



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ
V NANOMETROLOGII**

DETERMINATION ACCURACY OF MEASUREMENT IN NANOMETROLOGY

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

THE DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Šrámek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2019

Klíčová slova

Nanometrologie, měření délky, rubínová kulička, měřicí přístroj, přesnost měření, nejistota měření, opakovatelnost měření, reprodukovatelnost měření, substituční metoda, multipoziční metoda, metoda Monte Carlo.

Key words

Nanometrology, length measurement, ruby ball, measuring instrument, accuracy of measurement, uncertainty of measurement, repeatability of measurement, reproducebility of measurement, substitution method, multiposition method, Monte Carlo method.

Místo uložení disertační práce

Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

© Jan Sramek, 2019

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. MOTIVACE A CÍL PRÁCE.....	2
3. POŽADAVKY NA STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ	4
4 POSTUP PLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	5
4.1 Návrh řešení cílů disertační práce	5
4.2 Volba vhodného etalonu	5
4.3 Návrh, výroba a odzkoušení upínacího přípravku	5
4.4 Zvolené metody měření součástí.....	6
4.5 Měření rozměru rubínových kuliček.....	7
4.5.1 Dotykové měření rozměru kuliček na přístroji nano-CMM NMM-1	7
4.5.2 Dotykové měření na délkoměru s interferometrem	7
4.5.3 Bezdotykové měření na CT přístroji Rigaku	8
4.6 Vyhodnocení parametrů textury povrchu kuliček.....	9
4.7 Posouzení výsledků a statistické vyhodnocení	10
5. POUŽITÉ METODY STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ.....	13
5.1 Nejistota měření CMM při použití multipoziční metody.....	14
5.2 Nejistota měření CMM při použití substituční metody	15
5.3 Metoda Monte Carlo při stanovení nejistoty měření	16
6. VYHODNOCENÍ VÝPOČTU NEJISTOTY MĚŘENÍ MULTIPOZIČNÍ METODOU.....	17
7. VYHODNOCENÍ VÝPOČTU NEJISTOTY MĚŘENÍ SUBSTITUČNÍ METODOU.....	19
8 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ POMOCÍ METODY MONTE CARLO.....	21
8.1 Vyhodnocení výsledků simulace metodou Monte Carlo	23
9 SHRUTÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	24
9.1 Shrnutí použitých metod stanovení nejistoty měření	24
9.2 Návrh vhodného etalonu - ball plate	26
10 ZÁVĚR.....	28
11 POUŽITÁ LITERATURA.....	30
ABSTRAKT.....	34
ABSTRACT.....	35

1. ÚVOD

Rozvoj nanotechnologií v minulých desetiletích lze pozorovat v každodenním životě kolem nás. S tím souvisí i lidská potřeba měření v nanoměřítku. Problematika velmi přesného měření malých přesně vyrobených součástí (nástrojů, měřidel, etalonů) je aktuální již poměrně dlouhou dobu. Nároky na přesně opracované součásti různých přístrojů a zařízení lze vysledovat už v polovině minulého století. Lze je zařadit do relativně nového oboru – nanometrologie. Tyto nároky se postupem času, s rozšiřující se miniaturizací a zvyšujícími se nároky na kvalitu, spolehlivost a bezpečnost, dále zvyšují. Jedny z přístrojů používaných v nanometrologii jsou přesné souřadnicové měřicí stroje (CMM).

V disertační práci je řešena problematika přesnosti měření při použití dotykové nano-sondy přesného souřadnicového měřicího přístroje. Je zde popsána realizace měření přesných rubínových kuliček různými metodami a porovnávají se jejich výsledky. Disertační práce se zaměřuje zejména na kontaktní měření na nano-CMM přístroji (Nano positioning and Nanomeasuring Machine 1, dále jen NMM-1), který je zobrazen na obrázku číslo 1.1.



Obr. 1.1 Souřadnicový měřicí stroj SIOS nano-CMM NMM-1 [1].

2. MOTIVACE A CÍL PRÁCE

V současné době, kdy je evidentní rostoucí zájem průmyslu na posouzení a stanovení přesnosti měření měřicích přístrojů, je tento jev patrný i v oblasti nanometrologie délkových veličin. Neexistuje žádný samostatný vědecký článek, ani publikace, řešící problematiku stanovení přesnosti měření nano-CMM. Pouze rámcově je uvedena nutnost stanovení nejistoty měření u těchto měřicích přístrojů například v odborné literatuře [1, 12, 14, 53, 54], bez zdůraznění náročnosti stanovení složek nejistoty měření a kvantifikace jejich příspěvků.

