



LABORATORIJ ZA TEHNOLOŠKE MERITVE

Fakulteta za strojništvo
Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

SOP 13

KALIBRACIJA PREMERA NASTAVNIH OBROČEV

Datum izdaje	26. 01. 2023
Številka izdaje	E-7
Avtorji	red. prof. dr. Bojan Ačko
	Mitja Mlakar
	dr. Jasna Tompa
Odobril	red. prof. dr. Bojan Ačko

Evidenca sprememb (glede na predhodno izdajo)

Sprememba	Spremenjeno	Odstranjeno	Dodano
št.	Poglavje	Poglavje	Poglavje
1	10.1		
2	10.2		
3	12		

Vsebina

1	UVOD	4
1.1	Splošna načela	4
2	MERILNA OPREMA	4
3	SPREJEM	4
4	ČIŠČENJE	4
5	TEMPERATURNNA STABILIZACIJA	4
6	KALIBRACIJA - DVOTOČKOVNA PRIMERJALNA METODA	5
6.1	Opis metode merjenja	5
6.2	Namestitev obročev na ustrezno podlago in nadzor temperature	5
6.3	Umerjanje KMN s pomočjo etalonskega obroča	5
6.4	Merjenje premera kalibriranega obroča	6
6. A	KALIBRACIJA - SKENING METODA	7
6.1 A	Opis metode merjenja	7
6.2 A	Namestitev obročev na ustrezno podlago	7
6.3 A	Temperatura nastavnih obročev	7
6.4 A	Umerjanje KMN s pomočjo etalonskega obroča	8
6.5 A	Primerjalno merjenje nastavnega obroča	8
7	OVREDNOTENJE MERILNIH REZULTATOV	9
8	DOKUMENTIRANJE	9
9	ZAŠČITA	9
10	NEGOTOVOST DVOTOČKOVNEGA POSTOPKA	9
10.1	Matematični model meritve	9
10.2	Standardna negotovost posamične meritve $u(D_i)$	10
10.3	Standardna negotovost rezultata kalibracije $u(D)$	12
10.4	Razširjena negotovost	12
10.A	NEGOTOVOST SKENING POSTOPKA	13
10.1.A	Matematični model meritve	13
10.2.A	Standardna negotovost posamične meritve $u(D_i)$	13
10.3.A	Standardna negotovost rezultata kalibracije $u(D)$	16
10.4.A	Razširjena negotovost	17
11	SLEDLJIVOST	17
12	LITERATURA	17

1 UVOD

Postopek opisuje korake za kalibracijo premera nastavnih obročev od 2 mm do 300 mm po dvotočkovni metodi brez merjenja oblike in po skening postopku.

1.1 Splošna načela

Nastavne obroče uporabljamo kot etalone za notranje premere. Predvsem jih uporabljamo za primerjalno kalibracijo KMN za vse primere merjenja in kalibracije notranjih premerov (navojni obroči, gladki nastavni obroči. itd.)

2 MERILNA OPREMA

Etalonski obroči 14/50/150 - Zeiss/Mitutoyo (3 delni)

Koordinatni merilni stroj - ZEISS UMC 850

Merilnik temperature - ALMEMO 6290-7

3 SPREJEM

Obroče prevzamemo od uporabnika (stranke) in vizualno pregledamo, če imajo kakšne očitne poškodbe. Takšne poškodbe so korozija in večje praske ter ostale napake, ki bi negativno vplivale na uporabo. Prav tako zabeležimo tudi uporabnikovo ime, tip in serijsko številko naprave. Preverimo, če je število sprejetih obročev v skladu s pripadajočo dokumentacijo.

4 ČIŠČENJE

Merilni objekt pred meritvijo skrbno očistimo (posebej notranji valj) s petrol etrom in pregledamo s pomočjo povečevalnega stekla. Merilna površina mora biti popolnoma čista, suha in gladka. Pri zelo poškodovanih kontrolnih obročih (vidne raze) lahko po predhodnem dogovoru z naročnikom kalibracije obroče poliramo. Za to uporabimo Microfinishing Film 3M (Aluminium Oxide – 9 μm) ter rezilno olje EXKA 10 (rdeče). Glajenje površine izvedemo tako, da obroč z zunanjim obodom kotalimo po dovolj dolgi ravni površini medtem, ko smo vstavili na notranji valj ustrezno velik kos naoljenega Microfinishing filma. Med kotaljenjem izvajamo na celotno glajeno površino, s prsti preko filma, enakomeren zmeren pritisk s katerim dosežemo samo glajenje raz. Vpliv na spremembo dimenzije obroča je zanemarljiv.

S petrol etrom očistimo tudi etalonske obroče ter tipala in vodila stroja.

5 TEMPERATURNNA STABILIZACIJA

Obroče, ki jih prejmemo od naročnika, pred umerjanjem stabiliziramo v laboratorijskih pogojih pet ur. Kalibracija se izvaja pri trenutnih pogojih v laboratoriju. Pogoji (temperatura, vlaga in tlak) se merijo z uporabo merilnika ALMEMO 710. Temperatura naprave pa se meri s temperaturnim kontaktnim senzorjem z napravo ALMEMO 6290-7. Merilni rezultat se korigira na 20 °C. Merimo temperaturo vpenjalne podlage kot je opisano v poglavju 6.2.

