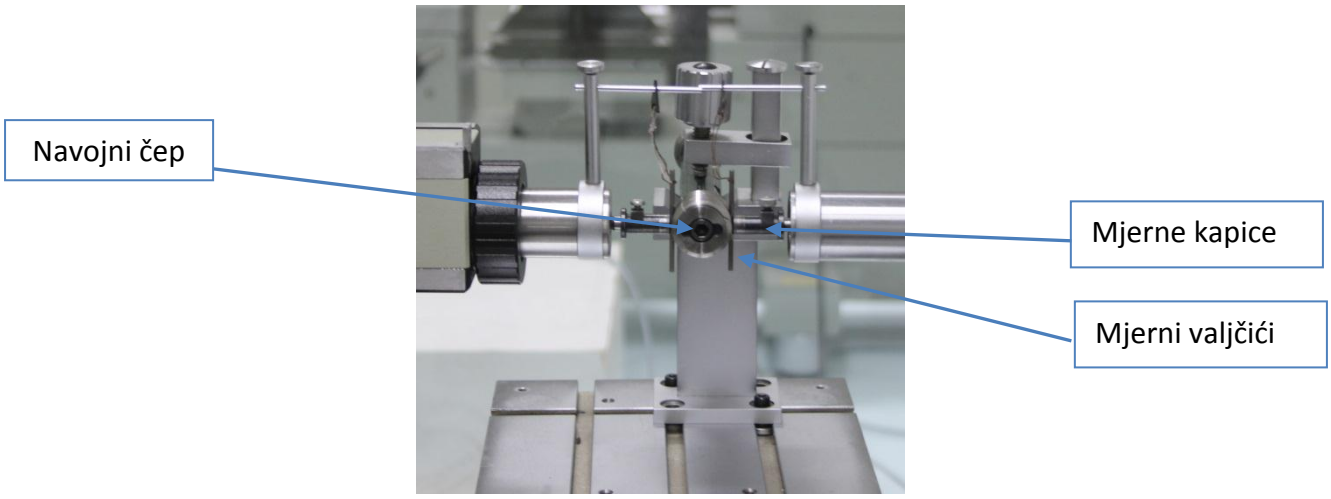
Microrep Joint DMS 680 je 1-D višenamjenski mjerni uređaj visoke točnosti, koji je za potrebe umjeravanja navojnih graničnih mjerila dodatno opremljen nastavcima i mjernim elementima za mjerenje unutarnjih (mjerni prihvat za T-ticala, garnitura T-ticala, mjerne čeljusti, mjerke s V-utorom) i vanjskih (garnitura mjernih valjčića) navoja.



Slika 4-1 Univerzalni mjerni uređaj Joint DMS 680

4.1.1 Umjeravanje srednjeg promjera navojnih čepova metodom s tri valjčića

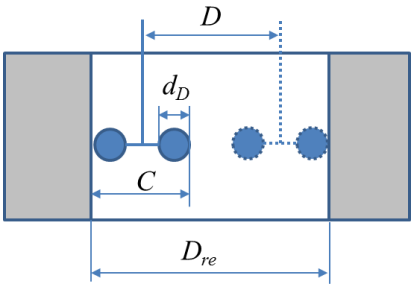
U Laboratoriju se umjeravaju navojni čepovi nazivnog srednjeg promjera od 1 mm do 60 mm i nazivnog koraka od 0,25 mm do 6 mm prema kategorijama umjeravanja 1 i 2.
Mjerni uređaj opremljen je standardnom garniturom mjernih valjčića proizvođača Carl Zeiss, promjera od 0,17 mm do 6,35 mm. Prema koraku navoja moguće je odabrati ravne mjerne kapice promjera 2 mm, 8 mm ili 14 mm. Mjerna sila može se postaviti na iznos od 2,5 N ili 4,8 N ovisno o koraku navoja (tj. odgovarajućem promjeru mjernih valjčića). Dobiveni rezultat je mjera preko valjčića *L*.



Slika 4-2 Mjerenje vanjskog navoja

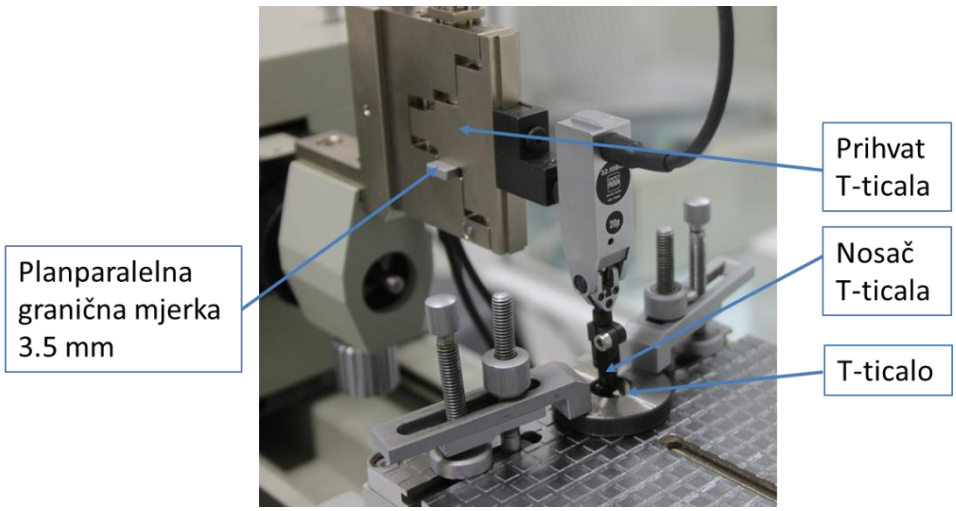
4.1.2 Umjeravanje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s T-ticalom

Ovom metodom umjeravaju se navojni prsteni nazivnog srednjeg promjera od 4 mm do 60 mm i nazivnog koraka od 0,6 mm do 6 mm prema kategorijama umjeravanja 1 i 2. Mjerni uređaj opremljen je mjernim prihvatom za T-ticala s promjerima kuglica od 0,335 mm do 4 mm. Konstanta T-ticala *C* određuje se mjerenjem referentnih prstena nazivnih promjera ϕ14 mm i ϕ50 mm prema slici 4-3 i slici 4-4.



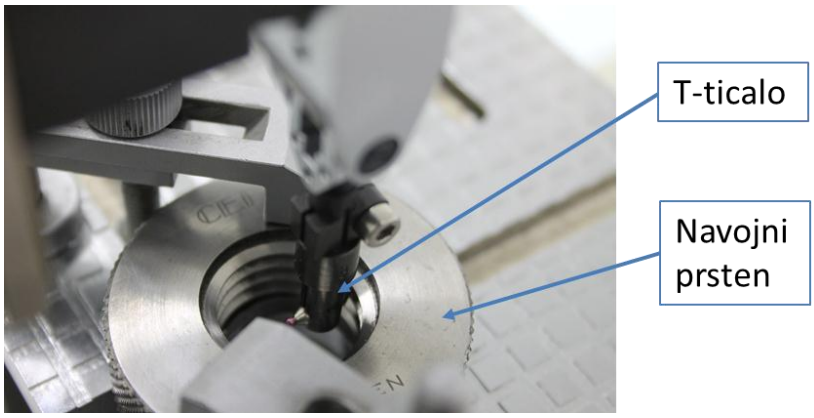
Slika 4-3 Određivanje konstante T-ticala

$C = D_{re} - D$
gdje je:
C – konstanta T-ticala
D_{re}– promjer referentnog prstena
D – izmjereni promjer



Slika 4-4 Mjerenje referentnog prstena

Mjerenje srednjeg promjera opisano je poglavlju 3.3.1.2. Prihvat i nosač T-ticala zadržavaju položaj namješten pri mjerenju referentnog prstena i tokom mjerenja ne smije doći do promjene njihovog položaja. Rezultat mjerenja je očitana vrijednost *L*. Odabir T-ticala i izračun srednjeg promjera opisan je u poglavlju 3.4.



Slika 4-5 Mjerenje navojnog prstena T-ticalom

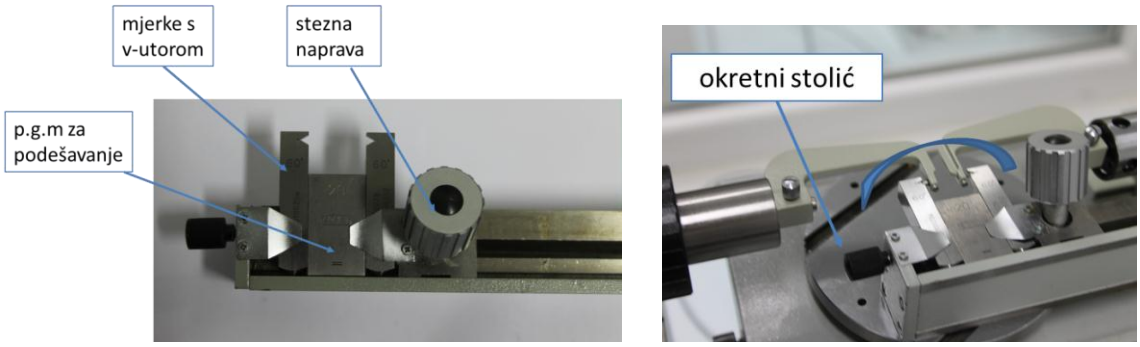
4.1.3 Umjeravanje srednjeg promjera navojnih prstena metodom s mjernim čeljustima

Ovom metodom umjeravaju se navojni prsteni nazivnog srednjeg promjera od 10 mm do 60 mm i nazivnog koraka od 1 mm do 4,5 mm prema kategorijama umjeravanja 2a i 2b. Mjerni uređaj opremljen je malim mjernim čeljustima s mjernim kuglicama promjera od 0,8 mm do 2,3 mm te mjerkama s V-utorom od 60˚ i 55˚. Ako se umjeravaju navojni prsteni s kutom navoja od 60˚ i 55˚, početna vrijednost se postavlja pomoću mjerki s V-utorom (Slika 4-6). Pri umjeravanju ostalih navoja, početna vrijednost se postavlja pomoću referentnih prstena promjera: ϕ14 mm i ϕ50 mm. U tom slučaju, potrebno je provesti korekciju rezultata mjerenja zbog utjecaja mjerne sile prema izrazu:

$$A_2 = 2 \cdot \left([\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)]^{-\frac{5}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \qquad (4.1)$$

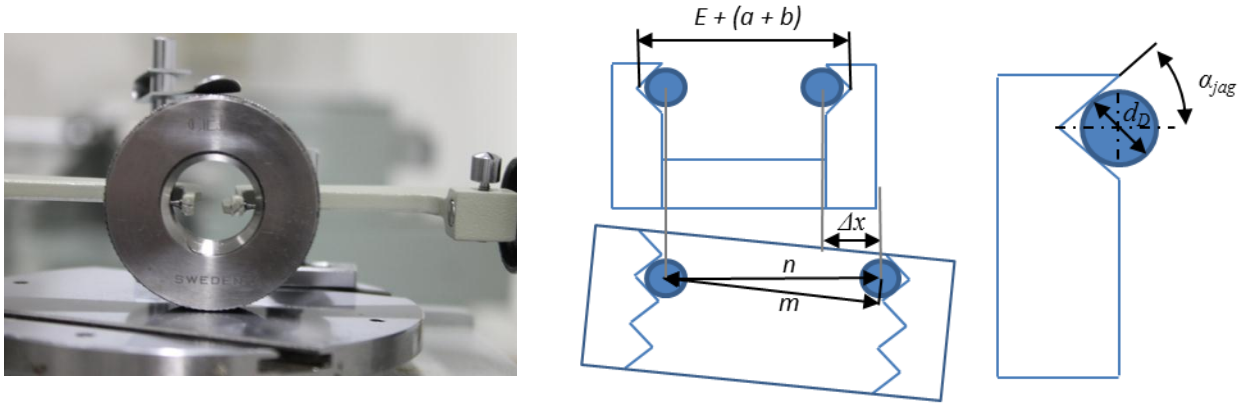
Naime, utjecaj mjerne sile se u većoj mjeri poništi s obzirom da ista sila djeluje na navoj i na referentni prsten/mjerke. Međutim, deformacija mjernih elemenata i navoja bit će različita ako se ostvaruje dodir kuglice s prstenom i kuglice s navojem. Tu razliku treba uzeti u obzir i uključiti je u račun srednjeg promjera. Kod postavljanja početne vrijednosti pomoću mjerki s V-utorom, ova korekcija nije potrebna.

Pri postavljanju početne vrijednosti preko mjerki s V-utorom, koristi se stezna naprava i planparalelna granična mjerka (ili kombinacija više njih) nazivne vrijednosti približne nazivnom promjeru navoja koji se umjerava (Slika 4-6). Pri postavljanju početne mjere pomoću referentnog prstena mjerni postupak odgovara postupku za umjeravanje unutarnjih promjera.



Slika 4-6 Postavljanje početnog položaja mjerkama s V-utorom

Mjerenje srednjeg promjera provodi se na način opisan u poglavlju 3.3.1.3. 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 4-7). Mjerne kuglice odabiru se prema istom principu kao i kod ostalih kontaktnih mjernih metoda. Matematički model za izračun srednjeg promjera koji se uobičajeno koristi uz ovu metodu (jednadžba 3.4) i predlaže se u literaturi [14], značajno odstupa od modela koje se predlaže danas važećom uputom [3] opisanom u poglavlju 3.4. Značajna razlika odnosi se na aproksimaciju korekcije nalijeganja mjernih elemenata u navoj, što rezultira značajnim odstupanjem u iznosu srednjeg promjera dobivenog mjerenjem ovom metodom. Navedeni izrazi u poglavlju 3.4 mogu se koristiti i za ovu metodu, ali je potrebno iz vrijednosti *Δx* izračunati udaljenost između središta mjernih kuglica u smjeru okomitom na središnju os navoja *m* prema izrazima 4.2 i 4.3.



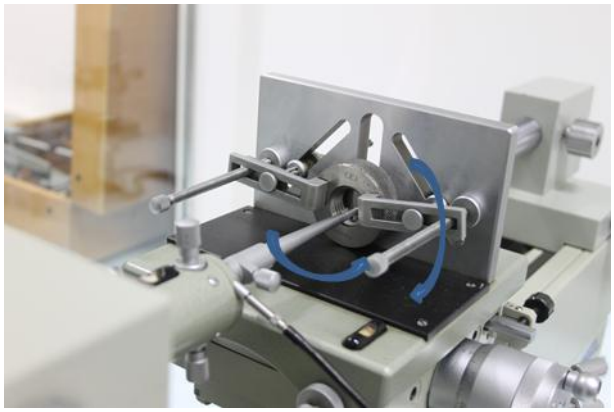
Slika 4-7 Mjerenje navoja metodom s mjernim čeljustima

$$n = E + (a + b) + \Delta x - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} \qquad (4.2)$$

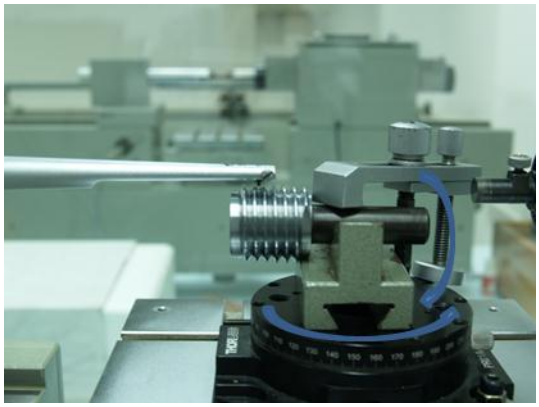
$$m = \sqrt{n^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2} \qquad (4.3)$$

4.1.4 Mjerenje koraka navoja

Ovom metodom mjere se navoji koraka od 0,6 mm do 6 mm na univerzalnom mjernom uređaju opremljenim s mjernim nastavkom za mjerenje koraka, prema metodi opisanoj u poglavlju 3.3.2.2. Metoda se oslanja na pretpostavku da je ploha baze navojnog mjerila okomita na središnju os navoja. Izmjerena vrijednost kuta dobivena je mjerenjem preko tri ili više uzastopnih navojnih grebena, ovisno o ukupnom broju navoja na mjerilu.



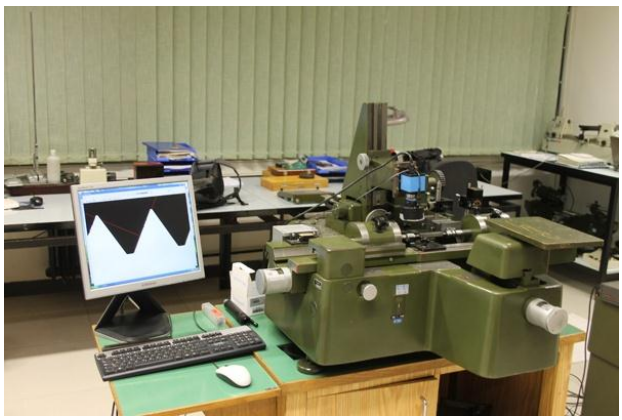
Slika 4-8 Mjerenje koraka unutarnjih navoja



Slika 4-9 Mjerenje koraka vanjskih navoja

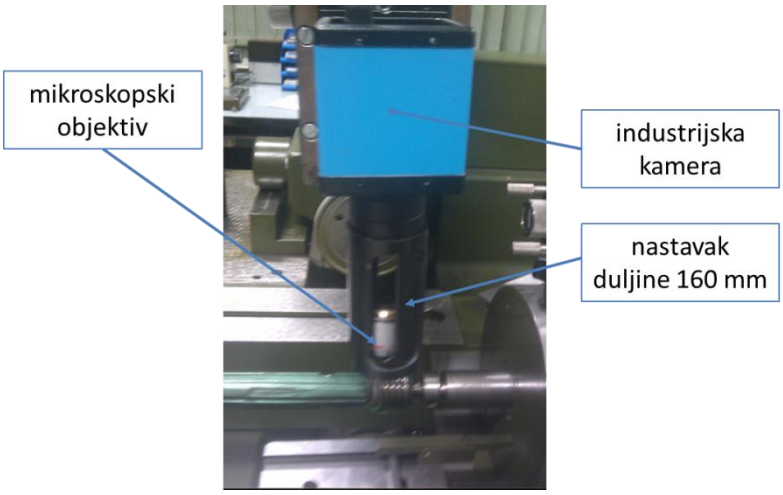
4.2 Modificirani 2D mjerni uređaj Carl Zeiss

Alatni mikroskop Carl Zeiss se koristio za 2D mjerenja u Laboratoriju dugi niz godina. Iako relativno zastario, ovaj uređaj se i danas odlikuje vrlo stabilnom mehanikom i točnim vođenjem. Veliki nedostatak ovog uređaja predstavljala je zastarjela optika i nemogućnost obrade mjernih podataka putem računala. Iz tog razloga se pristupilo modernizaciji uređaja ugradnjom novih mjernih skala, zamjenom optičkog sustava i nabavkom mjernog softvera.



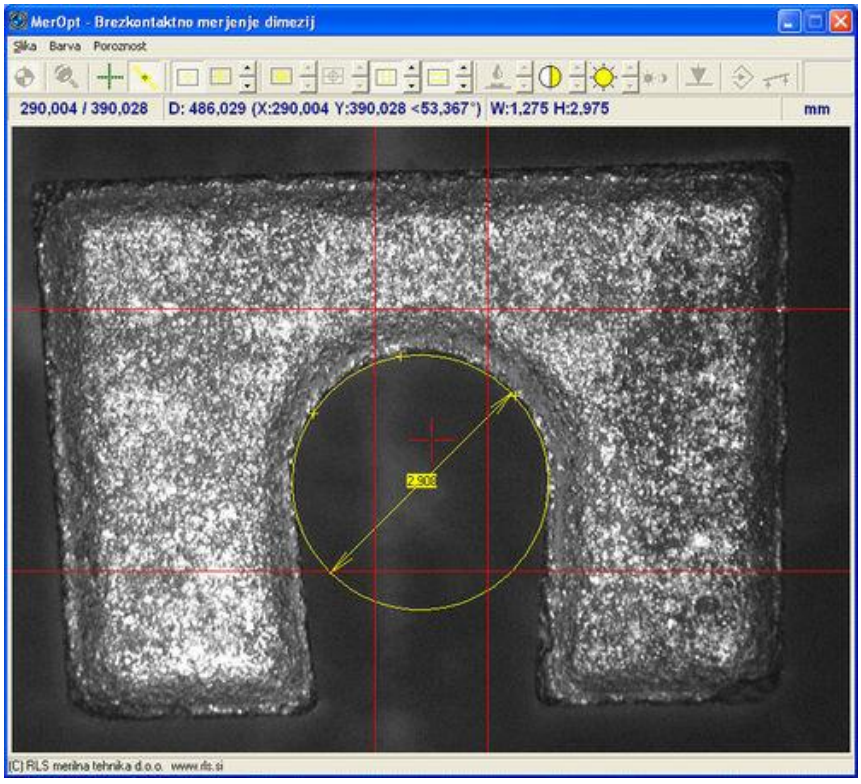
Slika 4-10 2D mjerni uređaj Carl Zeiss

Optičke mjerne skale (Renishaw tip RGH22Y) ugrađene su na dvije osi mjernog uređaja (*x* i *y* os).
Analogni optički sustav za viziranje i mjerenje zamijenjen je industrijskom digitalnom kamerom (tip DMK41AF02) proizvođača Imaging Source Europe GmbH (Njemačka).
Optički sustav izveden je s akromatskim mikroskopskim objektivima povećanja od 4 i 10 puta. Objektivi su udaljeni od CCD senzora kamere pomoću nastavaka duljine 160 mm.



Slika 4-11 Optički sustav

Veza s računalom ostvarena je preko akvizicijske kartice koju je razvila slovenska tvrtka RLS merilna tehnika. Kartica može pohranjivati podatke s tri mjerne skale istovremeno preko tri digitalna ulaza. Ista tvrtka razvila je softver za 2D mjerenja MerOpt [24] koji objedinjuje sliku s kamere i očitanja s mjernih skala. Princip mjerenja je ručni i zasniva se na pohranjivanju koordinata točaka značajke koja se mjeri. Pomak mjernog predmeta (*x* i *y* osi uređaja) odvija se ručno kao i pohrana mjernih podataka. Dodavanje značajki mjernim točkama i obrada rezultata provodi se naknadno izradom mjernih skripta.

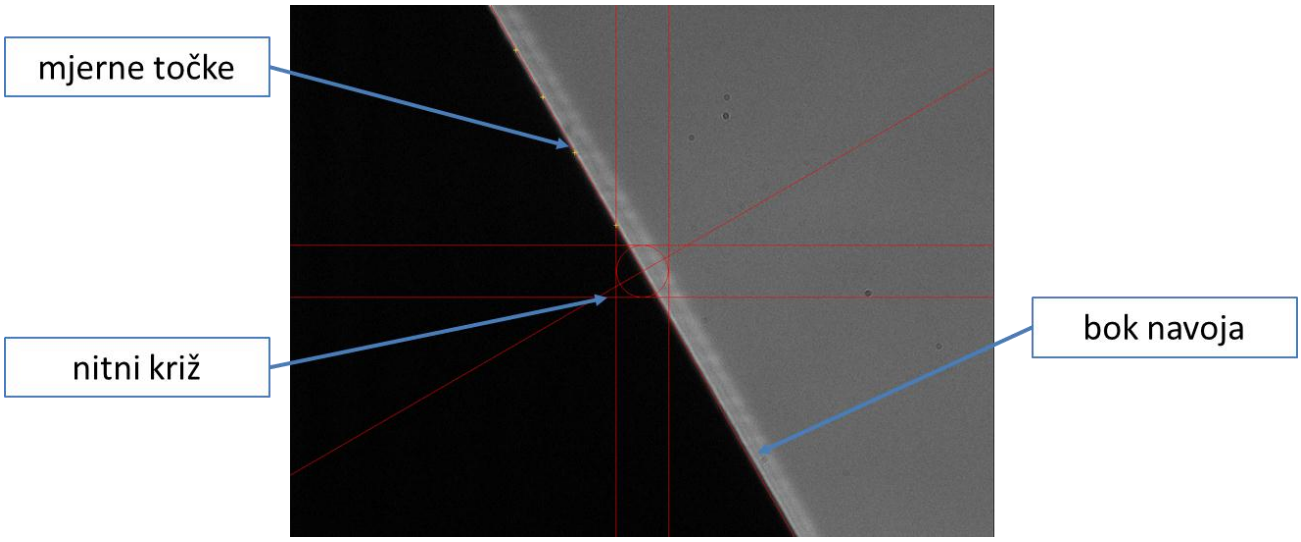


Slika 4-12 Mjerni program MerOpt

4.2.1 Mjerenje koraka i kuta navoja

Optičko mjerenja kuta i koraka navoja izvršeno je na modificiranom 2D uređaju Carl Zeiss s objektivom povećanja od 4x. U ovoj konfiguraciji vidno polje mjerenja iznosi 1 mm x 0,75 mm, a rezolucija sustava 0,8 µm, čime je omogućeno mjerenje koraka navoja u području od 1 mm do 6 mm.

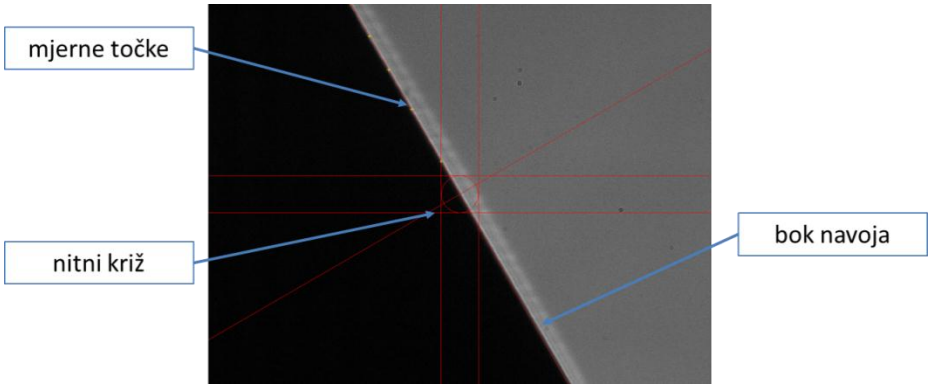
Osvjetljenje se postavlja s donje strane navoja suprotno od kamere. Radi izbjegavanja nepoželjne refleksije, korištena je kolimirana zelena svjetlost dobivena pomoću filtarske leće. Prije početka mjerenja optički sustav se zakreće za vrijednost kuta uspona navoja da bi se dobila slika s jasno izraženim rubovima, prikazana na slici 4-13.



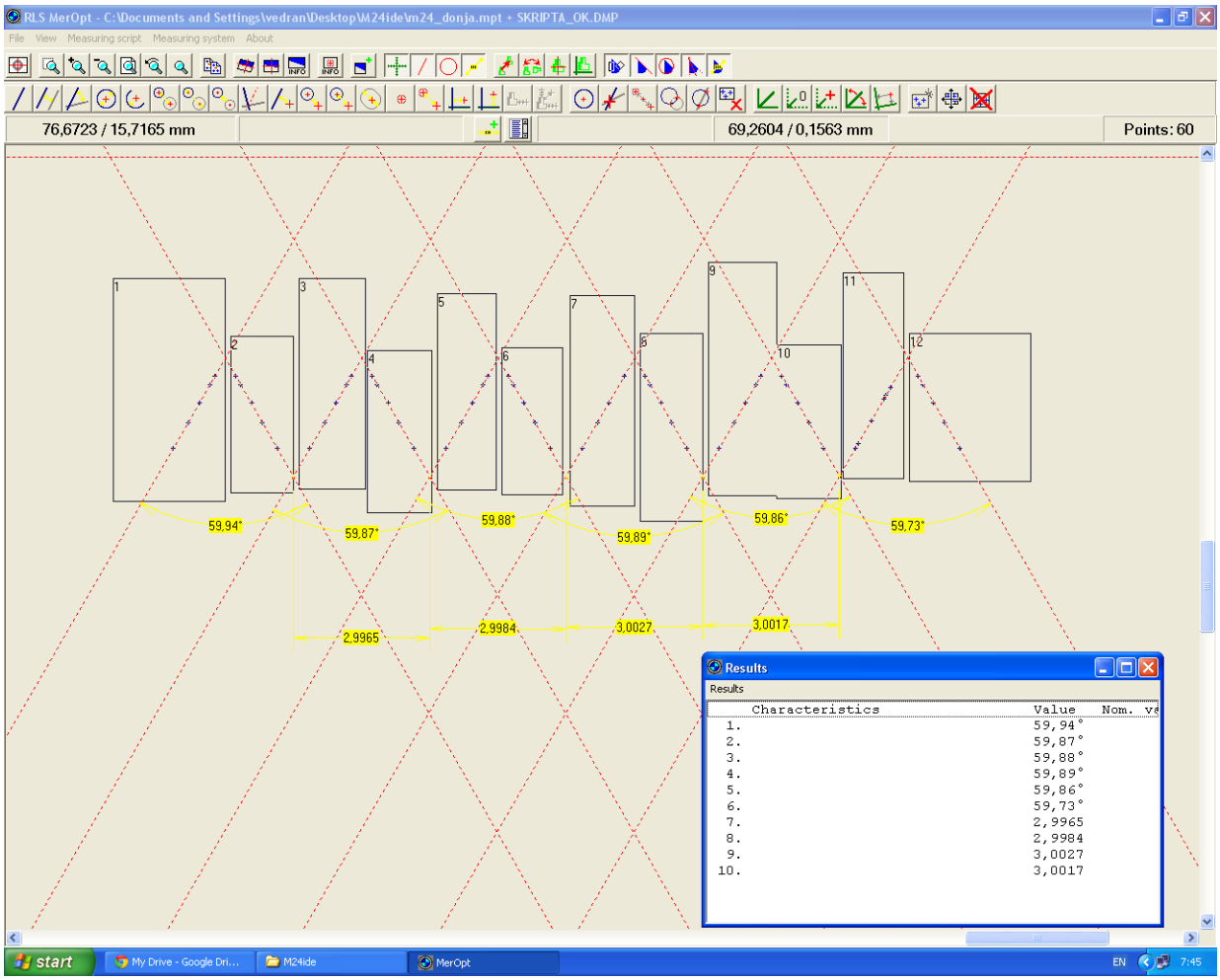
Slika 4-13 Slika mjerenja navoja 2D mjernim uređajem

Zatim se pomoću mikrometarskih vijaka središte kamere dovodi na rub boka navoja i uzima se mjerni podatak. Broj mjernih točaka na jednom boku navoja ovisi o veličini navoja koji se mjeri i o kvaliteti mjerne površine. Mjerenje se nastavlja dok se ne pohrane točke s barem tri navoja utora. Pohranjene mjerne točke obrađuju se u programu MerOpt prikazanom slikom 4-14.

Optičko mjerenje koraka i kuta unutarnjih navoja provodi se uzimanjem otiska. Za ovu primjenu koristi se stomatološka akrilna masa povišene tvrdoće.



Slika 4-14 Negativi navojnih prstena izrađeni u akrilnoj masi



Slika 4-15Obrada podataka u programu MerOpt

4.3 Vektorsko-numerički model

Model koji je izveden u nastavku rada primjenjiv je za izračunavanje srednjeg promjera paralelnih vanjskih, unutarnjih, simetričnih i asimetričnih navoja metodama s T-ticalom, mjernim čeljustima i metodom s tri valjčića. Geometriju navoja i mjesto nalijeganja valjčića/kuglica opisuje sustav nelinearnih jednadžbi čije se rješenje pronalazi numeričkim putem. Time je u potpunosti izbjegnut račun korekcije nalijeganja kuglice/valjčića u profil navoja (*rake correction*).

Rješenjem sustava dobiju se koordinate točaka dodira mjernog elementa i navoja te koordinate središta mjernog elementa iz kojih se izračunava srednji promjer.

Svaki navoj se može opisati karakterističnom zavojnicom polumjera r i koraka P te kutovima profila navoja β i γ.

Kod postavljanja matematičkog modela navoja početni izraz predstavlja jednadžbu zavojnice u parametarskom obliku:

$$x = r \cdot \cos(\varphi);\ y = r \cdot \sin(\varphi)\ ;\ z = t \cdot \varphi \qquad (4.4)$$

gdje je:

t - $t = \frac{P}{2 \cdot \pi}$

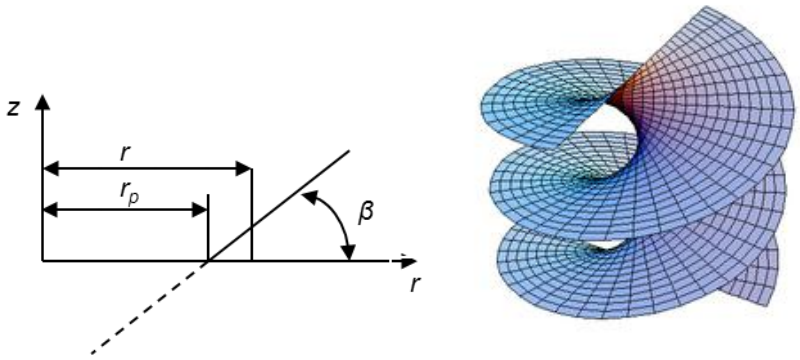
φ - Kut uspona

P - Korak zavojnice (navoja)

r - Polumjer zavojnice

Za određivanje helikoida koji predstavlja površinu jednog boka navoja jednadžba spirale (Izraz 4.4) se proširuje na:

$$x = r \cdot \cos(\varphi);\ y = r \cdot \sin(\varphi)\ ;\ z = t \cdot \varphi + a \cdot (r - r_p) \qquad (4.5)$$



Slika 4-16 Shema jednog boka profila navoja

gdje je:

a - Koeficijent smjera $a = \tan(\beta)$

β - Kut profila navoja

r_p - Teorijska udaljenost korijena navoja

Dva helikoida koja se razlikuju samo za kut profila navoja *a* opisuju cjelokupnu geometriju navojne površine pa iz izraza 4.5 proizlazi:

$$z_i = t \cdot \varphi + a_i \cdot (r - r_p);\ \ i = 1, 2 \qquad (4.6)$$

a se može zapisati u obliku:

$$a_i = a \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \text{za simetrične ili}$$

$$a_i = \begin{bmatrix} a_1 \\ -a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan(\beta) \\ -\tan(\gamma) \end{bmatrix} \quad \text{za asimetrične navoje} \qquad (4.7)$$

Ako se uzme u obzir da mjerna kuglica/valjak dodiruje jedan bok navoja samo u jednoj točki T, onda normala na navojnu površinu mora biti i normala na površinu mjernog elementa u toj točki.

Za određivanje normale na oba boka navoja prema:

$$\vec{\boldsymbol{N}} = grad\ f \tag{4.8}$$

uz jedinični vektor :

$$\vec{\boldsymbol{n}} = \frac{\vec{\boldsymbol{N}}}{|\vec{\boldsymbol{N}}|} \tag{4.9}$$

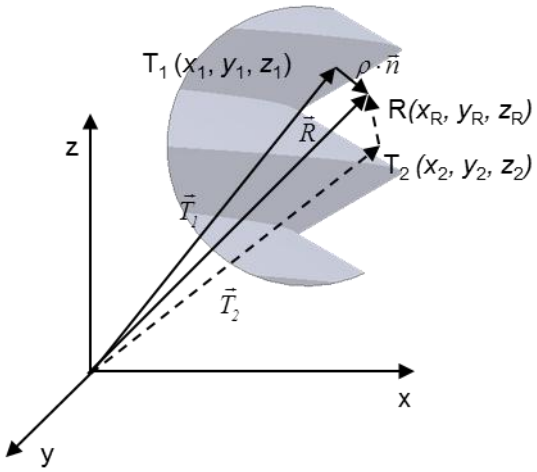
izraz (4.6) je potrebno zapisati u kartezijevim koordinatama:

$$f_i = t \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + a_i \cdot \left(\sqrt{x^2 + y^2 - r_p}\right) - z_i = 0;\ i = 1,2 \tag{4.10}$$

Derivacijom izraza (4.10) u točkama T_1 i T_2, $T_i(x_i, y_i, z_i)$ dobiva se:

$$\vec{\boldsymbol{N}}_{\boldsymbol{i}} = \begin{bmatrix} \dfrac{a_i \cdot x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} - \dfrac{t \cdot y_i}{x_i^2 + y_i^2} \\ \dfrac{a_i \cdot y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} - \dfrac{t \cdot x}{x_i^2 + y_i^2} \\ -1 \end{bmatrix};\ i = 1,2 \tag{4.11}$$

Neka se te dvije normale sijeku u nekoj točki R*(x_R, y_R, z_R)*, i neka su udaljenosti $\overline{RT_1} = \overline{RT_2} = \rho$, gdje je ρ polumjer mjernog elementa, onda točke T_1 i T_2 predstavljaju dodirne točke navoja i kuglice.



Slika 4-17 Dodir mjernog elementa i navoja

Ako točke T_1,T_2 i R definiraju vektore $\overrightarrow{\boldsymbol{T_1}}$, $\overrightarrow{\boldsymbol{T_2}}$ $\boldsymbol{i}$ $\vec{\boldsymbol{R}}$ onda se može vektorski zapisati:

$$\vec{\boldsymbol{R}} = \overrightarrow{\boldsymbol{T_i}} + \rho \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{n_i}} = \overrightarrow{\boldsymbol{T_i}} + \rho \cdot \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{N_i}}}{|\vec{\boldsymbol{N}}|};\ i = 1,2 \tag{4.12}$$

Raspiše li se izraz 4.12:

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{a_i \cdot x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} - \frac{t \cdot y_i}{x_i^2 + y_i^2} \\ \frac{a_i \cdot y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} - \frac{t \cdot x}{x_i^2 + y_i^2} \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{\rho}{|\vec{N}|};\ i = 1,2 \qquad (4.13)$$

dobiva se izraz 4.13 koji predstavlja skup od šest nezavisnih jednadžbi:

$$\frac{x_i - x_R}{\frac{a_i \cdot x_i}{\sqrt{x_i^2+y_i^2}} - \frac{t \cdot y_i}{x_i^2+y_i^2}} = \frac{y_i - y_R}{\frac{a_i \cdot y_i}{\sqrt{x_i^2+y_i^2}} - \frac{t \cdot x}{x_i^2+y_i^2}};\ i = 1,2 \qquad (4.14)$$

$$\frac{x_i - x_R}{\frac{a_i \cdot x_i}{\sqrt{x_i^2+y_i^2}} - \frac{t \cdot y_i}{x_i^2+y_i^2}} = \frac{z_i - z_R}{-1};\ i = 1,2 \qquad (4.15)$$

$$\rho = \sqrt{(x_R - x_i)^2 + (y_R - y_i)^2 + (z_R - z_i)^2} = |\rho \cdot \vec{\boldsymbol{n}}|;\ i = 1,2 \qquad (4.16)$$

uvrštavanjem točaka T_1 i T_2 u izraz 4.10 dobiva se:

$$f_i = t \cdot \arctan\left(\frac{y_i}{x_i}\right) + a_i \cdot \left(\sqrt{{x_i}^2 + {y_i}^2 - r_p}\right) - z_i = 0;\ i = 1,2 \qquad (4.17)$$

Neka je kut φ kut na kojem se nalazi središte mjernog elementa (proizvoljni početni uvjet), može se postaviti dodatni izraz:

$$\tan(\varphi) = \frac{y_R}{x_R} \qquad (4.18)$$

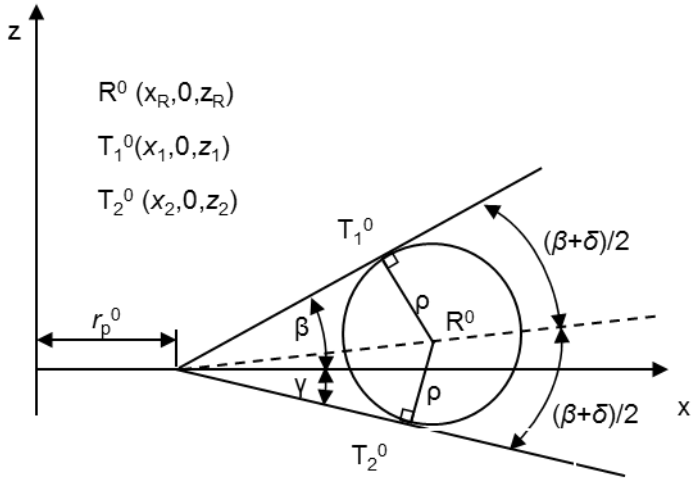
Rješavanjem sustava jednadžbi (Izrazi 4.14 - 4.18) mogu se odrediti vektori položaja $\overrightarrow{\boldsymbol{T_1}}$, $\overrightarrow{\boldsymbol{T_2}}$ i $\overrightarrow{\boldsymbol{R}}$ odnosno koordinate dodirnih točaka T_1 i T_2, središta mjernog elementa R i polumjer r_p za određeni navoj i promjer mjernog elementa.

Može se uočiti da sustav sadrži devet jednadžbi, a čak deset nepoznanica: *x*, *y*, *z* koordinate točaka T_1 i T_2 i R i polumjer r_p. Za rješavanje sustava jednadžbi potrebno je poznavati (izmjeriti) barem jednu od navedenih veličina. Korištenjem metode za mjerenje srednjeg promjera vanjskog navoja preko valjčića ili unutrašnjeg metodama s T-ticalom ili mjernim čeljustima, iz rezultata mjerenja se vrlo lako može utvrditi udaljenost središta mjernih elemenata *m*, pa tako i *x* koordinata središta mjernog elementa $x_R = \frac{m}{2}$.

Zbog nemogućnosti pronalaska analitičkog rješenja sustava prethodno postavljanih jednadžbi, potrebno je iskoristiti numerički pristup i na taj način doći do rješenja. Numerički alati za

rješavanje sustava nelinearnih jednadžbi rješenje pronalaze iterativnim postupkom i baziraju se na Newtonovom iterativnom koraku. Način na koji se izračunava korak iteracije čini razliku između brojnih metoda koje se danas koriste, među kojima su najzastupljenije metode s područjima pouzdanosti (*trust region methods*), Gauss-Newton metoda, Levenberg-Marquardt postupak i ostale[25] [26]. Budući da je u modelu dodira navoja i mjernog elementa moguće odabrati početne uvjete vrlo blizu rješenja, sve navedene metode će konvergirati k rješenju. U radu je korištena Gauss-Newton metoda zbog brze konvergencije. Bitno je naglasiti da je mogućnost odabira početnih uvjeta ključna za odabir numeričke metode i njene sigurne konvergencije.

Za određivanje početnih uvjeta, odnosno odabira početne dodirne točke i središta mjernog elementa kojima započinje iterativni postupak, može se pretpostaviti model aksijalnog presjeka u $y = 0$ ravnini. Iako takav prikaz ne odgovara stvarnom dodiru, točke T_1^0 , T_2^0 i R^0 se mogu iskoristiti kao početni uvjet, koji se sasvim sigurno nalazi u blizini rješenja navedenog sustava.



Slika 4-18 Određivanje početnih uvjeta

Uz poznavanje koordinate središta mjernog elementa $x_R = x_R^0$ iz geometrijskih odnosa prema slici 8 dobivaju se izrazi:

$$r_p^0 = x_R \mp \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)}$$

$$z_R^0 = \sin\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)}$$

$$y_R^0 = 0 \qquad (4.19)$$

$$x_1^0 = \pm\cos(\beta) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} + x_R \mp \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)}$$

$$y_1^0 = 0 \qquad (4.20)$$

$$z_1^0 = \pm\sin(\beta) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)}$$

$$x_2^0 = \pm\cos(\gamma) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} + x_R \mp \cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)}$$

$$y_2^0 = 0$$

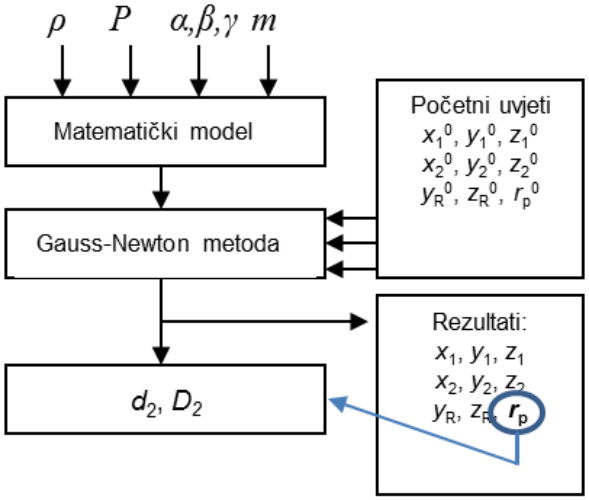
$$z_1^0 = \mp\sin(\gamma) \cdot \frac{\rho}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} \qquad (4.21)$$

Izrazi 4.19 do 4.21 predstavljaju izraze za izračun početnih uvjeta odabranog numeričkog postupka. Numeričko rješenje sustava predstavlja koordinate dodirnih točaka navoja i mjernog elementa T_1 i T_2, koordinate središta mjernog elementa R i iznos polumjera r_p. Uz poznati r_p, srednji promjer se izračunava prema izrazu:

$$d_2, D_2 = 2 \cdot r_p \pm \frac{P}{\tan(\beta) + \tan(\gamma)} \qquad (4.22)$$

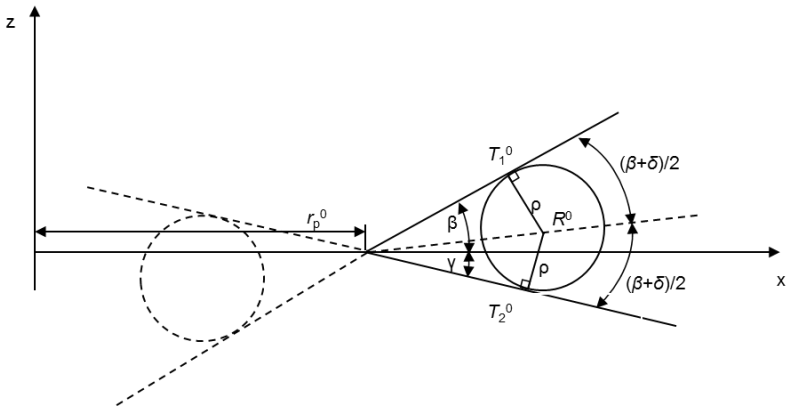
Gornji ± znak odnosi se na vanjski, a donji na unutrašnji navoj.

Prema prikazanom modelu izrađen je program za računanje srednjeg promjera navoja u programskom paketu MatLab 7.0. Blok dijagram programa dan je slikom 4-19.