V případě přístroje nano-CMM NMM-1 je specifický přístup výrobce SIOS ke stanovení přesnosti měření přístroje, respektive v uvádění nejistoty měření. Tento specifický přístup výrobce je patrný zejména k uváděné nejistotě měření daného přístroje, kdy je uváděna pouze nejistota měření vlastního odměřovacího systému, kterým je He-Ne laserinterferometr a údaj rozlišitelnosti měřené veličiny, tedy nikoliv přístroje nano-CMM NMM-1 jako celku. Tato situace je dána jednak specifíčkami dodávaných přístrojů, kdy se jedná o prakticky kusovou výrobu na zakázku s určitou mírou specializace provedení a taktéž různorodostí použití jak jednotlivých dodávaných snímacích systémů, tak i specifíčkami jejich konečného použití u různých koncových uživatelů. Jedná se zejména o vědecké a studijní instituce, popřípadě národní metrologické orgány, které často nepracují ve standardním ekonomickém režimu, jehož cílem je generování zisku.

Dalším problémem je neexistence metodiky pro stanovení přesnosti měření tohoto přístroje, která by byla vhodná pro podmínky akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno. Ze stejného důvodu je nutné i zajištění metrologické návaznosti této metodiky, tudíž je nutné vyřešit i neexistenci dostatečně přesného etalonu délky pro použití v akreditované zkušební laboratoři CEITEC Brno.

Faktory ovlivňující nejistotu měření, zejména tvar a textura povrchu měřené součásti u každé použité metody je nutné posoudit s cílem připravit metodiku pro určení nejistoty měření za použití dotykové nano-sondy při provádění přesných délkových měření pro obě výše uvedené instituce. Takový postup se v dosavadních běžně dostupných vědeckých publikacích nevyskytuje [4, 5, 7, 10, 14, 16, 17, 24, 26, 28-35]. Tato skutečnost je dána zejména specifíčkami řešené problematiky, její ekonomickou a odbornou náročností. Nelze opomenout fakt, že obdobné měřicí přístroje jsou využívány pouze u národních metrologických institucí nejvyspělejších států západní Evropy, respektive výzkumných institucí zemí, které nejsou problematikou akreditace metrologické laboratoře vázány.

Ostatní zahraniční pracoviště (Německo, Rakousko, Velká Británie) provozující přístroj nano-CMM NMM-1 často používají jiné typy snímacích systémů, tudíž nemají vypracovanou metodiku pro stanovení přesnosti měření za použití snímací nano-sondy Gannen XP. Potřeba kvantifikace přesnosti měření na přístroji nano-CMM NMM-1 v podmínkách měření v metrologické laboratoři, a to zejména pro měření s dotykovou nano-sondou Gannen XP (obrázek 2.1) v rozsahu vhodném pro nanometrologii je zásadním důvodem k zadání disertační práce. V praxi se jedná o ojedinělou skutečnost, kdy se při použití nano-CMM NMM-1 pracuje v reálném 3D prostředí. Při použití většiny jiných snímacích systémů nano-CMM NMM-1 (AFM, Laser Focus...) se posun v osách x a y užívá většinou pouze pro pohyb nad měřenou entitou, nikoliv pro vlastní odměřování měřené veličiny.



Obr. 2.1 Detail dotykové nano-sondy Gannen XP [12].

Hlavní cíl:

Stanovení přesnosti měření při použití dotykové nano-sondy Gannen XP na souřadnicovém měřicím stroji SIOS nano-CMM NMM-1.

V souladu s kvalitativními požadavky na přístroj nano-CMM NMM-1 je v disertační práci podrobně zpracovaný postup stanovení přesnosti měření přístroje při měření s dotykovou nano-sondou Gannen XP a to včetně vyhodnocení nejistoty měření s přihlédnutím na dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti. Pro porovnání výsledků měření je nutné použít tři na sobě nezávislé metody měření rozměru daných objektů (rubínových kuliček) a zjišťování parametrů textury povrchu rubínových kuliček pomocí vhodných metod.

Na základě potřeby dosažení hlavního cíle byly stanoveny dílčí cíle řešení:

1. Výběr metodiky jednotlivých měření.
2. Volba etalonu, návrh způsobu uchycení rubínových kuliček pro provedení experimentu, odzkoušení a výroba přípravku pro uchycení kuliček.
3. Volba vhodných metodik měření kuliček včetně stanovení nejistoty měření.
4. Realizace měření na přístroji nano-CMM NMM-1 využívající systém dotykové nano-sondy za dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.
5. Vytvoření matematického modelu měření na přístroji nano-CMM NMM-1 a realizace simulace systému metodou Monte Carlo.
6. Realizace jednotlivých měření na vhodných přístrojích za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti.
7. Popis hlavních vlivů na dosahovanou přesnost měření a stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1.
8. Porovnání a analýza naměřených hodnot parametrů kuliček.
9. Vytvoření sw modulu MS Excel pro rychlé stanovení nejistoty měření.
10. Návrh vhodného hmotného etalonu délky pro kalibraci přístroje nano-CMM NMM-1.