 LABORATORIJ ZA TEHNOLOŠKE MERITVE	SOP 13 - KALIBRACIJA PREMERA NASTAVNIH OBROČEV	Stran: 5 od 17
		Izdaja št. E-7

6 KALIBRACIJA - DVOTOČKOVNA PRIMERJALNA METODA

6.1 Opis metode merjenja

Dvotočkovno kalibracijo kontrolnih obročev izvajamo po primerjalni metodi na KMN ZEISS - UMC 850. Možnost merjenja po tej metodi je omejena na premere od 2 mm do 300 mm. Kot primerjalne etalonske obroče uporabljamo obroče Carl Zeiss_0455 premera 14 mm, Carl Zeiss_005378 premera 50 mm in Mitutoyo_970024 premera 150 mm.

6.2 Namestitev obročev na ustrezno podlago in nadzor temperature

Obroč, ki ga kalibriramo, in etalonski obroč (glej pogl. 6.4) pritrdimo na vpenjalno ploščo z utori s pomočjo vpenjalnih elementov tako, da je glavna smer tipanja vzporedna z Y-osjo KMN. Obroča morata biti blizu skupaj in na isti višini (z os). Pred meritvijo etalone skrbno očistimo (predvsem notranji valj) z ustreznim čistilnim sredstvom (Petrol eter).

Poleg čistoče je najpomembnejši vpliv na točnost meritve ustrezna temperatura tako primerjalnega obroča (s poznano mero) kot tudi obroča v procesu kalibracije (z neznano mero). Temperaturo merimo s kontaktnim termometrom ALMEMO 6290-7 (Id. Št.: S40679). Tipalo termometra namestimo med oba obroča na skupno podlago za vpenjanje. V času kalibracije mora biti temperatura kalibriranega objekta med 19,5 °C in 20,5 °C. Da je vpliv prehoda temperature iz rok operaterja na merjenec čim manjši, nosimo med operacijo vpenjanja obvezno zaščitne rokavice. Po potrebi merilne objekte pred kalibracijo pustimo vpete tako dolgo, da dosežejo specificirano temperaturo, ali reguliramo temperaturo klimatske naprave.

6.3 Umerjanje KMN s pomočjo etalonskega obroča

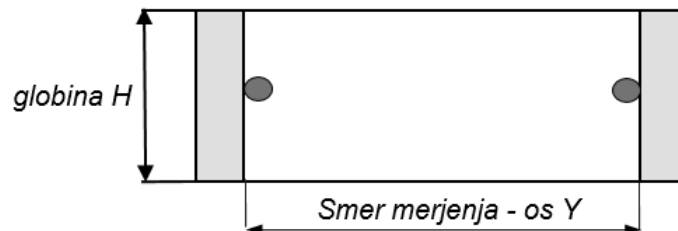
V odvisnosti od dimenzije nastavnega obroča, ki ga bomo merili, izberemo ustrezno dimenzijo etalonskega obroča in premer tipala v skladu z navodili v spodnji tabeli:

Premer kalibrir. obroča (mm)	Etalonski obroč (mm)	Id. štev. etalonskega obroča	Premer tipala (mm)
2,0 do 4,0	14	ZEISS - 0455	0,8
nad 4,0 do 35	14	ZEISS - 0455	2,0
nad 35 do 125	50	ZEISS - 005378	5,0
nad 125 do 300	150	MITUTUYO - 970024	5,0 mm

Etalonski obroč vpenjamo tako, da je označena smer kalibracije (črtici na zgornji površini obroča) poravnana z osjo Y KMN.

Z ustreznim umerjenim tipalom se lotimo določitve baznega sistema na etalonskem obroču. Primarno bazo določimo s pomočjo notranjega valja, ki ga skeniramo po vijačni poti (Helix-path). Začetek in konec skeniranega valja naj bo od čelnih površin etalonskega obroča oddaljen za cca. 10 % debeline obroča. Na voljo imamo tri etalonske obroče kot je razvidno iz zgornje tabele. Umerjanje sistema izvajamo s tipanjem dveh najbolj oddaljenih točk v smeri Y ($X = 0,0000$) na globini $H/2$ ($Z = -H/2$) ki leži pravokotno na os valja in simetrično med čelnima površinama etalonskega obroča.