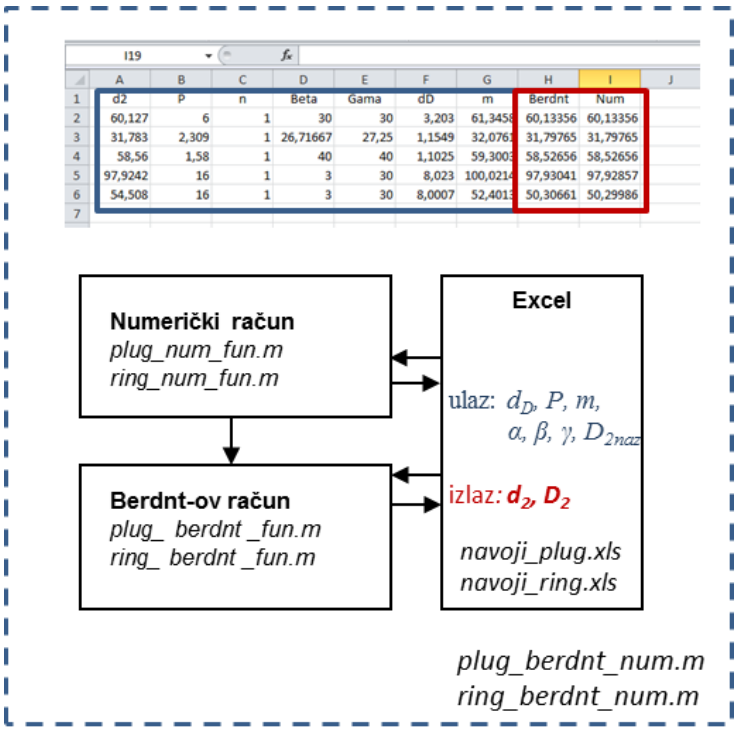
Slika 4-19 Blok dijagram programa za izračun srednjeg promjera

Izračun srednjeg promjera za vanjski i unutarnji navoj izvodi se na isti način, ali uz nešto različite početne uvjete. Pri računanju srednjeg promjera vanjskih navoja početna koordinata središta mjernog elementa x_R^0 mora biti veća od polumjera r_p kako bi se pronašlo rješenje sustava (koordinate dodirnih točaka) koje se nalazi s desne strane korijena. Obratni slučaj odgovara dodiru elementa i unutarnjeg navoja (Slika 4-20).



Slika 4-20 Dodir mjernog elementa s vanjskim i unutarnjim navojem

Radi što jednostavnijeg unosa podataka, izrađene su dvije programske funkcije za računanje srednjeg promjera vanjskih i unutarnjih navoja (*plug_num_fun.m i ring_num_fun.m*). U svrhu usporedbe ovog modela s Berndtovim modelom koji se uobičajeno koristi izrađene su programske funkcije (*plug_berdnt_fun.m i ring_berdnt_fun.m*) za izračun srednjeg promjera prema Berndtovim formulacijama. Skripte *plug_berdnt_num.m* i *ring_berdnt_num.m* objedinjuju unos podataka i ove dvije metode. Ulazni parametri iščitavaju se iz excel tablica (*navoji_plug.xls i navoji_ring.xls*) gdje se pohranjuje i rezultat srednjeg promjera nakon izvršenja programa. Na ovaj način se može izračunati srednji promjer za veliki broj navoja u istom koraku, što se koristi pri određivanju utjecaja kuta i koraka navoja na srednji promjer pomoću Monte-Carlo simulacija, koje su opisane u sljedećem poglavlju. Blok dijagram programa prikazan je slikom 4-21.



Slika 4-21 Verifikacija programa za izračun srednjeg promjera

Usporedni rezultati prikazani su tablicom 4-1. Ulazni parametri (navoji) odabrani su prema primjeru iz EURAMET upute [3] gdje je mjerna sila *F* jednaka nuli.

Tablica 4-1 Rezultati srednjeg promjera izračunati Berndtovim i numeričkim modelom

	d_{2naz} mm	P mm	n	β °	γ °	d_D mm	m mm	Berdnt d_2 mm	Num d_2 mm
Vanjski navoj	60,127	6	1	30	30	3,203	61,3458	60,13356	60,13356
	31,783	2,309	1	26,72	27,25	1,1549	32,0761	31,79765	31,79765
	58,56	1,58	1	40	40	1,1025	59,3003	58,52656	58,52656
	97,9242	**16**	**1**	**3**	**30**	**8,023**	**100,0214**	**97,93041**	**97,92857**
Unutarnji navoj	18,988	6	3	15	15	3,1058	17,6161	18,97489	18,97489
	18,988	6	3	15	15	3,225	17,1211	18,99323	18,99323
	54,508	16	1	3	30	8,0007	52,4013	54,48717	54,49386
	80,8785	6	1	3	30	3,4162	79,1134	81,28455	81,28473
	58,7301	6	1	20	30	3,0232	57,9998	58,7551	58,75513
	39,716	16	1	20	30	8,1825	37,2661	39,68905	39,6904

Tablicom 4-1 je prikazano da ne postoji razlika između rezultata izuzev kod izraženo asimetričnih navoja s velikim kutom uspona gdje dolazi do odstupanja od par mikrometara. Ovakvi navoji vrlo se rijetko pojavljuju u praksi i za ovaj slučaj koristit će se numerički model izračuna srednjeg promjera. Izračunate vrijednosti srednjih promjera vanjskih metričkih navoja sa obje metode prikazane su tablicom I-2 u prilogu 1, dok su vrijednosti srednjeg promjera asimetričnih *S* navoja prikazane u tablici I-3. Za istu veličinu *m* izračunate vrijednosti srednjeg promjera *S* navoja numeričkim i Berndtovim modelom razlikuju se čak do 2 µm. Ova razlika posljedica je aproksimativnog Berndtovog računa te se za umjeravanje asimetričnih navoja preporuča korištenje vektorsko-numeričkog modela. Rezultati dobiveni numeričkim modelom dodatno su provjereni pomoću Catia programa za 3D modeliranje.

4.3.1 Provjera vektorsko-numeričkog modela pomoću Catia softvera

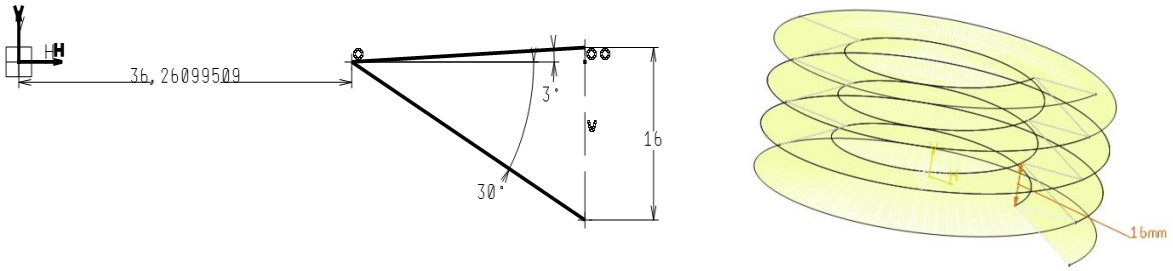
Na primjeru navoja nazivnog srednjeg promjera od 97,9242 mm prikazanog tablicom 4-2 može se uočiti razlika u srednjim promjerima izračunatim prema Berndtovom i vektorsko-numeričkom modelu (zadnja dva stupca) od relativno visokih 1.84 µm. Uzrok ovog neslaganja leži u različitom računu srednjeg promjera. Iako je Berndtov račun uobičajen za izračun srednjeg promjera i preporučen dokumentom [3], u specifičnim slučajevima njegova aproksimacija ima svoja ograničenja što može dovesti do pogreške u izračunatom promjeru na mikrometarskoj razini. Vektorsko-numerički model, s druge strane, egzaktno opisuje geometriju navoja i dodira navoja s mjernim elementnom, međutim, do rješenja se dolazi numeričkim računom, što može rezultirati pogrešno izračunatim srednjim promjerom. Ipak, ova numerička pogreška ne bi trebala biti veća od 10^{-16} mm. Kako je opisano na početku ovog poglavlja, vektorsko-numeričkim računom uz srednji promjer, izračunavaju se koordinate dodirnih točaka, koordinate središta mjernog elementa i teorijski promjer korijena navoja, što nudi dovoljno podataka da se pomoću 3D softvera izradi model navoja i mjernog elementa u dodiru te provjeri sam vektorsko-numerički model.
Za 3D modeliranje korišteno je programsko rješenje Catia V5R20. Za izradu modela navoja potrebno je poznavati kutove profila navoja, korak navoja i promjer korijena navoja *rp*.

Svaki navoj ima drugu vrijednost ovog promjera koji je usko povezan s karakterističnim promjerima navoja. Promjer teorijskog korijena može se direktno izračunati iz vrijednosti srednjeg promjera navoja ako se poznaju kutovi profila i korak navoja. Za navoj srednjeg promjera od 97,92857 mm (Tablica 4-5) izračunati promjer iznosi 36,260995088538031 mm. Bitno je naglasiti da je iznos srednjeg promjera dobiven vektorsko-numeričkim modelom uz mjeru preko valjčića m = 100,0214 mm.

Tablica 4-2 Mjere vanjskog navoja nazivnog srednjeg promjera d_2=97,9242 mm

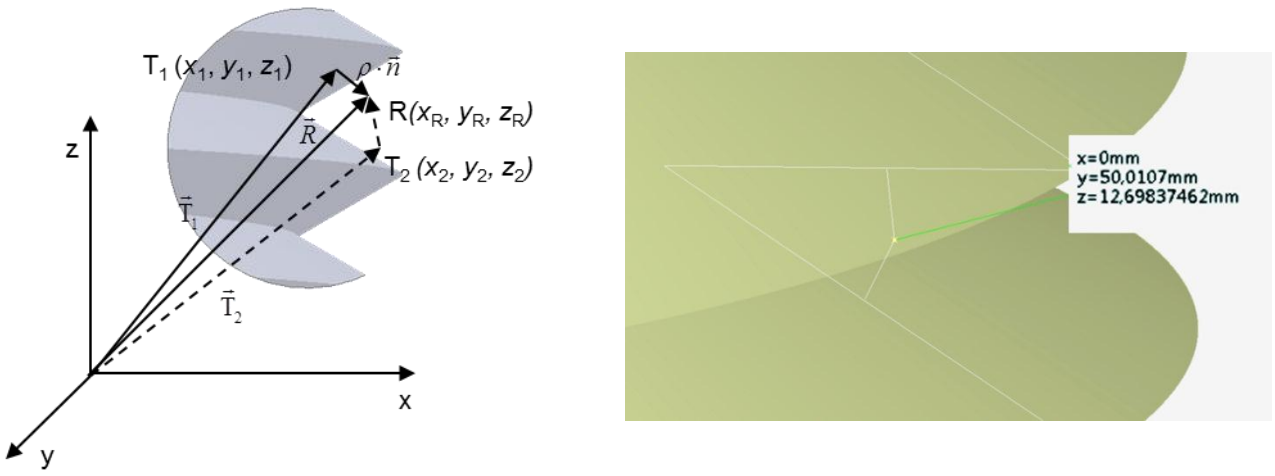
P mm	n	β °	γ °	d_D mm	m mm	Num d_2 mm
16	1	3	30	8,023	100,0214	97,92857

Na slici 4-22 prikazan je teorijski profil i navojna površina na primjeru navoja iz tablice 4-2.



Slika 4-22 3D model navoja d_2 = 97,9242 mm

Uz geometriju navojne površine, izrađen je i model kuglice/valjčića u dodiru s navojem uz uvjet tangencije mjernog elementa s gornjom i donjom navojnom površinom. Kako bi se ovaj dodir mogao ostvariti definirana je zajednička točka kroz koje prolaze normale s obje navojne površine, to jest definirano je središte mjernog elementa. Bilo da je mjerni element valjak ili kuglica, dodirne točke su iste, stoga se zbog lakšeg prikaza pretpostavlja mjerni element u obliku kuglice. Koordinate središta mjerne kuglice koje odgovaraju mjerenju navoja koraka od 16 mm pomoću mjernih elementa promjera d_D = 8,023 mm su: R(50,0107, 0, -3.301625384812626). Koordinata x_R iznosi $m/2$, koordinata y_R je proizvoljna pa može biti jednaka 0, a koordinata z_R se dobiva vektorsko numeričkom računom. Kako bi z_R koordinata bila pozitivna, uvećana je za iznos koraka P.

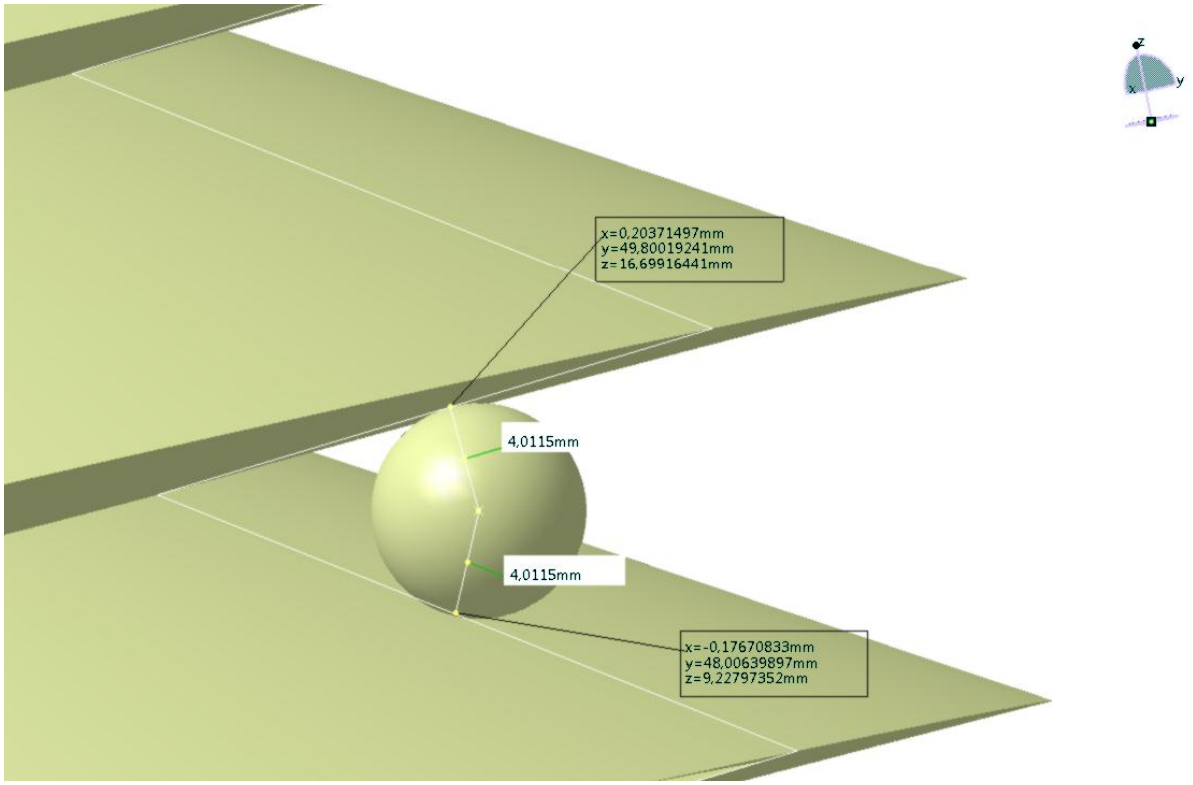


Slika 4-23 Dodir mjernog elementa i navoja

Slika 4-23 predstavlja model mjernog elementa i navoja u dodiru izrađenog prema izračunatim vrijednostima r_p i x_R. Ako izračunate vrijednosti ne odstupaju više od 10^{-8} mm, onda bi duljine normalne na gornju i donju navojnu površinu morale biti međusobno jednake i jednake polumjeru mjernog elementa, što bi dokazalo dodir mjernog elementa s navojnom površinom. Nadalje, koordinate dodirnih točaka mjerene na 3D modelu morale bi odgovarati izračunatim. Na ovaj način verificirat će se rezultati dobiveni v-n modelom. Sljedeća tablica usporedno prikazuje izračunate vrijednosti i vrijednosti izmjerene na 3D modelu.

Tablica 4-3 Koordinate dodirnih točaka dobiveni računom na v-n modelu i mjerenjem na 3D modelu

Dodirna točka	Koordinata	Vek-num račun mm	3D model mm	Razlike mm
T_1	x	49,80019241119440	49,80019241	$-1{,}19 \times 10^{-09}$
	y	-0,20371495632741	-0,20371497	$-1{,}37 \times 10^{-08}$
	z	16,69916441491690	16,69916441	$-4{,}92 \times 10^{-09}$
T_2	x	48,00639896524030	48,00639897	$4{,}76 \times 10^{-09}$
	y	0,17670826115333	0,17670833	$6{,}88 \times 10^{-08}$
	z	9,22797351408455	9,22797352	$5{,}92 \times 10^{-09}$



Slika 4-24 3D model s koordinatama dodirnih točaka

Ovim primjerom su prikazani i provjereni rezultati dobiveni v-n modelom te je uočena razlika na razini od 0,01 µm, što je zanemarivo. Zapravo, ova razlika je realno i manja, što bi se pokazalo povećanjem broja decimala kojima računa CAD softver Catia. Jednaki postupak proveden je za cijeli niz „*S*“ navoja (tablica I-3) i nisu uočene razlike u rezultatima dobivenim v-n i 3D modelom.

Analiza utjecajnih elemenata

Srednji promjer je funkcija veličine m, promjera mjernih elemenata d_D, kuta navoja α (ili kutovima bokova navoja β i γ) i koraka navoja P. Korak i kut navoja dvije su veličine prema kojima su razdvojene različite kategorije umjeravanja (Poglavlje 3.2). Ovisno o kategoriji umjeravanja, isti navoj može imati različite vrijednosti srednjeg promjera iako se mjeri istom metodom. Razlika u srednjem promjeru posljedica je različitog uvrštavanja[14] koraka i kuta navoja u izraze za izračun srednji promjera. Koliko pogreške koraka i kuta navoja utječu na konačni rezultat mjerenja srednjeg promjera ovisi o obliku i dimenzijama navoja koji se mjeri te o promjeru mjernih elemenata. Prema praksi koja se danas koristi, doprinos ovih utjecaja na srednji promjer navoja određuje se u skladu s GUM metodom procjenjivanja mjernih nesigurnosti [15] za svaki navoj pojedinačno. Metoda se temelji na pojednostavljenom Berndtovom modelu (Izraz 3.8) za simetrične navoje s normalnim i blagim kutom uspona. Prethodno je u radu opisan način određivanja srednjeg promjera navoja bez obzira na njegovu geometriju (asimetričnih navoja, viševojnih navoja te navoja s velikim kutom) prema egzaktnom Berndtovom modelu (Izraz 3.10) i vektorsko-numeričkom modelu u kojem se do rješenja dolazi numeričkim putem. Za određivanje doprinosa pogreške kuta i koraka navoja te ostalih (m i d_D) utjecajnih elemenata na rezultat mjerenja srednjeg promjera navoja prema ovim modelima, potrebno je koristiti Monte Carlo simulacije.

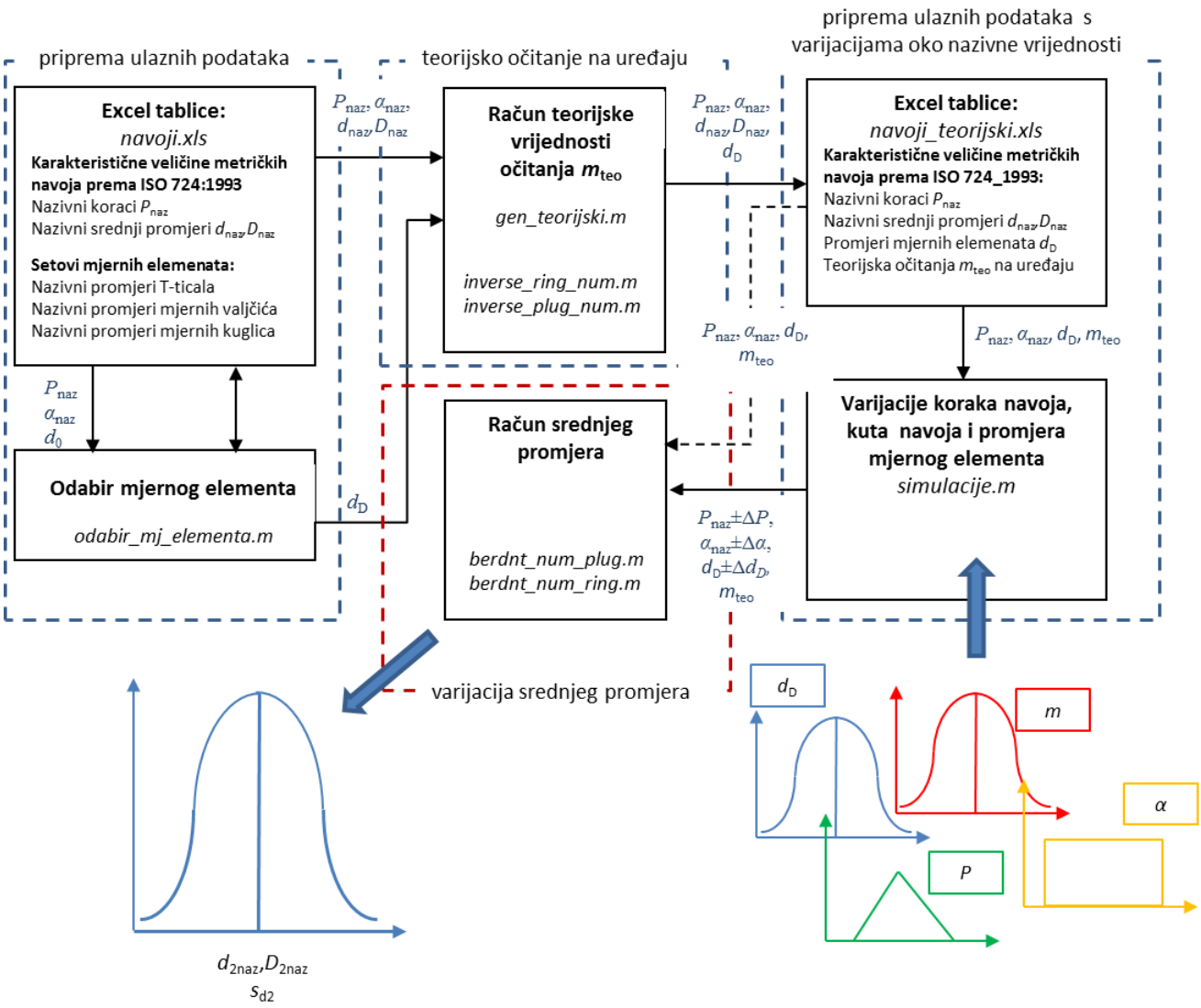
5.1 Numeričke simulacije

Simulacije opisane u ovom poglavlju izrađene su pomoću MATLAB programskog paketa temeljem vektorsko numeričkog modela za izračun srednjeg promjera navoja. Simulirani su procesi mjerenja vanjskih i unutarnjih navoja teorijskih srednjih promjera metodama s T-ticalom, mjernim valjčićima i mjernim čeljustima.

Izrađeni program izvršava se u četiri koraka kako je prikazano slikom 5-1:

- priprema ulaznih podataka za izračun teorijske vrijednosti m_{teo},
- izračunavanje teorijske vrijednosti m_{teo},
- priprema ulaznih podataka za izračun srednjeg promjera,
- izračunavanje srednjeg promjera.

[14] U račun srednjeg promjera mogu se uvrstiti nazivne ili stvarne (izmjerene) vrijednosti kuta i koraka navoja



Slika 5-1 Blok dijagram programa za simulacije

Prvi korak simulacije je priprema ulaznih podataka. Karakteristične veličine metričkih navoja (kut, korak, srednji promjer) propisane su normom ISO 724_1993. U excel tablicama *navoji.xls* nalaze se nazivne vrijednosti koraka i srednjeg promjera metričkih navoja u rasponu od 1 mm do 60 mm i nazivne vrijednosti pilastih *S* navoja. U istoj datoteci nalazi se i tablica nazivnih vrijednosti promjera mjernih elemenata dostupnih iz standardnih setova mjernih valjčića, T-ticala i mjernih kuglica (Prilog 1, Tablica I-1).

Funkcijom *odabir_mj_elementa.m* (prema izrazu 3.18) izračunava se optimalni promjer mjernih elementa d_0 za svaki navoj pojedinačno nakon čega se iz tablice *navoji.xls* odabire mjerni element promjera najbližeg optimalnom d_D. Time je priprema ulaznih podataka završena.

Za razliku od programa za izračun srednjeg promjera, kod simulacije mjernog procesa srednji promjer (uz kut, korak i promjer mjernog elementa) je ulazna veličina, a veličina *m* je nepoznanica koju je potrebno odrediti. Veličina *m* zajednička je za sve metode (Slika 3-18 i Slika 4-7) i predstavlja udaljenost središta mjernih elemenata. Ako se mjeri[15] navoj čiji srednji promjer

[15] simulira proces mjerenja

odgovara teorijskom (nazivnom) srednjem promjeru, veličina *m* označena je kao teorijska vrijednost udaljenosti središta mjernih elemenata m_{teo}. Ova vrijednost izračunava se za parametre metričkih navoja zapisanih u datoteci *navoji.xls*. Izbor promjera mjernih elemenata nije isti kod svih metoda i veličina m_{teo} bit će i u funkciji promjera odabranog mjernog elementa d_D. Pokretanjem programa *gen_teorijski.m* pozivaju se funkcije *inverse_plug_num_fun.m* i*inverse_ring_num_fun.m.* Ove funkcije su zapravo inverzni proces izračunavanja srednjeg promjera navoja opisanog u poglavlju 4.3. Nakon izvršenja programa izračunate vrijednosti m_{teo} zapisuju se u datoteku *navoji_teorijski.xls*. Ova datoteka sadrži tablice *Teo_plug_M*, *Teo_ring_M*,*Teo_jag_M*i *Teo_plug_S* gdje su zapisani kako slijedi: oznaka navoja, nazivni korak navoja, nazivni srednji promjer navoja, promjer mjernog elementa i parametar m_{teo} za svaku od navedenih metoda. Navedene tablice generiraju se prema navojima i mjernim metodama koje se simuliraju, a izdvojene su u prilogu 1. Iz podataka sadržanih u datoteci *navoji_teorijski.xls,* pozivajući funkcije *berndt_num_plug.m* i *berndt_num_ring.m* može se izračunati srednji promjer proizvoljnog navoja prema Berndtovom i vektorsko-numeričkom modelu. U svrhu usporedbe ova dva modela izrađene su tablice I-2 i I-3 (Prilog 1) koje odgovaraju vanjskim *M* i *S* navojima. Metrički navoji su navoji s najširim područjem upotrebe i predstavljaju više od polovice navoja koji se umjeravaju u Laboratoriju. Izrađene tablice olakšat će mjerenje metričkih navoja s obzirom da nude preporučeni promjer mjernog elementa i očekivane vrijednosti očitanja na uređaju. Buttress *S* navoji su navoji s izrazito asimetričnim kutom navoja (3˚ i 30˚) i obrađeni su s namjerom da se istaknu razlike u rezultatima srednjeg promjera izračunatim prema različitim modelima. Željelo se pokazati da i odabir modela za račun može imati značajni utjecaj na vrijednost srednjeg promjera navoja. Zadnji korak u programu odnosi se na Monte Carlo simulacije.

Ako za svaki od metričkih navoja varira pojedina karakteristična veličina (kut, korak, vrijednost očitanja i promjer mjernog elementa) oko svoje nazivne vrijednosti može se odrediti doprinos pojedinog utjecaja na srednji promjer. Programom *simulacije.m* definira se broj podataka (broj varijacija), razdioba svake od karakterističnih veličina te matematički model i mjerna metoda po kojoj se računa srednji promjer.

Dobiveni rezultati su razdiobe srednjeg promjera navoja zadanih u datoteci *navoji.xls*. U nastavku su obrađeni utjecaji koji su zajednički za promatrane metode mjerenja.

5.2 Utjecaj pogreške kuta na srednji promjer navoja

Utjecaj kuta navoja na srednji promjer simetričnih navoja može se odrediti temeljem izraza 5.1:

$$d_2, D_2 = m \mp d_D\left(\frac{1}{sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) \pm \frac{P}{2}\mathrm{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \mp A_1 \pm A_2 \qquad (5.1)$$

Derivacijom izraza 3.8 po $\alpha/2$ dobiva se koeficijent osjetljivosti:

$$c_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot \cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot \sin^2(\alpha/2)} = \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0) \qquad (5.2)$$

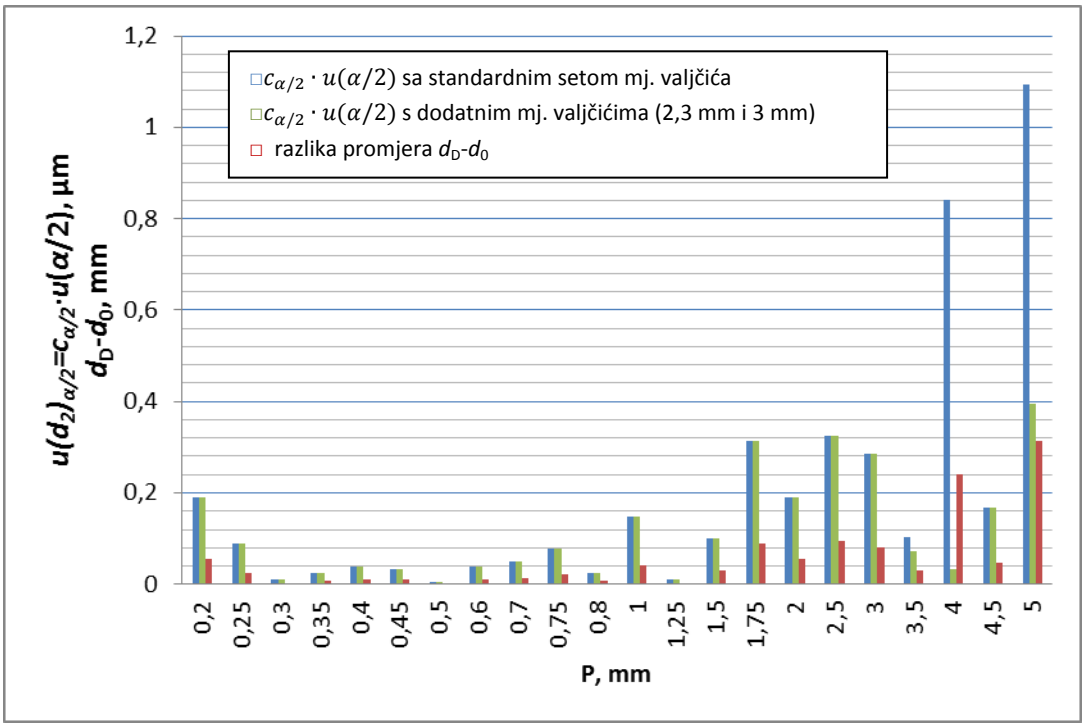
U izrazu 5.1 zanemarena je korekcija mjerne sile A_2 odnosno smatra se da je mjerna sila F = 0. Korekcija nalijeganja mjernog elementa A_1 smatra se konstantom i nije uzeta u obzir njezina ovisnost o kutu navoja.

Doprinos zbog pogreške kuta navoja na srednji promjer može se prikazati u obliku umnoška:

$$u(d_2, D_2)_{\alpha/2} = u(\alpha/2) \cdot c_{\alpha/2} \qquad (5.3)$$

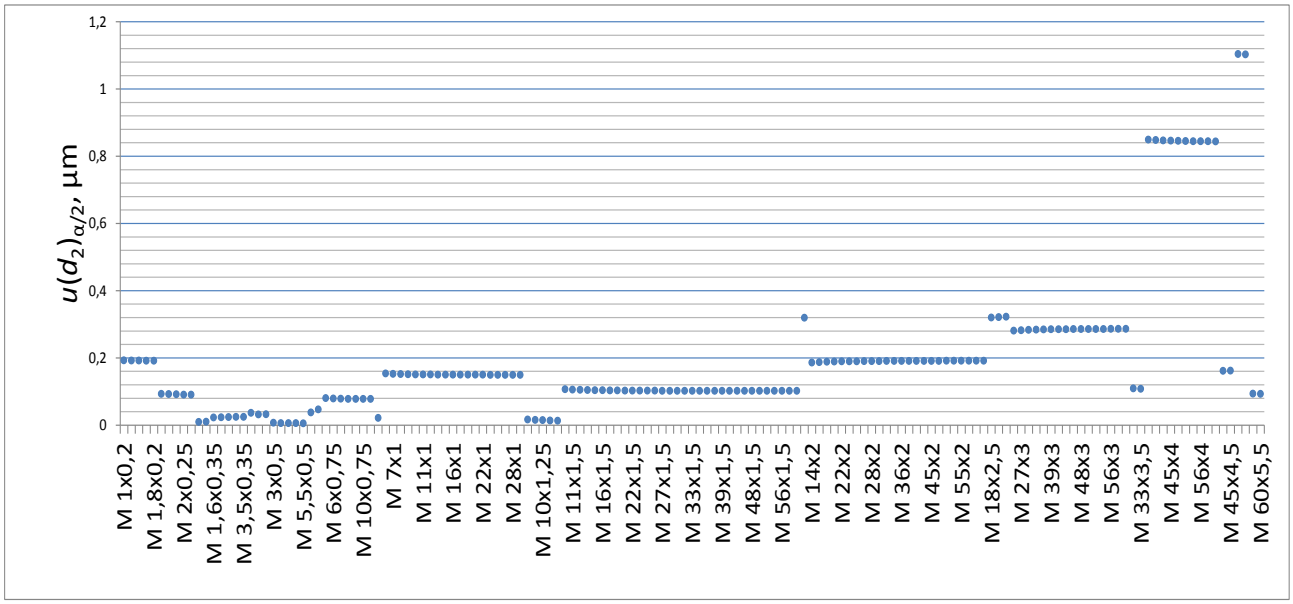
i ovisit će o razlici optimalnog promjera mjernog elementa i promjera mjernog elementa dostupnog iz standardnih setova (d_D - d_0), nazivnom kutu navoja α te o koraku navoja P. Korak navoja neposredno utječe na razliku promjera (d_D - d_0). Na slici 5-2 prikazani su doprinosi pogreške kuta navoja na srednji promjer metričkih navoja ako se koristi metoda mjerenja s tri valjčića uz standardne setove mjernih valjčića, a pretpostavlja se pogreška kuta profila ($\alpha/2$) prema pravokutnoj razdiobi s granicama ±0,1˚. Nisu obrađeni svi metrički navoji, nego su odabrani oni s različitim korakom navoja. Na istom dijagramu prikazana je i razlika (d_D - d_0). Ako se koriste mjerni valjčići iz standardnih setova za mjerenje navoja koraka 4 mm i 5 mm, pogreške kuta značajno će utjecati na izmjerenu vrijednost srednjeg promjera navoja. Ovaj utjecaj se može smanjiti proširenjem standardnih setova mjernih valjčića s dimenzijama od 2,3 mm i 3 mm. Na slici 5-2 podaci označeni plavom bojom predstavljaju doprinos kuta navoja na srednji promjer ako se koristi standardni set mjernih elemenata, a zelenom bojom označen je isti doprinos ako se standardi set proširi s dvije nove dimenzije. Kod mjerenja trapeznih navoja doprinos zbog pogreške kuta navoja je četiri puta izraženiji, s obzirom da je nazivni kut trapeznih navoja dvostruko manji (α = 30˚) stoga je u tom slučaju poželjno koristiti mjerne valjčiće namjenski izrađene što bliže d_0.

5.2.1 Vanjski navoji



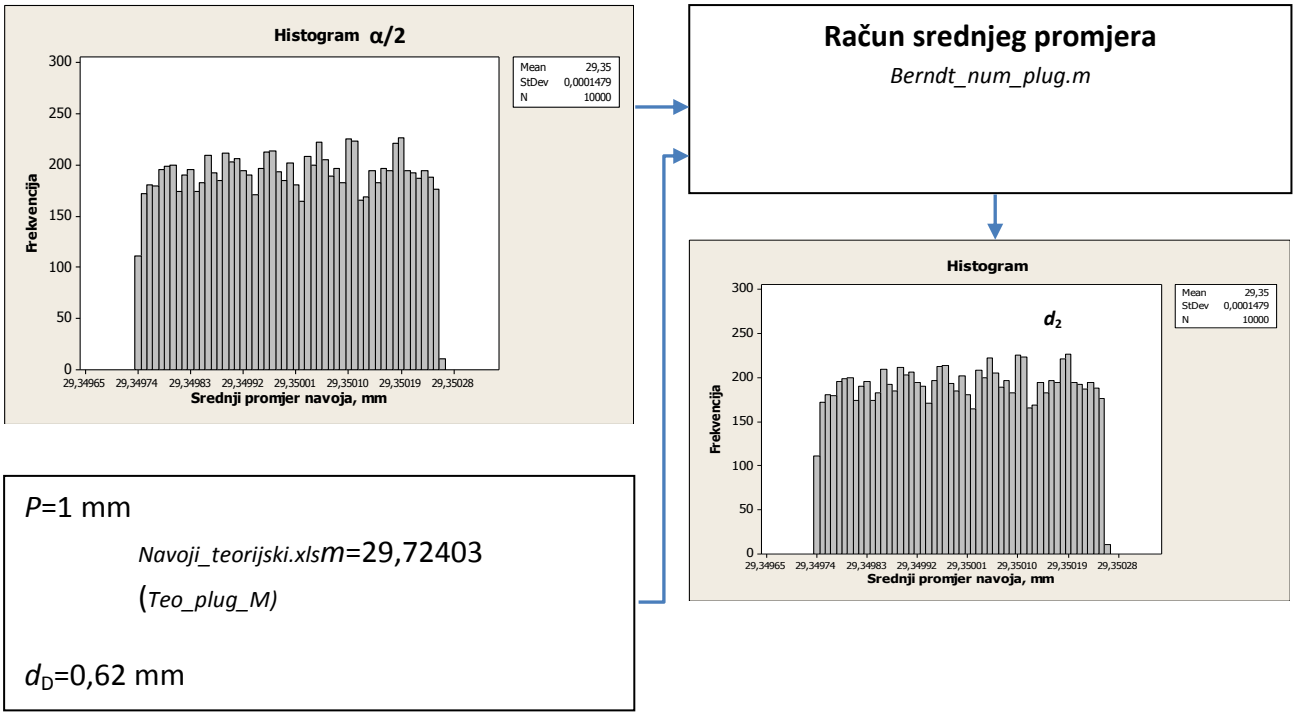
Slika 5-2 Utjecaj pogreške kuta profila od $\alpha/2$ = ±0,1˚na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima)

Utjecaj pogreške kuta prikazan slikom 5-2 određen je prema izrazu 5.3 gdje je srednji promjer funkcija više zavisnih varijabli, što nije uzeto u obzir. Opravdanost zanemarenja ovih zavisnosti vidljiva je na slici 5-3 gdje je isti doprinos određen Monte Carlo simulacijom.



Slika 5-3 Doprinos pogreške kuta profila od $\alpha/2 = \pm 0{,}1^{\circ}$ na srednji promjer metričkih navoja (Monte Carlo)

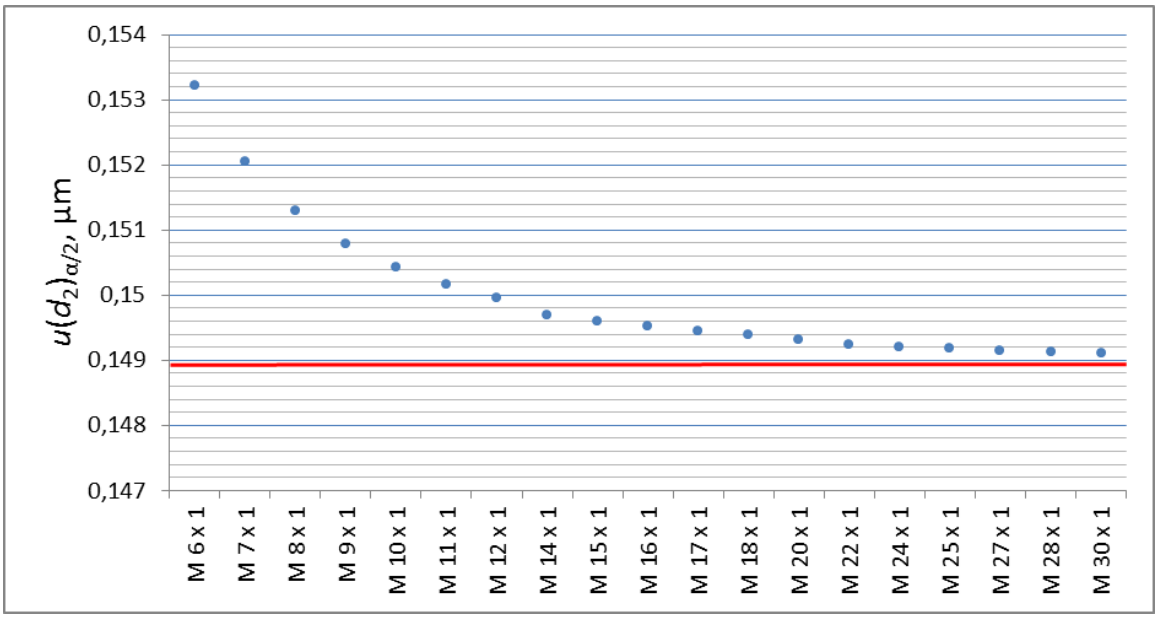
Simulacija je izvedena prema shemi prikazanoj na slici 5-1 gdje je za svaki metrički navoj ponovljen izračun srednjeg promjera 10000 puta s različitom vrijednosti kuta profila uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od ±0,1˚. Ostale ulazne vrijednosti (m_{teo}, d_D i P) zadane su tablicom *Teo_Plug_M* koja odgovara tablici I-2 u prilogu 1. Izlazne veličine su razdiobe srednjeg promjera svakog od standardnih metričkih navoja izračunate po vektorsko numeričkom modelu. Ulazne i izlazne veličine prikazane su na primjeru navoja M 30 x 1:



Slika 5-4 Razdioba srednjeg promjera navoja M 30 x 1

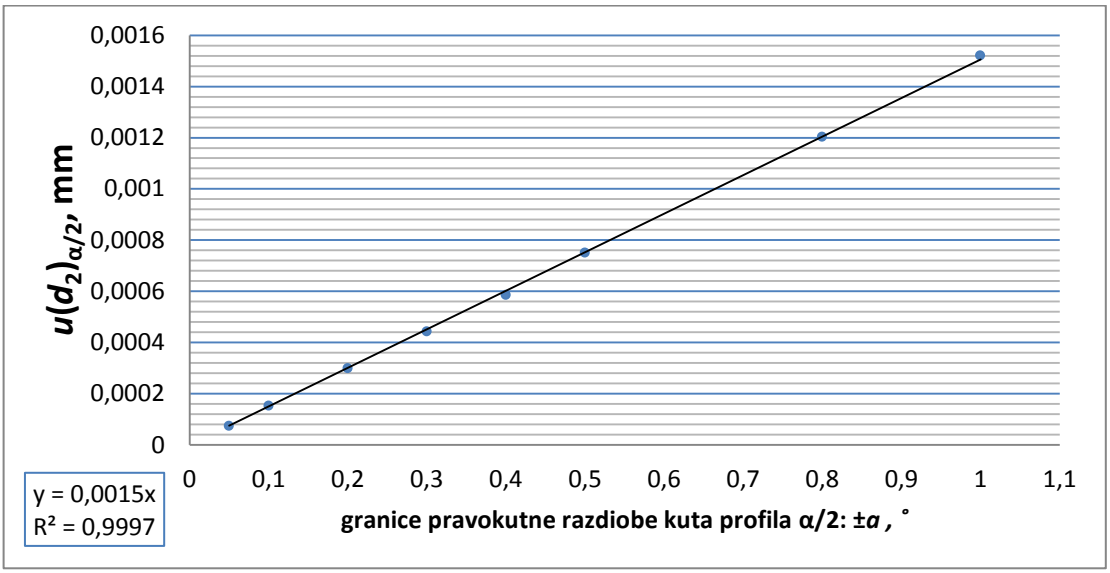
Iz slike 5-4 vidljivo je da razdioba srednjeg promjera ne odgovara normalnoj razdiobi, nego pravokutnoj razdiobi s granicama ±a = 0,258 µm (prema slici 5-4). Doprinos $u(d_2)_{\alpha/2}$ je jednak $\frac{0{,}258}{\sqrt{3}} = 0{,}1489\ \mu m$ što odgovara i analitičkom rješenju: $u(d_2)_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot \cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot \sin^2(\alpha/2)} \cdot u\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{2 \cdot 0{,}62 \cdot \cos(30) - 1}{2 \cdot \sin^2(30)} \cdot \frac{0{,}1}{\sqrt{3}} = 0{,}00149\ mm = 0{,}149\ \mu m.$

Iz slika 5-2 i 5-3 može se zaključiti da doprinos pogreške kuta navoja na srednji promjer značajno ovisi samo o koraku navoja. Slikom 5-5 dane su vrijednosti navoja s korakom 1 mm gdje je pokazano da veličina navoja gotovo da nema utjecaja na srednji promjer (razlika između različitih navoja iznosi manje od 0,01 µm). Crvenom linijom označen je isti doprinos, ali izračunat prema Berndtovom modelu. Vrijednosti doprinosa uslijed pogreške kuta u iznosu od ±0,1˚na srednji promjer prikazane su tablicom I-5 u prilogu 1.