3 POŽADAVKY NA STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ

Management měřicích systémů s důrazem na jejich přesnost měření je jednou z nejdůležitějších oblastí v současném globalizovaném a místy i přetechizovaném světě, mající vliv na prosperitu strojírensky vyspělých zemí. Jednou z charakteristik, kterou je ovlivňována přesnost měření je dána kalibrací přístroje, která je jedním ze základních kamenů metrologické návaznosti, bez které se stanovení přesnosti měření daného přístroje neobejde [5, 38].

- ***Metrologická návaznost a její vztah k přesnosti měření***

Metrologická návaznost je vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovaný nepřerušovaný řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření [6]. Nesporným důvodem ke stanovení přesnosti CMM je také bouřlivý vývoj měřicích přístrojů v posledních třech desetiletích.

- ***Splnění podmínek opakovatelnosti měření a reprodukovatelnosti měření***

V disertační práci je použito různých měřicích metod za použití různých měřicích přístrojů, které byly vybaveny různými snímacími systémy. Takto provedený soubor měření splňoval podmínky opakovatelnosti měření i reprodukovatelnosti měření. Tato skutečnost měla zásadní vliv na výsledky měření, zejména na dodržení vysoké úrovně preciznosti měření na nano-CMM NMM-1 i jiných přístrojích.

- ***Kvantifikace přesnosti měření pomocí nejistoty měření***

V disertační práci je zvoleno řešení, kdy aparát stanovení nejistoty měření je použit ke kvantifikaci samotné přesnosti měření nano-CMM NMM-1. To celé za dodržení vysoké úrovně preciznosti měření za specifikovaných podmínek (reprodukovatelnost a opakovatelnost). K prokázání těchto statistických parametrů jsou použity stanadardní nástroje, které splňovaly nároky na ně kladené v závazných dokumentech [2, 3, 6, 9, 11, 15]. Rozdíl mezi měřenou hodnotou veličiny a referenční hodnotou veličiny (etalonu) je nazýván chybou měření a skládá se ze dvou základních částí – systematické a náhodné chyby. V metrologické praxi často místo samotných chyb pracujeme s odhadem chyb - výkonnostní charakteristikou [8].

Pravdivost je proto systematickou složkou chyby. Pro určení pravdivosti nepotřebujeme vědět skutečnou hodnotu, ale potřebujeme znát referenční hodnotu. Referenční hodnota měřené veličiny (odlišná od skutečné hodnoty) má svou nejistotu měření, která je zpravidla malá. Pro získání "pravé" přesnosti měření bychom museli udělat nekonečný počet opakovaných měření. Existují různé typy přesnosti měření, v závislosti na podmínkách, za kterých je stanovena přesnost, např. opakovatelnost, reprodukovatelnost. Přesnost měření zahrnuje pravdivost i přesnost a považuje se za popis úplné chyby měření [8].

Tyto výkonnostní charakteristiky lze vyjádřit kvantitativně:

- Bias (rozdíl mezi naměřenou hodnotou získanou z opakovaných měření stejného vzorku a referenční hodnotou) je kvantitativní vyjádření pravdivosti.
- Směrodatná odchylka (standard deviation - opět získaná z několika měření objektu) je kvantitativní vyjádření přesnosti.

Tyto dva prvky lze zahrnout do aparátu odhadu nejistoty měření, který lze považovat za kvantitativní vyjádření přesnosti měření [8].

4 POSTUP PLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Realizace všech navržených experimentů představovala značné časové nároky jak na obsluhu, tak i na vytíženost samotných měřicích přístrojů, které jsou umístěny na pracovištích ČMI Brno a CEITEC. Tyto přístroje se standardně využívají k další vědecké, výukové či ekonomické činnosti daných subjektů, které přístroje vlastní nebo provozují. Proto bylo nejprve přistoupeno k postupnému řešení cílů disertační práce.

4.1 NÁVRH ŘEŠENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Po zkouškách a ověření daných metodik a experimentů bylo přikročeno k tomuto finálnímu řešení problematiky v disertační práci:

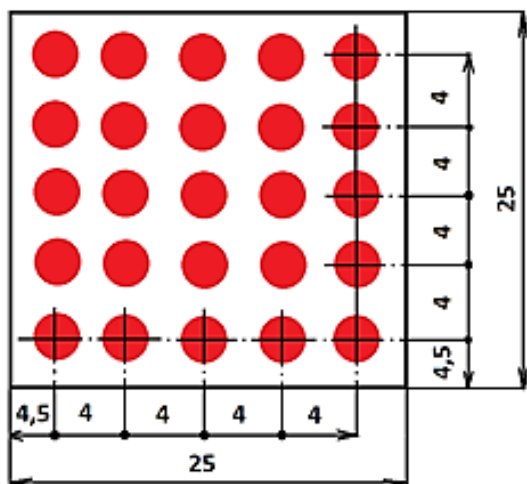
1. Volba vhodného délkového etalonu.
2. Návrh, výroba a odzkoušení upínacího přípravku.
3. Volba vhodných metod měření měřeného objektu.
4. Měření na přístroji nano-CMM NMM-1 za dodržení podmínek opakovatelnosti.
5. Realizace měření na ostatních přístrojích za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti.
6. Porovnání a vyhodnocení naměřených odchylek zvolených parametrů kuliček.
7. Popis hlavních vlivů na dosahovanou přesnost.
8. Kvantifikace nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1.
9. Vytvoření sw modulu pro rychlé stanovení nejistoty měření.
10. Návrh vhodného délkového etalonu – ball plate.