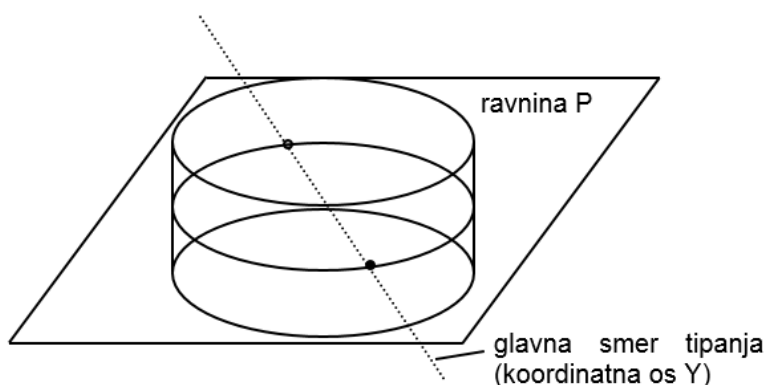
Razdaljo v koordinatni smeri Y merimo s funkcijo DISTANCE Y (point1 – point2) in pri tem po potrebi spreminjamo radij tipala tako dolgo, da dobimo izmerjen premer etalonskega obroča v okviru tolerance $D_{cal} \pm 0,05 \mu\text{m}$ (D_{cal} je kalibrirani premer obroča). Meritev ponovimo 10 krat.



Slika 1: Strategija merjenja

6.4 Merjenje premera kalibriranega obroča

Tako kot pri etalonskem obroču določimo primarno bazo s pomočjo notranjega valja, ki ga skeniramo po vijačni poti (Helix-path). Meritev izvajamo s tipanjem dveh najbolj oddaljenih točk v smeri Y ($X = 0,0000$) na globini $H/2$ ($Z = -H/2$) ki leži pravokotno na os valja in simetrično med čelnima površinama etalonskega obroča. Razdaljo v koordinatni smeri Y merimo s funkcijo DISTANCE Y (point1 – point2), pri tem radija tipala **ne spreminjamo!** Meritev ponovimo 10 krat, rezultat pa izračunamo kot srednjo vrednost vseh meritev. Rezultat kalibracije (odstopanje) je razlika med izmerjeno in imensko mero obroča. Premer obroča merimo v glavni smeri tipanja, ki leži v ravnini P in je orientirana pravokotno na os merilnega objekta (glej sliko 2). Če ima obroč označbo glavne smeri, tipamo v označeni smeri, v nasprotnem primeru pa pravokotno na smer, ki gre skozi identifikacijske označbe na obroču (proizvajalec, mera, itd.). V drugem primeru glavno smer tipanja označimo z vodoodpornim flomastrom.



Slika 2: Smer tipanja na valju

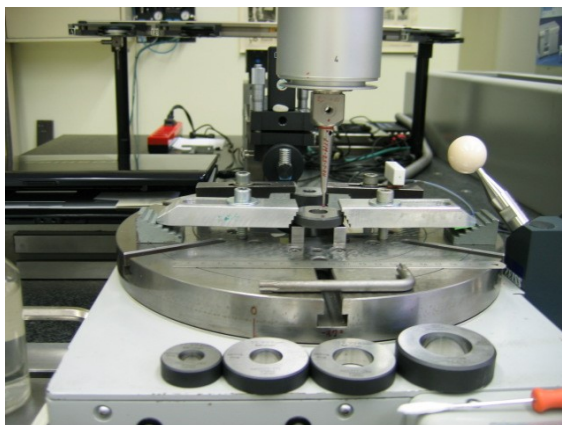
6. A KALIBRACIJA - SKENING METODA

6.1 A Opis metode merjenja

Tudi kalibracija po skening metodi je primerjalna in jo izvajamo na KMN ZEISS - UMC 850. Kot primerjalne etalonske obroče uporabljamo obroče Carl Zeiss_0455 premera 14 mm, Carl Zeiss_005378 premera 50 mm in Mitutoyo_970024 premera 150 mm.

6.2 A Namestitev obročev na ustrezno podlago

Obroč, ki ga kalibriramo, in etalonski obroč (glej pogl. 6.4 A) namestimo na ustrezno podlago in ju fiksiramo s pomočjo vpenjalnih elementov na delovno površino merilne mize (glej slika 3). Obročca morata biti blizu skupaj in na isti višini (z os). Pred vpenjanjem vrtljivo mizo zasučemo v obratni smeri urinega kazalca za kot -16° in $30'$ zato, da je smer utora na vrtljivi mizi vzporedna z Y-osjo KMN. Za tem vrtljive mize več ne premikamo.



Slika 3: Način vpenjanja obročev

6.3 A Temperatura nastavnih obročev

Poleg čistoče je najpomembnejši vpliv na točnost meritve ustrezna temperatura tako primerjalnega obroča (s poznano mero) kot tudi obroča v procesu kalibracije (z neznano mero). Temperaturo merimo s kontaktnim termometrom ALMEMO 6290-7 (Id. Št.: S40679). Tipalo termometra namestimo med oba obroča na skupno podlago za vpenjanje. V času kalibracije mora biti temperatura kalibriranega objekta med $19,5^\circ\text{C}$ in $20,5^\circ\text{C}$. Da je vpliv prehoda temperature iz rok operaterja na merjenec čim manjši, nosimo med operacijo vpenjanja obvezno zaščitne rokavice. Po potrebi merilne objekte pred kalibracijo pustimo vpete tako dolgo, da dosežejo specificirano temperaturo, ali reguliramo temperaturo klimatske naprave.