Slika 5-5 Doprinos pogreške kuta na srednji promjer navoja s korakom od 1 mm

Da bi se pokazalo da pogreška kuta ima linearni doprinos na srednji promjer, na primjeru navoja M 30 x 1 simulirane su vrijednosti srednjeg promjera ako pogreška kuta iznosi ±0,05˚, ±0,1˚, ±0,2˚, ±0,3˚, ±0,4˚, ±0,5˚,±0,8˚ i 1˚. Rezultati su prikazani sljedećim dijagramom:

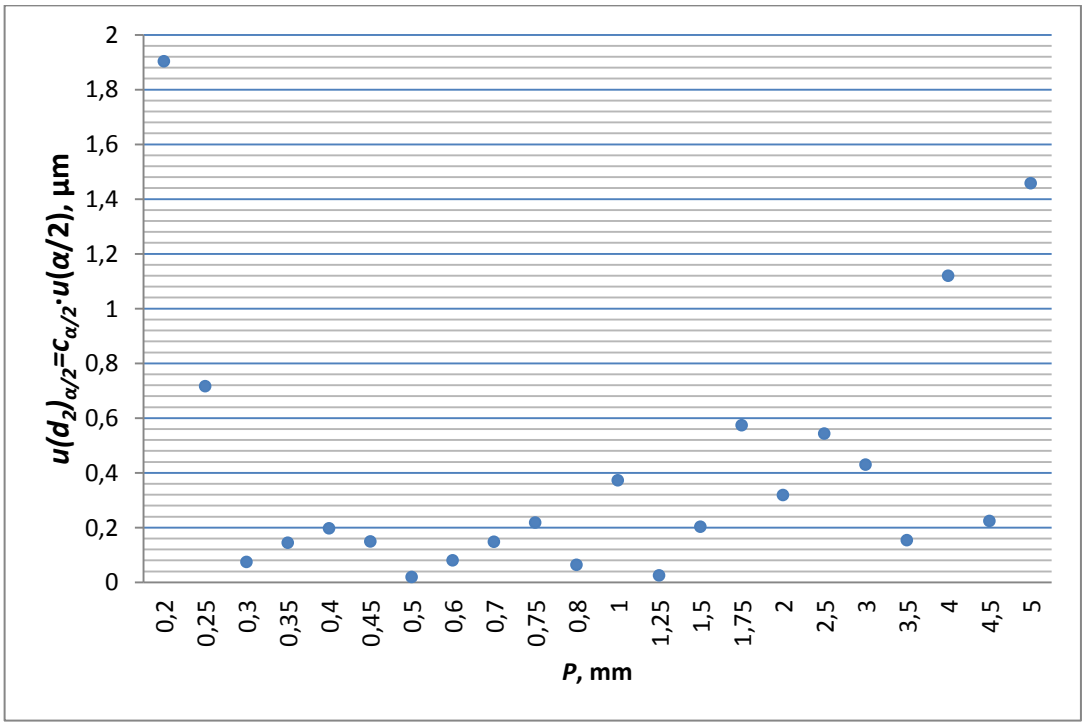


Slika 5-6 Doprinosi zbog pogreške kuta na srednji promjer navoja M 30 x 1

Ako se pretpostavi da se odstupanje kuta profila od nazivne vrijednosti ponaša prema pravokutnoj razdiobi, što je slučaj kod umjeravanja prema 1a i 2a kategoriji, onda se može iskazati:

$u\left(\frac{\alpha}{2}\right) = a/\sqrt{3}$ gdje je a dopuštena granica odstupanja $a = T_{\alpha/2}$. U slučaju metričkih navoja, tolerancijsko polje definirano je normom ISO 1502:1998 i odabire se prema koraku navoja.

Slikom 5-6 prikazano je teorijsko odstupanje srednjeg promjera ako se umjerava navojni čep s kutom profila unutar zahtijevanih granica tolerancija metodom s tri valjčića iz standardnih setova. Ovaj slučaj odgovara kategorijama umjeravanja 1a i 2a.

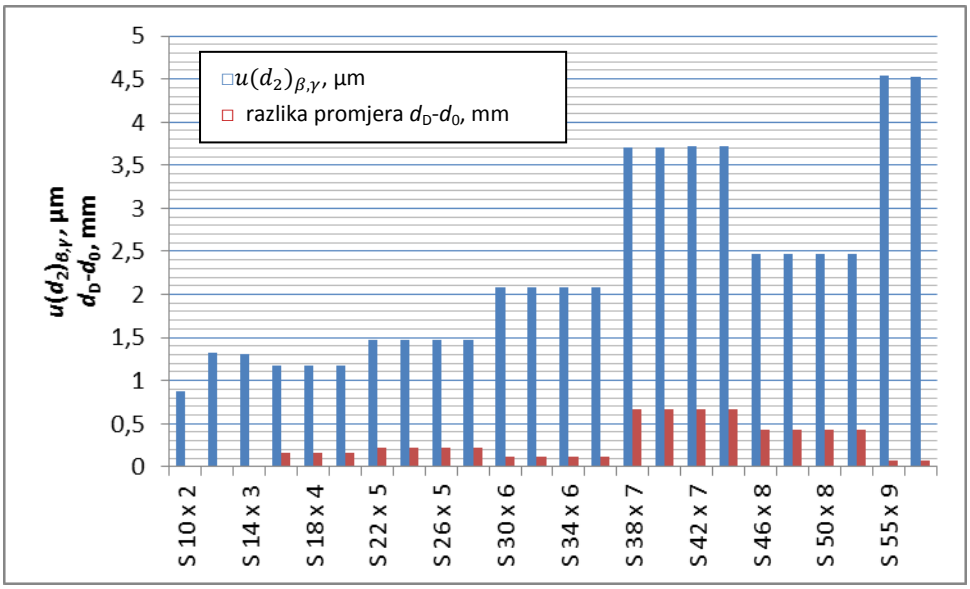


Slika 5-7 Odstupanje srednjeg promjera metričkih navoja ako je kut profila unutar granica dopuštenog odstupanja (metoda s tri valjčića)

Značajniji porast doprinosa primjećuje se kod navoja s korakom 0,2 mm što je posljedica širokog tolerancijskog polja od čak 1˚. Utjecaj pogreške kuta kod ovih navoja dominantna je sastavnica

nesigurnosti rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja prema a kategorijama umjeravanja. Iz tog razloga, navoje koraka manjeg ili jednakog 0,15 mm preporučljivo je mjeriti prema 1b i 2b kategorijama umjeravanja. Kod navoja koraka 4 mm i 5 mm ovaj utjecaj može se smanjiti izradom mjernih valjčića bliže optimalnom promjeru kao što je prikazano slikom 5-2. Sukladno simulacijama koje su prikazane, može se zaključiti da doprinos pogreške kuta na promjer navoja ne prelazi 0,6 µm pod uvjetom da se umjeravanje provodi prema 1a i 2a kategorijama umjeravanja i ako se kritične vrijednosti ovog doprinosa smanje na prethodno opisan način.

Prethodne analize odnosile su se na metričke navoje, međutim isti izraz 5.3 može se primijeniti na sve simetrične navoje s trokutnim osnovnim profilom. Ako se doprinos utjecaja pogreške kuta određuje pri mjerenju srednjeg promjera asimetričnih navoja, potrebno je koristiti Monte Carlo simulacije. Naime, i vektorsko numerički i Berndtov model za asimetrične navoje (Izraz 3.10) predstavljaju funkciju više zavisnih varijabli gdje se do rješenja dolazi iterativnim putem, stoga nije moguće odrediti koeficijente osjetljivosti derivacijom izraza po nekom od utjecaja.



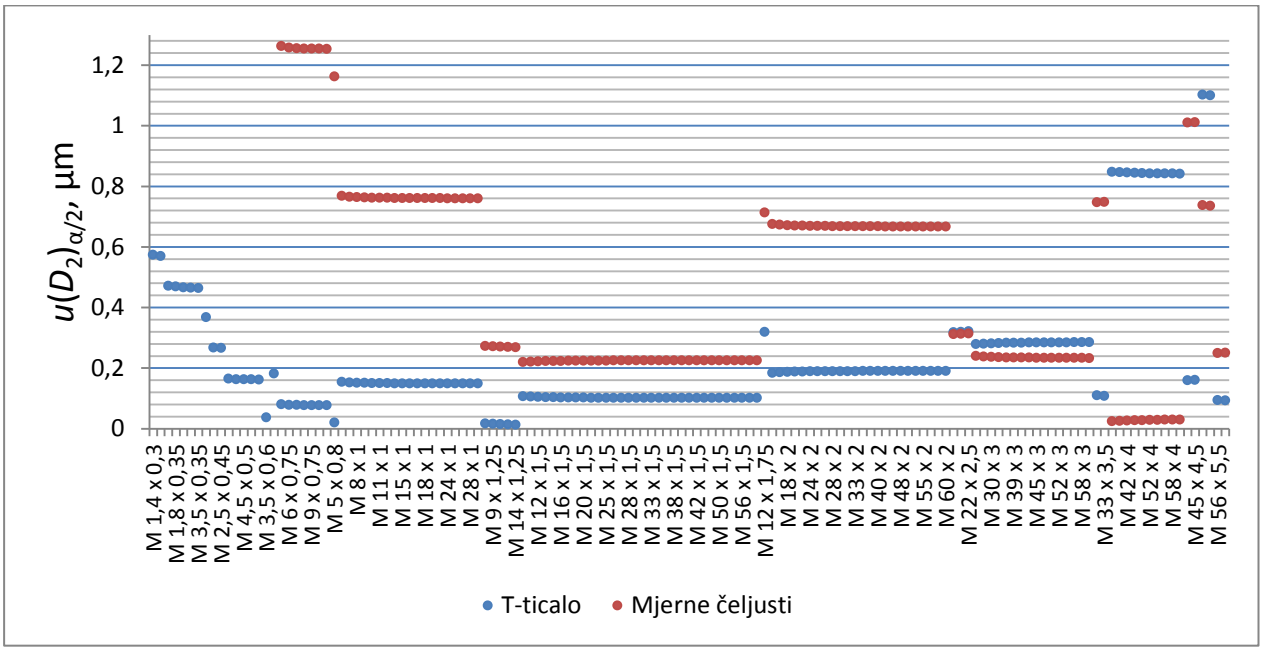
Slika 5-8 Doprinos pogreške kuta profila od *β* = *γ* = ±0,1˚na srednji promjer *S* navoja

Slikom 5-8 prikazan je doprinos pogreške kutova profila *β* i *γ* na srednji promjer navoja. Pogreška je simulirana prema pravokutnoj razdiobi s granicama od ±0,1˚uz 10000 ponavljanja. Srednji promjer izračunat je prema vektorsko numeričkom modelu. Ulazne veličine m_{teo}, d_D, P_{naz} zadane su *Excel* tablicom *Teo_plug_B* koja odgovara tablici I-3 iz priloga 1. Na slici je prikazana i razlika optimalnog promjera odabranog promjera mjernog elementa. Kod asimetričnih navoja ta razlika nije najizraženiji utjecajni element, kao što je to bio slučaj kod simetričnih navoja.

5.2.2 Unutarnji navoji

Doprinos utjecaja pogreške kuta navoja na vrijednost srednjeg promjera unutarnjih navoja određuje se jednako kao i kod vanjskih navoja. Kako se koriste iste matematičke formulacije, ovi doprinosi će se razlikovati samo u vrijednosti (d_D - d_0) s obzirom da se dostupni promjeri mjernih elementa razlikuju ovisno o metodi mjerenja. Tablicom I-1 u prilogu 1 dani su standardni setovi mjernih elemenata za metodu mjerenja s T-ticalom i metodu mjerenja s mjernim čeljustima.

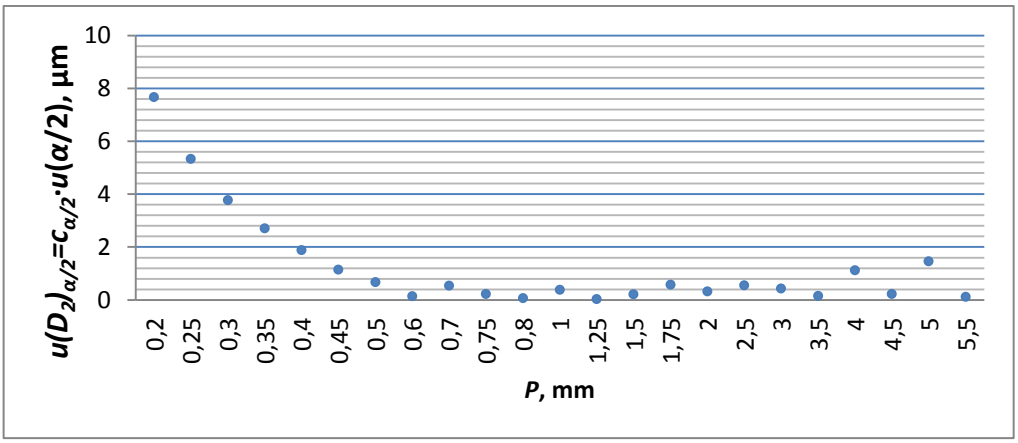
Sljedećim dijagramom usporedno su prikazane vrijednosti doprinosa $u(D_2)_{\alpha/2}$ pri mjerenju srednjeg promjera metričkih navoja s ove dvije metode.



Slika 5-9 Doprinos pogreške kuta profila od $\alpha/2$ = ±0,1˚na srednji promjer unutarnjih navoja (primjenom metoda s T-ticalom i s mjernim čeljustima)

Metoda mjerenja s T-ticalom manje je osjetljiva na ovaj utjecaj od metode s mjernim čeljustima, osim u slučaju mjerenja navoja s korakom od 4 mm. Znatno smanjenje nesigurnosti rezultata mjerenja dobivenih metodom s mjernim čeljustima postiglo bi se proširenjem seta mjernih elemenata koji se koristi uz ovu metodu.

Slikom 5-10 prikazano je teorijsko odstupanje srednjeg promjera ako se umjerava navojni prsten s kutom profila unutar zahtijevanih granica tolerancija metodom T-ticalom. Ovaj slučaj odgovara kategorijama umjeravanja 1a i 2a.



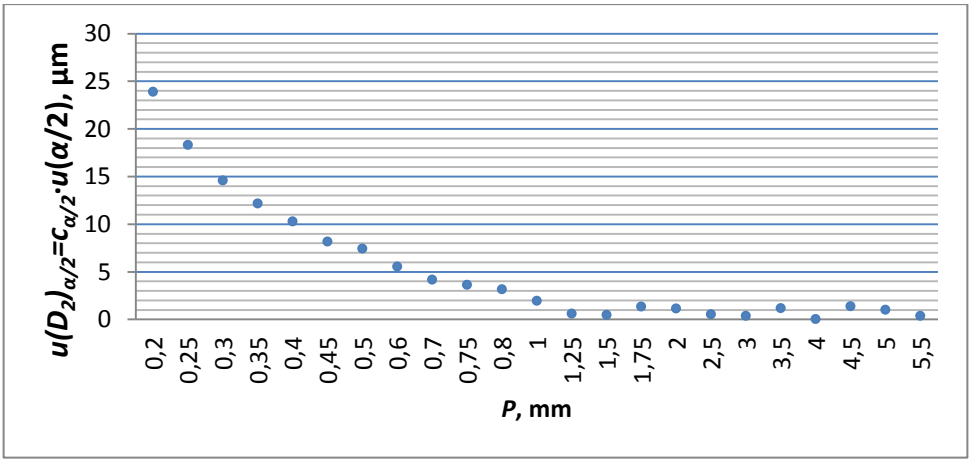
Slika 5-10 Odstupanje srednjeg promjera metričkih navoja ako je kut profila unutar granica dopuštenih odstupanja (metoda s T-ticalom)

Značajni porast ovog doprinosa izražen je kod navoja s korakom manjim od 0,5 mm zbog velikog tolerancijskog polja i promjera T-ticala.

Prema normi ISO 1502:1998 tolerancijsko polje kuta profila navoja α/2 za korake manje od 0,5 mm relativno je veliko (±25' do 1˚). Nadalje, u tom području koristi samo jedno T-ticalo s promjerom

od 0,8 mm što ima za posljedicu veću razliku (d_D - d_0). Mjerenje srednjeg promjera navoja koraka manjeg od 0,5 mm ne preporuča se mjeriti prema 1a i 2a kategoriji metodom s T-ticalom ako se koriste standardni setovi T-ticala. Uz izuzetak navoja s korakom 5 mm, ovaj doprinos će biti ispod 1,2 µm za metričke navoje.

Ista situacija odgovara i metodi s mjernim čeljustima, s tim da je doprinos utjecaja kuta navoja na srednji promjer značajno izražen kod navoja s korakom ispod 1 mm, a kod ostalih metričkih navoja ne prelazi 1,4 µm, što je prikazano sljedećim dijagramom:



Slika 5-11 Odstupanje srednjeg promjera metričkih navoja ako je kut profila unutar granica dopuštenih odstupanja (metoda s mjernim čeljustima)

5.3 Utjecaj pogreške koraka na srednji promjer navoja

Uz pogrešku kuta navoja, pogreška koraka predstavlja najznačajniji utjecaj na srednji promjer navoja. Derivacijom izraza 5.1 po *P* dobiva se koeficijent osjetljivosti:

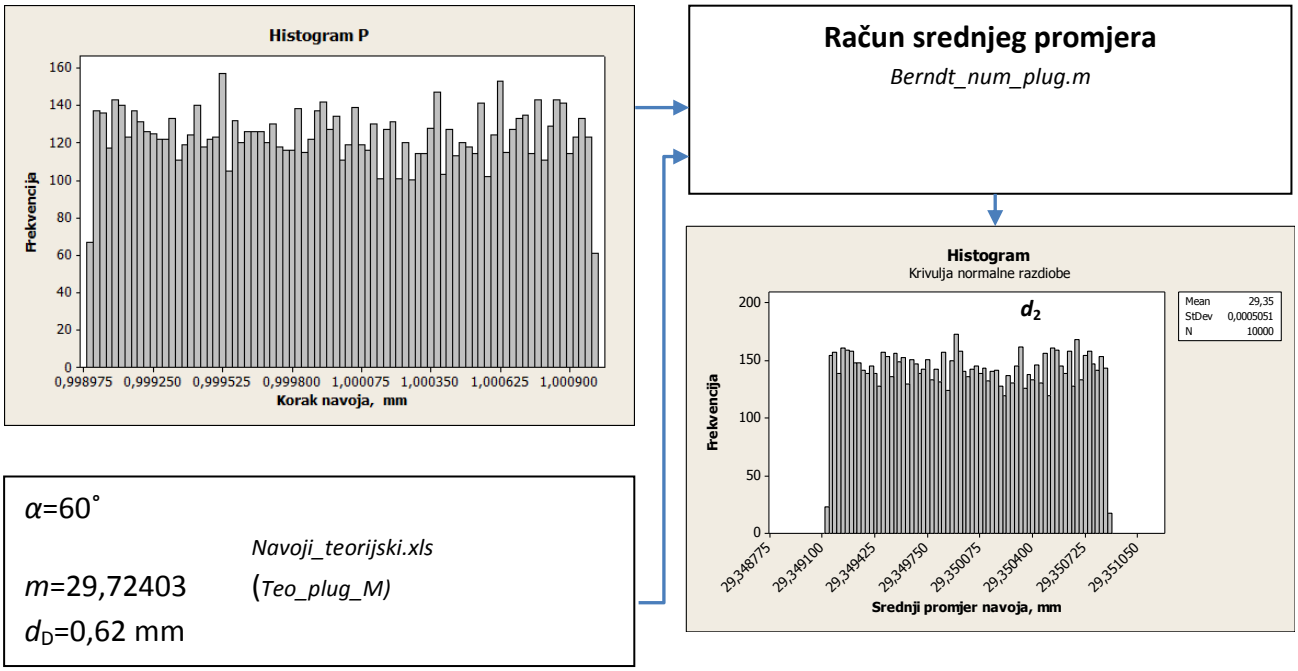
$$c_P = \frac{\mathrm{ctg}(\alpha/2)}{2} \qquad (5.4)$$

U izrazu 5.1 zanemarena je korekcija mjerne sile A_2 odnosno smatra se da je mjerna sila F = 0. Korekcija nalijeganja mjernog elementa A_1 smatra se konstantom i nije uzeta u obzir njezina ovisnost o koraku navoja.

Doprinos pogreške koraka navoja na srednji promjer može se prikazati u obliku umnoška:

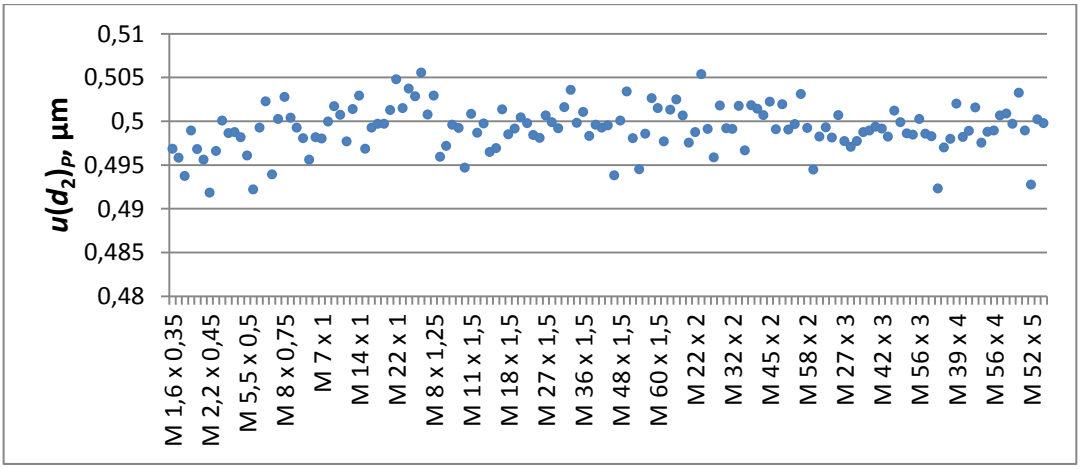
$$u(d_2, D_2)_P = u(P) \cdot c_P \qquad (5.5)$$

Iz izraza 3.21 slijedi da je ovaj utjecaj konstantan za sve metričke navoje bez obzira na njihove karakteristične promjere. Neophodna zanemarenja koja su se primijenila u prethodnim izrazima ne doprinose značajno ovom utjecaju, što je i dokazano Monte Carlo simulacijom. Simulacija je izvedena prema shemi prikazanoj na slici 5-1 gdje je za svaki metrički navoj ponovljen izračun srednjeg promjera 10000 puta s različitom vrijednosti koraka navoja, uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od ±1 mm. Ostale ulazne vrijednosti (m_{teo}, d_D i α) zadane su tablicom *Teo_Plug_M* koja odgovara tablici I-2 u prilogu 1. Izlazne veličine su razdiobe srednjeg promjera svakog od standardnih metričkih navoja izračunate po vektorsko numeričkom modelu. Ulazne i izlazne veličine prikazane su na primjeru navoja M 30 x 1 slikom 5-10.



Slika 5-12 Razdioba srednjeg promjera navoja M 30 x 1

Iz slike 5-12 vidljivo je da razdioba srednjeg promjera ne odgovara normalnoj razdiobi, nego pravokutnoj razdiobi s granicama ±a = 0,866 µm (prema slici). Doprinos zbog pogreške kuta $u(d_2)_P$ jednak je $\frac{0{,}866}{\sqrt{3}} = 0{,}5\ \mu m$ što odgovara i analitičkom rješenju.



Slika 5-13 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±1 µm na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima)

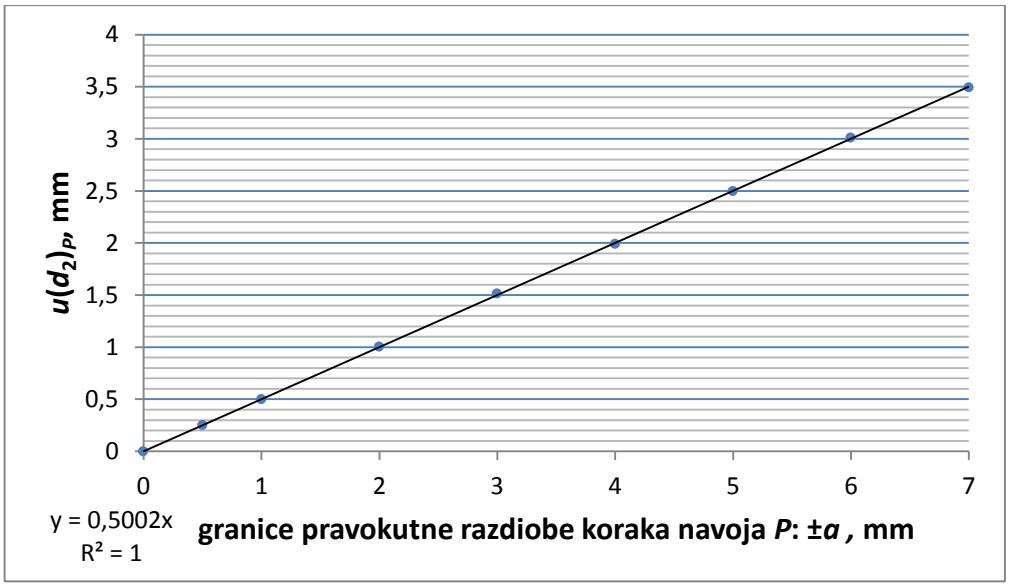
Slika 5-13 prikazuje utjecaj pogreške kuta od ±1 µm na srednji promjer metričkih navoja ako se primjenjuje mjerna metoda s valjčićima. Prosječni doprinos (aritmetička sredina utjecaja pogreške kuta svih navoja) iznosi 0,5 µm što odgovara izrazu 5.6 s uvrštenim vrijednostima kuta profila $\alpha/2$=30° i pogreške koraka navoja, uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od ±1 µm:

$$u(d_2)_P = u(P) \cdot c_P = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \tan(30)} = 0{,}5\ \mu m \qquad (5.6)$$

Varijacija ovog doprinosa za različite navoje je unutar granica od ±0,05 µm i može se zaključiti da se izraz 5.6 može opravdano koristiti za račun doprinosa pogreške koraka na srednji promjer svih

metričkih navoja. U slučaju mjerenja srednjeg promjera trapeznih navoja, utjecaj koraka imat će dvostruko veći doprinos na mjernu nesigurnost rezultata mjerenja zbog toga što je kut profila trapeznih navoja dvostruko manji (α/2 = 15˚).

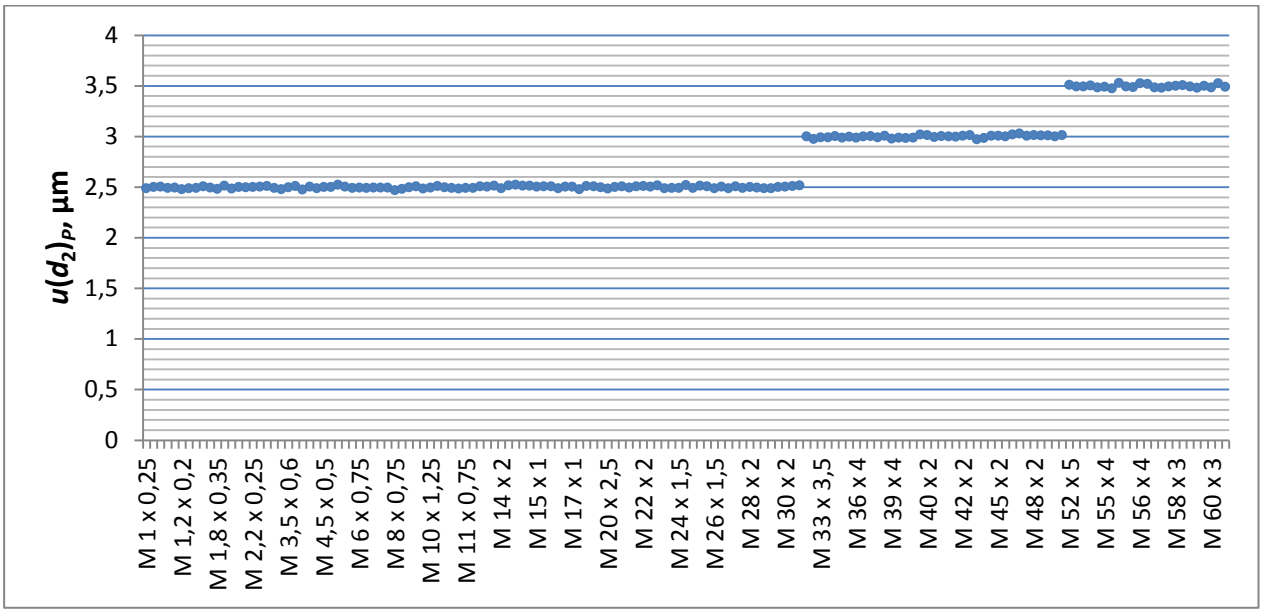
Kako bi se pokazalo da pogreška koraka navoja ima linearni doprinos na srednji promjer, na primjeru navoja M 30 x 1 simulirane su vrijednosti srednjeg promjera ukoliko pogreška koraka iznosi ±0 µm, ±0,5 µm, ±1 µm, ±2 µm, ±3 µm, ±4 µm, ±5 µm, ±6 µm i ±7 µm. Rezultati su prikazani sljedećim dijagramom:



Slika 5-14 Doprinosi pogreške koraka na srednji promjer navoja M 30 x 1

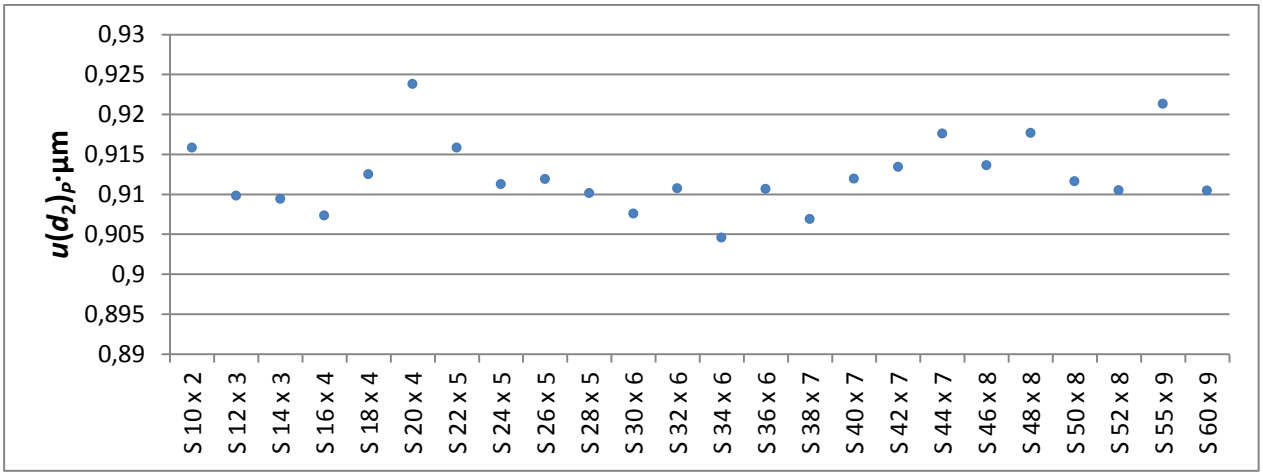
Ako se pretpostavi odstupanje koraka navoja od nazivne vrijednosti prema pravokutnoj razdiobi onda se može iskazati: $u\,(P) = a/\sqrt{3}$ gdje je a dopuštena granica odstupanja $a = T_P$. U slučaju metričkih navoja, tolerancijsko polje definirano je normom ISO 1502:1998 i odabire se prema nazivnom promjeru navoja.

Slikom 5-15 prikazano je teorijsko odstupanje srednjeg promjera ako se umjerava vanjski navoj s korakom unutar zahtijevanih granica tolerancija metodom s tri valjčića.



Slika 5-15 Doprinos pogreške koraka navoja na srednji promjer navoja

Ako se određuje jednostavni srednji promjer prema EURAMET uputi [3] korak navoja se ne mjeri, nego se u račun srednjeg promjera uzima njegova nazivna vrijednost. S obzirom da su dopuštena odstupanja koraka navoja relativno velika (od 5 do 7 µm) razlika između srednjeg promjera i jednostavnog srednjeg promjera može doseći čak desetak mikrometara. Jednostavni srednji promjer nije u funkciji koraka[16] i nesigurnost mjerenja jednostavnog srednjeg promjera bit će manja od nesigurnosti mjerenja srednjeg promjera upravo za doprinos zbog utjecaja koraka. Ako je pogreška koraka mala, ova dva promjera imat će vrlo blisku vrijednost.



Slika 5-16 Doprinos pogreške koraka navoja od 1 µm na srednji promjer *S* navoja

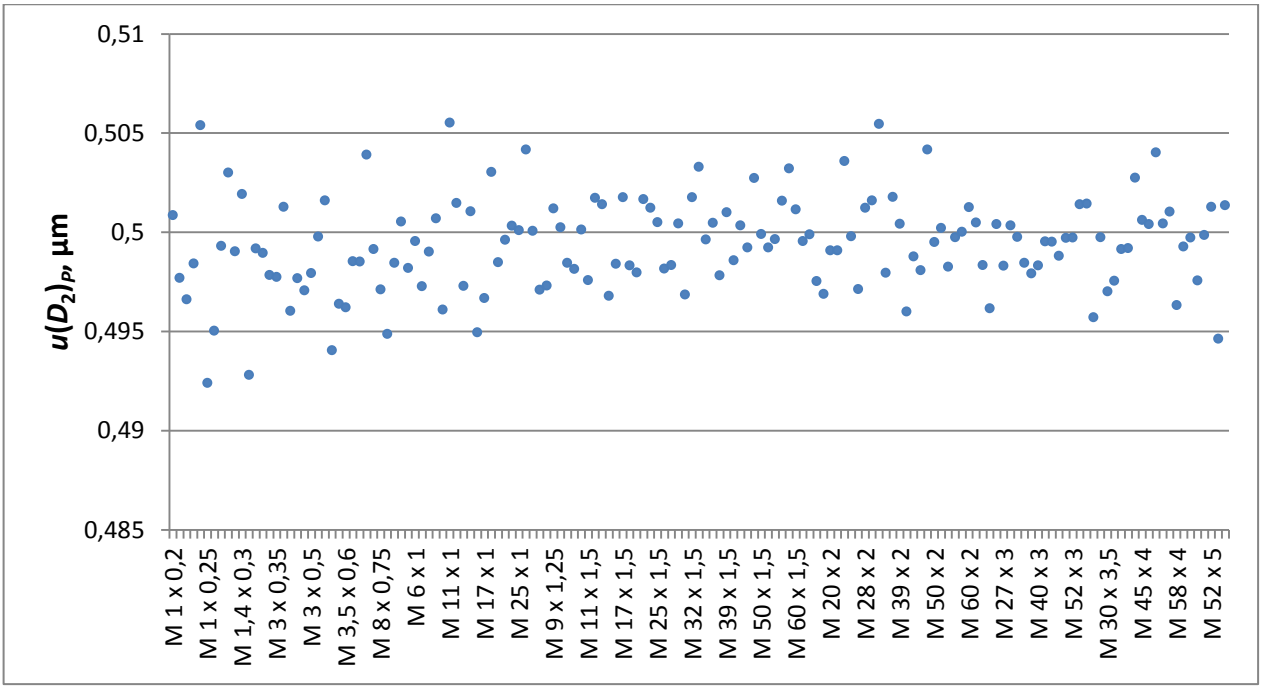
Slika 5-16 prikazuje doprinos pogreške kuta na srednji promjer asimetričnih *S* navoja (β = 3˚ i γ = 30˚) koja prosječno iznosi 0,91 µm (≈ 1 µm). Varijacija ovog doprinosa za različite dimenzije navoja je unutar granica od ±0,02 µm te se može zanemariti. Za asimetrične navoje ovaj utjecaj se može odrediti prema izrazu:

[16] Jednostavni srednji promjer je u funkciji nazivnog koraka

$$u(d_2, D_2)_P = u(P) \cdot c_P = u(P) \cdot \frac{1}{\tan(\beta) + \tan(\gamma)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\tan(3) + \tan(30)} \\ = 0{,}91\ \mu m \approx 1\ \mu m \qquad (5.7)$$

Objašnjenje ovog izraza dano je u poglavlju 5.5.

Određivanje ovog utjecaja pri mjerenju unutarnjih navoja izvodi se prema istim izrazima, a s obzirom da ovisi isključivo o kutu profila navoja, bit će jednak kao i kod vanjskih navoja.



Slika 5-17 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±1 µm na srednji promjer metričkih navoja (mjerna metoda s T-ticalom)

Pri mjerenju navoja metodom s mjernim čeljustima pogreška u koraku navoja više će utjecati na mjerni rezultat. Kod ove metode mjerena veličina m ovisi o koraku navoja, s obzirom da se mjerenje provodi u ravnini pomaknutoj za kut uspona navoja (Izraz 4.3). Ova funkcijska veza nije uzeta u obzir u prethodnim računima i simulacijama i ne smije biti zanemarena pri određivanju mjerne nesigurnosti metode s mjernim čeljustima. Pripadajući koeficijent osjetljivosti u tom slučaju iznosi:

$$c_P = \frac{\frac{P}{2}}{\sqrt{n^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}} + \frac{\mathrm{ctg}(\alpha/2)}{2} \qquad (5.8)$$

5.4 Utjecaj promjera mjernog elementa na srednji promjer navoja

Promjer mjernog elementa u obliku kuglice ili valjčića može se izravno izmjeriti jednoosnim mjernim uređajima na razini mjernih nesigurnosti ispod 1 µm.

Za određivanje utjecaja promjera mjernog elementa pri mjerenju srednjeg promjera simetričnih navoja derivacijom izraza 5.1 po d_D može se odrediti koeficijent osjetljivosti. S obzirom da veličina

m ovisi o promjeru mjernog elementa d_D, koeficijenti osjetljivosti će biti različiti za vanjske i unutarnje navoje:

$$m = L - d_D, \qquad za\ vanjske\ navoje\ (3\ valjčića)$$
$$m = L + C - d_D, \quad za\ unutarnje\ navoje\ (T - ticalo) \qquad (5.9)$$

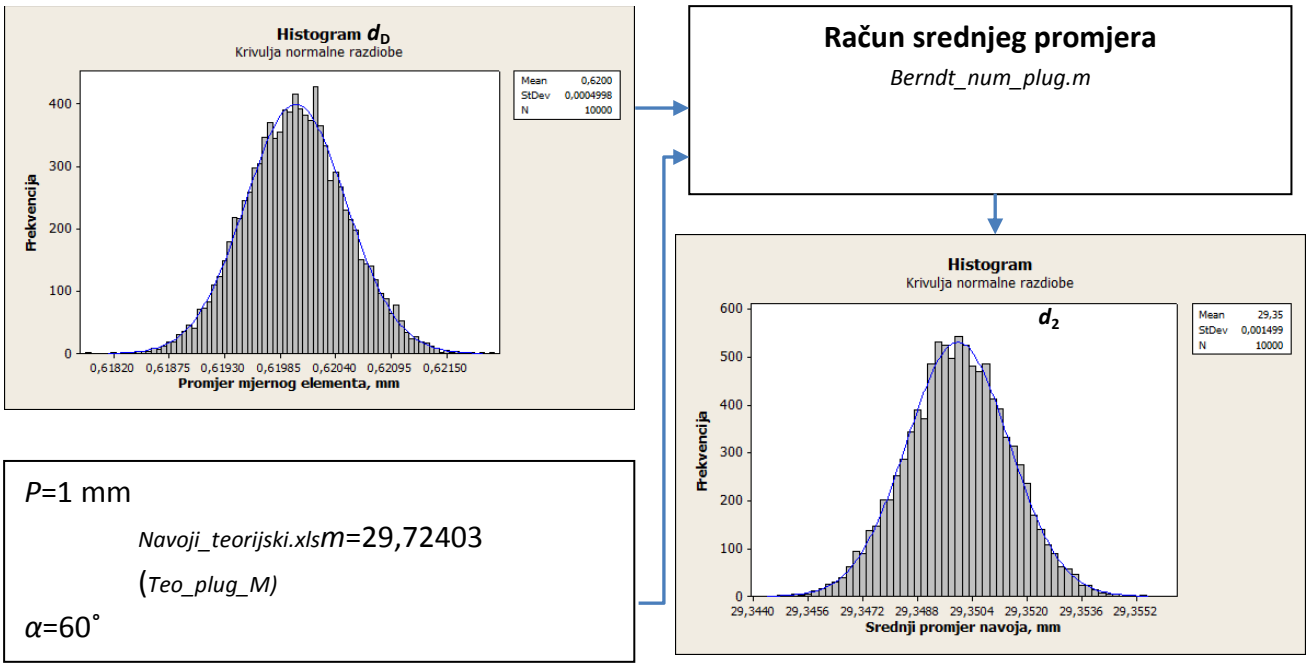
$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} + 1, \qquad za\ vanjske\ navoje$$
$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} - 1, \qquad za\ unutarnje\ navoje \qquad (5.10)$$

U izrazu 5.10 zanemarena je ovisnost korekcije nalijeganja promjeru mjernog elemenata te korekcija zbog mjerne sile.

Doprinos utjecaja mjernog elementa na srednji promjer navoja može se prikazati u obliku umnoška:

$$u(d_2, D_2)_{d_D} = u(d_D) \cdot c_{d_D} \qquad (5.11)$$

Jednako kao i kod određivanja utjecaja pogreške koraka i kuta navoja, provedena je Monte Carlo simulacija.

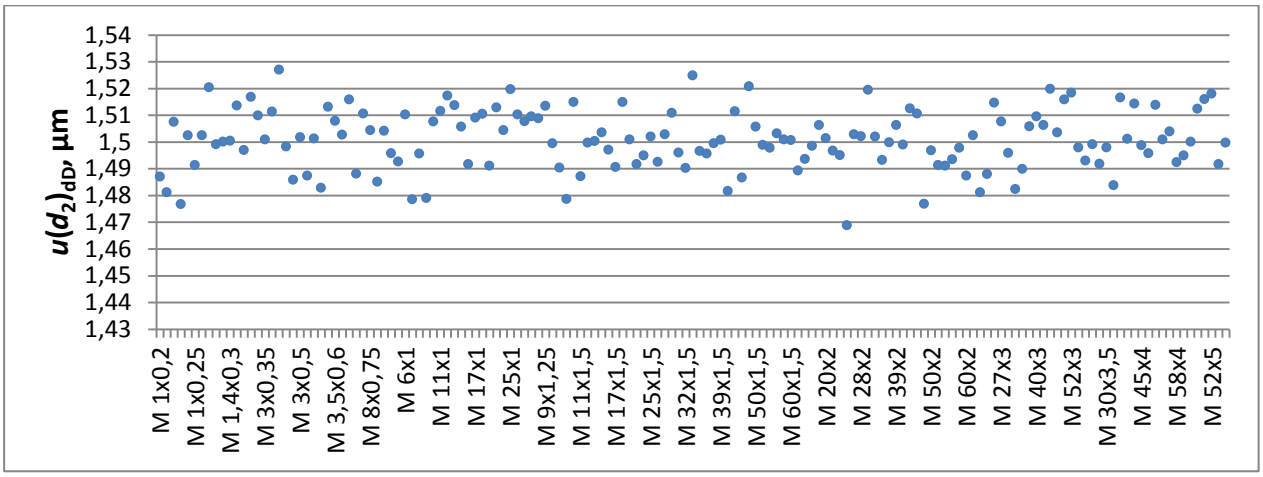


Slika 5-18 Razdioba srednjeg promjera navoja M30x1

Iz slike 5-18 vidljivo je da razdioba srednjeg promjera odgovara normalnoj razdiobi s procijenjenim standardnim odstupanjem od $s(d_2)$ = 1,5µm, što odgovara sljedećem izrazu:

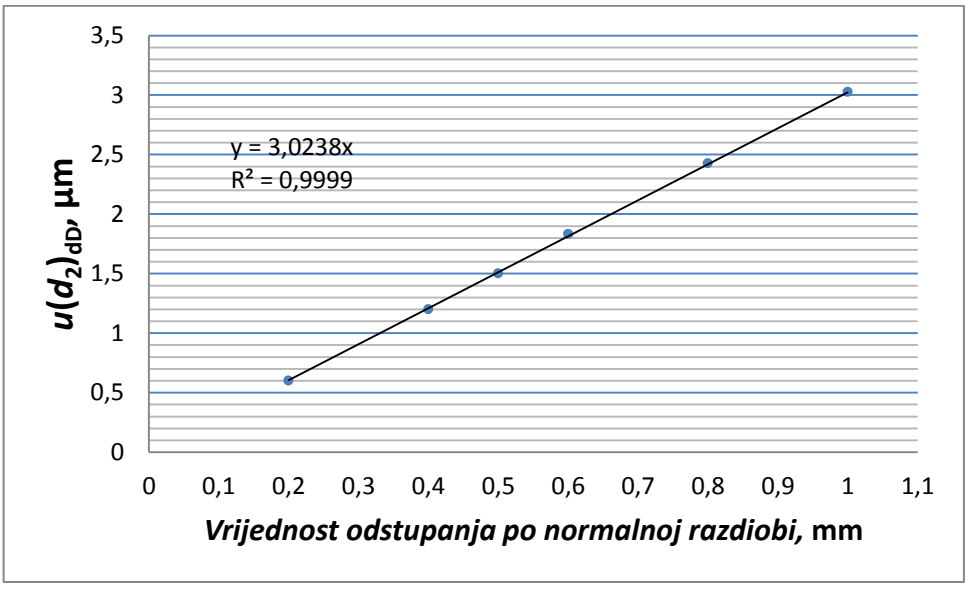
$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 1 = \frac{1}{\sin(30)} + 1 = 3$$
$$u(d_2, D_2)_{d_D} = u(d_D) \cdot c_{d_D} = 0{,}5 \cdot 3 = 1{,}5\ \mu m \qquad (5.12)$$

Ako se ista simulacija provede nad ostalim metričkim navojima, ovaj utjecaj se zanemarivo malo mijenja, bez obzira na karakteristične promjere i korak navoja, što je prikazano sljedećim dijagramom:



Slika 5-19 Utjecaj pogreške promjera mjernog elementa od ±0,5 µm na srednji promjer metričkih navoja
(mjerna metoda s valjčićima)

Dijagram prikazuje utjecaj pogreške u promjeru mjernog elementa na srednji promjer metričkih navoja, ako se primjenjuje mjerna metoda s valjčićima. Prosječni doprinos (aritmetička sredina utjecaja svih navoja) iznosi 1,5 µm što odgovara izrazu 5.12 s uvrštenim vrijednostima kuta profila $\alpha/2$ = 30˚ i pogreškom promjera mjernog valjčića uz pretpostavku normalne razdiobe uz σ = ±0,5 µm i $\mu = d_D$. Varijacija ovog doprinosa za različite navoje je ispod 0,02 µm što se može smatrati zanemarivim. Kako bi utvrdio linearni doprinos utjecaja mjernog elementa na srednji promjer, na primjeru navoja M 30 x 1 su simulirane vrijednosti srednjeg promjera s pogreškama od: ±0 µm, ±0,2 µm, ±0,4 µm, ±0,5 µm, ±0,6 µm, ±0,8 µm i ±1 µm. Rezultati su prikazani sljedećim dijagramom:



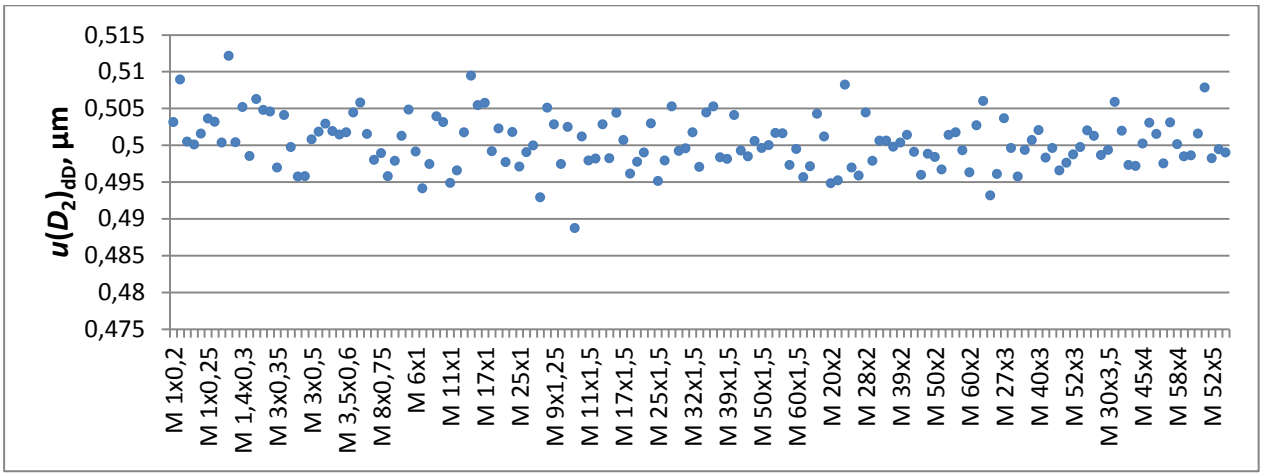
Slika 5-20 Doprinosi pogreške promjera mjernog elementa na srednji promjer navoja M 30 x 1

Pri mjerenju unutarnjih navoja ovaj utjecaj se računa prema izrazu 5.10 i za slučaj metričkih navoja iznosi:

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 1 = \frac{1}{\sin(30)} - 1 = 1$$

$$u(D_2)_{d_D} = u(d_D) \cdot c_{d_D} = 0{,}5 \cdot 1 = 0{,}5\ \mu m \qquad (5.13)$$

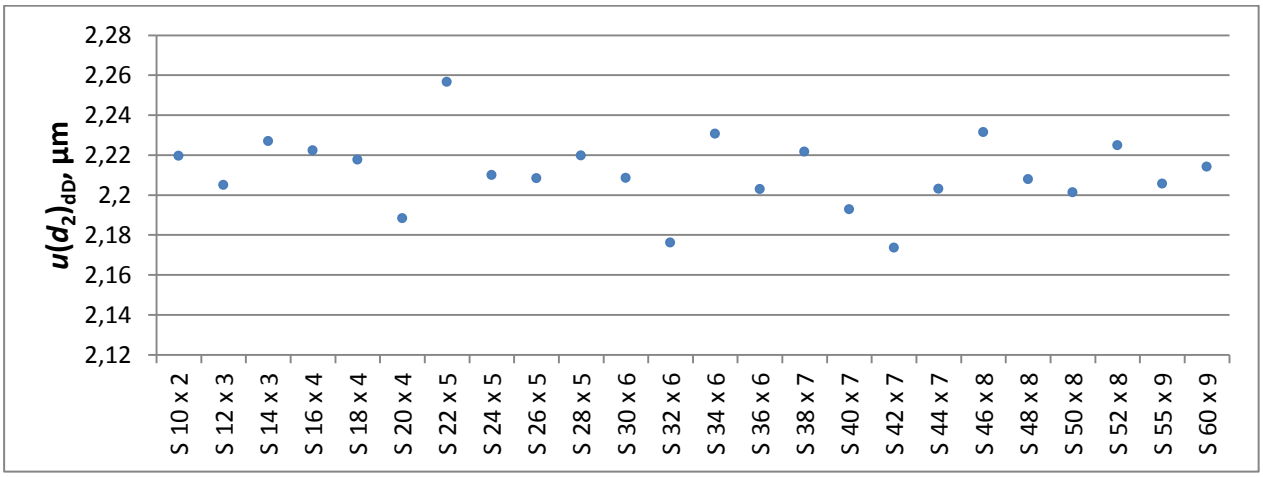
što je potvrđeno i Monte Carlo simulacijom:



Slika 5-21 Utjecaj pogreške promjera mjernog elementa od ±0,5 µm na srednji promjer metričkih navoja
(mjerna metoda s T-ticalom)

Dijagram prikazuje utjecaj pogreške u promjeru mjernog elementa na srednji promjer unutarnjih metričkih navoja ako se primjenjuje mjerna metoda s T-ticalom. Prosječni doprinos (aritmetička sredina utjecaja svih navoja) iznosi 0,5 µm što odgovara izrazu 5.13 s uvrštenim vrijednostima kuta profila $\alpha/2$ = 30 ˚ i pogreškom promjera mjernog valjčića uz pretpostavku normalne razdiobe uz σ = ±0,5 µm i $\mu = d_D$. Varijacija ovog doprinosa za različite navoje ispod je 0,004 µm što se može smatrati zanemarivim. Izraz 5.13 se može primijeniti i kod metode s mjernim čeljustima, iako ove dvije metode nemaju isti matematički model. Dobiveni doprinos bit će neznatno veći u odnosu stvarnu vrijednost, što proizlazi iz činjenice da je kod metode s mjernim čeljustima os mjerenja zakrenuta za kut uspona u odnosu aksijalni presjek navoja.