4.2 VOLBA VHODNÉHO ETALONU

Pro stanovení nejistoty měření přístroje používaného v nanometrologii je nutné použít přesný etalon délky z důvodu vysokých nároků na požadovanou přesnost měření a i samotné použité metody stanovení nejistoty měření. Z důvodu konstrukce přístroje a prostorového omezení bylo zamítnuto použití optického etalonu například interferometru. Samotné laserinterferometry slouží jako odměřovací systém zkoumaného přístroje a tudíž aplikace dalšího interferometru pro zajištění metrologické návaznosti by byla nevhodná. Z těchto důvodů je nutné přikročit k použití hmotného délkového etalonu. Opět z prostorových důvodů bylo zamítnuto použití koncových měrek, které by neumožňovaly pokrýt celý měřicí rozsah přístroje zejména v ose z . V disertační práci se jedná o rubínové kuličky o jmenovitých rozměrech $d = 1, 2, 3$ a 4 mm, které byly z důvodu nároků na prostor a stabilitu uchycení v první fázi experimentů nalepeny na tyčinky z uhlíkových vláken. Výrobcem rubínových kuliček je společnost Edmund Optics, Inc. z USA [22]. V další fázi provádění experimentů bylo přikročeno k návrhu, konstrukci modelu, odzkoušení a následné výrobě speciálního přípravku, který sloužil k uchycení měřených kuliček.

4.3 NÁVRH, VÝROBA A ODZKOUŠENÍ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU

V první fázi úvah a návrhů konstrukce přípravku pro uchycení kuliček bylo navrženo nejvhodnější rozmístění měřicích bodů, ve kterých budou vlastní kuličky instalovány. Toto rozmístění měřicích bodů bylo zvoleno tak, aby byl pokryt celý měřicí rozsah přístroje nano-CMM NMM-1 v osách x a y , tak jak je znázorněno na obrázku 4.1 vlevo. Pokrytí měřicího rozsahu přístroje v ose z bylo řešeno volbou různých jmenovitých průměrů rubínových kuliček.



Obr. 4.1 Schéma rozmístění měřicích bodů (vlevo), prostorový model přípravku z 3D tisku (vpravo) [autor].

Z důvodu potřeby zajištění přesného upnutí a ustavení v předem definované poloze měřených objektů byl navržen, odzkoušen a vyroben speciální přípravek pro uchycení rubínových kuliček. V prvotní fázi experimentu byl proveden návrh přípravku ve 3D. K tomuto kroku bylo využito pracovní prostředí Solid Edge. Tento model sloužil k ověření správnosti myšlenky a ke kontrole rozměrů. Pro ověření funkční správnosti byl na základě schváleného 3D modelu vytištěn funkční prototyp na 3D tiskárně, která je umístěna v laboratoři Oddělení primární nanometrologie a technické délky v ČMI OI Brno. Podoba tohoto prototypu je uvedena na obrázku 4.1 vpravo.

4.4 ZVOLENÉ METODY MĚŘENÍ SOUČÁSTÍ

Pro zajištění podmínek reprodukovatelnosti bylo realizováno několik sérií dotykových měření na délkoměru SIP 1002M spojeným s laserinterferometrem Renishaw XL80. Použitá metoda měření se opírala o akreditované kalibrační metody používané v ČMI Brno, což bylo jedním s požadavků pro vytvoření metodiku stanovení přesnosti měření. Tato měření poskytla dostatečně velký soubor naměřených dat měřených veličin – průměru a textury povrchu rubínových kuliček. Pro doplnění těchto měřicích metod a otestování parametrů CT měřicí techniky bylo provedeno měření rubínových kuliček o jmenovitém průměru $d = (1, 2, 3 \text{ a } 4)$ mm na rentgenových (dále jen CT) tomografech General Electric V_TOME_X L 240 (dále jen GE) a Rigaku nano3DX (dále jen Rigaku), které se nacházejí na pracovišti CEITEC v Brně.