6.4 A Umerjanje KMN s pomočjo etalonskega obroča

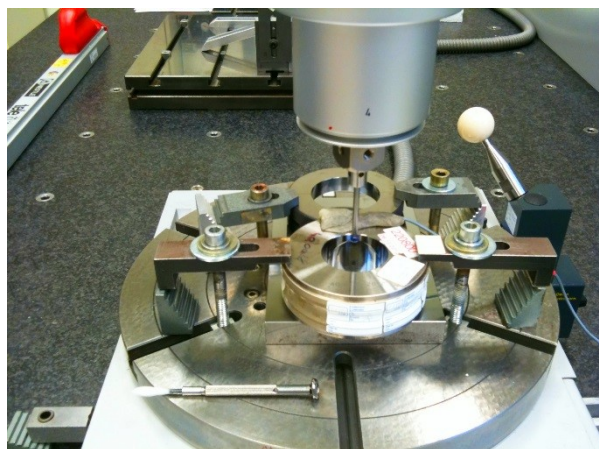
V odvisnosti od dimenzije nastavnega obroča, ki ga bomo merili izberemo ustrezno dimenzijo etalonskega obroča in premer tipala. Za lažjo odločitev uporabimo spodnjo tabelo:

Območje meritev nastavnih obročev	Izbran etalonski obroč	Id. šte. etalonskega obroča	Premer tipala
0,5 do 1,5 mm	14 mm	ZEISS - 0455	0,3 mm
1,5 do 4,0 mm	14 mm	ZEISS - 0455	0,5 mm
4,0 do 35 mm	14 mm	ZEISS - 0455	2,0 mm
35 do 125 mm	50 mm	ZEISS - 005378	5,0 mm
125 do 300 mm	150 mm	MITUTUYO - 970024	5,0 mm

Z ustreznim umerjenim tipalom se lotimo določitve baznega sistema na etalonskem obroču. Primarno bazo določimo s pomočjo notranjega valja, ki ga skeniramo po vijačni poti (Helixbahn). Začetek in konec skeniranega valja naj bo od čelnih površin etalonskega obroča oddaljen za cca. 10% debeline obroča. Na voljo imamo tri etalonske obročje kot je razvidno iz zgornje tabele. Umerjanje sistema izvajamo s skeniranjem po krožnici, ki leži pravokotno na os valja in simetrično med čelnima površinama etalonskega obroča. Krožnico merimo s funkcijo GAGE CORRECTION QUALIFICATION in pri tem po potrebi spreminjamo radij tipala tako dolgo, da dobimo izmerjen premer etalonskega obroča v okviru tolerance $< \text{ali} = \pm 0,05 \mu\text{m}$. Meritev ponovimo 10 krat.

6.5 A Primerjalno merjenje nastavnega obroča

Tako kot pri etalonskem obroču določimo primarno bazo s pomočjo notranjega valja, ki ga skeniramo po vijačni poti (Helixbahn). Meritev izvajamo s skeniranjem po krožnici, ki leži pravokotno na os valja in simetrično med čelnima površinama nastavnega obroča. Krožnico merimo s funkcijo GAGE CORRECTION in pri tem radij tipala ne spreminjamo. Meritev ponovimo 10 krat, rezultat pa izračunamo kot srednjo vrednost vseh meritev.



Slika 4: Primerjalno merjenje nastavnega obroča

	SOP 13 - KALIBRACIJA PREMERA NASTAVNIH OBROČEV	Stran: 9 od 17
		Izdaja št. E-7

7 OVREDNOTENJE MERILNIH REZULTATOV

Pri kalibraciji nastane protokol ZEISS CALYPSO. Rezultat meritve predstavlja srednjo aritmetično vrednost 10 meritev (izračunano v protokolu ZEISS), pri skeniranjem postopku pa je ovrednotena še krožnost (protokol ZEISS). Izmerjene (izračunane) merilne vrednosti prepisemo neposredno v predlogo za kalibracijski certifikat (glej točko 8!).

Pri primerjalnih meritvah s KMN ZEISS ne upoštevamo nobenih korekcij, ker imata etalonski in kalibrirani obroč približno enako temperaturo.

8 DOKUMENTIRANJE

Zapis o kalibraciji (originalni protokol ZEISS CALYPSO) shranimo v ustrezno podmapo (SOP 13/Zapisi, ustrezna letnica) mape »3-Zapisi in certifikati« v skladu z navodili v točki 6.2. PK. Drugo stran kalibracijskega certifikata kreiramo iz predloge »Predloga_2stran-SOP13.dotx«, ki se nahaja v mapi »4-Sistem kakovosti/SOP/SOP 13-Premer nastavnih obročev«. Kalibracijski certifikat kreiramo in arhiviramo v skladu z navodili v točki 6.1. PK.

9 ZAŠČITA

Obroče naoljimo s posebnim oljem za merilne instrumente ali brez kislinasto mastjo.