Provedena je simulacija i za asimetrične navoje što je prikazano dijagramom:



Slika 5-22 Doprinos pogreške promjera mjernog elementa od 0,5 µm na srednji promjer *S* navoja

Slika 5-22 prikazuje doprinos na srednji promjer asimetričnih *S* navoja (β = 3˚ i γ = 30˚) koji prosječno iznosi 2,2 µm. Varijacija ovog doprinosa za različite dimenzije navoja je unutar granica od ±0,05 µm te se može zanemariti. Za asimetrične navoje koeficijenti osjetljivosti mogu se odrediti prema sljedećim izrazima:

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\beta+\gamma}{2})} + 1, \qquad za\ vanjske\ navoje$$

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\beta+\gamma}{2})} - 1, \qquad za\ unutarnje\ navoje \tag{5.14}$$

Za vanjske *S* navoje mjerene metodom s tri valjčića ovaj doprinos bit će:

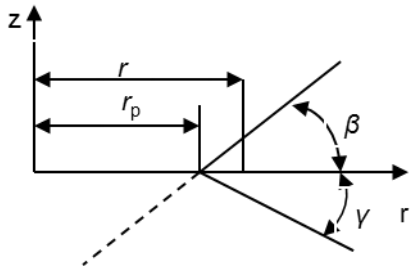
$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} + 1 = \frac{1}{\sin(16{,}5)} + 1 = 4{,}5$$

$$u(d_2)_{d_D} = u(d_D) \cdot c_{d_D} = 0{,}5 \cdot 4{,}5 = 2{,}25\ \mu m \tag{5.15}$$

Što odgovara dijagramu prikazanom slikom 5-22.

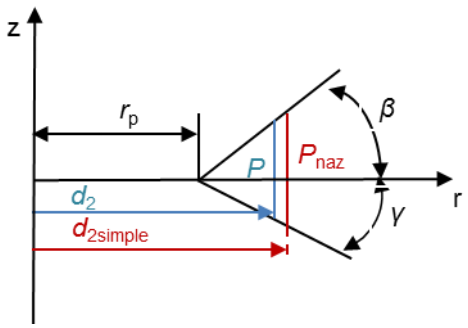
5.5 Utjecaj koraka navoja na teorijsku udaljenost korijena navoja r_p

Polumjer r_p je teorijska veličina kojom se definira teorijski profil trokutastog oblika.



Slika 5-23 Teorijski trokutni profil navoja

Ovaj polumjer uz kutove profila i korak u cijelosti opisuje geometriju navoja pa se mjerenje srednjeg promjera navoja zapravo svodi na mjerenje ovog polumjera. Srednji promjer navoja izračunava se preko mjere r_p v-n modelom, kao što je već spomenuto u poglavlju 4.3.



Slika 5-24 Srednji promjer i jednostavni srednji promjer navoja

gdje je:

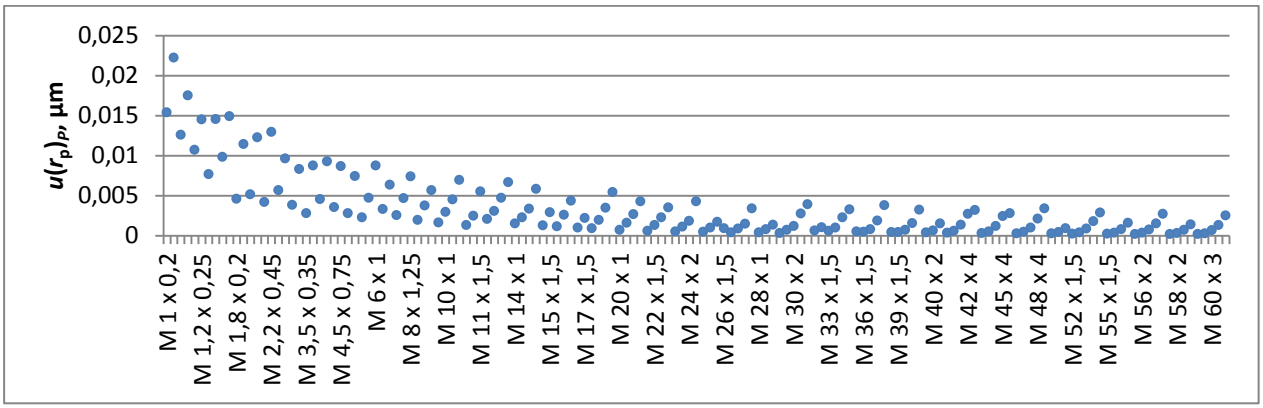
$$d_2, D_2 = 2 \cdot r_p \pm \frac{P}{\tan(\beta) + \tan(\gamma)}$$

$$d_{2simple}, D_{2simple} = 2 \cdot r_p \pm \frac{P_{naz}}{\tan(\beta) + \tan(\gamma)} \qquad (5.16)$$

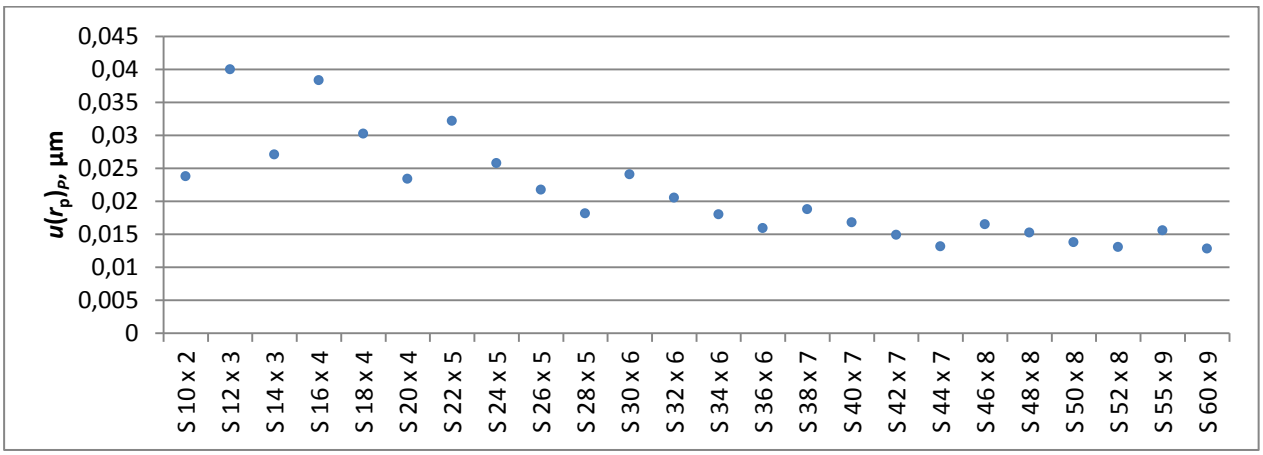
Ako pogreška koraka navoja značajno ne utječe na mjerenje polumjera r_p onda se može tvrditi da jednostavni srednji promjer nije u funkciji koraka navoja, a srednji promjer navoja ovisi o koraku i u tom slučaju, koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_p = \frac{1}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad ili \quad c_p = \frac{1}{\tan(\beta) + \tan(\gamma)} \qquad (5.17)$$

Monte Carlo simulacijom dokazano je da se vrijednost polumjera korijena navoja zanemarivo mijenja s varijacijom koraka od čak ±10 µm, uz pretpostavku pravokutne razdiobe. Simulacija je provedena za metričke i *S* navoje uz 10000 ponavljanja, što je prikazano sljedećim dijagramima:



Slika 5-25 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±10 µm na polumjerr_P metričkih navoja (mjerna metoda s valjčićima)



Slika 5-26 Utjecaj pogreške koraka navoja od ±10 µm na polumjer r_P *S* navoja (mjerna metoda s valjčićima)

Isti zaključci mogu se primijeniti i na mjerenje unutrašnjih navoja metodom s T-ticalom. Međutim, kod metode s mjernim čeljustima r_p je uvijek u funkciji koraka navoja s obzirom na zakrenutu os

mjerenja, stoga je za očekivati da će rezultati mjerenja jednostavnog promjera značajno odstupati od onih dobivenih metodom s T-ticalom. Može se zaključiti da metoda s mjernim čeljustima nije pogodna za mjerenje jednostavnog srednjeg promjera ako korak navoja značajno odstupa od nazivnog koraka. S druge strane, ako se određuje srednji promjer navoja i ako se korak navoja mjeri, rezultati dobiveni s obje metode moraju biti usporedivi.

5.6 Utjecaj temperature

Uobičajeni okolišni uvjeti se održavaju unutar granica temperature od 20˚C ± 0,5 ˚C u većini svjetskih mjeriteljskih laboratorija. Nadalje, mjerenju se ne pristupa ako nije provedeno temperiranje navojnih graničnih mjerenja dok se temperatura mjerila ne izjednači s temperaturom okoliša unutar ± 0,1 ˚C. Ako su ovi uvjeti zadovoljeni, utjecaj temperature na srednji promjer navoja nije velik, ali ne može se zanemariti. Recentna uputa za umjeravanje navojnih graničnih mjerila ovaj utjecaj ne ističe posebno, niti ga izravno uvrštava pri proračunu mjerne nesigurnosti. Ako se može pretpostaviti linearni model toplinske dilatacije, utjecaj temperature na srednji promjer navoja se može odrediti na isti način kao i kod mjerenja unutrašnjih i vanjskih promjera.

5.6.1 Utjecaj temperature na srednji promjer vanjskih navoja

Matematički model:

$$L = L_{20} + \delta l_T \tag{5.18}$$

$$\delta l_T = L_{20} \cdot \alpha_n \cdot \Delta t_A - L_{20} \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_A + L_{20} \cdot \alpha_n \cdot \Delta t_n - \\ - L_{20} \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i \tag{5.19}$$

gdje je:

- δl_T - Temperaturna korekcija, mm
- L - Mjera preko valjčića, mm
- L_{20} - Udaljenost preko valjčića na temperaturi od 20 ˚C. Temperaturna korekcija može se odrediti prema izrazu: $L_{20} = m_{teo} + d_D$, gdje se m_{teo} odabire prema tablicama I-2 i I-3 iz priloga 1.
- Δt_A - Odstupanje temperature okoliša od referentne temperature $\Delta t_A = T_o - 20\ °C$
- α_i - Koeficijent temperaturnog rastezanja mjerne skale uređaja K^{-1}
- α_n - Koeficijent temperaturnog rastezanja navojnog čepa K^{-1}
- Δt_n - Odstupanje temperature navojnog čepa od temperature okoliša, ˚C $\Delta t_p = T_p - T_o$
- Δt_i - Odstupanje temperature skale mjernog instrumenta od temperature okoliša, ˚C $\Delta t_i = T_i - T_0$

Ako uređaj posjeduje kompenzaciju temperature izraz 5.18 prelazi u oblik:

$$\delta l_T = L_{20} \cdot \alpha_n \cdot \Delta t_A + L_{20} \cdot \alpha_n \cdot \Delta t_n \tag{5.20}$$

$$\delta l_T = L_{20} \cdot \alpha_n \cdot (T_n - 20^{\circ}C) \tag{5.21}$$

5.6.2 Utjecaj temperature na srednji promjer unutarnjih navoja

Metoda s T-ticalom:

Matematički model:

$$D = D_{r20} + \delta t_{D_r} - C_{20} - \delta t_C \tag{5.22}$$

$$L_{20} + \delta t_L = D_{r20} + \delta t_{D_r} - C_{20} - \delta t_C + L - D \tag{5.23}$$

$$L_{20} = m_{20} + d_D - C_{20} \tag{5.24}$$

Iz jednadžbi 5.22 - 5.24 slijedi:

$$L = \overbrace{m_{20} + d_D - \underbrace{(D_{r20} - D) - \delta t_{D_r} + \delta t_C}_{C_{20}}}^{L_{20}} + \delta t_L$$

ili

$$L + (D_{r20} - D) - d_D \underbrace{+\delta t_{D_r} - \delta t_C - \delta t_L}_{-\delta l_T} = m_{20} \tag{5.25}$$

gdje je:

L	-	Očitanje uređaja pri mjerenju navoja, mm Očitanje uređaja na temperaturi od 20 ˚C, mm
L_{20}	-	Temperaturna korekcija može se odrediti prema izrazu: $L_{20} = m_{teo} - C_{naz} + d_D$, gdje se m_{teo} odabire prema tablici I-4 iz priloga 1.
m_{20}	-	Udaljenost središta mjernih kuglica na temperaturi od 20 ˚C, mm
C_{20}	-	Konstanta T-ticala na temperaturi od 20 ˚C, mm
d_D	-	Promjer mjernog elementa na temperaturi od 20 ˚C, mm
D_{r20}	-	Promjer referentnog prstena na temperaturi od 20 ˚C, mm
D	-	Očitanje uređaja pri mjerenju referentnog prstena, mm
δt_{D_r}	-	Korekcija zbog odstupanja temperature referentnog prstena od 20 ˚C, mm
δt_C	-	Korekcija zbog odstupanja temperature T-ticala od 20 ˚C, mm
δt_L	-	Korekcija zbog odstupanja temperature navojnog prstena od 20 ˚C, mm
δl_T	-	Temperaturna korekcija srednjeg promjera, mm

Promjena promjera mjernog elementa nije uzeta u obzir jer se pretpostavlja ista temperatura mjernog elementa pri mjerenju referentnog prstena i navoja. Iako su kuglice T-ticala izrađene od drugačijeg materijala (rubin) temperaturna korekcija konstante T-ticala izvedena je za čelik. S obzirom da su referentni prsten, navoj i T-ticalo izrađeni od čelika, onda su koeficijenti temperaturnog rastezanja jednaki za sve.

Temperaturna korekcija određuje se prema izrazu:

$$\delta l_T = \overbrace{L_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_L - L_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_A}^{\delta t_L} + \overbrace{C \cdot \alpha \cdot \Delta t_c - C \cdot \alpha \cdot \Delta t_A}^{\delta t_C} -$$
$$- \overbrace{(D_{r20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_r - D_{r20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_A)}^{\delta t_{D_r}} \tag{5.26}$$

gdje je:

α	-	Koeficijent temperaturnog rastezanja za čelik, K^{-1}
Δt_L	-	Razlika između temperature navojnog prstena i okolišne temperature, ˚C
Δt_c	-	Razlika između temperature T-ticala i okolišne temperature, ˚C
Δt_r	-	Razlika između temperature referentnog prstena i okolišne temperature, ˚C
Δt_A	-	Razlika između temperature okoliša i 20 ˚C, ˚C

Metoda s mjernim čeljustima:

Matematički model:

$$\delta l_T = \Delta x_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_{\Delta x} - \Delta x_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_A \qquad (5.27)$$

Ako se nulta vrijednost postavlja preko referentnog prstena i ako se pretpostavi da je *n*≈*m* onda vrijedi:

$$\Delta x_{20} = m_{teo} + d_D - D_{r20} \qquad (5.28)$$

Ako se nulta vrijednost postavlja preko mjerki s V-utorom, korekcija se izračunava tako da se D_{r20} zamijeni s:

$$D_{r20} = E + (a + b) - \frac{d_D}{sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + d_D \qquad (5.29)$$

gdje je:

Δx_{20}	-	Očitanje uređaja s mjernim čeljustima na temperaturi od 20 ˚C, mm
α	-	Koeficijent temperaturnog rastezanja za čelik, K^{-1}
$\Delta t_{\Delta x}$	-	Razlika temperature navojnog prstena i temperature okoliša, ˚C
Δt_A	-	Razlika između temperature okoliša i 20 ˚C, ˚C
E	-	Dužina kombinacije planparalelnih graničnih mjerki, mm
$a + b$	-	Konstante mjerki s v utorom, mm
α_{jag}	-	Kut V utora, ˚
m_{teo}	-	Odabire se prema tablici I-4 iz priloga 1.

5.6.3 Utjecaj temperature na kut i korak navoja

Kut navoja ostaje isti s promjenom temperature s obzirom da se koeficijenti temperaturnog rastezanja mogu smatrati jednakim u aksijalnom i radijalnom smjeru navoja.

$$tan\left(\frac{\alpha_{20}}{2} + \Delta\alpha\right) = \frac{P_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}{H_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)} = \frac{P_{20}}{H_{20}} = \tan\left(\frac{\alpha_{20}}{2}\right) \rightarrow \Delta\alpha = 0 \qquad (5.30)$$

Promjena koraka navoja zbog utjecaja temperature može se smatrati zanemarivom u slučaju čeličnih navojnih graničnih mjerila i odstupanja temperature od referentne unutar ±1 ˚C, što je zadovoljeno u većini svjetskih mjeriteljskih laboratorija.

Ako se uzme u obzir da je korak od 6 mm jedan od najvećih koraka standardnih navoja te koeficijent temperaturnog rastezanja za čelik od $\alpha_č = 11 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ maksimalno istezanje može doseći 0,07 µm. Korigirana vrijednost koraka navoja izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$P_{20} = \frac{P}{(1 + \alpha \cdot \Delta T)} \qquad (5.31)$$

gdje je:

α	-	Kut navoja, °
α_{20}	-	Kut navoja na temperaturi od 20 °C, °
H	-	Visina navoja, mm
P	-	Korak navoja, mm
P_{20}	-	Korak navoja na temperaturi od 20 °C, mm

5.6.4 Model utjecaja temperature na dimenzije vanjskih navoja

U svrhu prikaza promjene dimenzija navoja s obzirom na odstupanje temperature navoja od referentne temperature, izrađena je simulacija primjenom metode konačnih elemenata u ANSYS 12.1 programskom paketu. Temperaturni utjecaj prikazan je na primjeru M6x1 vanjskog navoja izrađenog od čelika, uz porast temperature od 1 ˚C. Početni uvjeti, pretpostavke i elementi koji su korišteni u modelu navedeni su kako slijedi:

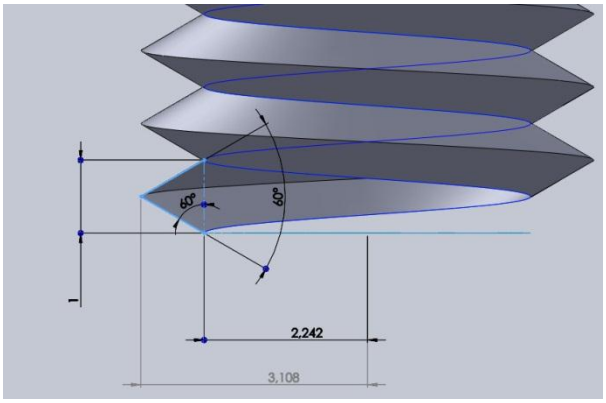
Korišteni element: SOLID 187 – 3D tetraedarski element s 10 čvorova

Modul elastičnosti: 193 GPa

Poissonov koeficijent: 0,29

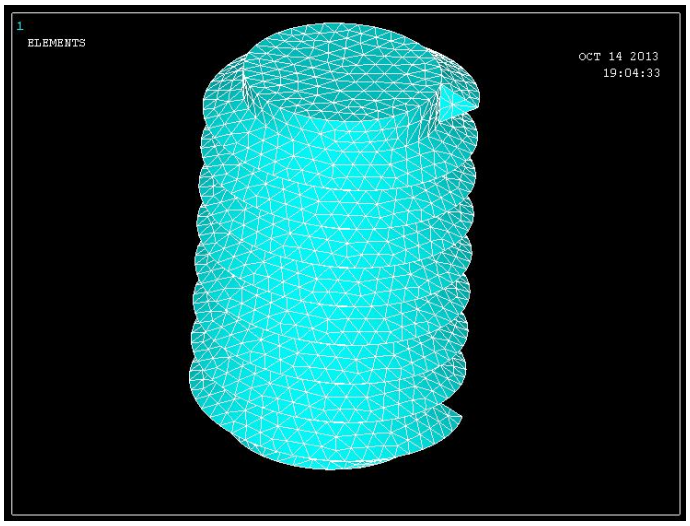
Koeficijent toplinskog istezanja: $11 \cdot 10^{-6}\mathrm{K}^{-1}$ (jednak u sve tri osi)

Dimenzije navoja prikazane su na slici:



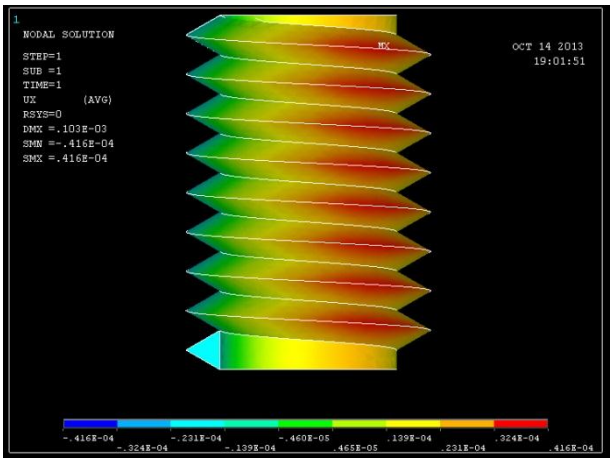
Slika 5-27 Dimenzija navoja M 6 x 1 (visina navoja je 9 mm)

Mreža konačnih elemenata sastoji se od 26088 tetraedarskih elemenata s ukupno 36672 čvora.

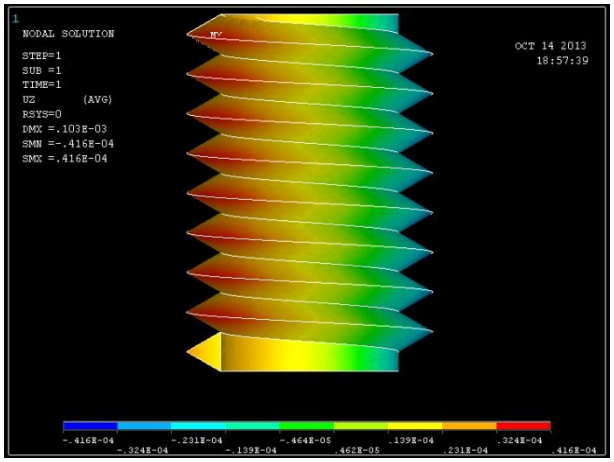


Slika 5-28 Mreža konačnih elemenata "mesh"

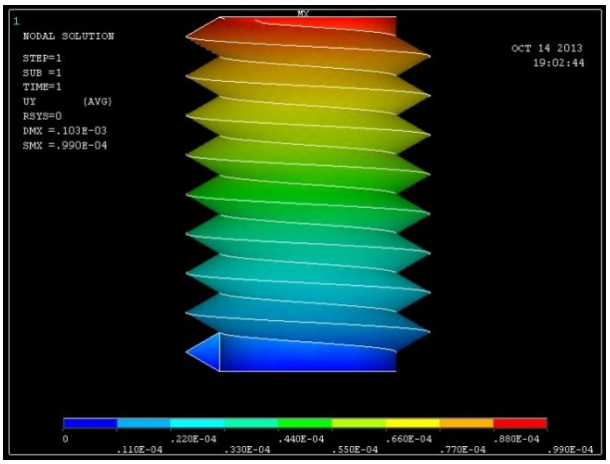
Dobiveni rezultati u potpunosti odgovaraju linearnim izrazima koji su prethodno navedeni u ovom poglavlju.



Slika 5-29 Deformacija navoja u smjeru osi x zbog porasta temperature za 1 ˚C



Slika 5-30 Deformacija navoja u smjeru osi y zbog porasta temperature za 1 ˚C



Slika 5-31 Deformacija navoja u smjeru osi z zbog porasta temperature za 1 ˚C

Mjerne nesigurnosti

U ovom poglavlju određene su nesigurnosti rezultata mjerenja srednjeg promjera paralelnih simetričnih navoja dobivenih metodama:

- Vanjski navoji: metoda s mjernim valjčićima
- Unutarnji navoji: metoda s T-ticalom i metoda s mjernim čeljustima

Mjerne nesigurnosti odnose se na sljedeće navoje:

- Cilindrični (paralelni) simetrični navoji
- Navoji s ravnim bokovima
- Pozitivnih kutova profila navoja
- Jednovojni i viševojni navoji

Proračun mjernih nesigurnosti izrađen je u skladu s uputom za određivanje mjernih nesigurnosti JCGM 100:2008 [15] i JCGM 100:2008 [26]. Pri određivanju mjernih nesigurnosti metoda s mjernim valjčićima i T-ticalom korišteni su izrazi i preporuke ponuđene u dokumentu EURAMET cg-10 [3]. Iako u ovoj uputi nije obrađena metoda s mjernim čeljustima, izrazi za mjernu nesigurnost koji se odnose na metodu s T-ticalom mogu se primijeniti na metodu s čeljustima, uz poštivanje zakrenutosti osi mjerenja u odnosu na bazu navoja (Slika 3-6).

Principi mjerenja i mjerni uređaji koji se koriste u Laboratoriju opisani su u poglavlju 4, a izrazi za račun srednjeg promjera i općeniti proračun mjerene nesigurnosti opisani su u poglavlju 3.4.

6.1 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim valjčićima

Matematički model mjerenja srednjeg promjera:

$$d_2 = l - d_D \cdot \left(\frac{1}{sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 1 \right) + \frac{P}{2} \cdot \mathrm{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A_1 + A_2 + \delta B + \delta l_x - \delta l_T + \delta l_A \qquad (6.1)$$

gdje je:

d_2	-	Srednji promjer navoja, mm
l	-	Očitana vrijednost na mjernom uređaju($L = l + \delta l_x + \delta l_A - \delta l_T$), 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
δB	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja, mm
δl_x	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm
δl_T	-	Temperaturna korekcija, mm
δl_A	-	Korekcija podešavanja mjernih kapica, mm

Sastavljena varijanca srednjeg promjera navoja $u(d_2)$:

$$u^2(d_2) = c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B) + c_{\Delta l}^2 \cdot u^2(l) + c_{\delta l_x}^2 \cdot u^2(\delta l_x) + c_{\delta l_T}^2 \cdot u^2(\delta l_T) + c_{\delta l_A}^2 \cdot u^2(\delta l_A) \quad (6.2)$$

gdje je:

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

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} + 1 \quad (6.3)$$

$u(P)$ - Nesigurnosti mjerenja koraka navoja
Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_P = \frac{\mathrm{ctg}(\frac{\alpha}{2})}{2} \quad (6.4)$$

$u(\alpha/2)$ - Nesigurnosti mjerenja kuta navoja
Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot \cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot \sin^2(\alpha/2)} = \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0) \quad (6.5)$$

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 mjerenja (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

$u(\delta l_A)$ - Nesigurnost podešavanja mjernih kapica

Koeficijenti osjetljivosti koji su jednaki 1 navedeni su kako slijedi:

$c_{A_1} = c_{A_2} = c_{\delta B} = c_l = c_{\delta l_x} = c_{\delta l_T} = c_{\delta l_A} = 1$

6.1.1 Nesigurnost kuta navoja

Kut vanjskih navoja mjeren je 2D mjernim uređajem Carl Zeiss na način opisan u poglavlju 4.2. Za umjeravanje prema kategorijama 1b i 2b procjena mjerne nesigurnosti izrađena je prema matematičkom modelu:

$$\alpha = \alpha_{oc} + \delta\alpha_{pon} + \delta\alpha_s + \delta\alpha_p \qquad (6.6)$$

$$u^2(\alpha) = 1 \cdot u^2(\alpha_{oc}) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_{pon}) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_s) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_p) \qquad (6.7)$$

gdje je:

$u(\alpha)$ - Nesigurnost mjerenja kuta navoja, °

$u(\alpha_{oc})$ - Nesigurnost očitanja (rezolucija), °

$u(\delta\alpha_{pon})$ - Ponovljivost mjerenja jednog utora, °

$u(\delta\alpha_s)$ - Kvaliteta slike ruba profila navoja, °

$u(\delta\alpha_p)$ - Nesigurnost pozicioniranja navoja, °

Nesigurnost očitanja uz rezoluciju od 0,01° i uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi:

$$u(\alpha_{oc}) = \frac{0{,}01\ °}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}003\ ° \qquad (6.8)$$

Ponovljivost mjerenja proizlazi iz 30 mjerenja kuta utora V – mjerke nazivne vrijednosti 60°. Uz pretpostavku normalne razdiobe, dobiveno procijenjeno standardno odstupanje iznosi s = 0,11°. Nesigurnost ponovljivosti mjernog rezultata uz tri ponovljena mjerenja iznosi:

$$u(\alpha_{pon}) = \frac{0{,}11°}{\sqrt{3}} = 0{,}121° \qquad (6.9)$$

Kvaliteta slike ruba navoja ovisi o kvaliteti izrade navoja. Pretpostavljaju se navoji uobičajene kvalitete izrade. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe, nesigurnost zbog kvalitete slike iznosi:

$$u(\alpha_s) = \frac{0{,}1°}{\sqrt{3}} = 0{,}058° \qquad (6.10)$$

U slučaju navoja s lošom kvalitetom ruba profila, ovaj član mjerne nesigurnosti potrebno je uvećati.

Nesigurnost pozicioniranja navoja u mjernom uređaju ovisi o provrtima za pozicioniranje i pretpostavlja se da iznosi:

$$u(\alpha_p) = \frac{0{,}1°}{\sqrt{3}} = 0{,}058° \qquad (6.11)$$

Tablica 6-1 Nesigurnost rezultata mjerenja kuta navoja na 2D mjernom uređaju „Carl Zeiss“

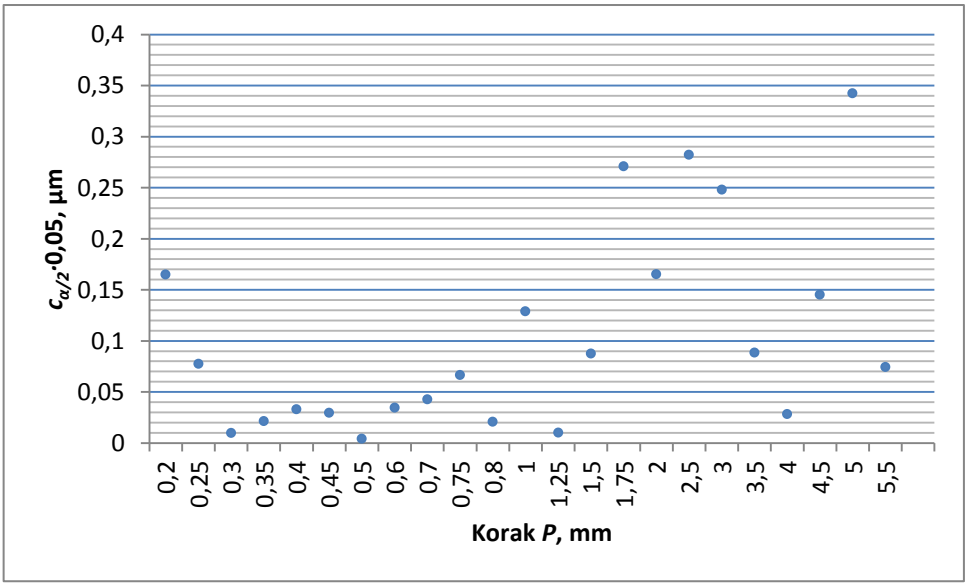
Sastavnice mjerne nesigurnosti x_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Razdioba	Koeficijenti osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$
$\boldsymbol{\alpha_{oc}}$	0,003°	Pravokutna	1	0,003°
$\boldsymbol{\delta\alpha_{pon}}$	0,064°	Normalna	1	0,064°
$\boldsymbol{\delta\alpha_{s}}$	0,058°	Pravokutna	1	0,058°
$\boldsymbol{\delta\alpha_{p}}$	0,058°	Pravokutna	1	0,058°
			$\boldsymbol{u(\alpha) =}$	**0,1 °**

Ako se umjeravanje navoja provodi prema kategorijama 1a i 2a, nesigurnost kuta navoja određuje se temeljem pretpostavke da je kut navoja unutar propisanih granica tolerancije, kako je opisano u poglavlju 3.2.

Koeficijent osjetljivosti određuje se za svako umjeravanje zasebno, s obzirom da ovisi o promjeru mjernog elementa i koraku navoja, kako je vidljivo iz izraza 6.5.

U poglavlju 5.2.1 Slika 5-7 prikazuje utjecaj kuta na srednji promjer metričkih navoja i uz opisana ograničenja, može se tvrditi da doprinos mjernoj nesigurnosti srednjeg promjera prema kategorijama 1a i 2a neće premašiti $c_{\alpha/2} \cdot u(\alpha/2) = 0{,}6\ \mu\text{m}$.

Mjerna nesigurnost rezultata mjerenja prema kategorijama 1b i 2b ne prelazi $c_{\alpha/2} \cdot u(\alpha/2) = c_{\alpha/2} \cdot 0{,}05 = 0{,}35\ \mu\text{m}$ što je prikazano sljedećim dijagramom:



Slika 6-1 Doprinos mjerenja kuta metričkih navoja (metoda s tri valjčića)

S obzirom da je *α/2* polovica izmjerene vrijednosti *α* može se zapisati:

$$\alpha/2 = \alpha \cdot \frac{1}{2} \tag{6.12}$$

Iz čega proizlazi:

$$u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) = u^2(\alpha) \cdot \frac{1}{4} \rightarrow u\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{u(\alpha)}{2} = \frac{0{,}1}{2} = 0{,}05 \tag{6.13}$$

6.1.2 Nesigurnost mjerenja koraka navoja

Korak vanjskih navoja mjeri se 2D mjernim uređajem Carl Zeiss na način opisan u poglavlju 3.3.2.1. Model mjerenja i sastavljena varijanca prikazani su sljedećim izrazima:

$$P = P_r + \delta P_{pon} + \delta P_p + \delta B \tag{6.14}$$

$$u^2(P) = 1 \cdot u^2(P_r) + 1 \cdot u^2(\delta P_{pon}) + 1 \cdot u^2(\delta P_p) + 1 \cdot u^2(\delta B) \tag{6.15}$$

gdje je:

$u(P)$ - Nesigurnost mjerenja koraka navoja, µm

$u(P_r)$ - Nesigurnost zbog rezolucije mjernih skala , µm

$u(\delta P_{pon})$ - Ponovljivost viziranja jednog boka navoja, µm

$u(\delta P_p)$ - Nesigurnost pozicioniranja navoja, µm

$u(\delta B)$ - Pravocrtnost boka navoja, µm

Nesigurnost očitanja uz rezoluciju od 0,1 µm i uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi:

$$u(P_r) = \frac{0{,}1\ \mu m}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}03\ \mu m \tag{6.16}$$

Ponovljivost viziranja proizlazi iz 30 mjernih podataka procijenjenog standardnog odstupanja od *s* = 0,97 µm. Standardna mjerna nesigurnost, uz tri ponovljena mjerenja iznosi:

$$u(P_{pon}) = \frac{1{,}27\ \mu m}{\sqrt{3}} = 0{,}73\ \mu m \tag{6.17}$$

Nesigurnost pozicioniranja navoja određena je iskustveno uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od *a* = ±0,5 µm i iznosi:

$$u(P_p) = \frac{0{,}5\ \mu m}{\sqrt{3}} = 0{,}28\ \mu m \tag{6.18}$$

Nesigurnost zbog odstupanja od pravocrtnosti boka navoja određena je iskustveno, uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od *a* = ±0,5 µm i iznosi:

$$u(P_p) = \frac{0{,}5\ \mu m}{\sqrt{3}} = 0{,}28\ \mu m \tag{6.19}$$

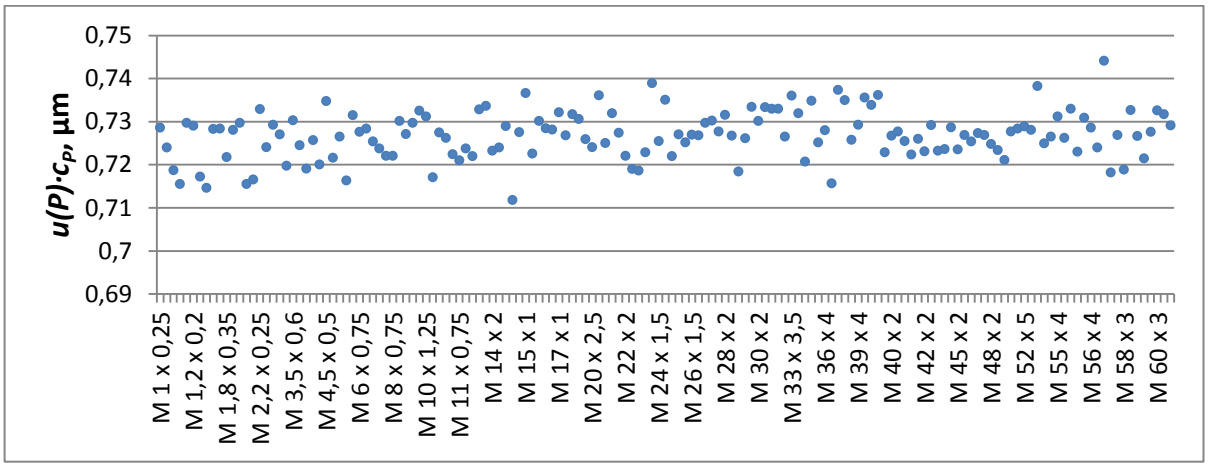
Tablica 6-2 Nesigurnost rezultata koraka navoja na 2D mjernom uređaju Carl Zeiss

Sastavnice mjerne nesigurnosti x_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Razdioba	Koeficijenti osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$
$\boldsymbol{P_r}$	0,03 µm	Pravokutna	1	0,03 µm
$\boldsymbol{\delta P_{pon}}$	0,73 µm	Normalna	1	0,73 µm
$\boldsymbol{\delta P_p}$	0,28 µm	Pravokutna	1	0,28 µm
$\boldsymbol{\delta B}$	0,28 µm	Pravokutna	1	0,28 µm
			$\boldsymbol{u(P)=}$	**0,84 µm**

U poglavlju 5.3 opisan je utjecaj koraka na srednji promjer metričkih navoja, gdje je vidljivo da doprinos ovog utjecaja ne ovisi značajno o koraku i karakterističnim promjerima navoja stoga se koeficijent osjetljivosti c_P može odrediti prema izrazu 6.4 i za sve metričke navoje iznosi:

$$c_P = \frac{\mathrm{ctg}(\alpha/2)}{2} = 0{,}866 \qquad (6.20)$$

Monte Carlo simulacijom uz 10000 ponavljanja i uz pretpostavku normalne razdiobe sa standardnom devijacijom od 0,84 µm te uz očekivanu vrijednost nazivnih koraka dobiven je sljedeći dijagram:



Slika 6-2 Doprinos koraka na srednji promjer navoja (Monte Carlo)

koji odgovara i analitičkom rješenju:

$$u(P) \cdot c_P = 0{,}84 \cdot 0{,}866 = 0{,}727\ \mu m \qquad (6.21)$$

Ako se navoj umjerava prema kategorijama 1a i 1b, sastavnicu mjerne nesigurnosti zbog utjecaja pogreške koraka nije potrebno uključiti u proračun mjerne nesigurnosti jednostavnog srednjeg promjera. Ova sastavnica nema značajan doprinos na ukupnu mjernu nesigurnost, što je pokazano upoglavlju 5.5.

6.1.3 Nesigurnost zbog utjecaja mjernog elemenata

Ova nesigurnost proizlazi iz postupka umjeravanja mjernih valjčića u skladu je s prijavljenim CMC vrijednostima za vanjske promjere te iznosi:

$$u(d_D) = 0{,}35\ \mu m \qquad (6.22)$$

Pripadajući koeficijent osjetljivosti može se odrediti prema izrazu 6.3 i za metričke navoje iznosi 3 µm.

Doprinos ove sastavnice detaljno je opisan u poglavlju 5.4.

6.1.4 Nesigurnost korekcije nalijeganja mjernog elementa

U poglavlju 4.3 pokazano je da ne postoji razlika u rezultatima srednjeg promjera metričkih navoja ukoliko se koristi Berndtova aproksimacija (uz korekciju nalijeganja mjernog elementa) i matematički egzaktan model, nesigurnost ove sastavnice nije uzeta u obzir pri procjeni ukupne mjerne nesigurnosti.

6.1.5 Nesigurnost korekcije mjerne sile

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti procijenjena je iz iskustva i iznosi:

$$u(A_2) = 0{,}1\ \mu m \qquad (6.23)$$

6.1.6 Nesigurnost zbog predmeta mjerenja

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti odnosi se na moguće pogreške oblika odnosno geometrije navoja i procijenjena je temeljem iskustva te iznosi:

$$u(\delta B) = 0{,}25\ \mu m \qquad (6.24)$$

6.1.7 Nesigurnost ponovljivosti mjernog sustava

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti proizlazi iz postupka 30 ponovljenih mjerenja srednjeg promjera tri navojna čepa. Standardna nesigurnost uz pretpostavku normalne razdiobe iznosi:

$$u(l) = \frac{0{,}35}{\sqrt{3}} = 0{,}2\ \mu m \qquad (6.25)$$

Postupak mjerenja srednjeg promjera zahtijeva tri ponovljena mjerenja.