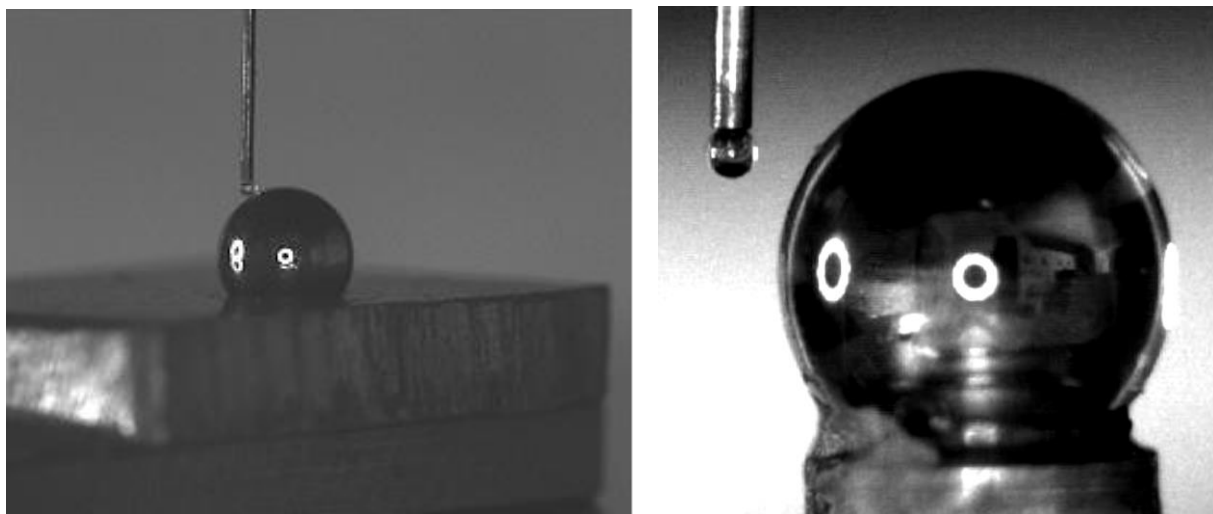
Pro zjištění parametrů textury povrchu rubínových kuliček a jejího případného vlivu na přesnost měření při použití dotykové sondy přístroje nano-CMM NMM-1 byla provedena měření na dalších specializovaných měřicích přístrojích. Na pracovišti ČMI OI Brno bylo provedeno měření parametrů textury povrchu na přesném kruhoměru Talyrond TR595S a AFM mikroskopu Accurex II.L. Oba tyto přístroje jsou v majetku ČMI Brno. Orientační vyhodnocení parametrů textury povrchu kuliček bylo také provedeno z měření na CT přístroji Rigaku.

4.5 MĚŘENÍ ROZMĚRU RUBÍNOVÝCH KULIČEK

Vlastní opakované měření rozměru rubínových kuliček o jmenovitém rozměru $d = (1; 2; 3 \text{ a } 4)$ mm bylo realizováno za použití tří měřicích metod, respektive měřicích přístrojů. Díky tomu bylo možné zajistit plnění podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti měření [16].

4.5.1 Dotykové měření rozměru kuliček na přístroji nano-CMM NMM-1

Tato měřicí metoda představuje časově nejnáročnější část disertační práce. Slouží jako základ ke stanovení nejistoty měření na přístroji SIOS NMM-1. Vlastní měření proběhlo v podzemní laboratoři ČMI OI Brno, kde je přístroj nano-CMM NMM-1 umístněný. Jedná se zejména o pracovní stůl z materiálu Invar, který umožňuje uchycení rubínových kuliček v různých přípravcích a držácích. V ose z je namontována dotyková nano-sonda Gannan XP. Snímaný detailní obraz byl přenášán na obrazovku monitoru, tak jak je uvedeno na obrázku 4.2.



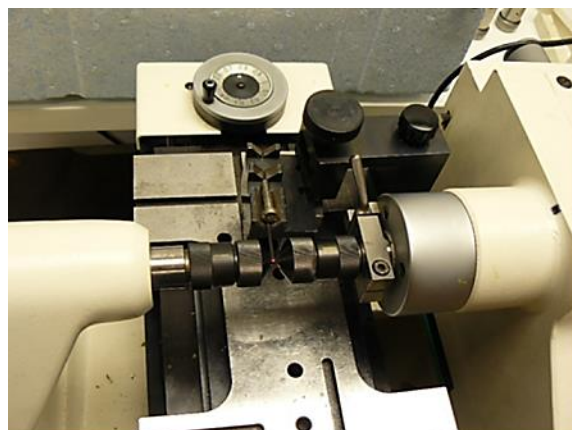
Obr. 4.2 Měření kuličky dotykovou sondou – detail [autor].

Při každém měření se snímalo 25 bodů na vrchní polokouli rubínové kuličky. Počet snímaných bodů a jejich poloha na kouli je volena v souladu s normou ČSN EN ISO 10 360-2 [15]. Měřeny byly postupně všechny kuličky, které byly k dispozici. Provedl se soubor opakovaných měření, tak aby byl získán dostatečný objem dat pro vyhodnocení opakovatelnosti této měřicí metody.