10 NEGOTOVOST DVOTOČKOVNEGA POSTOPKA

10.1 Matematični model meritve

Ker meritev ponavljamo 10 x, izračunamo končni rezultat kot srednjo vrednost 10 meritev:

$$D = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} D_i \quad (1)$$

$$D_i = D_c - L(\bar{\alpha} \cdot \delta T + \delta \alpha \cdot \bar{\theta}) + p_a \quad (2)$$

kjer so:

- D – rezultat kalibracije (kalibrirani premer) pri 20 °C
- D_i – rezultat posamične meritve pri 20 °C
- D_c – razdalja, ki jo izmeri KMN (z upoštevanjem korekcije na etalonskem obroču)
- L – nominalni premer (brez negotovosti)
- $\bar{\alpha}$ – povprečna temperaturna razteznost kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN
- δT – razlika med temperaturama kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN
- $\delta \alpha$ – razlika med temperaturnima razteznostima kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN
- $\bar{\theta}$ – povprečno odstopanje temperature kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN od 20 °C
- p_a – **pogrešek izmerjenega premera zaradi orientacije merjenja (premer ni merjen v liniji, ki gre skozi središče kroga)**

10.2 Standardna negotovost posamične meritve $u(D_i)$

Enačba za izračun skupne standardne negotovosti v [1] je v našem primeru:

$$u_c^2(D_i) = c_{D_c}^2 u^2(D_c) + c_{\alpha}^2 u^2(\bar{\alpha}) + c_{\delta T}^2 u^2(\delta T) + c_{\delta \alpha}^2 u^2(\delta \alpha) + c_{\theta}^2 u^2(\bar{\theta}) + c_{p_a}^2 u^2(p_a) \quad (5)$$

kjer so c_i parcialni odvodi funkcije (4):

$$c_{D_c} = \partial f / \partial D_c = 1$$

$$c_{\alpha} = \partial f / \partial \bar{\alpha} = -L \cdot \delta T$$

$$c_{\delta T} = \partial f / \partial \delta T = -L \cdot \bar{\alpha}$$

$$c_{\delta \alpha} = \partial f / \partial \delta \alpha = -L \cdot \bar{\theta}$$

$$c_{\theta} = \partial f / \partial \bar{\theta} = -L \cdot \delta \alpha$$

$$c_{p_a} = \partial f / \partial p_a = 1$$

a) Negotovost izmerjene razdalje (premera) $u(D_c)$

Standardna negotovost je ovrednotena po postopku SOP 11 (poskus, predstavljen v točkah 10.2.6 and 10.2.7 SOP 11). Uporabljeni so bili pari etalonskih obročev (14 mm – 50 mm) in (50 mm – 150 mm). Standardna negotovost u_s je bila izračunana iz 4 prispevkov (povprečni odmik od kalibrirane vrednosti, standardni odmik 15 meritev, standardna negotovost umerjanja - za 2 obroča). Konstantni del je bil ocenjen iz prvih dveh primerov (14 mm - 50 mm in 50 mm - 14 mm). Ocenjuje se, da je:

$$U_{sconst} = 0,08 \mu\text{m}$$

Ker se meritev ponovi 10-krat pri vsaki kalibraciji, se končna standardna negotovost srednje vrednosti izračuna na naslednji način:

$$u(D_c)_{const} = \sqrt{u_{sconst}^2 + \frac{s^2}{10}}$$

kjer je:

s - standardna negotovost 10 meritev

Standardni odmik s je v rangju 0,1 μm (tudi v testu po SOP 11), zato:

$$u(D_c)_{const} = 0,09 \mu\text{m}$$

Tudi linearni del je ovrednoten po SOP 11:

$$u(D_c)_{lin} = 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot L$$

b) Negotovost povprečne temperaturne razteznosti $u(\bar{\alpha})$

Interval $\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ je definiran na osnovi podatkov iz priročnika (za jeklo). Ob predpostavljani pravokotni porazdelitvi je standardna negotovost:

$$u(\alpha_m) = (1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})\sqrt{3} = 0,58 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

c) Negotovost razlike temperatur $u(\delta T)$

Obročča sta vpeta na isto podlago, katere temperaturo merimo. Omejitev odstopanja temperature podlage med kalibracijo jo $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Predpostavimo največjo verjetnost, da sta temperaturi enaki in območje razlike $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Ob predpostavljani normalni porazdelitvi je standardna negotovost:

$$u(\delta T) = 0,1/2 \text{ }^\circ\text{C} = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Negotovost razlike temperaturnih razteznosti $u(\delta\alpha)$

Ker temperature ne korigiramo, moramo predpostaviti interval razlike razteznosti med merilnim sistemom KMN (podatek proizvajalca: $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) in obročem (jeklo; $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) $I_{\delta\alpha} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Ob predpostavljani pravokotni porazdelitvi je standardna negotovost:

$$u(\delta\alpha) = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} / \sqrt{3} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

e) Negotovost povprečnega odstopanja temperature od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $u(\bar{\theta})$

Temperature ne korigiramo, vendar omejujemo odstopanje temperatura pri kalibraciji v intervalu $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Ob upoštevanju pravokotni porazdelitvi dobimo standardno negotovost:

$$u(\theta_m) = 0,5 \text{ }^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,29 \text{ }^\circ\text{C}$$

f) negotovost zaradi orientacije obroča $u(p_a)$

Smer merjenja pri 2-točkovnem merjenju premera izračuna merilni program KMN na osnovi predhodne meritve valja. Merilne ravnina je definirana kot pravokotna ravnina na os valja, merilna linija pa je linija v merilni ravnini, ki seka os valja. Glede na definirano merilno negotovost KMN predpostavljamo, da odstopanje orientacije oz. smeri izračunane merilne linije ni večje od $\pm 2 \text{ } \mu\text{m}$. Največje odstopanje izmerjenega premera zaradi pogreška te orientacije bo na najmanjšem premeru obroča, ki ga merimo po tem postopku (2 mm). Z enostavnim izračunom lahko ugotovimo, da je to odstopanje manjše od 2 nm, kar je v naši skupni merilni negotovosti zanemarljivo.