6.1.8 Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja

Univerzalni mjerni uređaj umjerava se u skladu s postupkom za umjeravanje 1D mjernih uređaja. Ova sastavnica mjerne nesigurnosti proizlazi iz potvrde o umjeravanju i iznosi:

$$u(\delta l_x) = (0{,}16 + 1{,}7 \cdot L)\ \mu m,\ L \text{ u m} \qquad (6.26)$$

L – očitanje mjernog uređaja

6.1.9 Nesigurnost zbog utjecaja temperature

Utjecaj temperature na mjerenje srednjeg promjera navoja metodom s tri valjčića detaljno je opisan u poglavlju 5.6.1. gdje je izveden izraz za temperaturnu korekciju rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja:

$$\delta l_T = L_{20} \cdot \alpha_p \cdot \Delta t_A - L_{20} \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_A + L_{20} \cdot \alpha_p \cdot \Delta t_p - L_{20} \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i \qquad (6.27)$$

Nakon postupka temperiranja, temperatura predmeta mjerenja i mjernog uređaja ne smije odstupati više od ± 0,1 K od temperature okoliša, a temperatura okoliša mora biti unutar intervala od 20 K ± 0,5 K. Koeficijent temperaturnog rastezanja mjerne skale uređaja iznosi 8 x 10^{-6} K^{-1}, a koeficijent temperaturnog rastezanja navojnog mjerila jednak je 11 x 10^{-6} K^{-1}.
Sastavljena varijanca dana je sljedećim izrazom:

$$u^2(\delta l_T) = c_{\Delta t_A}^2 \cdot u^2(\Delta t_A) + c_{\Delta t_p}^2 \cdot u^2(\Delta t_p) + c_{\Delta t_i}^2 \cdot u^2(\Delta t_i) \qquad (6.28)$$

Nesigurnost razlike temperature okoliša i referente temperature (t_0 = 20 ˚C, Δt_A = ±0,5 K):

$$u(\Delta t_A) = \frac{0{,}5}{\sqrt{3}} = 0{,}288\ K \qquad (6.29)$$

Koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\Delta t_A} = L_{20} \cdot (\alpha_p - \alpha_i) \qquad (6.30)$$

Nesigurnost razlike temperature okoliša i temperature mjernog instrumenta je:

$$u(\Delta t_p) = \frac{0{,}1}{\sqrt{3}} = 0{,}058\ K \qquad (6.31)$$

S koeficijentom osjetljivosti:

$$c_{\Delta t_p} = L_{20} \cdot \alpha_p \qquad (6.32)$$

Nesigurnost razlike temperature okoliša i temperature navojnog mjerila:

$$u(\Delta t_i) = \frac{0{,}1}{\sqrt{3}} = 0{,}058\ K \qquad (6.33)$$

S koeficijentom osjetljivosti:

$$c_{\Delta t_i} = L_{20} \cdot \alpha_i \qquad (6.34)$$

Tablica 6-3 Sastavnice mjerne nesigurnosti zbog utjecaja temperature

Veličina X_i	Procijena x_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, m
$\boldsymbol{\Delta t_A}$	0 °C	0,288 K	pravokutna	$L_{20} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-6}$	$L_{20} \cdot 1{,}008 \cdot 10^{-6}$
$\boldsymbol{\Delta t_p}$	0 °C	0,058 K	pravokutna	$L_{20} \cdot 11{,}5 \cdot 10^{-6}$	$L_{20} \cdot 0{,}667 \cdot 10^{-6}$
$\boldsymbol{\Delta t_i}$	0 °C	0,058 K	pravokutna	$L_{20} \cdot 8 \cdot 10^{-6}$	$L_{20} \cdot 0{,}464 \cdot 10^{-6}$
$\boldsymbol{u(\delta l_T)}$	$\boldsymbol{u(\delta l_T) = 1{,}29 \cdot L_{20}\ \mu m, L_{20} um}$				

S obzirom da se dobiveni izraz može raspisati kao :

$$L = L_{20} + L_{20} \cdot \alpha_p \cdot \Delta t_A = L_{20} + L \cdot \alpha_p \cdot \Delta t_A - L_{20} \cdot (\alpha_p \cdot \Delta t_A)^2 \qquad (6.35)$$

gdje je zadnji član u jednadžbi približno jednak nuli,te se može zanemariti čak i kod navoja najvećih promjera koje je moguće mjeriti u Laboratoriju, vrijedi $L_{20} \approx L$ pa je mjerna nesigurnost jednaka:

$$\boldsymbol{u(\delta l_T) = 1{,}29 \cdot L\ \mu m\ , L\ u\ m}$$

6.1.10 Nesigurnost zbog utjecaja mjernih kapica

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti određena je iz iskustva i uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi:

$$u(\delta l_A) = \frac{0{,}2}{\sqrt{3}} = 0{,}12\ \mu m \qquad (6.36)$$

6.1.11 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera vanjskih metričkih navoja

Tablica 6-4 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1b kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} + 1 = 3$	1,05
$\alpha/2$	0,1 ˚	normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,35
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	pravokutna	1	0,1
δB	0,25	pravokutna	1	0,25
l	0,2	normalna	1	0,2
δl_x	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$	normalna	1	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$
δl_T	$1{,}29 \cdot L$	-	1	$1{,}29 \cdot L$
δl_A	0,12	pravokutna	1	0,12
$u(d_2)$	$\sqrt{4{,}5541 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 1{,}3775} \approx \mathbf{1{,}17 + 0{,}35 \cdot L}$ µm, L u m			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,9925.

Tablica 6-5 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1a kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} + 1 = 3$	1,05
$\alpha/2$	Tolerancijsko polje	pravokutna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,6
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	pravokutna	1	0,1
δB	0,25	pravokutna	1	0,25
l	0,2	normalna	1	0,2
δl_x	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$	normalna	1	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$
δl_T	$1{,}29 \cdot L$	-	1	$1{,}29 \cdot L$
δl_A	0,12	pravokutna	1	0,12
$u(d_2)$	$\sqrt{4{,}5541 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 1{,}615} \approx \mathbf{1{,}27 + 0{,}32 \cdot L}$ µm, L u m			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,9925.

Tablica 6-6 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2b kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} + 1 = 3$	1,05
P	0,73	normalna	0,866	0,63
$\alpha/2$	0,1 °	normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,35
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	pravokutna	1	0,1
δB	0,25	pravokutna	1	0,25
l	0,2	normalna	1	0,2
δl_x	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$	normalna	1	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$
δl_T	$1{,}29 \cdot L$	-	1	$1{,}29 \cdot L$
δl_A	0,12	pravokutna	1	0,12
$u(d_2)$	$\sqrt{4{,}5541 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 1{,}7744} \approx \mathbf{1{,}33 + 0{,}30 \cdot L}$ µm, **L u m**,			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,9925.

Tablica 6-7 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2a kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} + 1 = 3$	1,05
P	0,73	normalna	0,866	0,63
$\alpha/2$	Tolerancijsko polje	pravokutna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,6
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	pravokutna	1	0,1
δB	0,25	pravokutna	1	0,25
l	0,2	normalna	1	0,2
δl_x	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$	normalna	1	$0{,}16 + 1{,}7 \cdot L$
δl_T	$1{,}29 \cdot L$	-	1	$1{,}29 \cdot L$
δl_A	0,12	pravokutna	1	0,12
$u(d_2)$	$\sqrt{4{,}5541 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 2{,}011} \approx \mathbf{1{,}42 + 0{,}29 \cdot L}$ µm, **L u m**			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,9924.

Mjerne nesigurnosti izražene su u funkciji izmjerene vrijednosti *L*, međutim, s obzirom da se vrijednost *L* uvrštava u metrima te da je gornja granica mjernog područja 60 mm, zavisni član mjerne nesigurnosti doprinosi s najviše 0,02 µm što se može zanemariti.

Mjerne nesigurnosti iznose:

- Jednostavni srednji promjer - 1b: ***u(d₂) = 1,2 µm, k = 1***
- Jednostavni srednji promjer - 1a: ***u(d₂) = 1,3 µm, k = 1***
- Srednji promjer - 2b: ***u(d₂) = 1,3 µm, k = 1***
- Srednji promjer - 2a: ***u(d₂) = 1,4 µm, k = 1***

6.2 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s T-ticalom

Matematički model mjerenja srednjeg promjera:

$$D_2 = l + (D_{r20} - D) + d_D \cdot \left(\frac{1}{sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 1 \right) - \frac{P}{2} \cdot \mathrm{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + A_1 - A_2 + \delta B + \\ + \delta l_x - \delta l_T + \delta l_{T-Dev} \qquad (6.37)$$

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
δB	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja,mm
δl_x	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm
δl_T	-	Temperaturna korekcija, mm
$\delta l_{T\text{-}Dev}$	-	Korekcija mjerenja s T-ticalom, mm

Sastavljena varijanca srednjeg promjera navoja:

$$u^2(D_2) = c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_{D_{r20}}^2 \cdot u^2(D_{r20}) + c_D^2 \cdot u^2(D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \\ + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B) + c_l^2 \cdot u^2(l) + c_{\delta l_x}^2 \cdot u^2(\delta l_x) + \\ + c_{\delta l_T}^2 \cdot u^2(\delta l_T) + c_{\delta l_{T-Dev}}^2 \cdot u^2(\delta l_{T-Dev}) \qquad (6.38)$$

gdje je:

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

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} - 1 \qquad (6.39)$$

$u(P)$ - Nesigurnosti mjerenja koraka navoja
Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_P = \frac{\mathrm{ctg}(\frac{\alpha}{2})}{2} \qquad (6.40)$$

$u(\alpha/2)$ - Nesigurnosti mjerenja kuta navoja
Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi:

$$c_{\alpha/2} = \frac{2 \cdot d_D \cdot \cos(\alpha/2) - P}{2 \cdot \sin^2(\alpha/2)} = \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0) \qquad (6.41)$$

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

Koeficijenti osjetljivosti koji su jednaki 1 navedeni su kako slijedi:

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

6.2.1 Nesigurnost kuta navoja

Za mjerenje kuta unutarnjih navoja na 2D mjernom uređaju potrebno je uzeti otisak pomoću akrilne mase.

Kut navoja mjeren je na način opisan u poglavlju 4.2. Za umjeravanje prema kategorijama 1b i 2b procjena mjerne nesigurnosti izrađena je prema matematičkom modelu:

$$\alpha = \alpha_{oc} + \delta\alpha_{pon} + \delta\alpha_s + \delta\alpha_p + \delta\alpha_o \qquad (6.42)$$

$$u^2(\alpha) = 1 \cdot u^2(\alpha_{oc}) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_{pon}) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_s) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_p) + 1 \cdot u^2(\delta\alpha_o) \qquad (6.43)$$

gdje je:

$u(\alpha)$ - Nesigurnost mjerenja kuta navoja, °
$u(\alpha_{oc})$ - Nesigurnost očitanja (rezolucija), °
$u(\delta\alpha_{pon})$ - Ponovljivost mjerenja jednog utora, °
$u(\delta\alpha_s)$ - Kvaliteta slike ruba profila navoja, °
$u(\delta\alpha_p)$ - Nesigurnost pozicioniranja navoja, °
$u(\delta\alpha_o)$ - Nesigurnost otiska navoja, °

Nesigurnost očitanja uz rezoluciju od 0,01° i uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi:

$$u(\alpha_{oc}) = \frac{0{,}01\,^\circ}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}003\,^\circ \qquad (6.44)$$

Ponovljivost mjerenja proizlazi iz 30 mjerenja kuta utora V – mjerke nazivne vrijednosti 60°. Uz pretpostavku normalne razdiobe, dobiveno procijenjeno standardno odstupanje iznosi s = 0,11°. Nesigurnost ponovljivosti mjernog rezultata uz tri ponovljena mjerenja iznosi:

$$u(\alpha_{pon}) = \frac{0{,}11°}{\sqrt{3}} = 0{,}121° \tag{6.45}$$

Kvaliteta slike ruba navoja ovisi o kvaliteti izrade navoja i pretpostavljaju se navoji uobičajene kvalitete izrade. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe, nesigurnost zbog kvalitete slike iznosi:

$$u(\alpha_s) = \frac{0{,}1°}{\sqrt{3}} = 0{,}058° \tag{6.46}$$

U slučaju navoja s lošom kvalitetom ruba profila ovaj član mjerne nesigurnosti je potrebno uvećati. Nesigurnost pozicioniranja navoja u mjernom uređaju ovisi o provrtima za pozicioniranje i pretpostavlja se da iznosi:

$$u(\alpha_p) = \frac{0{,}1°}{\sqrt{3}} = 0{,}058° \tag{6.47}$$

Nesigurnost koja proizlazi iz razlike kuta navoja i otiska procijenjena je iz iskustva i iznosi:

$$u(\alpha_o) = 0{,}1° \tag{6.48}$$

Tablica 6-8 Nesigurnost rezultata mjerenja kuta unutarnjih navoja na 2D mjernom uređaju Carl Zeiss

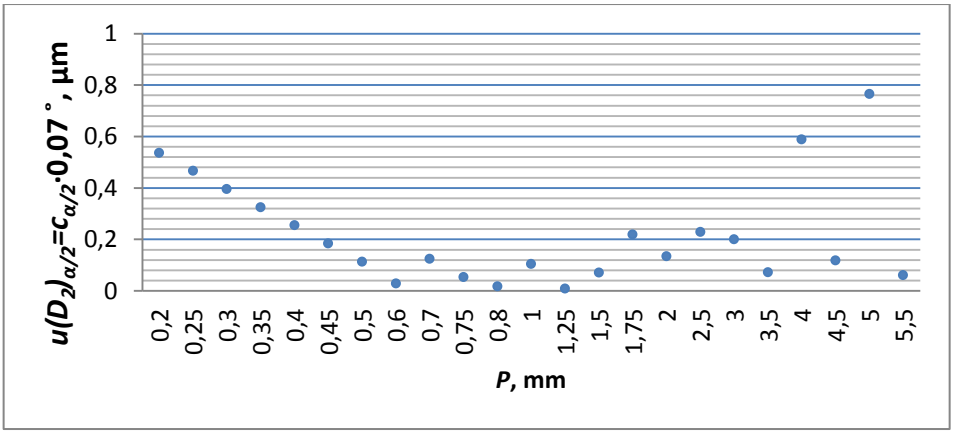
Sastavnice mjerne nesigurnosti x_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Razdioba	Koeficijenti osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$
$\boldsymbol{\alpha_{oc}}$	0,003°	Normalna	1	0,003°
$\boldsymbol{\delta\alpha_{pon}}$	0,064°	Pravokutna	1	0,064°
$\boldsymbol{\delta\alpha_s}$	0,058°	Pravokutna	1	0,058°
$\boldsymbol{\delta\alpha_p}$	0,058°	Pravokutna	1	0,058°
$\boldsymbol{\delta\alpha_o}$	0,1°	Pravokutna	1	0,1°
			$\boldsymbol{u(\alpha) =}$	**0,14 °**

Ako se srednji promjer navoja umjerava prema kategorijama 1a i 2a, nesigurnost kuta navoja se određuje na temelju pretpostavke da je kut navoja unutar propisanih granica tolerancije, kako je opisano u poglavlju 3.2.

Koeficijent osjetljivosti određuje se za svako umjeravanje zasebno, s obzirom da ovisi o promjeru mjernog elementa i koraku navoja, kako je vidljivo iz izraza 6.5.

U poglavlju 5.2.1, slika 5-10 prikazuje utjecaj kuta na srednji promjer metričkih navoja i uz opisana ograničenja može se tvrditi da doprinos mjernoj nesigurnosti srednjeg promjera prema kategorijama 1a i 2a neće premašiti $c_{\alpha/2} \cdot u\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 1{,}2\ \mu\text{m}$.

Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera prema kategorijama 1b i 2b ne prelazi $c_{\alpha/2} \cdot u(\alpha/2) = c_{\alpha/2} \cdot 0{,}07 = 0{,}6$ µm (uz izuzetak navoja s korakom od 5 mm) što je prikazano sljedećim dijagramom:



Slika 6-3 Doprinos utjecaja zbog pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja (metoda s T-ticalom)

6.2.2 Nesigurnost mjerenja koraka navoja

Korak vanjskih navoja mjeri se univerzalnim mjernim uređajem s nastavkom za mjerenje koraka navoja, na način opisan u poglavlju 3.3.2.2. Model mjerenja i sastavljena varijanca dani su kako slijedi:

$$P = P_r + \delta P_{pon} + \delta P_p + \delta B \qquad (6.49)$$

$$u^2(P) = 1 \cdot u^2(P_r) + 1 \cdot u^2(\delta P_{pon}) + 1 \cdot u^2(\delta P_p) + 1 \cdot u^2(\delta B) \qquad (6.50)$$

gdje je:

$u(P)$	-	Nesigurnost mjerenja koraka navoja, µm
$u(P_r)$	-	Nesigurnost očitanja , µm
$u(\delta P_{pon})$	-	Ponovljivost mjerenja, µm
$u(\delta P_p)$	-	Nesigurnost pozicioniranja navoja, µm
$u(\delta B)$	-	Pravocrtnost boka navoja, µm

Nesigurnost očitanja uz rezoluciju od 0,01 µm i uz pretpostavku pravokutne razdiobe iznosi:

$$u(P_r) = \frac{0{,}01\ \mu m}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}003\ \mu m \qquad (6.51)$$

Ponovljivost viziranja proizlazi iz 30 mjernih podataka procijenjenog standardnog odstupanja od *s* = 0,63µm. Mjerna nesigurnost, uz tri ponovljena mjerenja, iznosi:

$$u(P_{pon}) = \frac{1{,}27\ \mu m}{\sqrt{3}} = 0{,}36\ \mu m \qquad (6.52)$$

Nesigurnost pozicioniranja navoja određena je iskustveno, uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od *a* = ±0,6 µm i iznosi:

$$u(P_p) = \frac{0{,}6\ \mu m}{\sqrt{3}} = 0{,}35\ \mu m \qquad (6.53)$$

Nesigurnost zbog odstupanja od pravocrtnosti boka navoja određena je iskustveno, uz pretpostavku pravokutne razdiobe s granicama od a = ±0,5 µm i iznosi:

$$u(P_p) = \frac{0{,}5\ \mu m}{\sqrt{3}} = 0{,}28\ \mu m \qquad (6.54)$$

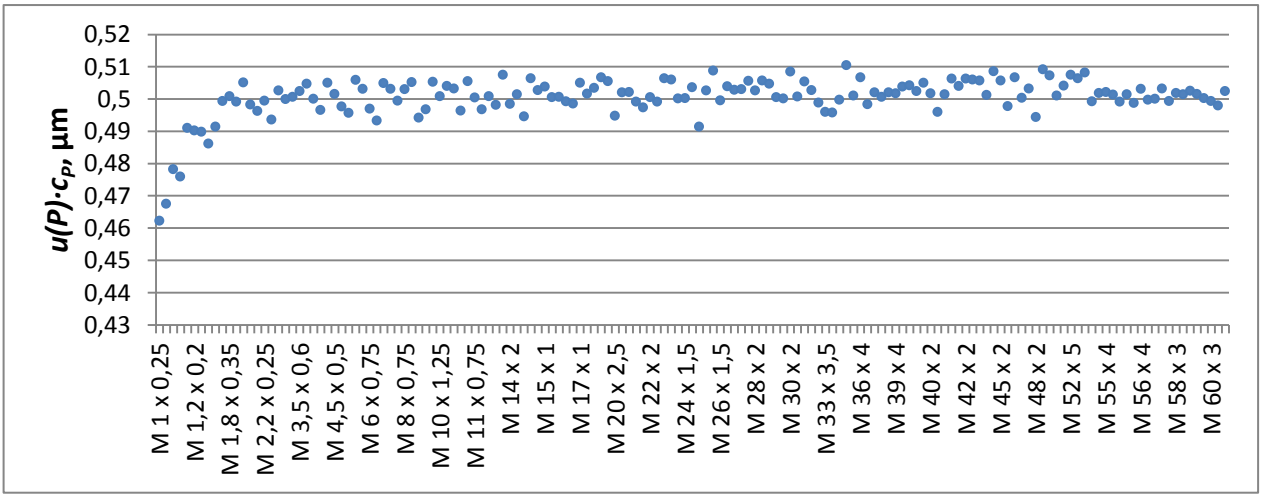
Tablica 6-9 Nesigurnost rezultata mjerenja koraka navoja unutarnjih navoja

Sastavnice mjerne nesigurnosti x_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Razdioba	Koeficijenti osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnsoti $u_i(y)$
$\boldsymbol{P_r}$	0,003 µm	Normalna	1	0,03 µm
$\boldsymbol{\delta P_{pon}}$	0,36 µm	Pravokutna	1	0,73 µm
$\boldsymbol{\delta P_p}$	0,35 µm	Pravokutna	1	0,28 µm
$\boldsymbol{\delta B}$	0,28 µm	Pravokutna	1	0,28 µm
			$\boldsymbol{u(P) =}$	**0,58 µm**

U poglavlju 5.3 opisan je utjecaj koraka na srednji promjer metričkih navoja gdje je vidljivo da doprinos ovog utjecaja ne ovisi značajno o koraku i karakterističnim promjerima navoja. Koeficijent osjetljivosti c_P se može odrediti prema izrazu 6.4 i za sve metričke navoje iznosi:

$$c_P = \frac{\mathrm{ctg}(\alpha/2)}{2} = 0{,}866 \qquad (6.55)$$

Monte Carlo simulacijom uz 10000 ponavljanja i uz pretpostavku normalne razdiobe s standardnom devijacijom od 0,84 µm te uz očekivanu vrijednost nazivnih koraka, dobiven je sljedeći dijagram:



Slika 6-4 Doprinos koraka na srednji promjer navoja (Monte-Carlo)

koji odgovara i analitičkom rješenju:

$$u(P) \cdot c_P = 0{,}58 \cdot 0{,}866 = 0{,}5\ \mu m \qquad (6.56)$$

Ako se navoj umjerava prema kategorijama 1a i 1b sastavnicu mjerne nesigurnosti zbog utjecaja pogreške koraka nije potrebno uključiti u proračun mjerne nesigurnosti jednostavnog srednjeg promjera. Ova sastavnica nema značajan doprinos na ukupnu mjernu nesigurnost što je pokazano u poglavlju 5.5.

6.2.3 Nesigurnost zbog utjecaja mjernog elemenata

Ova nesigurnost proizlazi iz postupka umjeravanja kuglica T-ticala i u skladu je s prijavljenim CMC vrijednostima za vanjske promjere te iznosi:

$$u(d_D) = 0{,}35\ \mu m \qquad (6.57)$$

Pripadajući koeficijent osjetljivosti određen je prema izrazu 6.3 i za metričke navoje iznosi 1 µm.

Doprinos ove sastavnice detaljno je opisan u poglavlju 5.4.

6.2.4 Nesigurnost korekcije nalijeganja mjernog elementa

U poglavlju 4.3 pokazano je da ne postoji razlika u rezultatima srednjeg promjera metričkih navoja ukoliko se koristi Berndtova aproksimacija (uz korekciju nalijeganja mjernog elementa) i matematički egzaktan model, nesigurnost ove sastavnice nije uzeta u obzir pri procjenu ukupne mjerne nesigurnosti.

6.2.5 Nesigurnost korekcije mjerne sile

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti procijenjena je iz iskustva i iznosi:

$$u(A_2) = 0{,}1\ \mu m \qquad (6.58)$$

6.2.6 Nesigurnost zbog predmeta mjerenja

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti odnosi se na moguće pogreške oblika tj. geometrije navoja i procijenjena je temeljem iskustva te iznosi:

$$u(\delta B) = 0{,}25\ \mu m \qquad (6.59)$$

6.2.7 Ponovljivost mjernog sustava

Ova sastavnica mjerne nesigurnosti proizlazi iz postupka 30 ponovljenih mjerenja srednjeg promjera tri navojna čepa. Rezultati mjerenja ponuđeni su u prilogu 2.

Standardna mjerna nesigurnost uz pretpostavku normalne razdiobe iznosi:

$$u(l) = \frac{0{,}35}{\sqrt{3}} = 0{,}2\ \mu m \qquad (6.60)$$

Postupak mjerenja srednjeg promjera zahtjeva tri ponovljena mjerenja.

6.2.8 Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja

Univerzalni mjerni uređaj umjerava se u skladu s postupkom za umjeravanje 1D mjernih uređaja. Ova sastavnica mjerne nesigurnosti proizlazi iz potvrde o umjeravanju i iznosi:

$$u(\delta l_x) = (0{,}16 + 1{,}7 \cdot L)\ \mu m,\ L\ u\ m \qquad (6.61)$$

L – očitanje mjernog uređaja

6.2.9 Nesigurnost zbog utjecaja temperature

Utjecaj temperature na mjerenje srednjeg promjera navoja metodom s T-ticalom detaljno je opisan u poglavlju 5.6.2 gdje je izveden izraz za temperaturnu korekciju rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja:

$$\delta l_T = \overbrace{L_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_L - L_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_A}^{\delta t_L} + \overbrace{C \cdot \alpha \cdot \Delta t_c - C \cdot \alpha \cdot \Delta t_A}^{\delta t_C} - \\ - \overbrace{(D_{r20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_r - D_{r20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_A)}^{\delta t_{D_r}} \qquad (6.62)$$

Nakon postupka temperiranja, temperatura predmeta mjerenja i mjernog uređaja ne smije odstupati više od ± 0,1 K od temperature okoliša, a temperatura okoliša mora biti unutar intervala od 20 K ± 0,5 K. Koeficijent temperaturnog rastezanja navojnog mjerila jednak je 11 x 10^{-6} K^{-1}. Nesigurnost ove korekcija određena je Monte Carlo simulacijom s parametrima:
Broj simulacija po navoju: 10000,

α - 11 x 10^{-6} K^{-1},

Δt_L - Pravokutna razdioba s granicama $a = \pm 0{,}1$ K,

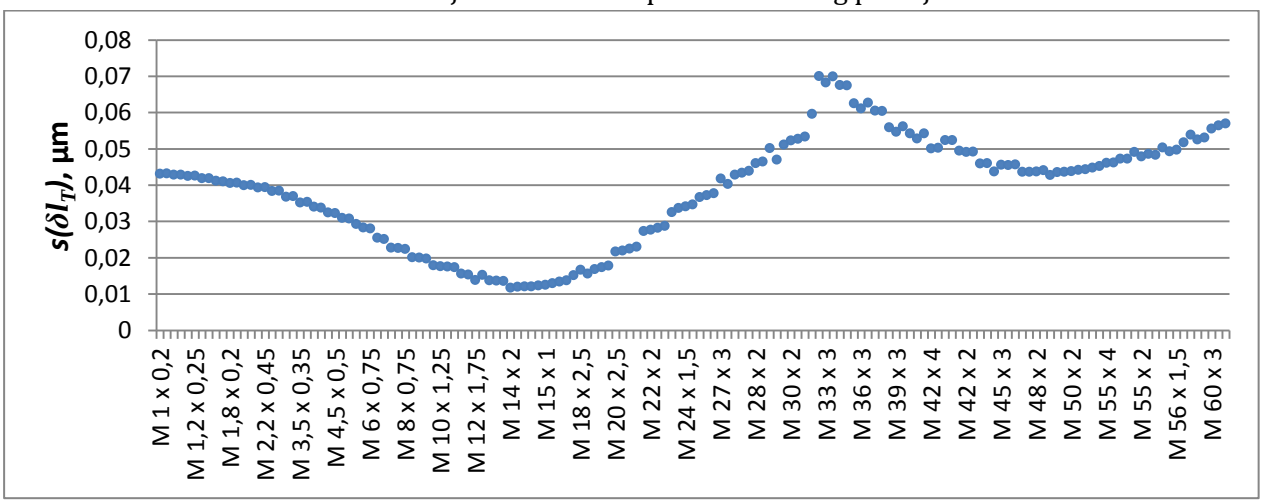
Δt_C - Pravokutna razdioba s granicama $a = \pm 0{,}1$ K,

Δt_r - Pravokutna razdioba s granicama $a = \pm 0{,}1$ K,

Δt_A - Pravokutna razdioba s granicama $a = \pm 0{,}5$ K,

C - Nazivna vrijednost konstante C koja odgovara promjeru mjernog elementa koji se koristi. Nazivne vrijednosti C i d_D odabiru prema tablici I-1 iz priloga 1 i ovise o koraku navoja,

L_{20} - $m_{teo} - C + d_D$, izračunata vrijednost m_{teo} nalazi se u tablici I-4 u prilogu 1, D_{r20} Za navoje s m_{teo} manjom od 30 koristi se prsten nazivnog promjera 14 mm dok se za veće vrijednosti koristi prsten nazivnog promjera 50 mm.



Slika 6-5Procijenjeno standardno odstupanje temperaturne korekcije za metričke navoje (metoda s T-ticalom)

Slika 6.5 prikazuje procijenjeno standardno odstupanje vrijednosti temperaturne korekcije za metričke navoje ako se za određivanje konstante T-ticala koriste dva prstena (ϕ14 mm i ϕ 50 mm). Nesigurnost temperaturne korekcije bit će manja od 0,07 µm za sve metričke navoje:

$$u(\delta l_T) = s(\delta l_T) = 0{,}7\ \mu m \qquad (6.63)$$

Ako bi se za određivanje konstante T-ticala koristilo više prstena čiji bi promjeri bili bliži srednjem promjeru navoja (tj. udaljenosti središta kuglica T-ticala m_{teo}) maksimalni utjecaj temperature tada iznosi 0,04 µm.

6.2.10 Nesigurnost mjerenja s mjernim prihvatom i T-ticalom

Model nesigurnosti:

$$u^2(\delta l_{T-Dev}) = u^2(\delta l_{res}) + u^2(\delta t_{pon}) \qquad (6.64)$$

gdje je:

$u(\delta l_{res})$ - Nesigurnost očitanja , µm

$u(\delta l_{pon})$ - Ponovljivost mjerenja s T-ticalom, µm

Rezolucija očitanja mjernih osi prihvata T-ticala je 0,1 µm i uz pretpostavku pravokutne razdiobe ova sastavnica mjerne nesigurnosti iznosi:

$$u(\delta l_{res}) = \frac{0{,}1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0{,}03\ \mu m \qquad (6.65)$$

Ponovljivost mjerenja s T-ticalom proizlazi iz mjerenja promjera prstena nazivnog promjera ϕ50 mm i temeljem 50 ponovljenih mjerenja. Procijenjeno standardno odstupanje iznosi $s(D) = 0{,}18$ µm. Rezultat mjerenja konstante T-ticala kao i mjerenja srednjeg promjera navoja srednja je vrijednost tri ponovljena mjerenja pa je:

$$u(\delta l_{pon}) = \frac{0{,}18}{\sqrt{3}} = 0{,}1\ \mu m \qquad (6.66)$$

Nesigurnost mjerenja s T- ticalom je:

$$u(\delta l_{T-Dev}) = \sqrt{0{,}03^2 + 0{,}1^2} = 0{,}1\ \mu m \qquad (6.67)$$

6.2.11 Nesigurnost umjeravanja unutarnjeg cilindra

Ova sastavnica proizlazi iz objavljene CMC vrijednosti za umjeravanje promjera prstena koja iznosi:

$$U(D) = 0{,}6 + 0{,}7D\ \mu m\ uz\ k = 2, D\ u\ m \qquad (6.68)$$

Za prstene ϕ50 ϕ14 nesigurnost umjeravanja iznosi:

$$u(D_{r20}) = 0{,}3\ \mu m \qquad (6.69)$$

6.2.12 Nesigurnost mjere referentnog prstena T-ticalom

Sastavljena varijanca:

$$u^2(D) = u^2(\delta l_x) + u^2(\delta t_{T-Dev}) \qquad (6.70)$$

$u(\delta l_x)$ - Nesigurnost umjeravanja univerzalnog mjernog uređaja, µm
$u(\delta l_{T\text{-}Dev})$ - Nesigurnost mjerenja s T-ticalom, µm

Ove dvije sastavnice opisane su u poglavljima 6.2.8 i 6.2.10 uz L = 0,05 m (promjer referentnog prstena ϕ50 mm). Mjerna nesigurnost ove sastavnice iznosi:

$$u(D) = \sqrt{0{,}25^2 + 0{,}1^2} = 0{,}26\ \mu m \qquad (6.71)$$

6.2.13 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera unutarnjih metričkih navoja

Tablica 6-10 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1b kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos mjerne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
$\alpha/2$	0,14 ˚	Normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,6
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	Pravokutna	1	0,1
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
l	0,2	Normalna	1	0,2
δl_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
δl_T	0,7	-	1	0,7
$\Delta l_{T\text{-}Dev}$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$u(D_2)$	$\sqrt{2{,}89 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 1{,}278} \approx \mathbf{1{,}12 + 0{,}31 \cdot L}\ \mu\mathbf{m}, \boldsymbol{L}\ \mathbf{u\ m}$			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,996.

Tablica 6-11 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 1a kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos mjerne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
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
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
l	0,2	Normalna	1	0,2
δl_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
δl_T	0,7	-	1	0,7
$\Delta l_{T\text{-}Dev}$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$u(D_2)$	$\sqrt{2{,}89 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 2{,}358} \approx \mathbf{1{,}53 + 0{,}23 \cdot L}$ µm, L u m			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,996.

Tablica 6-12 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2b kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Mjerna nesigurnost $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$ [µm]
d_D	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
$\alpha/2$	0,14 ˚	Normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,6
P	0,58	Normalna	0,866	0,5
A_1	0	0	0	0
A_2	0,1	Pravokutna	1	0,1
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
l	0,2	Normalna	1	0,2
δl_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
δl_T	0,7	-	1	0,7
$\Delta l_{T\text{-}Dev}$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$u(D_2)$	$\sqrt{2{,}89 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 1{,}53} \approx \mathbf{1{,}23 + 0{,}29 \cdot L}$ µm, L u m			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,996.

Tablica 6-13 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2a kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos mjerne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
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
P	0,58	Normalna	0,866	0,5
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	Pravokutna	1	0,1
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
l	0,2	Normalna	1	0,2
δl_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
δl_T	0,7	-	1	0,7
$\Delta l_{T\text{-}Dev}$	0,1	Pravokutna	1	0,1
$u(D_2)$	$\sqrt{2{,}89 \cdot L^2 + 0{,}544 \cdot L + 2{,}61} \approx \mathbf{1{,}62 + 0{,}22 \cdot L}$ µm, L u m			

Linearizacija je izvršena u području od 0 do 60 mm i dobiveni koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,996. Mjerne nesigurnosti izražene su u funkciji izmjerene vrijednosti L, međutim s obzirom da se vrijednost L uvrštava u metrima te da je gornja granica mjernog područja 60 mm, zavisni član nesigurnosti doprinosi s najviše 0,02 µm, što se može zanemariti.

Mjerne nesigurnosti iznose:

- Jednostavni srednji promjer - 1b: **$u(D_2)$ = 1,1 µm, k = 1**
- Jednostavni srednji promjer - 1a: **$u(D_2)$ = 1,6 µm, k = 1**
- Srednji promjer - 2b: **$u(D_2)$ = 1,2 µm, k = 1**
- Srednji promjer - 2a: **$u(D_2)$ = 1,6 µm, k = 1**

6.3 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja dobivenih metodom s mjernim čeljustima

Matematički model mjerenja srednjeg promjera:

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

$$m = \sqrt{\left(\underbrace{E + (a+b) - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T}_{n}\right)^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2} \qquad (6.72)$$

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
δB	-	Korekcija zbog geometrijskih pogrešaka navoja,mm
δl_x	-	Ponovljivost mjernog sustava, mm
δl_T	-	Temperaturna korekcija, mm
δl_E	-	Ponovljivost stezanja kombinacije planparalelne granične mjerke i mjerki s V utorom
m	-	Udaljenost središta mjernih kuglica, mm (Slika 4-7).
n	-	Udaljenost središta mjernih kuglica u smjeru osi mjerenja, mm (Slika 4-7).

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

$$u^2(d_2) = c_m^2 \cdot u^2(m) + c_{d_D}^2 \cdot u^2(d_D) + c_P^2 \cdot u^2(P) + c_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \\ + c_{A_1}^2 \cdot u^2(A_1) + c_{A_2}^2 \cdot u^2(A_2) + c_{\delta B}^2 \cdot u^2(\delta B) \qquad (6.73)$$

Sastavnice mjerne nesigurnosti iste su kao i kod metode s T- ticalom. Razlike su sadržane u sastavnici nesigurnosti mjere m. Ova sastavnica nesigurnost određena je Monte Carlo metodom prema modelu prikazanim izrazom 6.72.

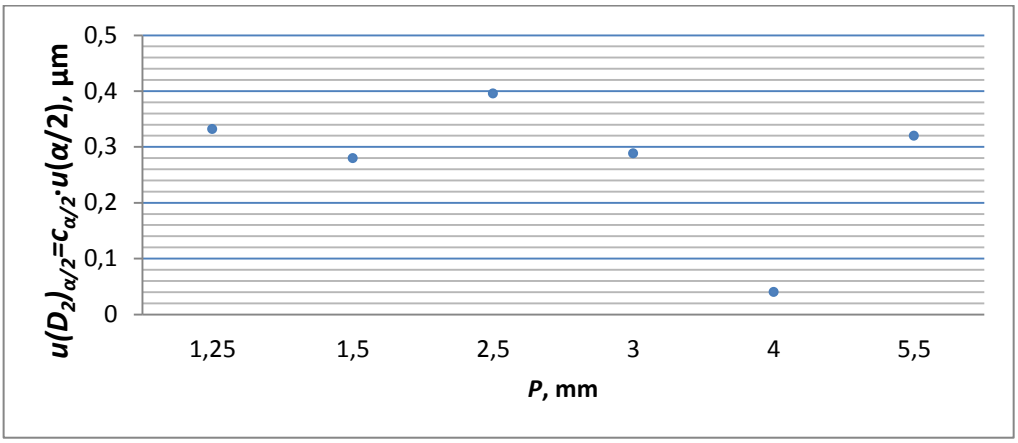
6.3.1 Nesigurnost kuta navoja

Kut navoja mjeren je na način opisan u poglavlju 4.2. Za umjeravanje prema kategorijama 1b i 2b nesigurnost mjerenja kuta unutarnjih navoja iznosi $u(\alpha) = 0{,}14\ \mu m$ (Tablica 6-8).

Ukoliko se srednji promjer navoja umjerava prema kategoriji 2b nesigurnost kuta navoja određuje se temeljem pretpostavke da je kut navoja unutar propisanih granica tolerancije kako je opisano u poglavlju 3.2.

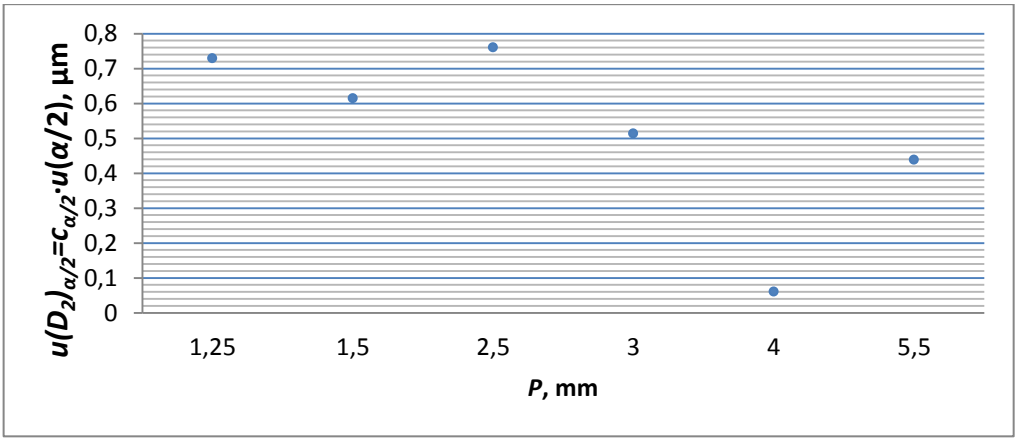
Koeficijent osjetljivosti određuje se za svako umjeravanje zasebno s obzirom da ovisi o promjeru mjernog elementa i koraku navoja.

U poglavlju 5.2.1 slika 5-10 prikazuje utjecaj pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja i s obzirom na ograničene dimenzije mjernih kuglica ticala metode s čeljustima ovaj utjecaj značajno se razlikuje s obzirom na korak navoja. Međutim kod mjerenja srednjeg promjera navoja koraka 1,25 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm i 5,5 mm prema kategorijama 1b i 2b doprinos ovog utjecaja je ispod 0,4 µm kako je prikazano sljedećim dijagramom:



Slika 6-6 Doprinos utjecaja zbog pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja (metoda s mjernim čeljustima, 2b kategorija umjeravanja)

Umjeravanje srednjeg promjera metričkih navoja primjenom metode s mjernim čeljustima provodi se isključivo za navoje ovih koraka. Za slučaj umjeravanja srednjeg promjera navoja prema 1b kategoriji, standardna nesigurnost $u(\alpha/2)$ određuje se s obzirom na granice dopuštenih odstupanja i doprinos ove sastavnice prikazan je slikom 6-7 i ne prelazi 0,8 µm:



Slika 6-7 Doprinos utjecaja zbog pogreške kuta na srednji promjer metričkih navoja (metoda s mjernim čeljustima , 1b kategorija umjeravanja)

6.3.2 Nesigurnost mjerenja kuta navoja

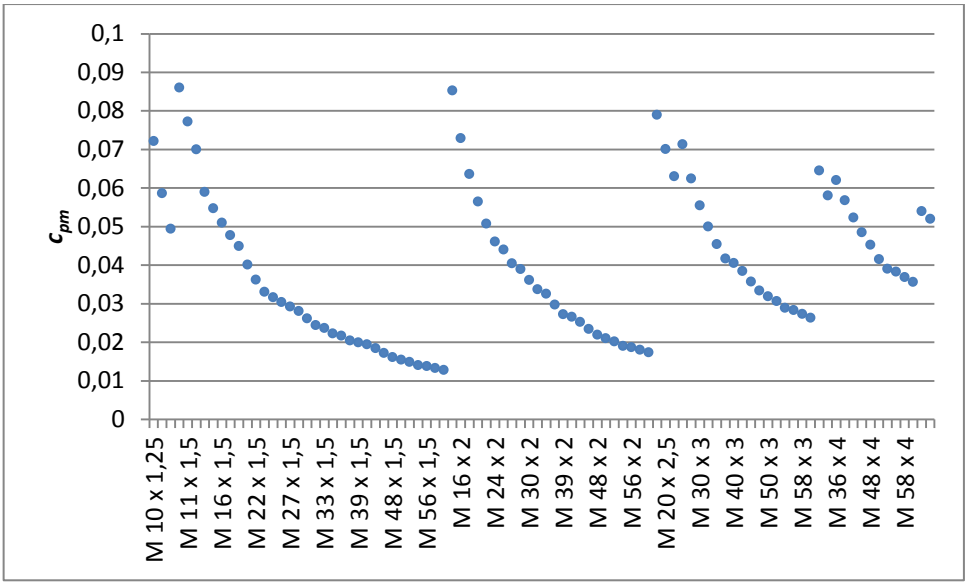
Nesigurnost mjerenja kuta unutarnjih metričkih navoja iznosi *u(P)* = 0,58 µm i određena je prema modelu prikazanom u poglavlju 6.2.2. Metodom s mjernim čeljustima jednostavni srednji promjer (kategorije 1a i 2a) se ne umjerava, s obzirom da pogreške kuta značajno utječu na iznos jednostavnog srednjeg promjera zbog zakrenutosti osi mjerenja u odnosu na bazu navoja.
Koeficijent osjetljivosti c_p jednak je:

$$c_P = -\left(\frac{\overbrace{\frac{P}{2}}^{c_{pm}}}{\sqrt{n^2 - \frac{P}{2}}} + \frac{1}{2 \cdot \tan(\alpha/2)} \right) \qquad (6.74)$$

Prvi član proizlazi iz zavisnosti mjere *m* o koraku navoja. Slika 6-8 prikazuje iznos ovog člana za metričke navoje različitog koraka. Vrijednost *n* izračunata je prema sljedećem izrazu:

$$n = \sqrt{m_{teo}^2 + \left(\frac{P}{2}\right)^2} \tag{6.75}$$

m_{teo} –Tablica I-4 iz priloga 1



Slika 6-8 Prvi član koeficijenta osjetljivosti c_p - metrički navoji

Maksimalna vrijednost ovog člana iznosi 0,086 (M 10 x 1,25 - navoj s najvećim kutom uspona) a ukupni koeficijent osjetljivosti jednak je:

$$c_P = -(0{,}086 + 0{,}866) = -0{,}95 \tag{6.76}$$

Sastavnica mjerene nesigurnosti zbog pogreške kuta iznosi:

$$u(P) = 0{,}95 \cdot 0{,}58 = 0{,}55\ \mu m \tag{6.77}$$

6.3.3 Nesigurnost veličine *n*

Veličina *n* izračunava se prema:

$$n = E + (a + b) - \frac{d_D}{\sin\left(\frac{\alpha_{jag}}{2}\right)} + l + \delta l_x + \delta l_E - \delta l_T \tag{6.78}$$

Sastavljena varijanca je :

$$u^2(n) = {c_E}^2 u^2(E) + {c^2}_{(a+b)} u^2(a+b) + {c_{d_D}}^2 u^2(d_D) + {c_{\alpha_{jag}/2}}^2 u^2\left(\alpha_{jag}/2\right) + {c_{\Delta l}}^2 u^2(l) + {c_{\delta l_E}}^2 u^2(\delta l_E) + {c_{\delta l_T}}^2 u^2(\delta l_T) \tag{6.79}$$

Koeficijenti osjetljivosti jednaki jedinici navedeni su kako slijedi: $c_E = c_{(a+b)} = c_{\alpha_{jag}/2} = c_l = c_{\delta l_E} = c_{\delta l_T} = 1$

Nesigurnost ponovljivosti mjerenja navoja procijenjena je temeljem 30 ponovljenih mjerenja navoja M 30 x 1.5. Početna vrijednost postavljena je pomoću mjerki s V-utorom prije provedbe mjerenja. Procijenjeno standardno odstupanje očitanja Δ*x* iznosi *s* = 0,25 µm.