4.5.2 Dotykové měření na délkoměru s interferometrem

Z důvodu zajištění reprodukovatelnosti naměřených hodnot průměru rubínových kuliček je zvolena další dotyková metoda měření na přesném délkoměru SIP 1002M, se kterým byl propojen průmyslový laserinterferometr Renishaw LX 80. Oba tyto přístroje jsou v majetku ČMI OI Brno. Vlastní digitální délkoměr je jednoosý dotykový přístroj, který umožňuje měření rozměrů do maximálního rozměru 1m s rozlišením 0,0001 mm. Jeho výhodou je stabilní propracovaná konstrukce, která se vyznačuje dodržením Abbého principu měření.

Pro zvýšení přesnosti měření rozměrů rubínových kuliček je používán laserinterferometr Renishaw XL80, který byl umístněný přímo v ose odměřovacího systému délkoměru SIP 1002M, čímž byl dodržen Abbého princip při měření. Sestava délkoměru SIP 1002M s průmyslovým laserinterferometrem je uvedena na obrázku 4.3 vlevo.



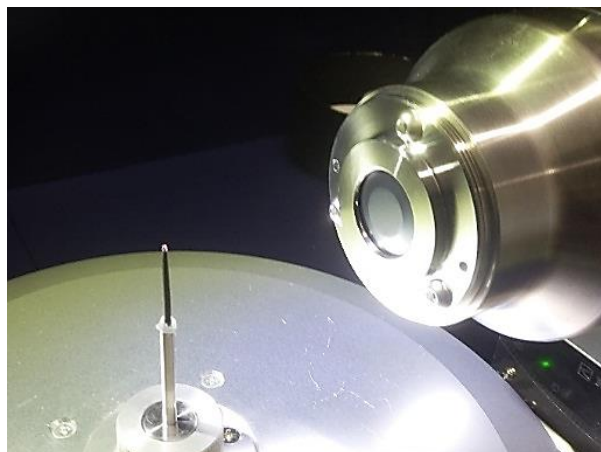
Obr. 4.3 Měření na délkoměru SIP doplněném o LI HP [autor].

Vlastní měření probíhalo za pomoci upraveného přípravku, který umožňoval uchycení rubínových kuliček včetně jejich definovatelné orientace vůči měřicí rovině, jak je vidět na obrázku 4.3 vpravo. Tyto měřicí roviny byly zvoleny tak, abychom dosáhli porovnatelných výsledků měření s použitou metodou na přístroji nano-CMM NMM-1.

K měření kuliček o jmenovitém průměru $d = (1, 2, 3 \text{ a } 4) \text{ mm}$ se používalo redukci vybavených kulovými doteky, které jsou standardním příslušenstvím délkoměru SIP 1002M a jsou uvedeny na obrázku číslo 4.2 vpravo. Měřicí síla byla nastavena na hodnotu menší než 0,25N. Teplota okolí a měřicího přístroje byla standardně monitorována a pohybovala se v rozmezí $20^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ v souladu s nároky na přesné délkové měření. Byl tak získán dostatečný objem dat pro vyhodnocení opakovatelnosti této měřicí metody a zároveň byl vytvořen dostatečně soubor naměřených dat pro vyhodnocení reprodukovatelnosti měření.

4.5.3 Bezdotykové měření na CT přístroji Rigaku

Pro zajištění přesnějších výsledků měření bylo provedeno další měření na CT přístroji Rigaku nano3DX, který je uveden na obrázku 4.4 vlevo. Tento přístroj umožňuje dosažení menšího rozlišení měřené veličiny oproti předchozímu přístroji GE.



Obr. 4.4 Celkový pohled na tomograf Rigaku nano3DX (vlevo) [21] a měřicí prostor přístroje s umístěnou kuličkou $d = 1 \text{ mm}$ (vpravo) [autor].

Vlastní tomograf Rigaku je vysoce přesný přístroj, který umožňuje provádět přesná 3D měření do maximálního rozsahu zorného pole přístroje ($7,2 \times 5,4$) mm s nejmenším rozlišením $0,27 \mu\text{m}$ při použití zorného pole ($0,9 \times 0,7$) mm. Situace při měření je zobrazena na obrázku 4.4 vpravo. Použitý zdroj záření je X-ray trubice o 20 až 50 kV. Jako detektor byla použita rentgenová CCD kamera. Přesnost osy rotace měřeného objektu je menší než $0,5 \mu\text{m}$ [21]. Vybavení přístroje