Preglednica 1: Komponente merilne negotovosti pri dvotočkovnem merjenju

Veličina X_i	Ocenjena vrednost x_i	Standardna negotovost $u(x_i)$	Porazdelitev	Količnik občutljivosti c_i	Prispevek negotovosti $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$	
D_c	<i>konst</i>	0 mm	0,09 μm	Normalna	1	0,09 μm
	<i>lin</i>	L	$0,9 \cdot 10^{-6} \cdot L$	Normalna	1	$0,9 \cdot 10^{-6} \cdot L$
$\bar{\alpha}$	$9,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$0,58 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Pravokotna	$0,1 \text{ }^\circ\text{C} \cdot L$	$0,06 \cdot 10^{-6} \cdot L$	
δT	0 $^\circ\text{C}$	0,05 $^\circ\text{C}$	Normalna	$9,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot L$	$0,47 \cdot 10^{-6} \cdot L$	
$\delta \alpha$	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Pravokotna	$0,5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot L$	$0,72 \cdot 10^{-6} \cdot L$	
$\bar{\theta}$	0 $^\circ\text{C}$	0,29 $^\circ\text{C}$	Pravokotna	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot L$	$0,72 \cdot 10^{-6} \cdot L$	
p_a	0 mm	0,002 μm	Pravokotna	1	0,002 μm	
skupno :					$\sqrt{(0,09 \mu\text{m})^2 + (1,4 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$	

10.3 Standardna negotovost rezultata kalibracije $u(D)$

Izračunana standardna negotovost je:

$$u = \sqrt{(0,09 \mu\text{m})^2 + (1,4 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

10.4 Razširjena negotovost

Po EA za izračun razširjene negotovosti uporabimo faktor $k = 2$:

Najboljša razširjena negotovost je:

$$U = \sqrt{(0,2 \mu\text{m})^2 + (2,8 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}; k = 2$$

	SOP 13 - KALIBRACIJA PREMERA NASTAVNIH OBROČEV	Stran: 13 od 17
		Izdaja št. E-7

10.A NEGOTOVOST SKENING POSTOPKA

10.1.A Matematični model meritve

Ker meritev ponavljamo 10 x, izračunamo končni rezultat kot srednjo vrednost 10 meritev:

$$D = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} D_i \quad (3)$$

$$D_i = D_c - L(\bar{\alpha} \cdot \delta T + \delta \alpha \cdot \bar{\theta}) - p_n \quad (4)$$

kjer so:

D – rezultat kalibracije (kalibrirani premer) pri 20 °C

D_i – rezultat posamične meritve pri 20 °C

D_c – premer, ki ga izračuna KMN iz merilnih točk

L – nominalni premer (brez negotovosti)

$\bar{\alpha}$ – povprečna temperaturna razteznost kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN

δT – razlika med temperaturama kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN

$\delta \alpha$ – razlika med temperaturnima razteznostima kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN

$\bar{\theta}$ – povprečno odstopanje temperature kalibriranega obroča in merilnega sistema KMN od 20 °C

p_n – naključni pogrešek realnega premera zaradi odstopanja krožnosti kalibriranega obroča

10.2.A Standardna negotovost posamične meritve $u(D_i)$

Enačba za izračun skupne standardne negotovosti v [1] je v našem primeru:

$$u_c^2(D_i) = c_{D_c}^2 u^2(D_c) + c_{\alpha}^2 u^2(\bar{\alpha}) + c_{\delta T}^2 u^2(\delta T) + c_{\delta \alpha}^2 u^2(\delta \alpha) + c_{\bar{\theta}}^2 u^2(\bar{\theta}) + c_{p_n}^2 u^2(p_n) \quad (5)$$