S obzirom da se postupak umjeravanja provodi uz tri ponovljena mjerenja, standardna nesigurnost iznosi:

$$u(\delta l) = \frac{0{,}25}{\sqrt{3}} = 0{,}15\ \mu m \qquad (6.80)$$

Nesigurnost ponovljivost stezanja planparalelne granične mjerke i mjerki s V utorom procijenjeno je temeljem 30 ponovljenih stezanja referentne mjerke nazivne duljine 25 mm. Procijenjeno standardno odstupanje očitanja iznosi *s* = 0,45 µm.
S obzirom da se postupak umjeravanja provodi uz tri ponovljena mjerenja, standardna nesigurnost iznosi:

$$u(\delta l_E) = \frac{0{,}25}{\sqrt{3}} = 0{,}26\ \mu m \qquad (6.81)$$

Nesigurnost zbog utjecaja temperature na mjerenje srednjeg promjera navoja metodom s mjernim čeljustima detaljno je opisan u poglavlju 5.6.2, gdje je izveden izraz za temperaturnu korekciju rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja:

$$\delta l_T = \Delta x_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_{\Delta x} - \Delta x_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t_A \qquad (6.82)$$

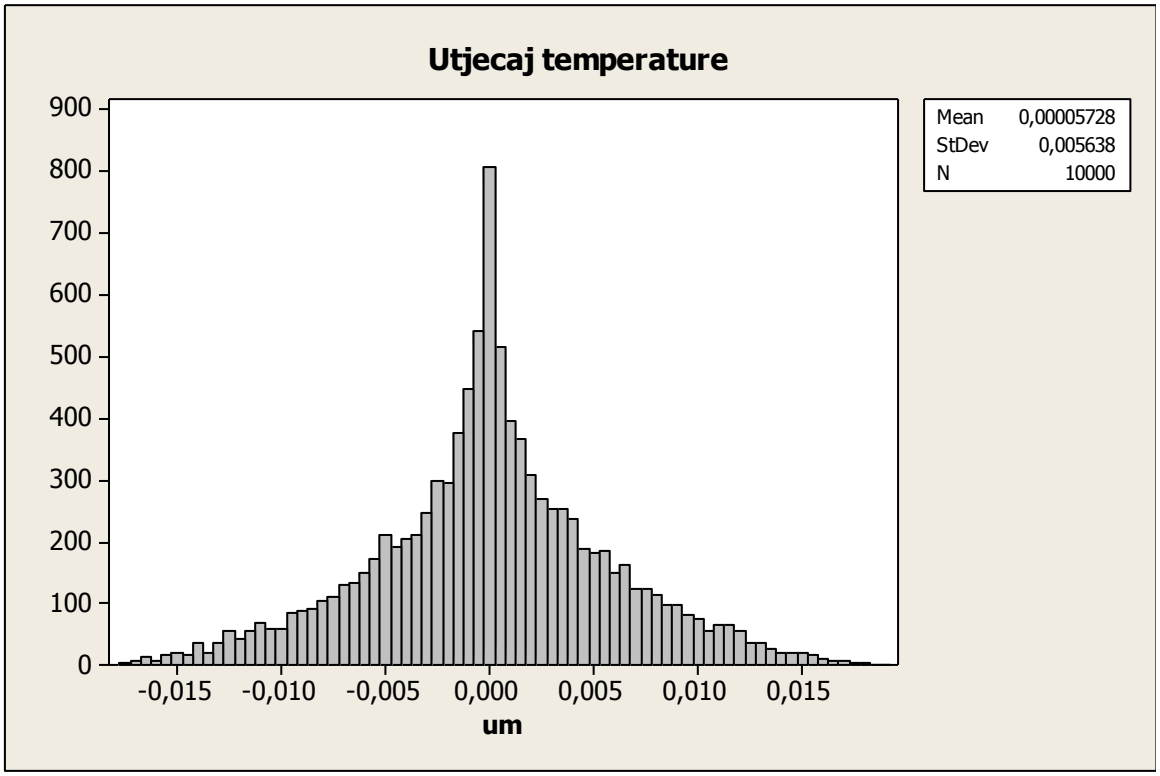
Nakon postupka temperiranja, temperatura predmeta mjerenja i mjernog uređaja ne smije odstupati više od ± 0,1 K od temperature okoliša, a temperatura okoliša mora biti unutar intervala od 20˚± 0,5˚. Koeficijent temperaturnog rastezanja navojnog mjerila jednak je 11 x 10^{-6} K^{-1}. Nadalje, duljina referentne planparalelne granične mjerke *E* odabire se tako da *Δx* bude 0 ± 3 mm.
Nesigurnost razlike temperature okoliša i referente temperature (t_0 = 20 ˚C, Δt_A = ±0,5 K):

$$u(\Delta t_A) = \frac{0{,}5}{\sqrt{3}} = 0{,}288\ K \qquad (6.83)$$

Nesigurnost razlike temperature okoliša i temperature navojnog mjerila:

$$u(\delta \Delta x_{20}) = \frac{0{,}1}{\sqrt{3}} = 0{,}058\ K \qquad (6.84)$$

Monte Carlo simulacijom pokazano je da temperatura nema značajan utjecaj na mjerenje srednjeg promjera navoja metodom s mjernim čeljustima, pod uvjetom da se provede pravilan odabir referentne mjerke za postavljanje početne vrijednosti uređaja. Uz pretpostavku normalne razdiobe, procijenjeno standardno odstupanje temperaturne korekcije iznosi $u(\delta l_T) = 0{,}06$ µm, što je prikazano slikom 6-9.



Slika 6-9 Utjecaj temperature na srednji promjer navoja – metoda s mjernim čeljustima

Proširena nesigurnost umjeravanja referentnih planparalelnih graničnih mjerki sukladno proceduri umjeravanja iznosi:

$$U(E) = 0{,}05 + 1{,}1 \cdot L\ \mu\text{m}, L \text{ u m uz } k = 2$$

Maksimalna duljina referentne p.g.m koja se koristi za postavljanje početne vrijednosti je 45 mm. Standardna nesigurnost umjeravanja p.g.m od 45 mm uz pretpostavku normalne razdiobe iznosi:

$$u(E) = 0{,}05\ \mu m \qquad (6.85)$$

Nesigurnost umjeravanja konstante mjerki s utorom sukladno nesigurnostima rezultata mjerenja u LABCOM 97' usporedbi i uz pretpostavku normalne razdiobe iznosi:

$$u(a+b) = 0{,}75\ \mu m \qquad (6.86)$$

Nesigurnost umjeravanja kuta mjerki s v utorom proizlazi iz mjerenja i uz pretpostavku normalne razdiobe iznosi:

$$u\left(\alpha_{jag}/2\right) = 0{,}0032°$$

Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi :

$$c_{\alpha_{jag}/2} = \frac{d_D}{\sin(\alpha_{jag}/2)\cdot\tan(\alpha_{jag}/2)} = 3{,}4641 \cdot d_D, \text{mm/rad} \qquad (6.87)$$

Za najveći promjer mjerne kuglice od 3,1 mm koeficijent osjetljivosti iznosi 10,73 mm/rad:

Nesigurnost umjeravanja promjera mjernih kuglica proizlazi iz postupka umjeravanja kuglica mjernih čeljusti i u skladu je s prijavljenim CMC vrijednostima za vanjske promjere te iznosi:

$$u(d_D) = 0{,}35\ \mu m \tag{6.88}$$

Pripadajući koeficijent osjetljivosti iznosi :

$$c_{d_D} = \frac{1}{\sin(\alpha_{jag}/2)} = 2 \tag{6.89}$$

Nesigurnost umjeravanja mjernog uređaja procijenjena je u skladu s postupkom za umjeravanje 1D mjernih uređaja. Ova sastavnica mjerne nesigurnosti proizlazi iz potvrde o umjeravanju i iznosi:

$$u(\delta l_x) = (0{,}16 + 1{,}7 \cdot L)\ \mu m, L \text{ u m} \tag{6.90}$$

S obzirom da se duljina referentne p.g.m odabire tako da razlika Δx bude manja od 3 mm, ova sastavnica iznosi:

$$u(\delta l_x) = 0{,}17\ \mu m \tag{6.91}$$

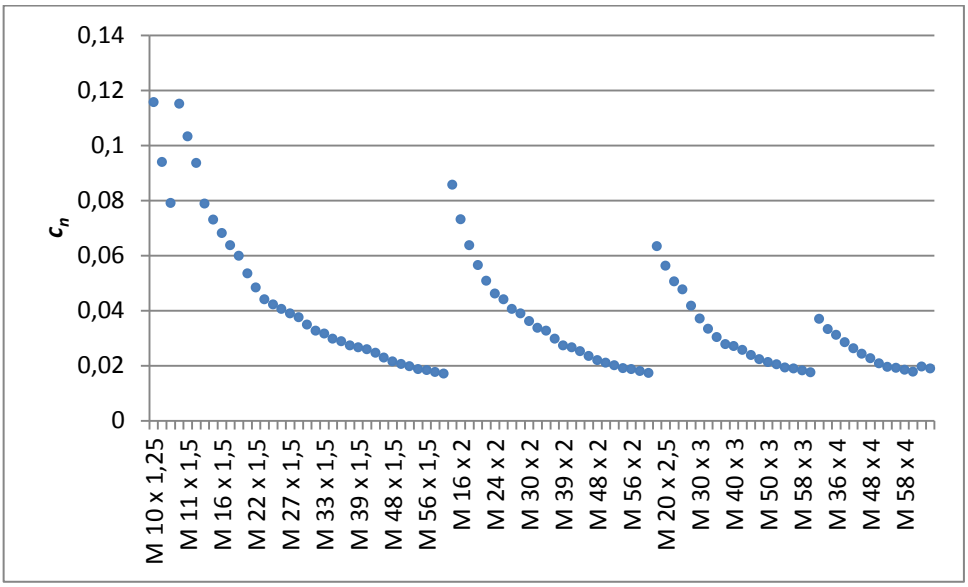
Tablica 6-14 Sastavnice mjernih nesigurnosti veličine n

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	Normalna	2	0,7
$\alpha_{jag}/2$	0,0032˚	Normalna	10,73 mm/rad	0,6
$a+b$	0,75	Normalna	1	0,75
E	0,05	Normalna	1	0,05
δl_x	0,17	Normalna	1	0,17
δl_E	0,05	Normalna	1	0,05
Δl_T	0,06	Normalna	1	0,06
l	0,15	Normalna	1	0,15
$u(n)$	**1,21 µm**			

Koeficijent osjetljivosti c_n izračunat je prema:

$$c_n = \frac{n}{\sqrt{n^2 + \left(\frac{P}{2}\right)^2}} \tag{6.92}$$

Vrijednosti koeficijenta osjetljivosti za metričke navoje prikazani su sljedećim dijagramom:



Slika 6-10 koeficijenti osjetljivosti c_n za metričke navoje

Najveća vrijednost c_n je kod navoja s najvećim kutom uspona i iznosi 0,12.

6.3.4 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera unutarnjih metričkih navoja

Ostale sastavnice mjernih nesigurnosti jednake su kao i kod metode s T-ticalom.

6.3.5 Nesigurnost rezultata mjerenja srednjeg promjera vanjskih metričkih navoja

Tablica 6-15 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2b kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	Normalna	$\frac{1}{sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
P	0,95	Normalna	0,55	0,63
$\alpha/2$	0,14˚	Normalna	$\frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} \cdot (d_D - d_0)$	0,4
A_1	-	-	-	-
A_2	0,1	Pravokutna	1	0,1
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
n	1,21	Normalna	0,12	0,15
$u(D_2)$	**0,8 µm**			

Tablica 6-16 Sastavnice mjernih nesigurnosti – 2a kategorija umjeravanja

Veličina X_i	Iznos standardne nesigurnosti $u(X_i)$	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(y)$, µm
d_D	0,35	Normalna	$\frac{1}{\sin(\alpha/2)} - 1 = 1$	0,35
P	0,95	Normalna	0,55	0,63
$\alpha/2$	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
δB	0,25	Pravokutna	1	0,25
Δn	1,21	Normalna	0,12	0,15
$u(D_2)$	**1,06 µm**			

Standardne nesigurnosti iznose:

- Srednji promjer - 2b: $u(D_2)$ **= 0,8 µm,** k **= 1**
- Srednji promjer - 2a: $u(D_2)$ **= 1,06 µm,** k **= 1**

EURAMET.L-S21

Jedan od strateških ciljeva Laboratorija je objava mjeriteljskih sposobnosti na području mjerenja navoja u CIPM MRA KDCB bazu podataka. Temeljem ovog istraživanja izrađeni su postupci umjeravanja jednostavnog srednjeg promjera paralelnih graničnih mjerila metodom s T-ticalom za unutarnje navoje [27] i metodom s tri valjčića za vanjske navoje [28]. Postupci su provjereni i odobreni od strane BIPM stručnjaka. 2013. godine objavljene su CMC vrijednosti za umjeravanje jednostavnog srednjeg promjera navoja u CIPM MRA KDCB bazu podataka.
Odgovornost Nacionalnog Laboratorija kao potpisnika CIPM MRA je sudjelovanje na međunarodnim ključnim (eng: *key*) ili dodatnim (eng: *supplementory*) usporedbama u cilju potvrđivanja mjeriteljskih sposobnosti [29]. S obzirom da usporedba za umjeravanje navoja na razini nacionalnih instituta nikad nije provedena, Laboratorij je 2011. godine na godišnjem sastanku EURAMET-a tehničkom odboru za duljinu (TC-L) predložio iniciranje usporedbe za umjeravanje paralelnih graničnih mjerila navoja. Odlučeno je da se provede međunarodna usporedba pod nazivom EURAMET.L-S21 Supplementary Comparison of Parallel Thread Gauges i koju će voditi Laboratorij. 2012. godine izrađen je tehnički protokol [18] koji je proslijeđen svim članovima EURAMET-a. Na usporedbu se prijavilo deset nacionalnih laboratorija, a mjerenja su započela 12.3.2012.

7.1 Tehnički protokol

Tehnički protokol izrađen je sukladno uputi o provođenju ključnih/dodatnih usporedbi [19] i predstavlja važan dokument kojim je detaljno opisan postupak provedbe usporedbe. Konačna odluka Laboratorija o sudjelovanju na usporedbi donosi se temeljem tehničkog protokola usporedbe koji sadrži informacije o vremenskom rasporedu mjerenja, standardima mjerenja, mjeriteljskim uvjetima, informacijama o transportu, izvještajima mjerenja i slično.
Tehnički protokol objavljen je na stranicama BIPM-a pod nazivom projekta EURAMET.L-S21 [18]

7.1.1 Sudionici usporedbe

Mjerenja su izvršena u jednom ciklusu mjerenja od uz sudjelovanje nacionalnih instituta Hrvatske, Slovenije, Švicarske, Mađarske, Finske, Francuske, Austrije, Estonije, Italije, Turske i Estonije.
Mjerenja u Laboratoriju provedena su na početku i na kraju ciklusa mjerenja kako bi se ustvrdila vremenska postojanost srednjeg promjera graničnih navojnih mjerila. Jedan od nacionalnih instituta je po završetku mjernog ciklusa zatražio ponovno mjerenje s drugom mjernom opremom.

7.1.2 Opis mjernih sredstava

Na usporedbi se umjeravalo šest graničnih kontrolnih mjerila navoja. Tri navojna čepa i tri navojna prstena sljedećih dimenzija i oznaka:

Tablica 7-2 Mjerna sredstva

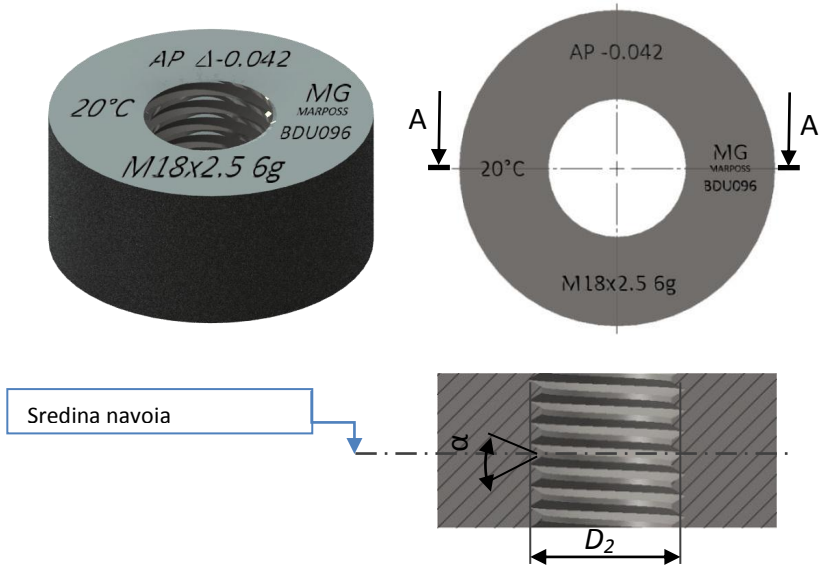
	Navoj	Serijski broj
Navojni čep	GO M6x1 6H	FSB 01
	GO M12x1,75 6H	FSB 02
	GO M36x1,5 6H	FSB 03
Navojni prsten	GO M18x2,5 6g	BDU 096
	GO M42x4,5 6g	BDP 105
	GO M30x1,5 6g	BEI 234

7.1.3 Postupak mjerenja

Mjerene veličine su:

- Jednostavni srednji promjer (1a i 2a kategorija umjeravanja)
- Srednji promjer (1b i 2b kategorija umjeravanja)
- Kut navoja
- Korak navoja

Mjerna mjesta prikazana su na slici 7-1 i slici 7-2.



Slika 7-1 mjerna mjesta – navojni prsten



Slika 7-2 mjerna mjesta – navojni čep

7.1.4 Mjerni izvještaj

Mjerni izvještaj sadržava rezultate mjerenja i mjerne nesigurnosti uz faktor pokrivanja $k = 1$.
Uz rezultate mjerenja navedene su sastavnice mjernih nesigurnosti za sve kategorije umjeravanja srednjeg promjera te sastavnice nesigurnosti mjerenja kuta i koraka navoja. Primjer ispunjenog izvještaja rezultata mjerenja navojnog čepa M 12 x 1.75 u Laboratoriju prikazan je na slici 7-3:

Thread plugs

Thread plug gauge: M12x1,75

Parameter	Symbol	Measured Value	Uncertainty (k=1) u_c
Thread angle is assumed to be nominal (1a or 2a calibration category)			
Pitch diameter	d_2	10,88056mm	1,46 µm
Simple pitch diameter	$d_{2\,Simple}$	10,88066 mm	1,26 µm
Thread angle is measured (1b or 2b calibration category)			
Pitch diameter	d_2	10,88055 mm	1,38 µm
Simple pitch diameter	$d_{2\,Simple}$	10,88065 mm	1,16 µm
Flank angle	α	1,0471539 rad	$1{,}75\times10^{-3}$ rad
Left flank angle (optional)	β	- rad	- rad
Right flank angle (optional)	γ	- rad	- rad
Pitch	P	1,749885 mm	0,86 µm

Parameters of measurement system

Parameter	Symbol	Value
Measured displacement	m	12,66316 mm
Measurement force	F	2,6 N
Diameter of probing element	d_D	1,09976 mm

Short description of the applied measurement method/instruments:

- 3-wire method
- Length measurement machine

Slika 7-3 Izvještaj o mjerenju

7.2 Analiza rezultata mjerenja

Analiza rezultata mjerenja provedena je u skladu s BIPM praksom [30], [12]. Proveden je Birge ratio test konzistencije rezultata usporedbe. Za svaki od laboratorija izračunate su *En* vrijednosti i referentne vrijednosti SCRV (eng. *supplementary comparison reference value*) kao ponderirane sredine (eng. *weighted mean*) prijavljenih rezultata mjerenja. Zbog značajnog doprinosa rezultata mjerenja jednog od instituta na ponderiranu sredinu (preko 95%) SCRV dodatno je izračunata kao aritmetička sredina rezultata mjerenja. Postupak analize rezultata dan je u nastavku:

Za svaki laboratorij (*i*) normirani težinski faktor, w_i računa se prema:

$$w_i = C \cdot \frac{1}{u^2(x_i)} \tag{7.1}$$

gdje je $u(x_i)$ standardna mjerna nesigurnost laboratorija "*i*" a konstanta *C* iznosi:

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u^2(x_i)}} \tag{7.2}$$

gdje je *n* broj laboratorija.
Ako se referentna vrijednost određuje kao ponderirana sredina onda vrijedi:

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i \rightarrow x_{ref} \tag{7.3}$$

Ako se referentna vrijednost određuje kao aritmetička sredina onda vrijedi:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \rightarrow x_{ref} \tag{7.4}$$

Statistička konzistentnost rezultata s nesigurnostima mjerenja provjerava se računanjem *En* vrijednosti za svaki laboratorij. Opći izraz koji vrijedi bez obzira na način na koji se računa referentna vrijednost je:

$$E_n = \frac{x_i - \bar{x}_w}{2 \cdot u(x_i - x_{ref})} \tag{7.5}$$

Nesigurnost ponderirane sredine je:

$$u(\bar{x}_w) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u^2(x_i)}}} \rightarrow u(x_{ref}) \tag{7.6}$$

Nesigurnost aritmetičke sredine je:

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{n} \sqrt{u^2(x_i)} \rightarrow u(x_{ref}) \tag{7.7}$$

Nesigurnost razlike $u(x_i - x_{ref})$ za slučaj ponderirane sredine ako je $x_{ref} = f(x_i)$ iznosi:

$$u(x_i - x_{ref}) = u(x_i - \bar{x}_w) = \sqrt{u^2(x_i) - u^2(\bar{x}_w)} \quad (7.8)$$

Izvod izraza 7.8 može se pronaći u dokumentu CCEM WGKC/2007-27 [31].
Nesigurnost razlike $u(x_i - x_{ref})$ za slučaj ponderirane sredine kad je $x_{ref} = f(x_i)$ iznosi:

$$u(x_i - x_{ref}) = u(x_i - \bar{x}) = \sqrt{\left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot u^2(x_i) + u^2(\bar{x})} \quad (7.9)$$

Izvod izraza 7.9 dan je u prilogu 2.
Ako u račun srednje vrijednosti ne ulazi rezultat i-tog laboratorija $x_{ref} \neq f(x_i)$ onda se nesigurnost razlike računa prema sljedećem izrazu:

$$u(x_i - x_{ref}) = \sqrt{u^2(x_i) + u^2(x_{ref})} \quad (7.10)$$

Statističko slaganje rezultata mjerenja u usporedbi provjerena je „Birge ratio“ testom:

$$R_B = \frac{u_{ext}(\bar{x}_w)}{u_{int}(\bar{x}_w)} \quad (7.11)$$

gdje je:

$$u_{ext}(\bar{x}_w) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \bar{x}_w)^2}{u^2(x_i)}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u^2(x_i)}}} \quad (7.12)$$

i

$$u_{int}(\bar{x}_w) = u(\bar{x}_w) = \sqrt{C} \quad (7.13)$$

Ako je usporedba statistički konzistentna sljedeći uvjet mora biti zadovoljen:

$$R_B < \sqrt{1 + \sqrt{\frac{8}{n-1}}}, uz\ k = 2 \quad (7.14)$$

Ukoliko uvjet 7.14 nije zadovoljen iz računa referentne vrijednosti izostavlja se rezultat s najvećom *En* vrijednosti. Postupak je ponavlja dok se uvjet $R_B < R_{Bcrit}$ ne zadovolji.
Naknadno se izračunaju *En* vrijednosti rezultata koji su izostavljeni iz računa referentne vrijednosti korištenjem izraza 7.5 i izraza 7.14. Laboratoriji čiji su rezultati izuzeti iz računa referentne vrijednosti označen je crvenom bojom.

7.3 Rezultati mjerenja

U ovom radu nisu prikazani svi rezultati usporedbe već rezultati i analiza rezultata jednog navojnog prstena i jednog navojnog čepa u svrhu diskusije dokazivanja hipoteze ovoga rada. Ostali rezultati bit će prikazani „Draft B EURAMET.L-S21“ na stranicama BIPM-a.

Rezultati mjerenja navojnog čepa M 12 x 1,25 prikazani su tablicama 7-3 do 7-9 te dijagramima (slikama) 7-4 do 7-9, a rezultati mjerenja navojnog prstena M 18 x 2,5 tablicama 7-10 do 7-16 te dijagramima (slikama) 7-10 do 7-15. Vrijednosti rezultata i mjerene nesigurnosti dane su u prilogu 2. Plavom linijom prikazana je referentna vrijednost SCRV.

Rezultati laboratorija koji pokazuju nekonzistentnost s ostalima, te rezultati ponovljenog mjerenja INRIM instituta isključeni su iz izračuna referentne vrijednosti.

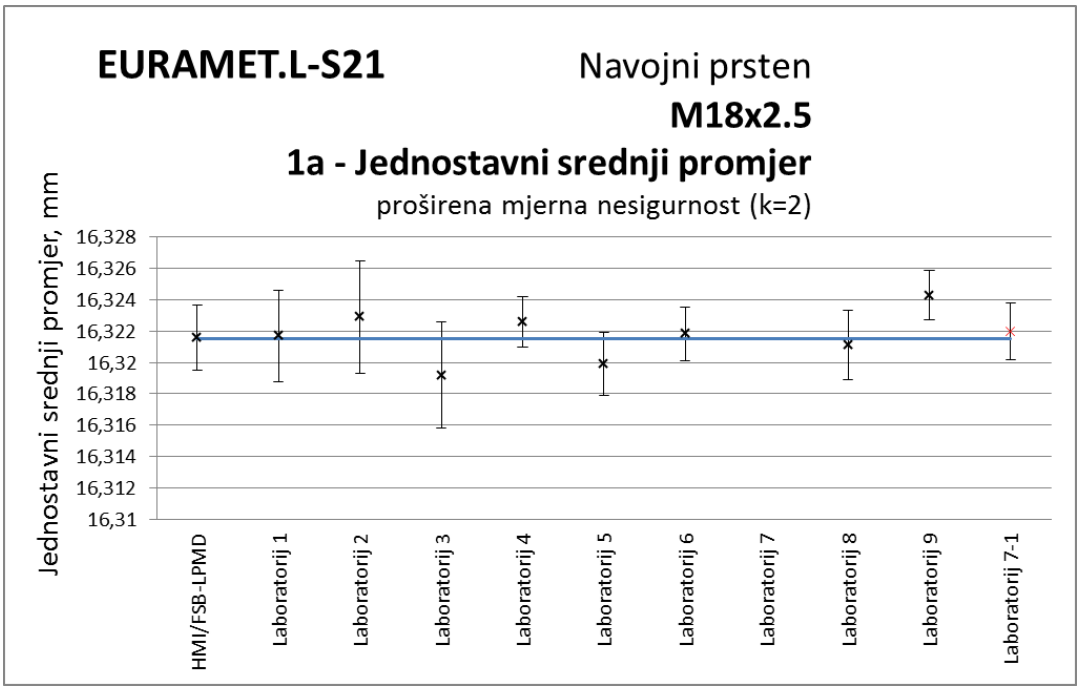
Tablica 7-3 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1a

NMI	1a - Jednostavni srednji promjer, $D_{2\ Simple}$			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	$x_i-\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	16,32159	1,03	0,00008	0,04
Laboratorij 1	16,3217	1,47	0,00019	0,07
Laboratorij 2	16,3229	1,8	0,00139	0,40
Laboratorij 3	16,3192	1,70	-0,00231	-0,70
Laboratorij 4	16,3226	0,80	0,00109	0,78
Laboratorij 5	16,3199	1,0	-0,00161	-0,87
Laboratorij 6	16,32183	0,85	0,00032	0,21
Laboratorij 7				
Laboratorij 8	16,3211	1,10	-0,00041	-0,20
Laboratorij 9	16,3243	0,8		
Laboratorij 7-1	16,3220	0,9	0,00049	0,25
n	8			
C	1,46347E-07			
$\bar{x}_w$	16,32151			
u_{int}	0,00038			
u_{ext}	0,00039			
R_B	1,013805783	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,438417522	**0,705**		

	En
Laboratorij 9	**16,3243**
	1,57

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti

Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

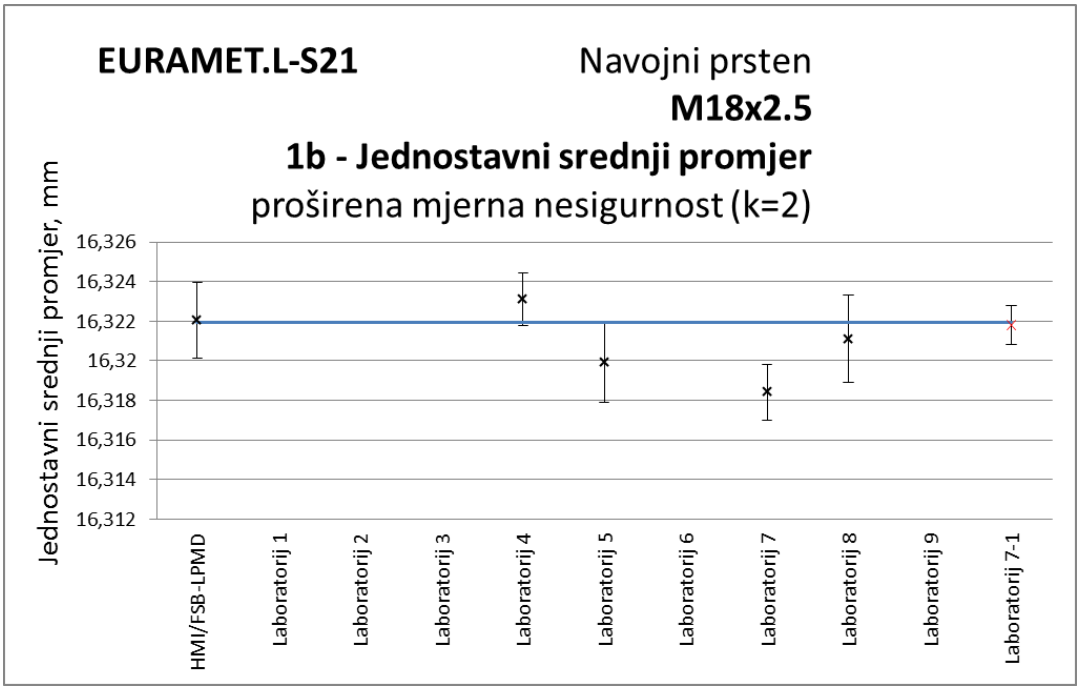


Slika 7-4 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1a

Tablica 7-4 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1b

NMI	1b - Jednostavni srednji promjer, $D_{2\ Simple}$			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	16,32204	0,96	0,00009	0,05
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3				
Laboratorij 4	16,3231	0,66	0,00115	1,17
Laboratorij 5	16,3199	1,0	-0,00205	-1,14
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	16,3184	0,7		
Laboratorij 8	16,3211	1,10	-0,00085	-0,42
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	16,3218	0,5	-0,00015	-0,11
n	4			
C	1,92042E-07			***En***
$\bar{x}_w$	16,32195		**Laboratorij 7**	**16,3184**
u_{int}	0,00044			-2,15
u_{ext}	0,00071			
R_B	1,617033988	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,622650043	**0,997**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

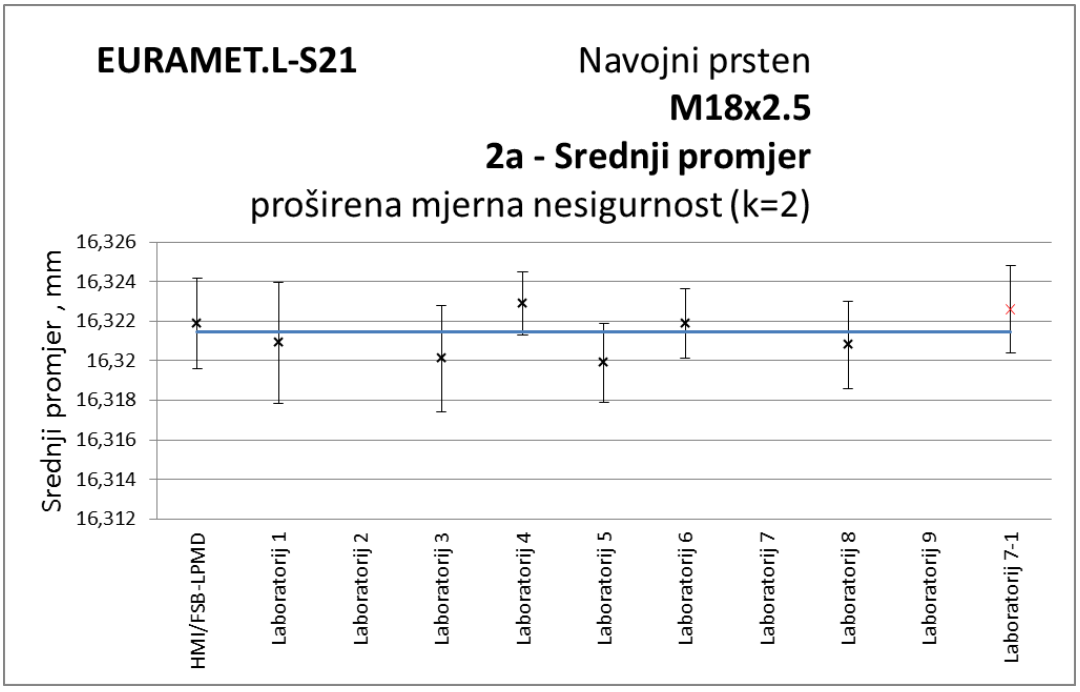


Slika 7-5 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Jednostavni srednji promjer 1b

Tablica 7-5 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2a

NMI	2a - Srednji promjer, D_2			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	16,32189	1,14	0,00043	0,20
Laboratorij 1	16,3209	1,52	-0,00056	-0,19
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	16,3201	1,35	-0,00136	-0,53
Laboratorij 4	16,3229	0,80	0,00144	1,03
Laboratorij 5	16,3199	1,0	-0,00156	-0,85
Laboratorij 6	16,32188	0,89	0,00042	0,26
Laboratorij 7				
Laboratorij 8	16,3208	1,10	-0,00066	-0,32
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	16,3226	1,1	0,00114	0,49
n	7			
C	1,56191E-07			
$\bar{x}_w$	16,32146			
u_{int}	0,00040			
u_{ext}	0,00044			
R_B	1,121690101	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,467889825	**0,764**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.



Slika 7-6 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2a

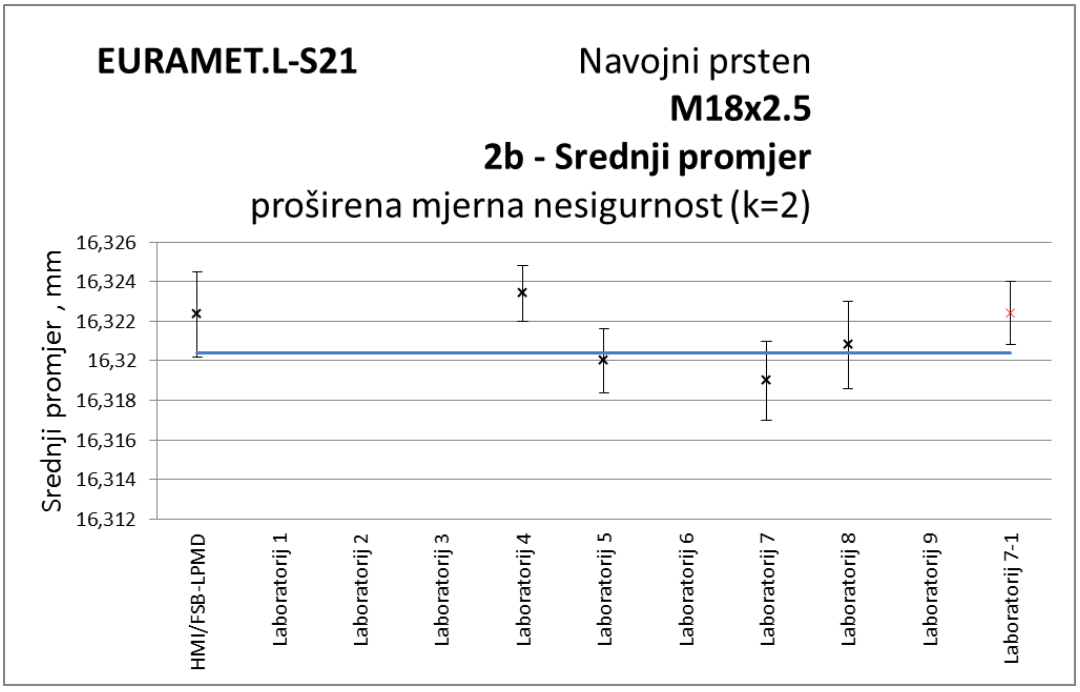
Tablica 7-6 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2b

NMI	2b - Srednji promjer, D_2			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	16,32234	1,08	0,00194	1,01
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3				
Laboratorij 4	16,3234	0,70		
Laboratorij 5	16,3200	0,81	-0,00040	-0,31
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	16,3190	1,0	-0,00140	-0,80
Laboratorij 8	16,3208	1,10	0,00040	0,20
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	16,3224	0,8	0,00200	1,07
n	4			
C	2,37646E-07			
$\bar{x}_w$	16,32040			
u_{int}	0,00049			
u_{ext}	0,00066			
R_B	1,361704492	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,622650043	**0,839**		

	En
Laboratorij 4	**16,3234**
	1,76

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti

Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

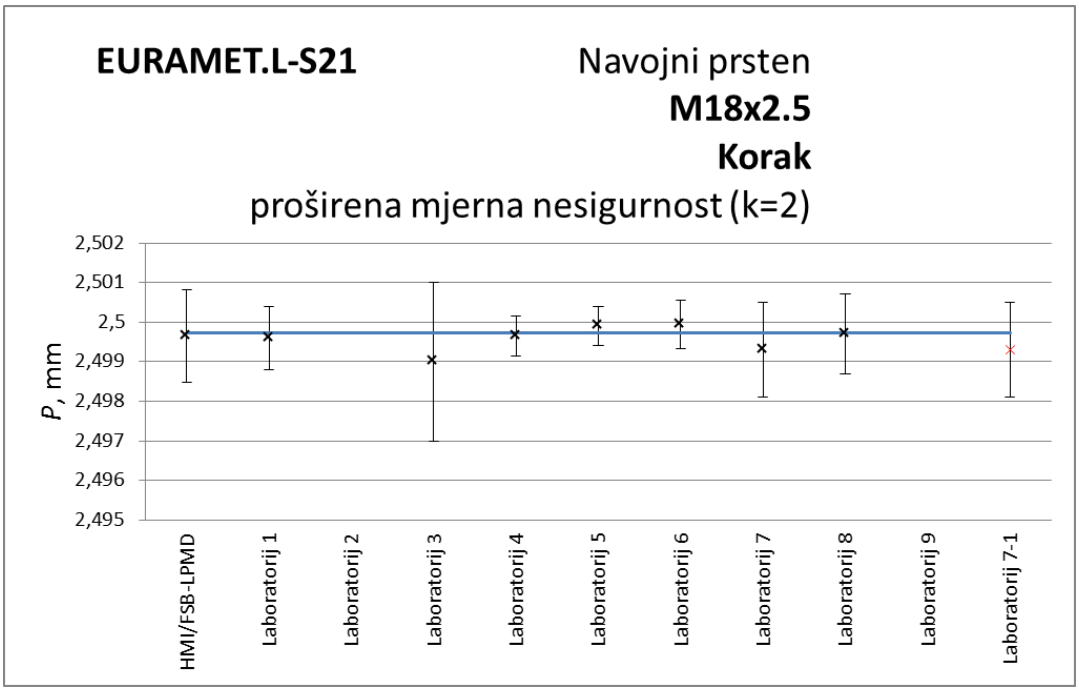


Slika 7-7 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Srednji promjer 2b

Tablica 7-7 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Korak navoja

NMI	Korak, *P*			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	$x_i-\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	2,49965	0,58	-0,00009	-0,08
Laboratorij 1	2,4996	0,4	-0,00014	-0,18
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	2,4990	1	-0,00074	-0,37
Laboratorij 4	2,49964	0,25	-0,00010	-0,23
Laboratorij 5	2,4999	0,25	0,00016	0,38
Laboratorij 6	2,49994	0,3	0,00020	0,37
Laboratorij 7	2,4993	0,60	-0,00044	-0,37
Laboratorij 8	2,4997	0,5	-0,00004	-0,04
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	2,4993	0,6	-0,00044	-0,36
n	8			
C	1,66357E-08			
$\bar{x}_w$	2,49974			
u_{int}	0,00013			
u_{ext}	0,00007			
R_B	0,567234817	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,438417522	**0,394**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

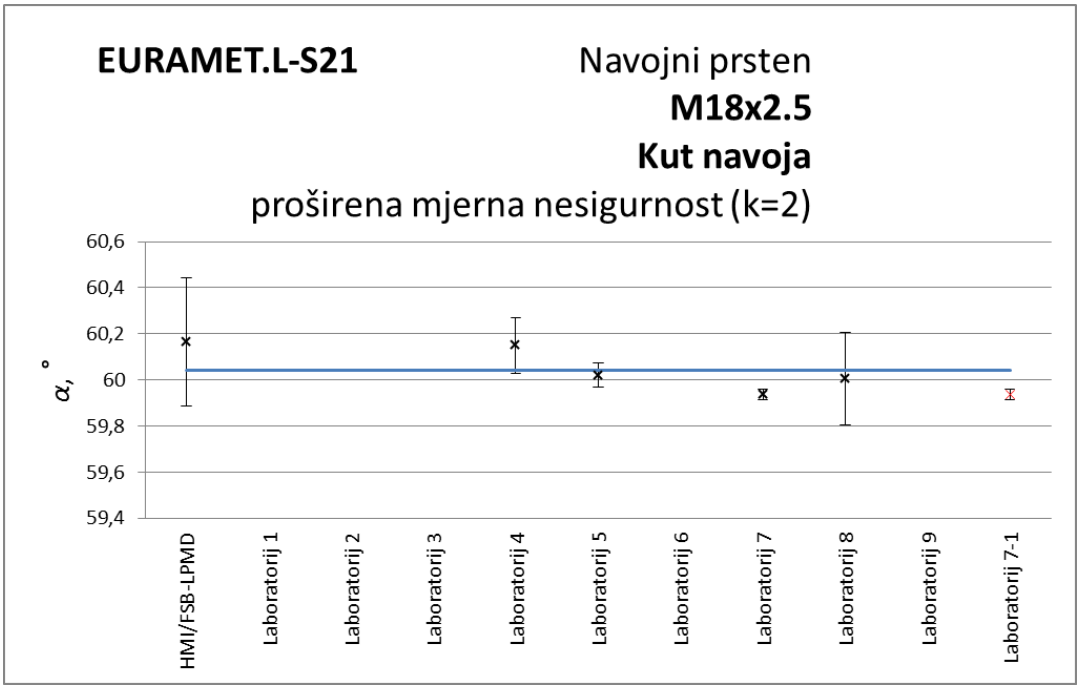


Slika 7-8 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Korak navoja

Tablica 7-8 Rezultati mjerenja navojnog prstena (SRCV - ponderirana sredina)– Kut navoja

NMI	Kut, α			
	Rezultat, °	Mj. nesigurnost (k=1), °	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	60,17	0,14	0,12251	0,44
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3				
Laboratorij 4	60,15	0,06	0,10736	0,97
Laboratorij 5	60,02	0,03	-0,02245	-0,89
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	59,94	0,01		
Laboratorij 8	60,00	0,10	-0,03792	-0,19
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	59,94	0,01	-0,10553	-2,04
n	4			
C	0,000535332			**En**
$\bar{x}_w$	60,04		**Laboratorij 7**	**59,93711495**
u_{int}	0,02314			-2,04
u_{ext}	0,02938			
R_B	1,269904282	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,622650043	**0,783**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.



Slika 7-9 Rezultati mjerenja navojnog prstena – Kut navoja

Tablica 7-9 Rezultati mjerenja navojnog prstena (SRCV - aritmetička sredina)– Kut navoja

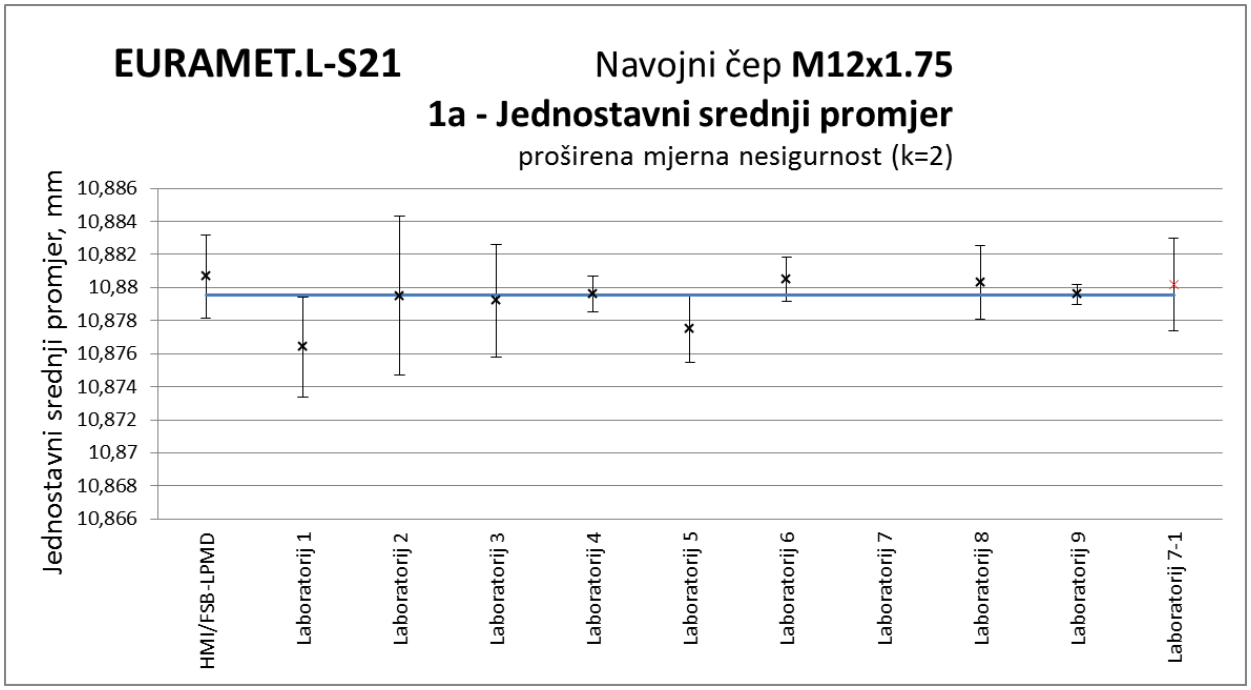
NMI	Kut, α			
	Rezultat, ˚	**Mj. nesigurnost (k=1), ˚**	x_i-$\bar{x}$	*En*
HMI/FSB-LPMD	60,17	0,14	0,08013	0,37
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3				
Laboratorij 4	60,15	0,06	0,06498	0,52
Laboratorij 5	60,02	0,03	-0,06482	-0,65
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	59,94	0,01		
Laboratorij 8	60,00	0,10	-0,08029	-0,47
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	59,94	0,01	-0,14790	-1,56
n	4			
C	0,000535332	$\bar{x}_w$		**En**
$\bar{x}$	60,09	60,04	**Laboratorij 7**	**59,93711495**
u_{ref}	0,04602			-1,56
u_{ext}	0,02938			
R_B	1,269904282	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,622650043	**0,783**		

Bez obzira na da li je SRCV računata kao ponderirana ili aritmetička sredina rezultat mjerenja kuta navoja u INIRIM-u statistički se ne slaže s ostalim rezultatima *En* = 1,56 > 1 i s obzirom da rezultat INIRIM-a u tom slučaju ne utječe na SRCV, referentna vrijednost kuta navoja izračunata je kao ponderirana sredina i za ovaj navoj iznosi 60,04 ˚.

Tablica 7-10 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1a

NMI	1a - Jednostavni srednji promjer, $d_{2\ Simple}$			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	10,88066	1,26	0,00108	0,43
Laboratorij 1	10,8764	1,5	-0,00318	-1,07
Laboratorij 2	10,8795	2,4	-0,00008	-0,02
Laboratorij 3	10,8792	1,70	-0,00038	-0,11
Laboratorij 4	10,8796	0,54	0,00002	0,02
Laboratorij 5	10,8775	1,0	-0,00208	-1,07
Laboratorij 6	10,88051	0,66	0,00093	0,75
Laboratorij 7				
Laboratorij 8	10,8803	1,11	0,00072	0,33
Laboratorij 9	10,8796	0,3	0,00002	0,04
Laboratorij 7-1	10,8802	1,4	0,00062	0,22
n	9			
C	4,94029E-08			
$\bar{x}_w$	10,87958			
u_{int}	0,00022			
u_{ext}	0,00027			
R_B	1,225690451	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,414213562	**0,867**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.