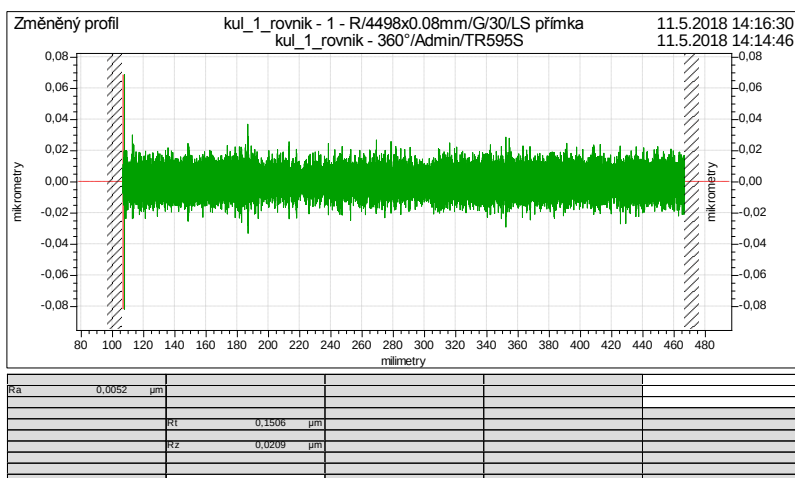
umožňuje: 3D kvantitativní analýzu obrázku za použití sw nano3DCalc, 2D a 3D zobrazení měřeného objektu, ořezávání, filtraci a další operace. Měření proběhlo za standardních podmínek pro akreditovanou zkušební laboratoř na pracovišti CEITEC Brno.

4.6 VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU KULÍČEK

Vyhodnocení parametrů textury povrchu rubínových kuliček o jmenovitém průměru $d = (1; 2; 3 \text{ a } 4) \text{ mm}$ bylo realizováno opět za použití tří měřicích metod, respektive měřicích přístrojů. Díky tomu bylo možné zjistit hodnotu předpokládaného vlivu parametrů textury povrchu na přesnost měření přístroje nano-CMM NMM-1.

4.6.1 Dotykové měření na přístroji Talyrond TR 595S

Jednou ze dvou hlavních měřicích metod parametrů textury povrchu bylo kontaktní měření na přesném kruhoměru od anglického výrobce Taylor Hobson s označením Talyrond TR595S, jehož pracovní prostor je uveden na obrázku 4.5 vlevo.

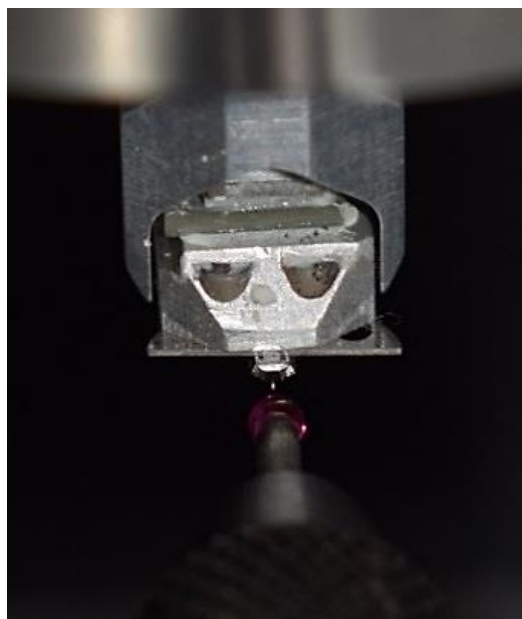


Obr. 4.5 Pracovní prostor přístroje Talyrond TR595S vlevo a ukázka naměřených dat analyzovaných v sw Ultra 300[autor].

Měření proběhlo v laboratoři číslo 23 Oddělení primární nanometrologie a technické délky ČMI Brno. K měření kuliček o jmenovitém průměru $d = (1, 2, 3 \text{ a } 4) \text{ mm}$ se používalo doteku s diamantovým hrotem o poloměru $2 \mu\text{m}$, který je standardním příslušenstvím přesného kruhoměru TR595S. Měřicí síla byla nastavena na hodnotu $0,20\text{N}$ v souladu s uživatelskou příručkou přístroje [35]. Teplota v uzavřeném boxu měřicího přístroje byla standardně monitorována a pohybovala se v rozmezí $20^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$ v souladu s nároky na přesné délkové měření. Pro uchycení kuliček bylo opět využito kevlarových tyčinek, pomocí kterých bylo provedeno pevné upnutí v pětiramenném přesném sklíčidle.

4.6.2 Bezdotykové měření na AFM mikroskopu

Druhou měřicí metodou použitou pro zjištění parametrů textury povrchu rubínových kuliček bylo „bezkontaktní“ snímání pomocí mikroskopu atomové síly Accurex II.L od výrobce Topometrix Corp., USA, který je v majetku ČMI Brno a je umístěn v jedné z podzemních laboratoří Oddělení primární nanometrologie a technické délky. Celkový pohled na přístroj Accurex II.L je uveden na obrázku 4.6 vlevo. Využití mikroskopu atomové síly pro měření nanodrsnosti je jedním ze základních prvků, který se využívá v oblasti nanometrologie. Tato metoda umožňuje přesné měření parametrů textury povrchu různých materiálů včetně rubínových kuliček [36, 37].



Obr. 4.6 Celkový pohled na přístroj Accurex II.L (vlevo), detailní pohled na uchycení rubínové kuličky pomocí kleštiny vpravo [autor].