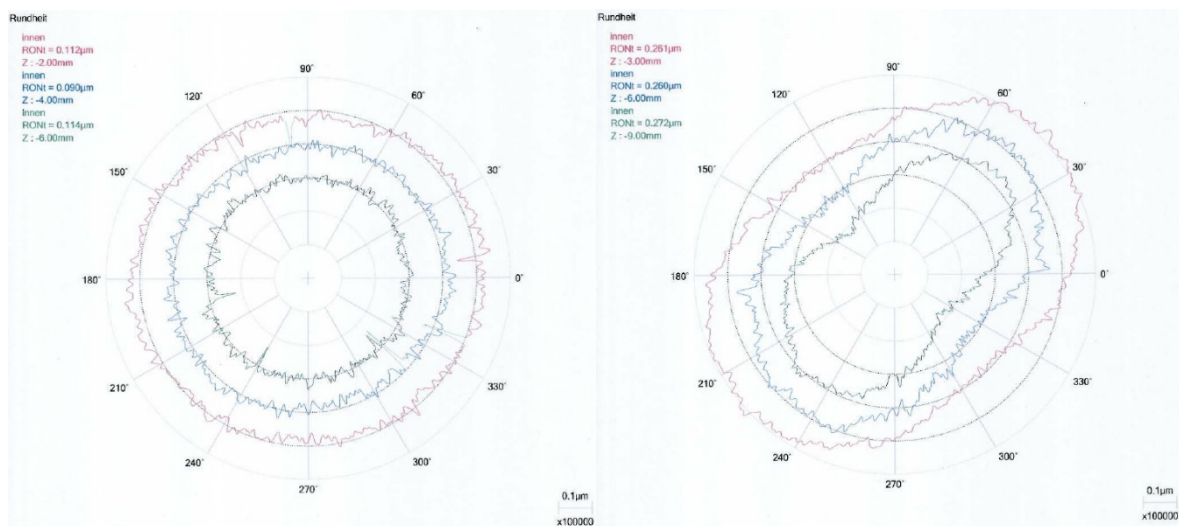
kjer so c_i parcialni odvodi funkcije (4):

$$\begin{aligned} c_{D_c} &= \partial f / \partial D_c &= 1 \\ c_{\alpha} &= \partial f / \partial \bar{\alpha} &= -L \cdot \delta T \\ c_{\delta T} &= \partial f / \partial \delta T &= -L \cdot \bar{\alpha} \\ c_{\delta \alpha} &= \partial f / \partial \delta \alpha &= -L \cdot \bar{\theta} \\ c_{\bar{\theta}} &= \partial f / \partial \bar{\theta} &= -L \cdot \delta \alpha \\ c_{p_n} &= \partial f / \partial p_n &= 1 \end{aligned}$$

Standardne negotovosti vhodnih veličin ovrednotimo (ocenimo) za uporabljen etalon in kalibracijski postopek ter predpostavljene pogoje meritve. Za izračun CMC predpostavimo »idealni« obroč z odstopanjem krožnosti $o_{kr} = 0$. Negotovost konkretne kalibracije ovrednotimo s pomočjo Excel datoteke »Negotovost SOP13.xlsx« (shranjena v mapi »4-Sistem kakovosti/SOP/SOP13-Premer nastavnih obročev») ob upoštevanju odstopanja krožnosti obroča, ki ga kalibriramo.

a) Negotovost izračunanega premera $u(D_c)$

Standardna negotovost je ovrednotena po postopku SOP 11 (eksperiment). Primerjali smo obroča 14 mm in 50 mm. Pri korekciji merilnega rezultata na kalibrirano vrednost obroča smo upoštevali poleg kalibriranih premerov obročev 14 mm in 50 mm (dvotočkovno; glej točko 10.2 a) še odstopanja krožnosti (primerjalni premer je namreč srednji premer obroča). Krožnosti sta razvidni na sliki 5.



Slika 5: Krožnost obroča 14 mm (0,1133 μm) – levo in obroča 50 mm (0,361 μm) – desno

Standardno negotovost zaradi krožnosti pri kalibraciji obročev s premeri 2 mm do 120 mm ocenimo na

$$u = 0,15 \mu\text{m}$$

Skupna negotovost je torej:

$$u = \sqrt{0,2 \mu\text{m}^2 + 0,15 \mu\text{m}^2} = 0,25 \mu\text{m}$$

Ker je pri obroču 150 mm odstopanje krožnosti 0,975 μm , ocenjujemo standardno merilno negotovost zaradi odstopanja krožnosti na:

$$u = 0,6 \mu\text{m}$$

Pri kalibraciji obročev s premeri 125 mm do 300 mm je zato prispevek negotovosti:

$$u = 0,7 \mu\text{m}.$$

b) Negotovost povprečne temperaturne razteznosti $u(\bar{\alpha})$

Interval $\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ je definiran na osnovi podatkov iz priručnika (za jeklo). Ob predpostavljani pravokotni porazdelitvi je standardna negotovost:

$$u(\alpha_m) = (1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})\sqrt{3} = 0,58 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

c) Negotovost razlike temperatur $u(\delta T)$

Obročča sta vpeta na isto podlago, katere temperaturo merimo. Omejitev odstopanja temperature podlage med kalibracijo jo $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Predpostavimo največjo verjetnost, da sta temperaturi enaki in območje razlike $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Ob predpostavljene normalni porazdelitvi je standardna negotovost:

$$u(\delta T) = 0,1/2 \text{ }^\circ\text{C} = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Negotovost razlike temperaturnih razteznosti $u(\delta\alpha)$

Ker temperature ne korigiramo, moramo predpostaviti interval razlike razteznosti med merilnim sistemom KMN (podatek proizvajalca: $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) in obročem (jeklo; $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) $I_{\delta\alpha} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Ob predpostavljene pravokotni porazdelitvi je standardna negotovost:

$$u(\delta\alpha) = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} / \sqrt{3} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

e) Negotovost povprečnega odstopanja temperature od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $u(\bar{\theta})$