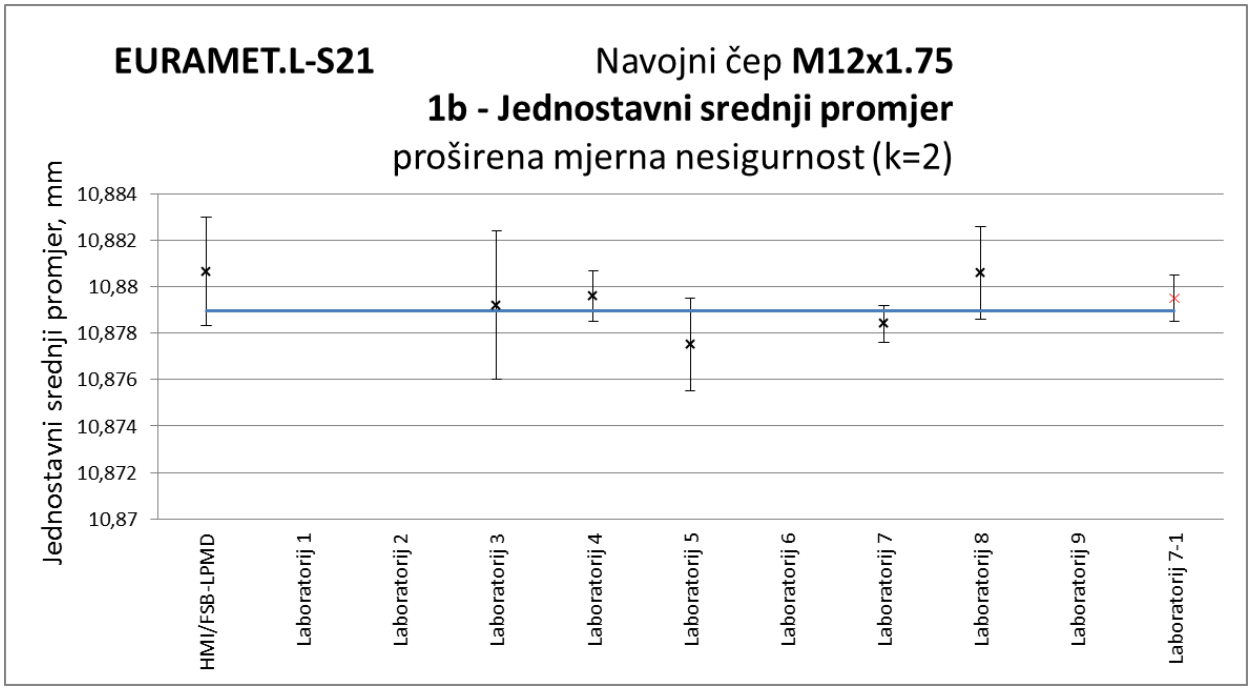
Slika 7-10 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1a

Tablica 7-11 Rezultati mjerenja navojnog čepa– Jednostavni srednji promjer 1b

NMI	1b - Jednostavni srednji promjer, $d_{2Simple}$			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	10,88065	1,16	0,00167	0,74
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	10,8792	1,60	0,00022	0,07
Laboratorij 4	10,8796	0,54	0,00062	0,67
Laboratorij 5	10,8775	1,0	-0,00148	-0,77
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	10,8784	0,4	-0,00058	-1,01
Laboratorij 8	10,8806	1,00	0,00162	0,84
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	10,8795	0,5	0,00052	0,46
n	6			
C	7,80449E-08			
$\bar{x}_w$	10,87898			
u_{int}	0,00028			
u_{ext}	0,00036			
R_B	1,283933191	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,504962147	**0,995**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti

Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.



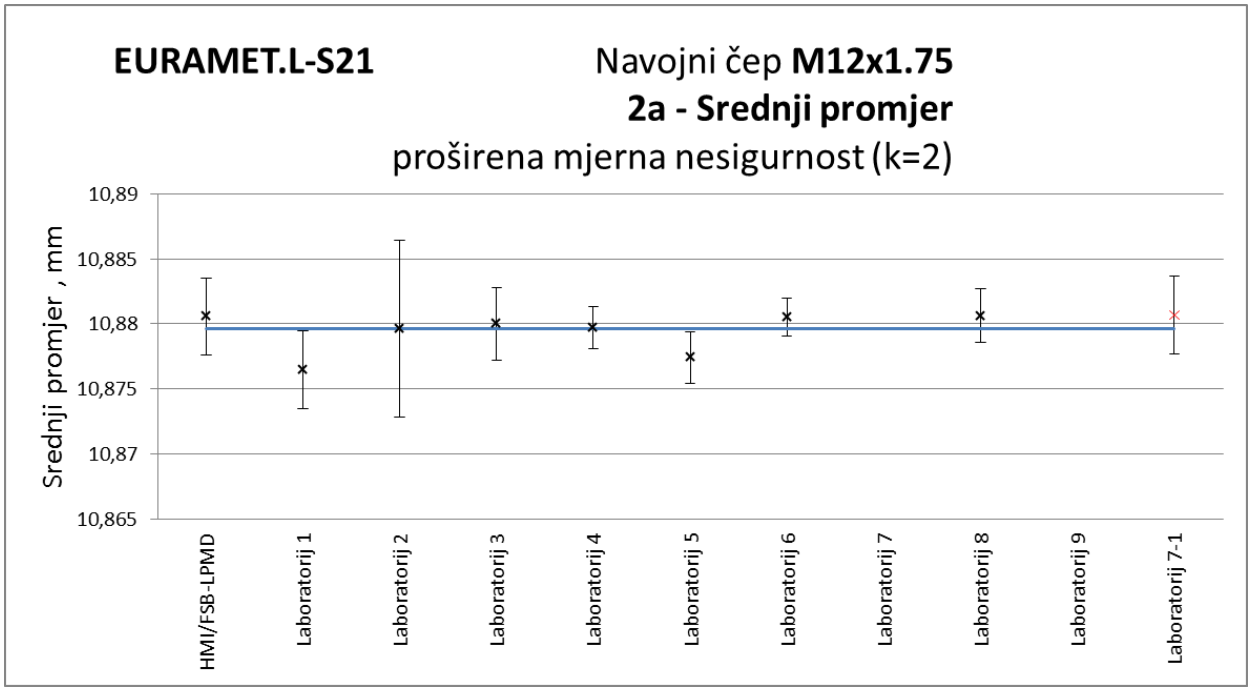
Slika 7-11 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Jednostavni srednji promjer 1b

Tablica 7-12 Rezultati mjerenja navojnog čepa–Srednji promjer 2a

NMI	2a - Srednji promjer, d_2			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	10,88056	1,46	0,00096	0,34
Laboratorij 1	10,8765	1,5	-0,00310	-1,07
Laboratorij 2	10,8796	3,4	0,00000	0,00
Laboratorij 3	10,8800	1,40	0,00040	0,15
Laboratorij 4	10,8797	0,81	0,00010	0,07
Laboratorij 5	10,8774	1,0	-0,00220	-1,19
Laboratorij 6	10,88051	0,71	0,00091	0,76
Laboratorij 7				
Laboratorij 8	10,8806	1,03	0,00100	0,52
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	10,8807	1,5	0,00110	0,36
n	8			
C	1,43662E-07			
$\bar{x}_w$	10,87960			
u_{int}	0,00038			
u_{ext}	0,00050			
R_B	1,321556731	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,438417522	**0,919**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti

Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

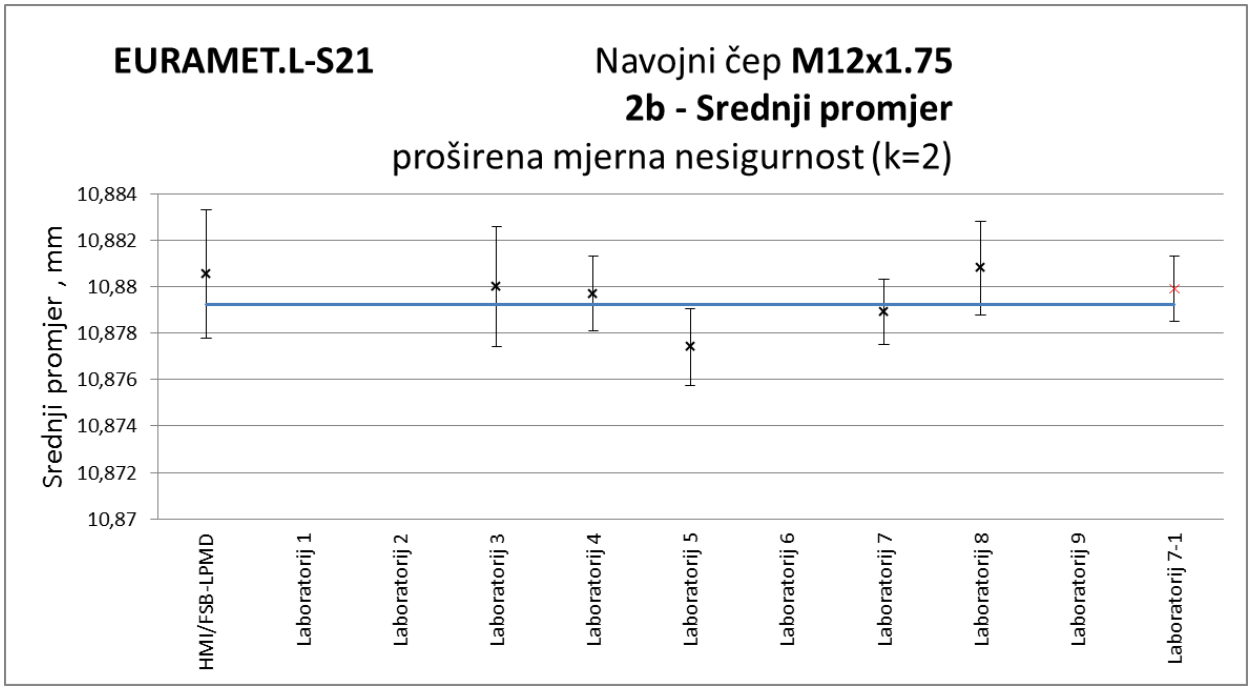


Slika 7-12 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Srednji promjer 2a

Tablica 7-13 Rezultati mjerenja navojnog čepa–Srednji promjer 2b

NMI	2b - Srednji promjer, d_2			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	10,88055	1,38	0,00131	0,49
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	10,8800	1,30	0,00076	0,30
Laboratorij 4	10,8797	0,81	0,00046	0,32
Laboratorij 5	10,8774	0,8	-0,00184	-1,25
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	10,8789	0,7	-0,00034	-0,29
Laboratorij 8	10,8808	1,00	0,00156	0,84
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	10,8799	0,7	0,00066	0,41
n	6			
C	1,40186E-07			
$\bar{x}_w$	10,87924			
u_{int}	0,00037			
u_{ext}	0,00051			
R_B	1,352720914	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,504962147	**0,899**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

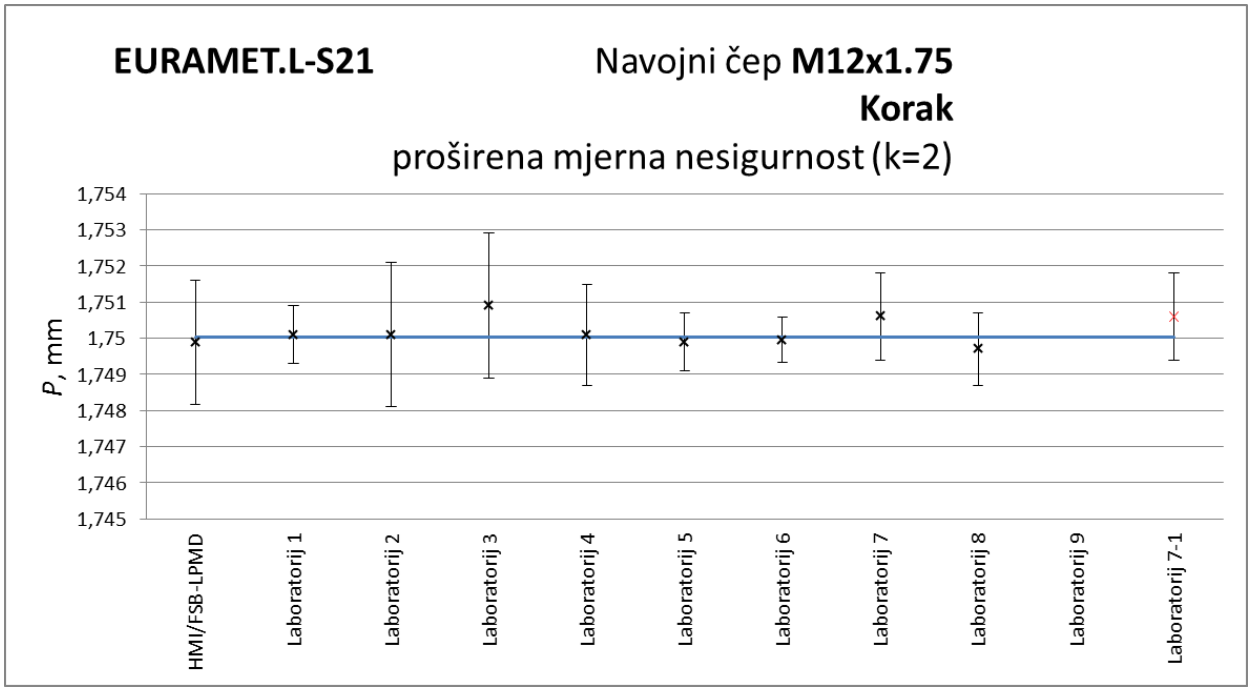


Slika 7-13 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Srednji promjer 2b

Tablica 7-14 Rezultati mjerenja navojnog čepa– Korak

NMI	Korak, *P*			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	$x_i-\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	1,74989	0,86	-0,00014	-0,09
Laboratorij 1	1,7501	0,4	0,00007	0,10
Laboratorij 2	1,7501	1,0	0,00007	0,04
Laboratorij 3	1,7509	1	0,00087	0,44
Laboratorij 4	1,7501	0,7	0,00007	0,05
Laboratorij 5	1,7499	0,40	-0,00013	-0,18
Laboratorij 6	1,74995	0,31	-0,00008	-0,15
Laboratorij 7	1,75060	0,60	0,00057	0,50
Laboratorij 8	1,7497	0,5	-0,00033	-0,35
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	1,7506	0,6	0,00057	0,46
n	9			
C	2,85091E-08			
$\bar{x}_w$	1,75003			
u_{int}	0,00017			
u_{ext}	0,00009			
R_B	0,540957615	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,414213562	**0,383**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.



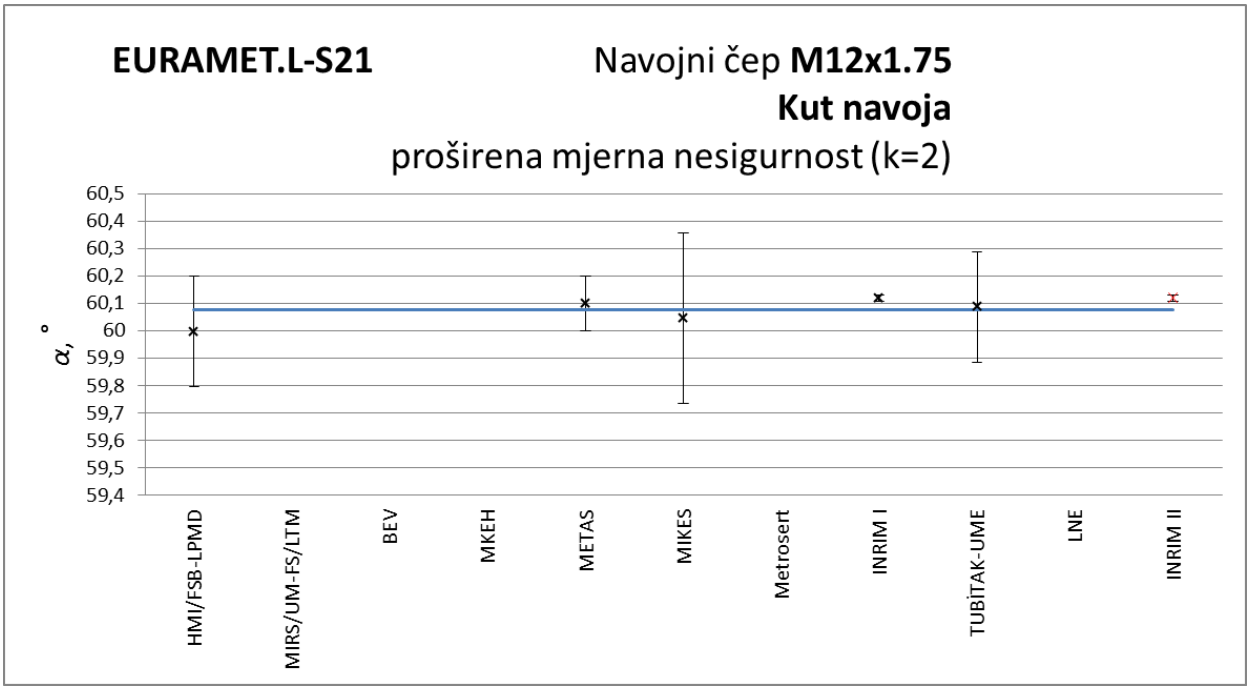
Slika 7-14 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Korak navoja

Tablica 7-15 Rezultati mjerenja navojnog čepa (SRCV - ponderirana sredina)– Kut navoja

NMI	Kut, α			
	Rezultat, ˚	Mj. nesigurnost (k=1), ˚	$x_i-\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	60,00	0,10	-0,12123	-0,61
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	60,00	0,07	-0,11859	-0,90
Laboratorij 4	60,10	0,05	-0,01873	-0,19
Laboratorij 5	60,05	0,15	-0,07276	-0,24
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	60,12	0,01	0,00173	0,91
Laboratorij 8	60,09	0,10	-0,03208	-0,16
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	60,12	0,01	0,00173	0,11
n	6			
C	3,19195E-05			
$\bar{x}_w$	60,12			
u_{int}	0,00565			
u_{ext}	0,00576			
R_B	1,01987281	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,504962147	**0,678**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti

Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.



Slika 7-15 Rezultati mjerenja navojnog čepa – Kut navoja

Tablica 7-16 Rezultati mjerenja navojnog čepa (SRCV - aritmetička sredina)– Kut navoja

NMI	Kut, α			
	Rezultat, ˚	Mj. nesigurnost (k=1), ˚	$x_i-\bar{x}$	*En*
HMI/FSB-LPMD	60,00	0,10	-0,06096	-0,34
Laboratorij 1				
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	60,00	0,07	-0,05832	-0,44
Laboratorij 4	60,10	0,05	0,04154	0,37
Laboratorij 5	60,05	0,15	-0,01248	-0,05
Laboratorij 6				
Laboratorij 7	60,12	0,01	0,06201	0,82
Laboratorij 8	60,09	0,10	0,02820	0,16
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	60,12	0,01	0,06201	0,81
n	6			
C	3,19195E-05	$\bar{x}_w$		
$\bar{x}$	60,06	60,12		
u_{ref}	0,03763			
u_{ext}	0,00576			
R_B	1,01987281	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,504962147	**0,678**		

Crvenom i zelenom bojom označeni su laboratoriji koji ne ulaze u račun referentne vrijednosti
Zelenom bojom označeno je ponovljeno mjerenje Laboratorija 7.

Bez obzira na da li je SRCV računata kao ponderirana ili aritmetička sredina rezultat mjerenja kuta navoja u INIRIM-u statistički se slaže s ostalim rezultatima *En* = 1,56 < 1 i s obzirom da rezultat INIRIM-a u tom slučaju značajno utječe na SRCV, referentna vrijednost kuta navoja izračunata je kao aritmetička sredina i za ovaj navoj iznosi 60,06˚.

7.4 Veza usporedbe EURAMET.L-S21 i CIPM MRA KCDB baze podataka

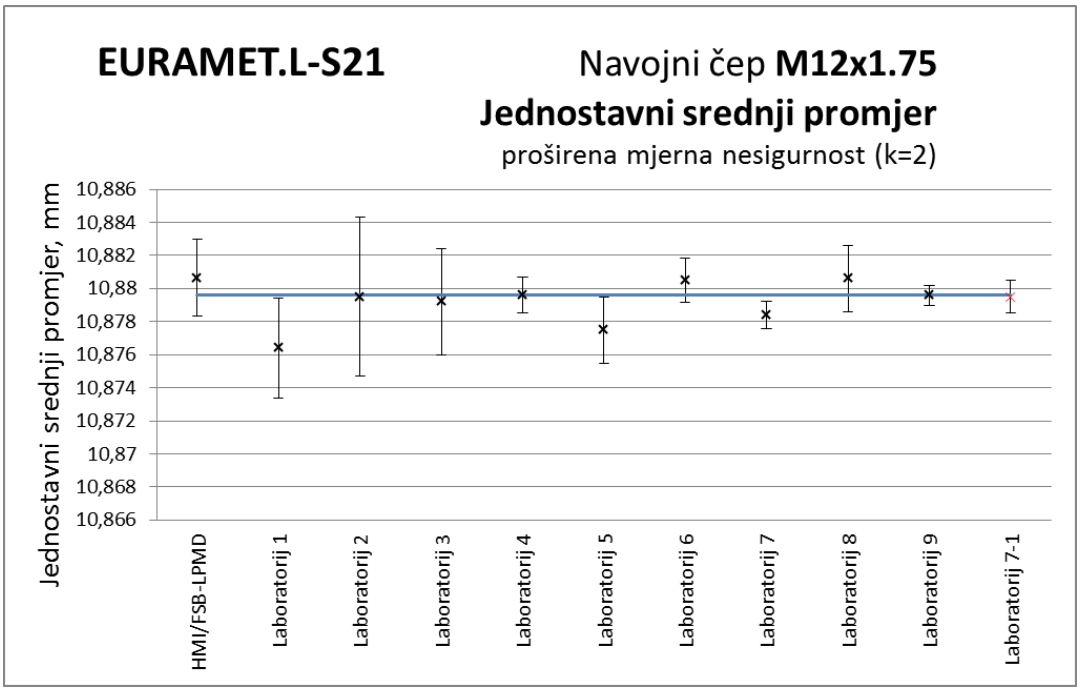
Od deset nacionalnih instituta koji su sudjelovali u usporedbi EURAMET.L-S21 pet NMI-a posjeduje objavljene CMC vrijednosti u CIPM MRA KDCB bazi podataka. S obzirom da je ova usporedba prva EURAMET usporedba s područja mjerenja navoja ne postoji standardni postupak za ostvarivanje veze između usporedbe i CMC vrijednosti. Nadalje, različite kategorije umjeravanja srednjeg promjera navoja nisu predviđene u DIMVIM dokumentom [32] kojim su definirana područja prijave CMC-a. Ipak pregledom već prijavljenih CMC-a za područje mjerenja navoja ustanovljeno je da je su NMI Hrvatske i Švedske prijavili CMC-e za jednostavni srednji promjer (kategorije 1a i 1b) iz čega se može zaključiti da se pri prijavama postojećih CMC vrijednosti razlikovao jednostavni srednji promjer i srednji promjer navoja. Ako bi se hipoteza rada potvrdila u potpunosti: „**Određivanjem utjecajnih elemenata na rezultat mjerenja srednjeg promjera navoja**, dobiven različitim mjernim postupcima, **moguće je postići usporedivost rezultata mjerenja unutar i između različitih kategorija umjeravanja“**, tada bi rezultati umjeravanja srednjeg promjera navoja bili usporedivi bez obzira na različite kategorije i jedinstvena CMC vrijednost za srednji promjer bila bi dovoljna. U slučaju da bi se hipoteza djelomično potvrdila, odnosno ako su rezultati mjerenja srednjeg promjera usporedivi unutar istih kategorija, a nisu usporedivi između kategorija, tada bi DIMVIM bilo potrebno proširiti s veličinom Jednostavni srednji promjer što odgovara i postojećem stanju prijavljenih vrijednosti. Iako se iz analize rezultata mjerenja (Poglavlje 8.3) može zaključiti da ne postoji statistički značajna razlika između vrijednosti jednostavnog srednjeg promjera i srednjeg promjera, ove rezultate mjerenja nije ispravno međusobno uspoređivati s obzirom da su to teorijski različiti promjeri koji proizlaze iz različitih definicija s bitnom razlikom koja se odnosi na ovisnost srednjeg promjera o koraku navoja kako je opisano u poglavlju 5.5. Rezultati mjerenja unutar iste kategorije (1a i 1b, te 2a i 2b) moraju biti usporedivi ako je kut navoja graničnog mjerila unutar dopuštenih granica odstupanja ili ako se odabere mjerni element s promjerom vrlo bliskim optimalnom (Poglavlje 5.2), bez obzira na odstupanje kuta navoja.

Objedinjeni rezultati jednostavnog srednjeg promjera navoja dani su tablicama 7-1 i 7-2 te prikazani dijagramima 7-16 i 7-17. Rezultati srednjeg promjera navoja dani su tablicama 7-3 i 7-4 te prikazani dijagramima 7-18 i 7-19. Plavom bojom označeni su rezultati mjerenja prema 1b i 2b kategoriji umjeravanja dok su crveno bojom označeni rezultati mjerenja prema 1a i 2a kategoriji umjeravanja.

Tabela 7-1 Jednostavni srednji promjer – čep M 12 x 1,75

NMI	Jednostavni srednji promjer, $d_{2\ Simple}$			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	10,88065	1,16	0,00104	0,46
Laboratorij 1	10,8764	1,5	-0,00321	-1,08
Laboratorij 2	10,8795	2,4	-0,00011	-0,02
Laboratorij 3	10,8792	1,6	-0,00041	-0,13
Laboratorij 4	10,8796	0,54	-0,00001	-0,01
Laboratorij 5	10,8775	1	-0,00211	-1,08
Laboratorij 6	10,88051	0,66	0,00090	0,72
Laboratorij 7	10,8784	0,4		
Laboratorij 8	10,8806	1	0,00099	0,51
Laboratorij 9	10,8796	0,3	-0,00001	-0,02
Laboratorij 7-1	10,8795	0,5	-0,00011	-0,10
n	9			
C	4,8572E-08			
$\bar{x}_w$	10,87961			
u_{int}	0,00022			
u_{ext}	0,00028			
R_B	1,262154764	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,414213562	**0,892**		

	En
Laboratorij 7	**10,8784**
	-1,32

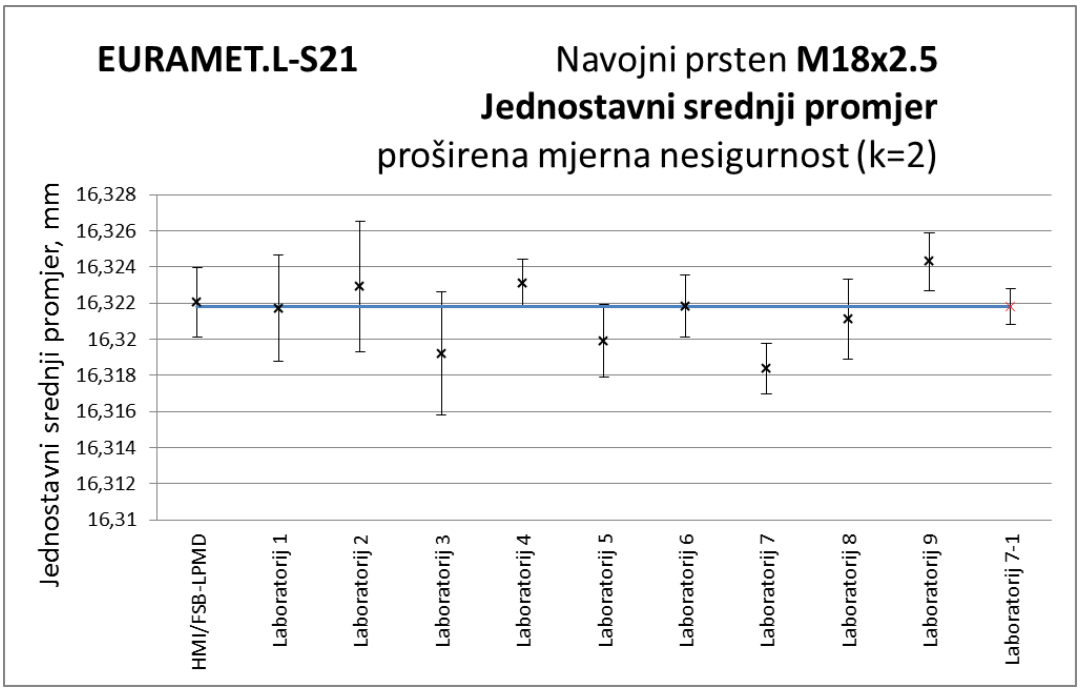


Slika 7-16 Jednostavni srednji promjer – navojni čep M 12 x 1,75

Tabela 7-2 Jednostavni srednji promjer – prsten M 18 x 2,5

NMI	Jednostavni srednji promjer, $D_{2\ Simple}$			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	16,32204	0,96	0,00021	0,12
Laboratorij 1	16,3217	1,47	-0,00013	-0,04
Laboratorij 2	16,3229	1,8	0,00107	0,30
Laboratorij 3	16,3192	1,7	-0,00263	-0,79
Laboratorij 4	16,3231	0,66	0,00127	1,15
Laboratorij 5	16,3199	1	-0,00193	-1,03
Laboratorij 6	16,32183	0,85	0,00000	0,00
Laboratorij 7	16,3184	0,7		
Laboratorij 8	16,3211	1,1	-0,00073	-0,35
Laboratorij 9	16,3243	0,8		
Laboratorij 7-1	16,3218	0,5	-0,00003	-0,02
n	8			
C	1,29723E-07			
$\bar{x}_w$	16,32183			
u_{int}	0,00036			
u_{ext}	0,00044			
R_B	1,234638985	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,438417522	**0,858**		

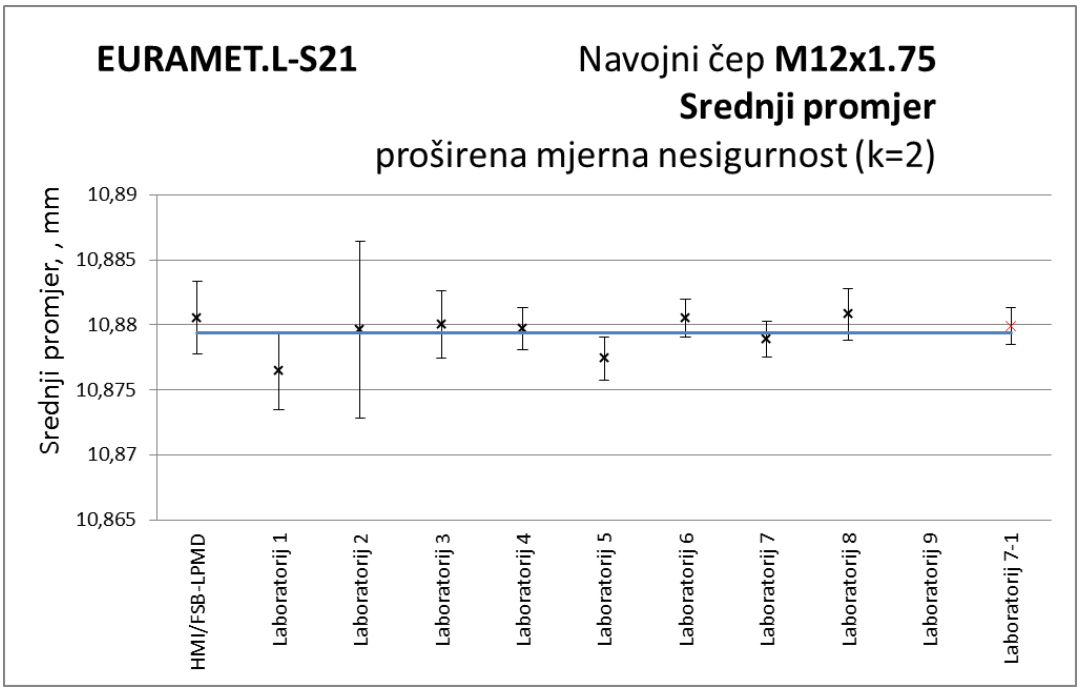
	En
Laboratorij 7	**16,3184**
	-2,18
Laboratorij 9	**16,3243**
	1,41



Slika 7-17 Jednostavni srednji promjer – navojni prsten M 18 x 2,5

Tabela 7-3 Srednji promjer – čep M 12 x 1,75

NMI	Srednji promjer, d_2			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	10,88055	1,38	0,00117	0,44
Laboratorij 1	10,8765	1,5	-0,00288	-0,98
Laboratorij 2	10,8796	3,4	0,00022	0,03
Laboratorij 3	10,88	1,3	0,00062	0,25
Laboratorij 4	10,8797	0,81	0,00032	0,21
Laboratorij 5	10,8774	0,83	-0,00198	-1,30
Laboratorij 6	10,88051	0,71	0,00113	0,89
Laboratorij 7	10,8789	0,7	-0,00048	-0,39
Laboratorij 8	10,8808	1	0,00142	0,75
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	10,8799	0,7	0,00052	0,34
n	9			
C	1,03648E-07			
$\bar{x}_w$	10,87938			
u_{int}	0,00032			
u_{ext}	0,00045			
R_B	1,392091228	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,414213562	**0,984**		

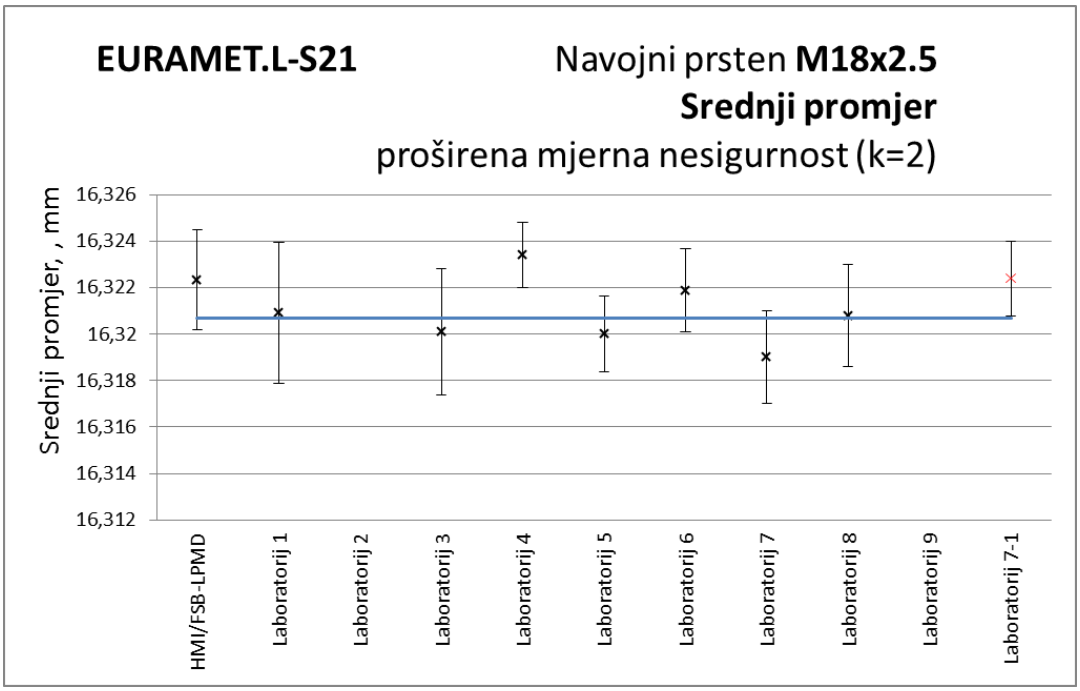


Slika 7-18 Srednji promjer – navojni čep M 12 x 1,75

Tabela 7-4 Srednji promjer – prsten M 18 x 2,5

NMI	Srednji promjer, D_2			
	Rezultat, mm	Mj. nesigurnost (k=1), µm	x_i-$\bar{x}_w$	*En*
HMI/FSB-LPMD	16,32234	1,08	0,00164	0,82
Laboratorij 1	16,3209	1,52	0,00020	0,07
Laboratorij 2				
Laboratorij 3	16,3201	1,35	-0,00060	-0,23
Laboratorij 4	16,3234	0,7		
Laboratorij 5	16,32	0,81	-0,00070	-0,49
Laboratorij 6	16,32188	0,89	0,00118	0,74
Laboratorij 7	16,319	1	-0,00170	-0,92
Laboratorij 8	16,3208	1,1	0,00010	0,05
Laboratorij 9				
Laboratorij 7-1	16,3224	0,8	0,00170	0,96
n	7			
C	1,54992E-07			
$\bar{x}_w$	16,32070			
u_{int}	0,00039			
u_{ext}	0,00045			
R_B	1,149170169	R_B/R_{BCrit}		
R_{BCrit}	1,467889825	**0,783**		

	En
Laboratorij 4	**16,3234**
	1,68



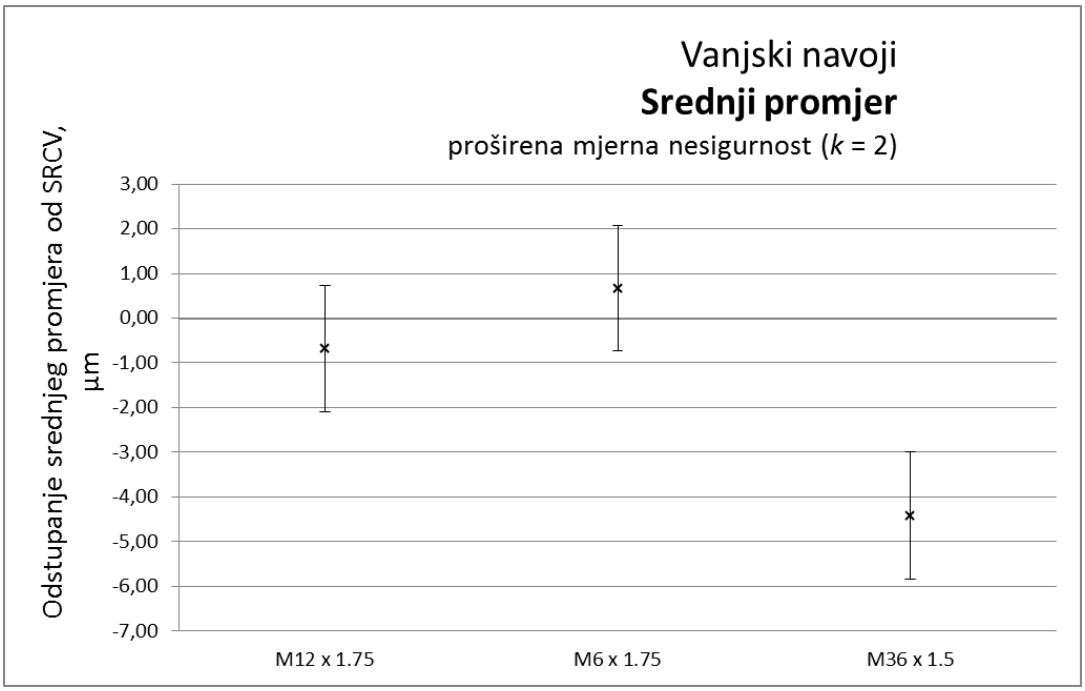
Slika 7-19 Srednji promjer – navojni prsten M 18 x 2,5

Analizom rezultata mjerenja potvrđeno je da su rezultati srednjeg promjera navoja usporedivi unutar istih kategorija umjeravanja, čime je hipoteza rada djelomično potvrđena. Objedinjenjem rezultata mjerenja mogu se izdvojiti rezultati i mjerne nesigurnosti za jednostavni srednji promjer navoja i srednji promjer navoja kao dvije različite dimenzije navoja. Temeljem ovog istraživanja preporučuje se izmjena mjeriteljske prakse i postupak prijave CMC vrijednosti kako je navedeno u nastavku:

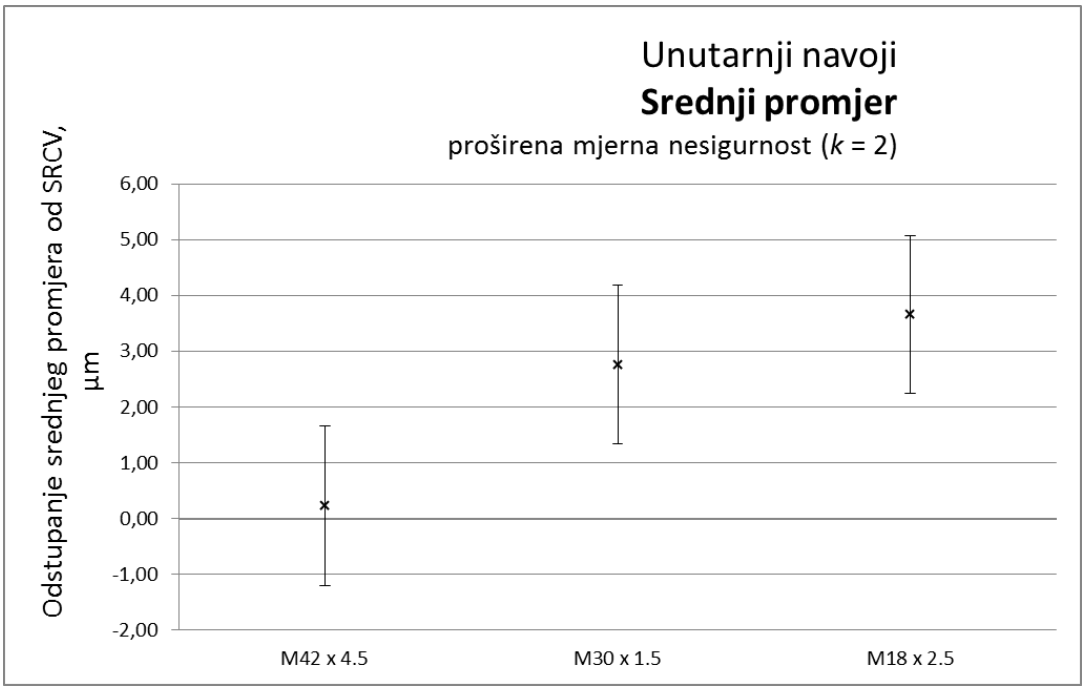
- Prilikom vođenja usporedbi nije potrebno raditi razliku između a i b kategorija umjeravanja.
- NMI-i koji nemaju mogućnost mjerenja kuta navoja moraju utvrdili nalazi li se navojno mjerilo unutar granica dopuštenog odstupanja ili koristiti mjerne elemente bliskog promjera optimalnom.
- S obzirom na provedenu usporedbu može se zaključiti da većina NMI-a posjeduje mogućnost mjerenja koraka navoja. Stoga je moguće zadržati postojeći popis područja mjernih sposobnosti (DimVim) i ograničiti smo jedan - srednji promjer navoja, te sukladno s tim revidirati prijavljene CMC vrijednosti za jednostavni srednji promjer. Drugo rješenje uključuje proširenje DimVim-a sa stavkom jednostavni srednji promjer. Na taj način harmoniziralo bi stanje na području umjeravanja navojnih mjerila i ostvarila bi se poveznica mjeriteljske prakse, važećih normi, preporuka i uputa za umjeravanje s postupkom prijave mjernih sposobnosti.

Rezultati mjerenja – ostale metode

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su mjerenja graničnih mjerila metodom aksijalnog profila na Masterscanner uređaju u umjernom laboratoriju Trescal s.p.a. Italija. Mjerne nesigurnosti preuzete su iz doktorske disertacije „Primjerava metoda merjenja srednjega premera navoja i analiza vplivov na merilni rezultat“ [9]. Slika 8-1 i slika 8-2 prikazuju odstupanja rezultata mjerenja srednjeg promjera od referentnih vrijednosti – SRCV EURAMET.L-S21 usporedbe. Referente vrijednost izračunate su iz objedinjenih rezultata mjerenja prema kategorijama 2a i 2b.

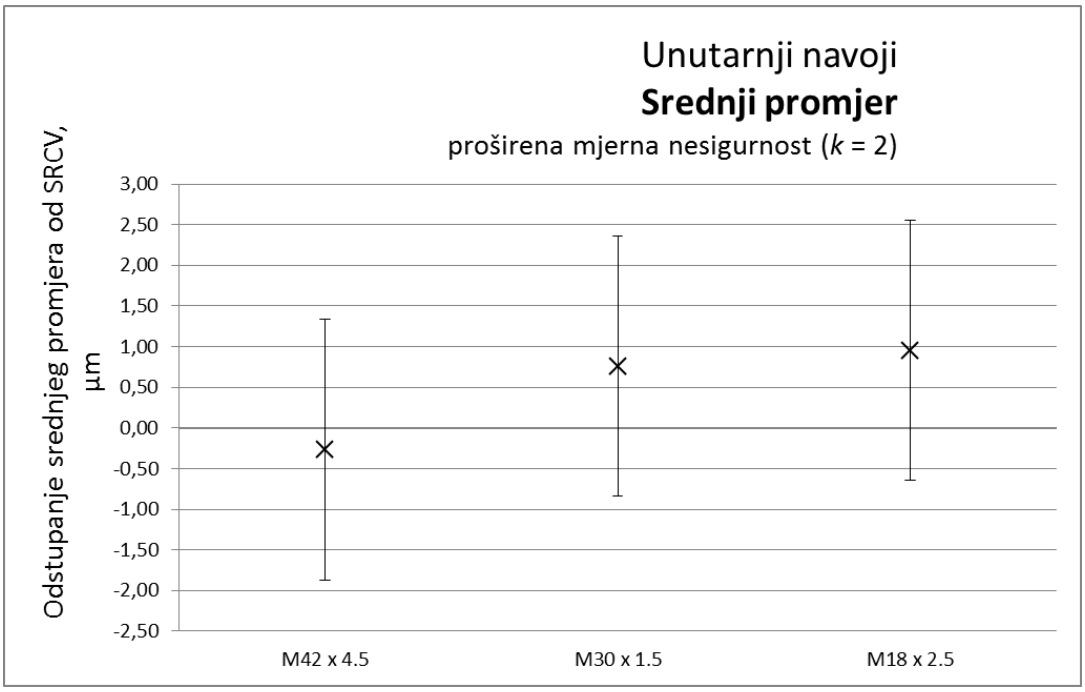


Slika 8-1 Odstupanja rezultata mjerenja vanjskih navoja dobivenih s Masterscanner uređajem od referentne vrijednosti usporedbe EURAMET.L-S21 (SRCV)



Slika 8-2 Odstupanja rezultata mjerenja unutarnjih navoja dobivenih s Masterscanner uređajem od referentne vrijednosti usporedbe EURAMET.L-S21 (SRCV)

Analizom rezultata utvrđeno je da se rezultati mjerenja metodom skeniranja aksijalnog profila samo djelomično slažu s rezultatima usporedbe EURAMET.L-S21 gdje su mjerenja provedena standardnim metodama (T-ticalo, tri valjčića). Da bi se utvrdili uzroci neslaganja rezultata potrebno je provesti znatno opširnije istraživanje orijentirano na metodu mjerenja aksijalnog profila.