Temperature ne korigiramo, vendar omejujemo odstopanje temperatura pri kalibraciji v intervalu $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Ob upoštevanju pravokotni porazdelitvi dobimo standardno negotovost:

$$u(\theta_m) = 0,2 \text{ }^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$$

f) Negotovost realnega premera obroča zaradi odstopanja krožnosti kalibriranega obroča $u(p_n)$

Realni premer obroča je v različnih smereh različen (lahko je večji ali manjši od srednjega premera, ki ga podamo v kalibracijskem certifikatu), zato odstopanje realnega premera smatramo kot naključni pogrešek. V izračunu CMC ga ne upoštevamo, ker predpostavljamo idealno krožnost merjenega obroča. Pri podajanju merilne negotovosti v kalibracijskem certifikatu upoštevamo prispevek krožnosti kalibriranega obroča tako, da predpostavimo interval realnega premera:

$$I_D = D_{sr} \pm o_{kr}$$

kjer sta:

D_{sr} - kalibrirani srednji premer

o_{kr} - izmerjeno odstopanje krožnosti ($r_{\max} - r_{\min}$)

Standardna negotovost je torej:

$$u(p_n) = o_{kr} / \sqrt{3}$$

Ta prispevek negotovosti ovrednotimo s pomočjo Excel datoteke »Negotovost-SOP13«, ki je v mapi »4-Sistem kakovosti/SOP/SOP 13«.

Preglednica 2: Komponente merilne negotovosti pri merjenju s skening postopkom

Veličina X_i	Ocenjena vrednost x_i	Standardna negotovost $u(x_i)$	Porazdelitev	Količnik občutljivosti c_i	Prispevek negotovosti $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
D_c	(2 do 120) mm	0,25 μm	Normalna	1	0,25 μm
	(125 do 300) mm	0,7 μm			0,7 μm
$\bar{\alpha}$	$9,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$0,58 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Pravokotna	$0,1 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot L$	$0,06 \cdot 10^{-6} L$
δT	$0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$	Normalna	$9,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot L$	$0,47 \cdot 10^{-6} L$
$\delta \alpha$	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Pravokotna	$0,5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot L$	$0,72 \cdot 10^{-6} L$
$\bar{\theta}$	$0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$0,29 \text{ } ^\circ\text{C}$	Pravokotna	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot L$	$0,72 \cdot 10^{-6} L$
p_n	0 mm	0 μm	Pravokotna	1	0 μm
				skupno :	$\sqrt{(0,25 \mu\text{m})^2 + (1,12 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$ $\sqrt{(0,7 \mu\text{m})^2 + (1,12 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$

10.3.A Standardna negotovost rezultata kalibracije $u(D)$

Ker je rezultat kalibracije izračunan kot aritmetična srednja vrednost 10 meritev, lahko v skladu z GUM (metoda A), standardno negotovost $u(D)$ izračunamo po enačbi:

$$u(D) = \frac{u(D_i)}{\sqrt{10}}$$

Izračunana standardna negotovost za premere 2 mm do 120 mm je:

$$u = \sqrt{(0,08 \mu\text{m})^2 + (0,35 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

Izračunana standardna negotovost za premere 125 mm do 300 mm je:

$$u = \sqrt{(0,22 \mu\text{m})^2 + (0,35 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

Zaradi negotovosti postopka vrednotenja in nezadostnih dokazov o usposobljenosti z interkomparacijami povečamo negotovost za premere 2 mm do 120 mm na:

$$u = \sqrt{(0,1 \mu\text{m})^2 + (1,4 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

za premere 125 mm do 300 mm pa na:

$$u = \sqrt{(0,3 \mu\text{m})^2 + (1,4 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

 LABORATORIJ ZA TEHNOLOŠKE MERITVE	SOP 13 - KALIBRACIJA PREMERA NASTAVNIH OBROČEV	Stran: 17 od 17
		Izdaja št. E-7

10.4.A Razširjena negotovost

Po EA za izračun razširjene negotovosti uporabimo faktor $k = 2$. Najboljše razširjene negotovosti (CMC) so:

Za premere 2 mm do 120 mm:

$$U = \sqrt{(0,2 \mu m)^2 + (2,8 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

Za premere 125 mm do 300 mm:

$$U = \sqrt{(0,6 \mu m)^2 + (2,8 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

11 SLEDLJIVOST

Merilna naprava za izvajanje kalibracije:

- KMN ZEISS UMC 850 – preverjena sposobnost po akreditiranem postopku z dolgimi merilnimi kladicami (KOBÄ).
- Etalonski obroči \varnothing 14 mm (ZEISS), \varnothing 50 mm (ZEISS), \varnothing 150 mm (MITUTOYO), kalibrirani v evropskem nacionalnem meroslovnem inštitutu

12 LITERATURA

- [1] EA 4/02 M: 2022: Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration
- [2] EURAMET cg-6, Extent of Calibration for Cylindrical Diameter Standards, 2011