Slika 8-3 Odstupanja rezultata mjerenja dobivenih s metodom s mjernim čeljustima od referentne vrijednosti usporedbe EURAMET.L-S21 (SRCV)

Slikom 8-3 prikazana su odstupanja rezultata mjerenja vanjskih navoja metodom s mjernim čeljustima od referentnih vrijednosti EURAMET.L-S21 usporedbe. Mjerne nesigurnosti procijenjene su na način opisan u poglavlju 6.3.5. Utvrđeno je dobro slaganje rezultata i može se zaključiti da je metoda s mjernim čeljustima pogodna za mjerenje srednjeg promjera vanjskih navoja na razini nacionalnih mjeriteljskih instituta.

Zaključak

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu je ujedno i Nacionalni laboratorij za duljinu te predstavlja najvišu razinu u hrvatskom mjeriteljstvu dužina. Laboratorij njeguje pedesetogodišnju praksu umjeravanja navojnih mjerila, a jedan od strateških ciljeva Laboratorija je objava mjeriteljskih sposobnosti na području mjerenja navoja u CIPM MRA KDCB bazu podataka. Postupak prijave započeo je 2011. godine i otvorio čitav niz pitanja koja proizlaze iz nedostatnih tehničkih uputa i preporuka te općenito manjka znanstvenih istraživanja na ovom području, što je osnovna motivacija ovoga rada.

Glavni cilj rada je određivanje i istraživanje dominantnih utjecaja na mjerenje srednjeg promjera unutarnjih i vanjskih paralelnih navoja čija je svrha postavljanje temelja za postizanje usporedivosti rezultata mjerenja metodom s T-ticalom i metodom s tri valjčića na EURAMET razini. S obzirom da norme i upute s područja mjerenja navoja ne postoje na hrvatskom jeziku, na početku rada je dan prijevod stručnih termina i definicija propisanih normom ISO 5408:2009 [19]. U nastavku rada su opisane metode mjerenja, proračuni za određivanje srednjeg promjera i proračuni za procjenu mjernih nesigurnosti koji se koriste na razini nacionalnih mjeriteljskih instituta s naglaskom na recentni dokument EURAMET cg-10 [3]. Iako ovaj dokument preporučuje Berndtov model za izračun srednjeg promjera, koji je usvojen od većine nacionalnih instituta, u nastavku rada je opisan izvorni vektorsko numerički model mjerenja srednjeg promjera. Usporedba navedenog modela s Berndtovim nije pokazala značajne razlike kod navoja s normalnim i blažim kutom uspona dok se razlike od čak par mikrometara pojavljuju pri mjerenju asimetričnih navoja. Razlog tome su nedovoljno točne aproksimacije koje se koriste u Berndtovom računu. U svrhu usporedbe ovih modela izrađen je 3D model mjerenja (navoja i mjernog elementa) u CAD programskom paketu. U drugom dijelu rada je dan opis programa za simulacije utjecaja kuta i koraka navoja, promjera mjernog elementa i temperature na srednji promjer navoja. Simulacije su izrađene u programskim paketu *Matlab* i baziraju se na Monte Carlo metodi. Uz simetrične navoje (metričke) istražen je i doprinos navedenih utjecaja na srednji promjer asimetričnih *S* navoja. Paralelno sa simulacijama, isti doprinosi su izračunati i analitičkim putem. Temeljem rezultata ovih simulacija može se izdvojiti sljedeće:

- **Utjecaj mjernih postupaka**, koji se koriste za umjeravanje srednjeg promjera navoja na razini nacionalnih instituta, **na rezultat mjerenja i mjernu nesigurnost srednjeg pomjera detaljno je istražen i predloženi su analitički izrazi za računanje doprinosa navedenih utjecaja.**
- **Predložen je model za korekciju rezultata srednjeg promjera navoja zbog utjecaja temperature.**
- Primjenom kontaktnih metoda: metode s T-ticalom, metode s mjernim čeljustima i metode s mjernim valjčićima **određene su kritične dimenzije mjernog elementa kod kojih dolazi do značajnog povećanja mjerne nesigurnosti.**
- **Izrađen je model za izračun srednjeg promjera koji se koristi uz metodu s mjernim čeljustima s ciljem smanjenja mjerne nesigurnosti na razinu metode s T-ticalom.**

U nastavku rada procijenjena je nesigurnost rezultata mjerenja dobivenih metodama s T-ticalom i mjernim čeljustima za unutarnje te metodom s tri valjčića za vanjske navoje. Sastavnice mjernih nesigurnosti procijenjene su temeljem provedenih simulacija.

U eksperimentalnom dijelu provedena su mjerenja u Laboratoriju. U cilju potvrđivanja ostvarenih rezultata, Laboratorij je na godišnjem sastanku EURAMET-a 2011. godine predložio tehničkom odboru za duljinu (TC-L) iniciranje usporedbe za umjeravanje paralelnih graničnih mjerila navoja. Ovakva usporedba nikad nije provedena na EURAMET razini. Laboratorij je izabran da vodi usporedbu pod nazivom EURAMET.L-S21 „Supplementary Comparison of Parallel Thread Gauges“. Početkom 2012. Godine je izrađen tehnički protokol [18] koji je proslijeđen svim članovima EURAMET-a. Na usporedbu se prijavilo deset europskih nacionalnih instituta. Nakon završenih mjerenja, provedena je analiza rezultata mjerenja srednjeg promjera prema četiri kategorije umjeravanja (*1a, 2a, 1b* i *2b*) te kuta i koraka navoja. Rezultati mjerenja dobiveni u ovom istraživanju potvrđeni su prema svim kategorijama umjeravanja. S ciljem ostvarenja veze između usporedbe i CMC vrijednosti, provedena je dodatna analiza i potvrđeno je da su rezultati srednjeg promjera navoja usporedivi unutar istih kategorija umjeravanja, čime je hipoteza rada potvrđena. Temeljem ovog istraživanja izdvojene su sljedeće preporuke za izmjenu mjeriteljske prakse i postupak prijave CMC vrijednosti:

- Prilikom vođenja usporedbi nije potrebno raditi razliku između *a* i *b* kategorija umjeravanja.
- NMI-i koji nemaju mogućnost mjerenja kuta navoja moraju prethodno utvrditi nalazi li se navojno mjerilo unutar granica dopuštenog odstupanja ili pri mjerenju srednjeg promjera koristiti mjerne elemente promjera bliskog optimalnom promjeru.
- S obzirom na provedenu usporedbu, može se zaključiti da većina NMI-a posjeduje mogućnost mjerenja koraka navoja, stoga je moguće zadržati postojeći popis područja mjernih sposobnosti (DimVim) i ograničiti smo jedan - srednji promjer navoja. Sukladno s tim, valja revidirati prijavljene CMC vrijednosti za jednostavni srednji promjer. Drugo rješenje uključuje proširenje DimVim-a sa stavkom - jednostavni srednji promjer. Time bi se harmoniziralo stanje na području umjeravanja navojnih mjerila i ostvarila poveznica mjeriteljske prakse, važećih normi, preporuka te uputa za umjeravanje s postupkom prijave mjernih sposobnosti.

U nastavku rada su provedena mjerenja graničnih mjerila metodom aksijalnog profila na Masterscanner uređaju u umjernom laboratoriju Trescal s.r.l. Italija. Analizom rezultata utvrđeno je da se rezultati mjerenja metodom aksijalnog profila samo djelomično slažu s rezultatima usporedbe EURAMET.L-S21 gdje su mjerenja provedena standardnim metodama (T-ticalo, tri valjčića). Za utvrđivanje razloga ovog neslaganja rezultata, potrebno je provesti znatno opširnije istraživanje orijentirano na metodu mjerenja aksijalnog profila. Rezultati mjerenja dobiveni metodom s mjernim čeljustima provjereni su na isti način i utvrđeno je slaganje rezultata te se može zaključiti da je metoda s mjernim čeljustima pogodna za mjerenje srednjeg promjera vanjskih navoja na razini nacionalnih mjeriteljskih instituta.

Reference

[1] Ivo Hercigonja, *Izbor zavojnih tolerancija i njihov odnošaj k alatu i metodama mjerenja / doktorska disertacija*. Zagreb, Hrvatska: Tehnički fakultet sveučilišta Kraljevine Jugoslavije, 1931, Voditelj: Artemije Šahnazarov.

[2] Rudolf Thalmann, "Interlaboratory Comparison M19 Calibration of Screw Threads Final Report", Swiss Federal Office of Metrology, Wabern, 1997.

[3] EURAMET, *Calibration Guide cg-10 v2.0 - Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing*, 2nd ed. Braunschweig, Germany: EURAMET e.V., 2011.

[4] Georg Wilhelm Berndt, *Die Gewinde, ihre Entwicklung, ihre Messung und ihre Toleranzen*. Berlin: J. Springer, 1926.

[5] Reginald Galestin, "Advanced 2D scanning: the solution for the calibration of thread ring and thread plug gauges", *Transverse Disciplines in Metrology : science report*, pp. 363-372, 2010.

[6] Vedran Šimunović, Nenad Ferdelji, Marko Katić, Vedran Mudronja, "Calculation Of Pitch Diameter Of Symetrical Thread Plug Gauges", in *13th International Scientific Conference on Production Engineering CIM 2011* , Vol. 13, Biograd, Hrvatska, 2011, pp. 28-32.

[7] NPL. (2007) Notes on Screw Gauges. [Online]. http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/dimensional/screw_gauge_booklet.pdf

[8] ISO 724:1993/Cor1:2009, *ISO General-purpose Metric Screw Thread - Basic dimensions.*, 2009.

[9] Tadeja Merkač Primožič, *Primerjava metod merjenja srednjeg premera navoja in analiza vplivov na merilni rezultat / doktorska disertacija*. Maribor, Slovenia: Fakulta za strojništvo, 2009, Voditelj: Ačko, Bojan.

[10] T Francis Farago, A Mark Curtis, *Mark Handbook of Dimensional Measurement*, 3rd ed. New York: Industrial Press INC, 1994.

[11] John Stoup, Ted Doiron, "Uncertainty and Dimensional Calibrations", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 102, no. 6, pp. 648-676, 1997.

[12] Emil W Deeg, "New Algorithms for Calculating Hertzian Stresses, Deformations, and Contact Zone Parameters", *AMP Journal of Technology*, Vol. 2, pp. 14-24, 1992.

[13] ISO 1502:1996, *ISO General-purpose Metric Screw Threads Gauges and Gauging.*, 1996.

[14] Harry Trumpold, *Längnenprüftechnik - Eine Einführung*, 2nd ed., Sonja Klauss, Ed. Leipzig, Germany: WEB Fachbuchverlag, 1984.

[15] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*., 2008.

[16] Biserka Runje, Gorana Baršić, Miroslav Mažar, "Statistical Tolerancing Using Monte-Carlo Simulation ", in *13th International Scientific Conference on Production Engineering* , Biograd, Hrvatska, 2011, pp. 207-210.

[17] E Papadopoulos Christos, Yeung Hoi, "Uncertainty estimation and Monte-Carlo simulation method ", *Elsevier Flow Measurement and Instrumentation*, pp. 291–298., Dec. 2001.

[18] Vedran Šimunović, Vedran Mudronja. (2012, Sep.) TP - Suplementary Comparison on Parallel thread gauges technical protocol EURAMET L-S21. [Online]. http://www.bipm.org/exalead_kcdb/exa_kcdb.jsp?_p=AppB&_q=thread&x=0&y=0

[19] ISO 5408:2009 , *Screw Threads Vocabulary*., 2009.

[20] Rudolf Stančec, *Mjerenje navoja, podloge za predavanja*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, katedra za mjerenje i kontrolu.

[21] Bojan Ačko, "Uncertainty of Thread Gauge Calibration by Using a Coordinate measuring machine", *Strojarstvo*, Vol. 10, no. 3, pp. 5-10, 2004.

[22] S Carmignato , L De Chiffre , "A New Method for Thread Calibration on Coordinate Measuring Machines", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52, no. 1, pp. 447-450, 2003.

[23] RLS, "MerOpt merilni program", RLS, Ljubljana, Slovenia, 2005.

[24] J Nocedal, S J Wright, *Numerical Optimization*, Robisnon Glynn, Ed. New York , USA: Springer, 1999.

[25] M W Häußler, "A local convergence analysis for the Gauss-Newton and Levenberg-Morrison-Marquardt Algorithms", *Springer Computing*, Vol. 31, no. 3, pp. 231-244, 1983.

[26] JGCM 101:2008, *Evaluation of measurement data - supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using Monte-Carlo method*., 2008.

[27] Vedran Šimunović, *Postupak za umjeravanje graničnih mjerila za unutarnji paralelni simetrični navoj*, 01st ed. Zagreb: HMI/FSB-LPMD, 2013.

[28] Vedran Šimunović, *Postupak za umjeravanje graničnih mjerila za vanjski paralelni simetrični navoj*, 03rd ed. Zagreb: HMI/FSB-LPMD, 2013.

[29] BIPM. (2014, Jan.) CIPM MRA. [Online]. www.bipm.org/en/cipm-mra/mra_online.html

[30] BIPM. (2012) Measurement comparisons in the CIPM MRA: KCDB office of the BIPM. [Online]. http://www.bipm.org/en/cipm-mra/documents/

[31] M G Cox, "The evaluation of key comparison data", *Metrologia*, Vol. 33, no. 6, p. 589, 2012.

[32] W Bich, M Cox, T Estler, L Nielsen, W Woeger, "Proposed guidelines for the evaluation of key comparison data", BIPM Director's Advisory Group on Uncertainties, Draft CCEM WKGC/2002-27, 2002.

[33] Working group on the MRA - WG - MRA. (2013) BIPM. [Online]. http://www.bipm.org/utils/common/pdf/DimVIM/dim-vim-en.pdf

[34] Državni zavod za mjeriteljstvo, "JCGM 200:2008 Međunarodni mjeriteljski rječnik", 2008.

[35] C T Folsom, D P Bondurant, "Non-Contact Internal Thread Inspection", *Automated Fastening Conference & Exposition*, pp. 291-298, 1999.

[36] The Imaging Source Europe GmbH. (2013, Mar.) FireWire 400 Monochrome Camrea DMK 41AF02. [Online]. http://www.theimagingsource.com/en_US/products/cameras/firewire-ccd-mono/dmk41af02

[37] Opto Engineering S.r.l. (2013, Mar.) TC2309 1x Bi-Telecentric lens for Detectors up to 2/3”.

[Online]. http://www.opto-engineering.com/brochure/TC2309.pdf

[38] Stefaan Pomme, "Determination of a reference value associated standard uncertainty and degrees of equvalence", Institute for Reference Materials and Measurements, European Commission, JRC, Luxsemburg, Scientific and Policy reports 10.2787/61338, 2012.

Životopis

Vedran Šimunović rođen je 12. svibnja 1981. godine u Zagrebu. Tehničku školu Ruđera Boškovića završava 1999. godine kada upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje. Diplomirao je 2007. godine na Procesno energetskom smjeru, usmjerenje Termotehnika. Za vrijeme studija dodijeljena mu je Rektorova nagrada za istraživanje na području mjerenja odstupanja od kružnosti.
Od 2007. godine zaposlen je na Katedri za mjerenje i kontrolu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u svojstvu asistenta. Tijekom rada na fakultetu aktivno sudjeluje u izvođenju vježbi iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Kontrola kvalitete i Mjerni roboti. Također sudjeluje u radu Nacionalnog laboratorija za duljinu, u okviru kojeg provodi glavninu znanstveno-istraživačkog rada i surađuje s brojnim tvrtkama na izradi specifičnih tehničkih rješenja za dimenzionalna mjerenja u proizvodnji.
Kao autor ili koautor objavio je 16 znanstvenih radova od kojih je 1 izvorni znanstveni rad u časopisima koji su indeksirani u *Current Contents* bazi podataka.
Govori i piše engleskim jezikom.

Biography

Vedran Šimunović was born on May 12, 1981 in Zagreb. In 1999 he finished high school and enrolled into the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. He graduated in 2007 at Department of Thermodynamics,Thermal and Process engineering; Applied thermodynamics. During his study he was awarded with Rector's Award for research in measurement of roundness.
Since 2007 he works at Department of Quality, Chair of Precise Measurement and Quality at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb as a teaching assistant on several courses. He also works as a research assistant at National Laboratory for Length within which he carries out the majority of his scientific research and collaborates with numerous companies to develop specific technical solutions for dimensional measurement in production.
As the author or co-author he published 16 scientific papers in Croatia and abroad.
He is fluent in written and spoken English language.

Prilog1

Tablica I-1Standardne dimenzije mjernih elemenata

Redni broj	Mjerni valjčići d_D, mm	PromjerT-ticala d_D, mm	Konstanata 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	0,62	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 I-2 Vrijednosti metričkih navoja mjerenih metodom s tri valjčića

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
M 1x0,25	0,25	0,838	0,17	0,962448	0,838	0,838
M 1x0,2	0,2	0,87	0,17	1,037318	0,87	0,87
M 1,1x0,25	0,25	0,938	0,17	1,06227	0,938	0,938
M 1,1x0,2	0,2	0,97	0,17	1,137226	0,97	0,97
M 1,2 x 0,25	0,25	1,038	0,17	1,162138	1,038	1,038
M 1,2 x 0,2	0,2	1,07	0,17	1,237157	1,07	1,07
M 1,4 x 0,3	0,3	1,205	0,17	1,285944	1,205	1,205
M 1,4 x 0,2	0,2	1,27	0,17	1,437061	1,27	1,27
M 1,6 x 0,35	0,35	1,373	0,195	1,460801	1,373	1,373
M 1,6 x 0,3	0,3	1,47	0,17	1,550703	1,47	1,47

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
M 1,8 x 0,35	0,35	1,573	0,195	1,66059	1,573	1,573
M 1,8 x 0,2	0,2	1,67	0,17	1,836955	1,67	1,67
M 2 x 0,4	0,4	1,74	0,22	1,834435	1,74	1,74
M 2 x 0,25	0,25	1,838	0,17	1,961713	1,838	1,838
M 2,2 x 0,45	0,45	1,908	0,25	2,019293	1,908	1,908
M 2,2 x 0,25	0,25	2,038	0,17	2,161673	2,038	2,038
M 2,5 x 0,45	0,45	2,208	0,25	2,319044	2,208	2,208
M 2,5 x 0,35	0,35	2,273	0,195	2,360231	2,273	2,273
M 3 x 0,5	0,5	2,675	0,29	2,822716	2,675	2,675
M 3 x 0,35	0,35	2,773	0,195	2,860121	2,773	2,773
M 3,5 x 0,6	0,6	3,11	0,335	3,261292	3,11	3,11
M 3,5 x 0,35	0,35	3,273	0,195	3,360057	3,273	3,273
M 4 x 0,7	0,7	3,545	0,39	3,719889	3,545	3,545
M 4 x 0,5	0,5	3,675	0,29	3,822379	3,675	3,675
M 4,5 x 0,75	0,75	4,013	0,455	4,274604	4,013	4,013
M 4,5 x 0,5	0,5	4,175	0,29	4,322292	4,175	4,175
M 5 x 0,8	0,8	4,48	0,455	4,698233	4,48	4,48
M 5 x 0,5	0,5	4,675	0,29	4,822232	4,675	4,675
M 5,5 x 0,5	0,5	5,175	0,29	5,322187	5,175	5,175
M 6 x 1	1	5,35	0,62	5,725493	5,35	5,35
M 6 x 0,75	0,75	5,513	0,455	5,774088	5,513	5,513
M 7 x 1	1	6,35	0,62	6,725066	6,35	6,35
M 7 x 0,75	0,75	6,513	0,455	6,773919	6,513	6,513
M 8 x 1,25	1,25	7,188	0,725	7,557051	7,188	7,188
M 8 x 1	1	7,35	0,62	7,724797	7,35	7,35
M 8 x 0,75	0,75	7,513	0,455	7,773812	7,513	7,513
M 9 x 1,25	1,25	8,188	0,725	8,556695	8,188	8,188
M 9 x 1	1	8,35	0,62	8,724616	8,35	8,35
M 9 x 0,75	0,75	8,513	0,455	8,77374	8,513	8,513
M 10 x 1,5	1,5	9,026	0,895	9,518733	9,026	9,026
M 10 x 1,25	1,25	9,188	0,725	9,556448	9,188	9,188
M 10 x 1	1	9,35	0,62	9,724489	9,35	9,35
M 10 x 0,75	0,75	9,513	0,455	9,773689	9,513	9,513
M 11 x 1,5	1,5	10,026	0,895	10,51841	10,026	10,026
M 11 x 1	1	10,35	0,62	10,7244	10,35	10,35
M 11 x 0,75	0,75	10,513	0,455	10,77365	10,513	10,513
M 12 x 1,75	1,75	10,863	1,1	11,54947	10,863	10,863
M 12 x 1,5	1,5	11,026	0,895	11,51816	11,026	11,026
M 12 x 1,25	1,25	11,188	0,725	11,55613	11,188	11,188
M 12 x 1	1	11,35	0,62	11,72433	11,35	11,35
M 14 x 2	2	12,701	1,1	13,17096	12,701	12,701
M 14 x 1,5	1,5	13,026	0,895	13,51783	13,026	13,026

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
M 14 x 1,25	1,25	13,188	0,725	13,55595	13,188	13,188
M 14 x 1	1	13,35	0,62	13,72423	13,35	13,35
M 15 x 1,5	1,5	14,026	0,895	14,51771	14,026	14,026
M 15 x 1	1	14,35	0,62	14,7242	14,35	14,35
M 16 x 2	2	14,701	1,1	15,17046	14,701	14,701
M 16 x 1,5	1,5	15,026	0,895	15,51762	15,026	15,026
M 16 x 1	1	15,35	0,62	15,72417	15,35	15,35
M 17 x 1,5	1,5	16,026	0,895	16,51754	16,026	16,026
M 17 x 1	1	16,35	0,62	16,72415	16,35	16,35
M 18 x 2,5	2,5	16,376	1,35	16,91327	16,376	16,376
M 18 x 2	2	16,701	1,1	17,17012	16,701	16,701
M 18 x 1,5	1,5	17,026	0,895	17,51747	17,026	17,026
M 18 x 1	1	17,35	0,62	17,72413	17,35	17,35
M 20 x 2,5	2,5	18,376	1,35	18,91279	18,376	18,376
M 20 x 2	2	18,701	1,1	19,16989	18,701	18,701
M 20 x 1,5	1,5	19,026	0,895	19,51737	19,026	19,026
M 20 x 1	1	19,35	0,62	19,7241	19,35	19,35
M 22 x 2,5	2,5	20,376	1,35	20,91245	20,376	20,376
M 22 x 2	2	20,701	1,1	21,16972	20,701	20,701
M 22 x 1,5	1,5	21,026	0,895	21,5173	21,026	21,026
M 22 x 1	1	21,35	0,62	21,72408	21,35	21,35
M 24 x 3	3	22,051	1,65	22,75518	22,051	22,051
M 24 x 2	2	22,701	1,1	23,16959	22,701	22,701
M 24 x 1,5	1,5	23,026	0,895	23,51724	23,026	23,026
M 24 x 1	1	23,35	0,62	23,72406	23,35	23,35
M 25 x 2	2	23,701	1,1	24,16953	23,701	23,701
M 25 x 1,5	1,5	24,026	0,895	24,51722	24,026	24,026
M 25 x 1	1	24,35	0,62	24,72405	24,35	24,35
M 26 x 1,5	1,5	25,026	0,895	25,5172	25,026	25,026
M 27 x 3	3	25,051	1,65	25,75468	25,051	25,051
M 27 x 2	2	25,701	1,1	26,16945	25,701	25,701
M 27 x 1,5	1,5	26,026	0,895	26,51718	26,026	26,026
M 27 x 1	1	26,35	0,62	26,72404	26,35	26,35
M 28 x 2	2	26,701	1,1	27,16941	26,701	26,701
M 28 x 1,5	1,5	27,026	0,895	27,51717	27,026	27,026
M 28 x 1	1	27,35	0,62	27,72404	27,35	27,35
M 30 x 3,5	3,5	27,727	2,05	28,7983	27,727	27,727
M 30 x 3	3	28,051	1,65	28,75433	28,051	28,051
M 30 x 2	2	28,701	1,1	29,16935	28,701	28,701
M 30 x 1,5	1,5	29,026	0,895	29,51714	29,026	29,026
M 30 x 1	1	29,35	0,62	29,72403	29,35	29,35
M 32 x 2	2	30,701	1,1	31,1693	30,701	30,701

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
M 32 x 1,5	1,5	31,026	0,895	31,51712	31,026	31,026
M 33 x 3,5	3,5	30,727	2,05	31,79786	30,727	30,727
M 33 x 3	3	31,051	1,65	31,75407	31,051	31,051
M 33 x 2	2	31,701	1,1	32,16928	31,701	31,701
M 33 x 1,5	1,5	32,026	0,895	32,51711	32,026	32,026
M 35 x 1,5	1,5	34,026	0,895	34,51709	34,026	34,026
M 36 x 4	4	33,402	2,55	35,04052	33,402	33,402
M 36 x 3	3	34,051	1,65	34,75388	34,051	34,051
M 36 x 2	2	34,701	1,1	35,16922	34,701	34,701
M 36 x 1,5	1,5	35,026	0,895	35,51708	35,026	35,026
M 38 x 1,5	1,5	37,026	0,895	37,51707	37,026	37,026
M 39 x 4	4	36,402	2,55	38,04011	36,402	36,402
M 39 x 3	3	37,051	1,65	37,75373	37,051	37,051
M 39 x 2	2	37,701	1,1	38,16918	37,701	37,701
M 39 x 1,5	1,5	38,026	0,895	38,51707	38,026	38,026
M 40 x 3	3	38,051	1,65	38,75369	38,051	38,051
M 40 x 2	2	38,701	1,1	39,16917	38,701	38,701
M 40 x 1,5	1,5	39,026	0,895	39,51706	39,026	39,026
M 42 x 4,5	4,5	39,077	2,55	40,28238	39,077	39,077
M 42 x 4	4	39,402	2,55	41,0398	39,402	39,402
M 42 x 3	3	40,051	1,65	40,75362	40,051	40,051
M 42 x 2	2	40,701	1,1	41,16915	40,701	40,701
M 42 x 1,5	1,5	41,026	0,895	41,51705	41,026	41,026
M 45 x 4,5	4,5	42,077	2,55	43,28204	42,077	42,077
M 45 x 4	4	42,402	2,55	44,03954	42,402	42,402
M 45 x 3	3	43,051	1,65	43,75352	43,051	43,051
M 45 x 2	2	43,701	1,1	44,16912	43,701	43,701
M 45 x 1,5	1,5	44,026	0,895	44,51704	44,026	44,026
M 48 x 5	5	44,077	3,2	46,14983	44,077	44,077
M 48 x 4	4	45,402	2,55	47,03934	45,402	45,402
M 48 x 3	3	46,051	1,65	46,75345	46,051	46,051
M 48 x 2	2	46,701	1,1	47,1691	46,701	46,701
M 48 x 1,5	1,5	47,026	0,895	47,51703	47,026	47,026
M 50 x 3	3	48,051	1,65	48,75341	48,051	48,051
M 50 x 2	2	48,701	1,1	49,16909	48,701	48,701
M 50 x 1,5	1,5	49,026	0,895	49,51702	49,026	49,026
M 52 x 5	5	48,752	3,2	50,8243	48,752	48,752
M 52 x 4	4	49,402	2,55	51,03912	49,402	49,402
M 52 x 3	3	50,051	1,65	50,75337	50,051	50,051
M 52 x 2	2	50,701	1,1	51,16908	50,701	50,701
M 52 x 1,5	1,5	51,026	0,895	51,51702	51,026	51,026
M 55 x 4	4	52,402	2,55	54,03899	52,402	52,402

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
M 55 x 3	3	53,051	1,65	53,75332	53,051	53,051
M 55 x 2	2	53,701	1,1	54,16906	53,701	53,701
M 55 x 1,5	1,5	54,026	0,895	54,51701	54,026	54,026
M 56 x 5,5	5,5	52,428	3,2	54,06745	52,428	52,428
M 56 x 4	4	53,402	2,55	55,03895	53,402	53,402
M 56 x 3	3	54,051	1,65	54,75331	54,051	54,051
M 56 x 2	2	54,701	1,1	55,16906	54,701	54,701
M 56 x 1,5	1,5	55,026	0,895	55,51701	55,026	55,026
M 58 x 4	4	55,402	2,55	57,03887	55,402	55,402
M 58 x 3	3	56,051	1,65	56,75328	56,051	56,051
M 58 x 2	2	56,701	1,1	57,16905	56,701	56,701
M 58 x 1,5	1,5	57,026	0,895	57,51701	57,026	57,026
M 60 x 5,5	5,5	54,428	3,2	56,06727	54,428	54,428
M 60 x 4	4	57,402	2,55	59,03881	57,402	57,402
M 60 x 3	3	58,051	1,65	58,75326	58,051	58,051
M 60 x 2	2	58,701	1,1	59,16905	58,701	58,701

Tablica I-3 Vrijednosti „S“ navoja mjerenih metodom s tri valjčića

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
S 10 x 2	2	8,5	1,1	9,098424	8,500478	8,5
S 12 x 3	3	9,75	1,65	10,65572	9,751184	9,75
S 14 x 3	3	11,75	1,65	12,6497	11,75084	11,75
S 16 x 4	4	13	2,05	13,69412	13,00158	13
S 18 x 4	4	15	2,05	15,68753	15,0012	15
S 20 x 4	4	17	2,05	17,68306	17,00094	17
S 22 x 5	5	18,25	2,55	19,06799	18,25158	18,25
S 24 x 5	5	20,25	2,55	21,063	20,25129	20,25
S 26 x 5	5	22,25	2,55	23,05927	22,25108	22,25
S 28 x 5	5	24,25	2,55	25,0564	24,25091	24,25
S 30 x 6	6	25,5	3,2	26,95276	25,5014	25,5
S 32 x 6	6	27,5	3,2	28,94944	27,50121	27,5
S 34 x 6	6	29,5	3,2	30,94676	29,50106	29,5
S 36 x 6	6	31,5	3,2	32,94455	31,50093	31,5
S 38 x 7	7	32,75	3,2	32,61299	32,75136	32,75
S 40 x 7	7	34,75	3,2	34,61042	34,75121	34,75
S 42 x 7	7	36,75	3,2	36,60826	36,75108	36,75
S 44 x 7	7	38,75	3,2	38,60643	38,75098	38,75
S 46 x 8	8	40	4	41,01473	40,00136	40
S 48 x 8	8	42	4	43,01258	42,00124	42
S 50 x 8	8	44	4	45,01072	44,00113	44
S 52 x 8	8	46	4	47,00908	46,00104	46

Navoj	P_{naz} mm	d_{2naz} mm	d_D mm	m_{teo} mm	$d_{2Berdnt}$ mm	d_{2num} mm
S 55 x 9	9	48,25	5,05	51,27219	48,25139	48,25
S 60 x 9	9	53,25	5,05	56,26808	53,25116	53,25

Tablica I-4 Vrijednosti unutrašnjih metričkih navoja mjerenih metodama s T-ticalom i mjernim čeljustima

Navoj	D_{2naz} mm	P_{naz} mm	T-ticalo d_D mm	T-ticalo m_{teo} mm	Mjerne čeljusti d_D mm	Mjerne čeljusti m_{teo} mm
M 1 x 0,25	0,838	0,25	0,335	0,376743	-	-
M 1 x 0,2	0,87	0,2	0,335	0,368037	-	-
M 1,1 x 0,25	0,938	0,25	0,335	0,479379	-	-
M 1,1 x 0,2	0,97	0,2	0,335	0,469805	-	-
M 1,2 x 0,25	1,038	0,25	0,335	0,580849	-	-
M 1,2 x 0,2	1,07	0,2	0,335	0,57079	-	-
M 1,4 x 0,3	1,205	0,3	0,335	0,791795	-	-
M 1,4 x 0,2	1,27	0,2	0,335	0,771801	-	-
M 1,6 x 0,35	1,373	0,35	0,335	1,003458	-	-
M 1,6 x 0,3	1,47	0,3	0,335	1,058042	-	-
M 1,8 x 0,35	1,573	0,35	0,335	1,204223	-	-
M 1,8 x 0,2	1,67	0,2	0,335	1,172557	-	-
M 2 x 0,4	1,74	0,4	0,335	1,414592	-	-
M 2 x 0,25	1,838	0,25	0,335	1,383765	-	-
M 2,2 x 0,45	1,908	0,45	0,335	1,625945	-	-
M 2,2 x 0,25	2,038	0,25	0,335	1,583933	-	-
M 2,5 x 0,45	2,208	0,45	0,335	1,926434	0,8	0,988747
M 2,5 x 0,35	2,273	0,35	0,335	1,90532	0,8	0,97051
M 3 x 0,5	2,675	0,5	0,335	2,437011	0,8	1,5027
M 3 x 0,35	2,773	0,35	0,335	2,405605	0,8	1,473412
M 3,5 x 0,6	3,11	0,6	0,335	2,958625	0,8	2,025163
M 3,5 x 0,35	3,273	0,35	0,335	2,90576	0,8	1,974521
M 4 x 0,7	3,545	0,7	0,455	3,239711	0,8	2,547253
M 4 x 0,5	3,675	0,5	0,335	3,437499	0,8	2,505926
M 4,5 x 0,75	4,013	0,75	0,455	3,751217	0,8	3,05929
M 4,5 x 0,5	4,175	0,5	0,335	3,937619	0,8	3,006529
M 5 x 0,8	4,48	0,8	0,455	4,261664	0,8	3,570077
M 5 x 0,5	4,675	0,5	0,335	4,437701	0,8	3,506904
M 5,5 x 0,5	5,175	0,5	0,335	4,93776	0,8	4,007152
M 6 x 1	5,35	1	0,62	4,974234	0,8	4,613399
M 6 x 0,75	5,513	0,75	0,455	5,251843	0,8	4,561008
M 7 x 1	6,35	1	0,62	5,974771	0,8	5,614226
M 7 x 0,75	6,513	0,75	0,455	6,252039	0,8	5,561488
M 8 x 1,25	7,188	1,25	0,725	6,818775	0,8	6,668518

Navoj	D_{2naz} mm	P_{naz} mm	T-ticalo d_D mm	T-ticalo m_{teo} mm	Mjerne čeljusti d_D mm	Mjerne čeljusti m_{teo} mm
M 8 x 1	7,35	1	0,62	6,975099	0,8	6,614716
M 8 x 0,75	7,513	0,75	0,455	7,252161	0,8	6,561771
M 9 x 1,25	8,188	1,25	0,725	7,819187	0,8	7,668997
M 9 x 1	8,35	1	0,62	7,975313	0,8	7,61503
M 9 x 0,75	8,513	0,75	0,455	8,252241	0,8	7,561951
M 10 x 1,5	9,026	1,5	0,895	8,533042	0,8	8,72332
M 10 x 1,25	9,188	1,25	0,725	8,819469	0,8	8,669324
M 10 x 1	9,35	1	0,62	8,97546	0,8	8,615243
M 10 x 0,75	9,513	0,75	0,455	9,252297	0,8	8,562073
M 11 x 1,5	10,026	1,5	0,895	9,533431	0,8	9,723649
M 11 x 1	10,35	1	0,62	9,975566	0,8	9,615394
M 11 x 0,75	10,513	0,75	0,455	10,25234	0,8	9,56216
M 12 x 1,75	10,863	1,75	1,1	10,1762	0,8	10,777
M 12 x 1,5	11,026	1,5	0,895	10,53372	0,8	10,72389
M 12 x 1,25	11,188	1,25	0,725	10,81982	0,8	10,66973
M 12 x 1	11,35	1	0,62	10,97565	0,8	10,61551
M 14 x 2	12,701	2	1,1	12,23091	1,35	11,73023
M 14 x 1,5	13,026	1,5	0,895	12,5341	0,8	12,72422
M 14 x 1,25	13,188	1,25	0,725	12,82002	0,8	12,66996
M 14 x 1	13,35	1	0,62	12,97575	0,8	12,61566
M 15 x 1,5	14,026	1,5	0,895	13,53423	0,8	13,72433
M 15 x 1	14,35	1	0,62	13,97579	0,8	13,61571
M 16 x 2	14,701	2	1,1	14,23146	1,35	13,73098
M 16 x 1,5	15,026	1,5	0,895	14,53434	0,8	14,72442
M 16 x 1	15,35	1	0,62	14,97582	0,8	14,61575
M 17 x 1,5	16,026	1,5	0,895	15,53442	0,8	15,7245
M 17 x 1	16,35	1	0,62	15,97584	0,8	15,61578
M 18 x 2,5	16,376	2,5	1,35	15,83861	1,35	15,83861
M 18 x 2	16,701	2	1,1	16,23182	1,35	15,73146
M 18 x 1,5	17,026	1,5	0,895	16,53449	0,8	16,72456
M 18 x 1	17,35	1	0,62	16,97586	0,8	16,61581
M 20 x 2,5	18,376	2,5	1,35	17,83912	1,35	17,83912
M 20 x 2	18,701	2	1,1	18,23207	1,35	17,73179
M 20 x 1,5	19,026	1,5	0,895	18,5346	0,8	18,72466
M 20 x 1	19,35	1	0,62	18,9759	0,8	18,61585
M 22 x 2,5	20,376	2,5	1,35	19,83949	1,35	19,83949
M 22 x 2	20,701	2	1,1	20,23226	1,35	19,73203
M 22 x 1,5	21,026	1,5	0,895	20,53468	0,8	20,72473
M 22 x 1	21,35	1	0,62	20,97592	0,8	20,61589
M 24 x 3	22,051	3	1,65	21,34669	1,8	21,04641

Navoj	D_{2naz} mm	P_{naz} mm	T-ticalo d_D mm	T-ticalo m_{teo} mm	Mjerne čeljusti d_D mm	Mjerne čeljusti m_{teo} mm
M 24 x 2	22,701	2	1,1	22,23239	1,35	21,73221
M 24 x 1,5	23,026	1,5	0,895	22,53474	0,8	22,72478
M 24 x 1	23,35	1	0,62	22,97594	0,8	22,61591
M 25 x 2	23,701	2	1,1	23,23245	1,35	22,73228
M 25 x 1,5	24,026	1,5	0,895	23,53477	0,8	23,7248
M 25 x 1	24,35	1	0,62	23,97594	0,8	23,61592
M 26 x 1,5	25,026	1,5	0,895	24,53479	0,8	24,72482
M 27 x 3	25,051	3	1,65	24,34724	1,8	24,04702
M 27 x 2	25,701	2	1,1	25,23254	1,35	24,7324
M 27 x 1,5	26,026	1,5	0,895	25,53481	0,8	25,72483
M 27 x 1	26,35	1	0,62	25,97596	0,8	25,61593
M 28 x 2	26,701	2	1,1	26,23257	1,35	25,73245
M 28 x 1,5	27,026	1,5	0,895	26,53482	0,8	26,72485
M 28 x 1	27,35	1	0,62	26,97596	0,8	26,61594
M 30 x 3,5	27,727	3,5	2,05	26,6555	1,8	27,15589
M 30 x 3	28,051	3	1,65	27,34761	1,8	27,04745
M 30 x 2	28,701	2	1,1	28,23264	1,35	27,73253
M 30 x 1,5	29,026	1,5	0,895	28,53485	0,8	28,72487
M 30 x 1	29,35	1	0,62	28,97597	0,8	28,61595
M 32 x 2	30,701	2	1,1	30,23269	1,35	29,7326
M 32 x 1,5	31,026	1,5	0,895	30,53488	0,8	30,7249
M 33 x 3,5	30,727	3,5	2,05	29,65599	1,8	30,1563
M 33 x 3	31,051	3	1,65	30,34788	1,8	30,04775
M 33 x 2	31,701	2	1,1	31,23271	1,35	30,73263
M 33 x 1,5	32,026	1,5	0,895	31,53489	0,8	31,7249
M 35 x 1,5	34,026	1,5	0,895	33,5349	0,8	33,72492
M 36 x 4	33,402	4	2,55	31,76315	2,3	32,26351
M 36 x 3	34,051	3	1,65	33,34809	1,8	33,04798
M 36 x 2	34,701	2	1,1	34,23277	1,35	33,7327
M 36 x 1,5	35,026	1,5	0,895	34,53491	0,8	34,72493
M 38 x 1,5	37,026	1,5	0,895	36,53492	0,8	36,72494
M 39 x 4	36,402	4	2,55	34,76363	2,3	35,26392
M 39 x 3	37,051	3	1,65	36,34824	1,8	36,04815
M 39 x 2	37,701	2	1,1	37,23281	1,35	36,73275
M 39 x 1,5	38,026	1,5	0,895	37,53493	0,8	37,72494
M 40 x 3	38,051	3	1,65	37,34828	1,8	37,0482
M 40 x 2	38,701	2	1,1	38,23283	1,35	37,73277
M 40 x 1,5	39,026	1,5	0,895	38,53494	0,8	38,72495
M 42 x 4,5	39,077	4,5	2,55	37,87147	2,3	38,37178
M 42 x 4	39,402	4	2,55	37,764	2,3	38,26425

Navoj	D_{2naz} mm	P_{naz} mm	T-ticalo d_D mm	T-ticalo m_{teo} mm	Mjerne čeljusti d_D mm	Mjerne čeljusti m_{teo} mm
M 42 x 3	40,051	3	1,65	39,34836	1,8	39,04829
M 42 x 2	40,701	2	1,1	40,23285	1,35	39,7328
M 42 x 1,5	41,026	1,5	0,895	40,53495	0,8	40,72496
M 45 x 4,5	42,077	4,5	2,55	40,87184	2,3	41,3721
M 45 x 4	42,402	4	2,55	40,76429	2,3	41,2645
M 45 x 3	43,051	3	1,65	42,34846	1,8	42,04839
M 45 x 2	43,701	2	1,1	43,23287	1,35	42,73283
M 45 x 1,5	44,026	1,5	0,895	43,53496	0,8	43,72497
M 48 x 5	44,077	5	3,2	42,00381	3,1	42,20394
M 48 x 4	45,402	4	2,55	43,76453	2,3	44,26471
M 48 x 3	46,051	3	1,65	45,34854	1,8	45,04848
M 48 x 2	46,701	2	1,1	46,2329	1,35	45,73286
M 48 x 1,5	47,026	1,5	0,895	46,53497	0,8	46,72498
M 50 x 3	48,051	3	1,65	47,34858	1,8	47,04853
M 50 x 2	48,701	2	1,1	48,23291	1,35	47,73287
M 50 x 1,5	49,026	1,5	0,895	48,53497	0,8	48,72498
M 52 x 5	48,752	5	3,2	46,67943	3,1	46,87953
M 52 x 4	49,402	4	2,55	47,76478	2,3	48,26493
M 52 x 3	50,051	3	1,65	49,34862	1,8	49,04857
M 52 x 2	50,701	2	1,1	50,23292	1,35	49,73289
M 52 x 1,5	51,026	1,5	0,895	50,53498	0,8	50,72499
M 55 x 4	52,402	4	2,55	50,76493	2,3	51,26506
M 55 x 3	53,051	3	1,65	52,34867	1,8	52,04863
M 55 x 2	53,701	2	1,1	53,23293	1,35	52,73291
M 55 x 1,5	54,026	1,5	0,895	53,53499	0,8	53,72499
M 56 x 5,5	52,428	5,5	3,2	50,78838	3,1	50,98848
M 56 x 4	53,402	4	2,55	51,76497	2,3	52,2651
M 56 x 3	54,051	3	1,65	53,34869	1,8	53,04865
M 56 x 2	54,701	2	1,1	54,23294	1,35	53,73291
M 56 x 1,5	55,026	1,5	0,895	54,53499	0,8	54,72499
M 58 x 4	55,402	4	2,55	53,76505	2,3	54,26517
M 58 x 3	56,051	3	1,65	55,34871	1,8	55,04868
M 58 x 2	56,701	2	1,1	56,23295	1,35	55,73292
M 58 x 1,5	57,026	1,5	0,895	56,53499	0,8	56,725
M 60 x 5,5	54,428	5,5	3,2	52,78858	3,1	52,98867
M 60 x 4	57,402	4	2,55	55,76513	2,3	56,26524
M 60 x 3	58,051	3	1,65	57,34874	1,8	57,0487
M 60 x 2	58,701	2	1,1	58,23295	1,35	57,73293
M 60 x 1,5	59,026	1,5	0,895	58,53499	0,8	58,725

Tablica I-5 Doprinos nesigurnosti rezultata mjerenja srednjeg promjera navoja s korakom od 1 mm zbog pogreške kuta od 0,1 ˚

Navoj	d_2, mm	$U_{\alpha/2}(d_2)$, mm	$U_{\alpha/2}(d_2) = c\,(\alpha/2)\cdot u(\alpha/2)$, mm
M 6 x 1	5,35	0,153091	0,148876
M 7 x 1	6,35	0,151909	0,148876
M 8 x 1	7,35	0,151158	0,148876
M 9 x 1	8,35	0,150652	0,148876
M 10 x 1	9,35	0,150294	0,148876
M 11 x 1	10,35	0,150032	0,148876
M 12 x 1	11,35	0,149835	0,148876
M 14 x 1	13,35	0,149561	0,148876
M 15 x 1	14,35	0,149465	0,148876
M 16 x 1	15,35	0,149386	0,148876
M 17 x 1	16,35	0,149321	0,148876
M 18 x 1	17,35	0,149267	0,148876
M 20 x 1	19,35	0,149182	0,148876
M 22 x 1	21,35	0,14912	0,148876
M 24 x 1	23,35	0,149072	0,148876
M 25 x 1	24,35	0,149053	0,148876
M 27 x 1	26,35	0,14902	0,148876
M 28 x 1	27,35	0,149007	0,148876
M 30 x 1	29,35	0,148983	0,148876

Prilog 2

$$d_i = x_i - \bar{x} = x_i - \frac{1}{n}\sum_{x=1}^{n} x_i = x_i - \frac{x_i}{n} - \frac{1}{n}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} x_j = \left(x_i - \frac{1}{n}\right) - \frac{1}{n}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} x_j \qquad (1.1)$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_i} = 1 - \frac{1}{n} \qquad (1.2)$$

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{n} \qquad (1.3)$$

$$u^2(d_i) = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + \frac{1}{n^2}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} u^2(x_j) \qquad (1.4)$$

$$u^2(d_i) = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \cdot u^2(x_i) - \frac{1}{n^2}u^2(x_i) + \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n} u^2(x_i) \qquad (1.5)$$

$$u^2(d_i) = \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot u^2(x_i) + \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n} u^2(x_i) = \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot u^2(x_i) + u^2(\bar{x}) \qquad (1.6)$$

$$u(d_i) = \sqrt{\left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot u^2(x_i) + u^2(\bar{x})} \qquad (1.7)$$