Pro pevné a rozměrově vyhovující upnutí bylo použito držáku s kleštinou Taylor Hobson, která umožňovala definovatelné pootočení kuličky celkem o 360°. Pro vlastní měření byl použit hrot PPP_CONTR od výrobce Nanosensors™ ze Švýcarska, který je uveden na obrázku 4.6 vpravo. Během měření bylo využito tzv. „kontaktního“ režimu měření textury povrchu rubínových kuliček. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat probíhalo v programovém prostředí Gwyddion [19].

4.7 POSOUZENÍ VÝSLEDKŮ A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Na základě získaných výsledků ze souborů naměřených dat, které byly statisticky zpracovány, bylo v disertační práci provedeno vyhodnocení těchto výsledků z hlediska výskytu odlehlých hodnot, dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, posouzení zvolených metod měření a upřesnění jednotlivých vlivů na konečnou přesnost měření přístroje SIOS nano-CMM NMM-1, která byla po statistickém zpracování kvantifikována pomocí nejistoty měření.

Prvotním krokem před provedením statistického vyhodnocení naměřených dat získaných z měření na přístroji nano-CMM NMM-1 bylo provedení tzv. Grubbsova testu. V souladu se zněním normy ČSN ISO 5725-2 [20] se nejprve provedlo vyloučení odlehlých hodnot. Po odstranění odlehlé hodnoty již nelze na hladině významnosti 0,05 zamítnout nulovou hypotézu o neexistenci odlehlých hodnot v pozorovaném souboru. Takový soubor tedy můžeme s danou spolehlivostí považovat za zbavený odlehlých hodnot.

4.7.1 Statistické vyhodnocení výsledků měření rozměru kuliček

Během provádění celého souboru experimentů, byl kladen důraz na získání souboru naměřených dat. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k dodržení preciznosti měření za podmínek opakovatelnosti [16] a za podmínek reprodukovatelnosti měření [16]. Pro vyhodnocení splnění těchto podmínek bylo určeno porovnání výsledků měření dvou stěžejních metod měření rozměru kuliček, které jsou uvedeny v tabulce 4.1. První metoda měření se uskutečnila na přístrojích nano-CMM NMM 1 a délkoměru SIP 1002M spojeného s laserinterferometrem XL 80. Druhá metoda, která zahrnovala použití dvou akreditovaných kalibračních postupů ČMI Brno. Jednalo se o provedení srovnávacího měření rozměru rubínových kuliček na přístrojích nano-CMM NMM-1 a CT přístroji Rigaku

Tab. 4.1 Vyhodnocená data z měření průměru kuličky o $d = 1\text{ mm}$ na přístrojích nano-CMM NMM-1 a SIP 1002M / XL 80.

Číslo měření	Průměr kuličky $d = 1\text{mm}$		Číslo měření	Průměr kuličky $d = 1\text{mm}$	
	NNM-1 (mm)	SIP/XL (mm)		NNM-1 (mm)	CT (mm)
1	0.957971	0.959343	1	0.957971	0.969432
2	0.959900	0.959544	2	0.959900	0.969444
3	0.959742	0.959434	3	0.959742	0.969434
4	0.963979	0.961944	4	0.963979	
5	0.956974	0.959440	5	0.956974	
6	0.959795	0.959667	6	0.959795	
7	0.959911	0.959417	7	0.959911	
8	0.959812	0.959544	8	0.959812	
9	0.961399	0.959443	9	0.961399	
10	0.960176	0.959667	10	0.960176	
R	0.007005	0.002601	R	0.007005	0.000012
$\bar{x}$	0.959966	0.959744	$\bar{x}$	0.959966	0.969437
$s_{r1,2}$	0.001768	0.000740	$s_{r3,4}$	0.001768	0.000005
$v_{r1,2}$	0.184138	0.077117	$v_{r3,4}$	0.184138	0.000541
s_{R1}	0.0013595935		s_{R2}	0.00428081	
v_{R1}	0.0014164570		v_{R2}	0.00444921	
k_{r1}	0.784857		k_{r1}	0.684299	
CD_{r1}	0.003671	0.001537	CD_{r2}	0.003671	0.000011
CD_{R1}	0.002823		CD_{R2}	0.008889	

Vysvětlivky:

R - rozpětí naměřených hodnot
 $\bar{x}$ - aritmetický průměr
 s_r - směrodatná odchylka opakovatelnosti
 v_r - variační koeficient opakovatelnosti
 s_R - směrodatná odchylka reprodukovatelnosti
 v_R - variační koeficient reprodukovatelnosti
 k_r - koeficient korelovatelnosti
 CD_r - kritický rozdíl opakovatelnosti
 CD_R - kritický rozdíl reprodukovatelnosti

Podmínka přijatelnosti výsledků:
 $|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \leq CD$

Nesplněna	Nesplněna
Nesplněna	

Pro vyhodnocení možného vlivu textury povrchu rubínových kuliček na přesnost měření bylo určeno porovnání výsledků měření dvou metod měření textury povrchu kuliček. Opět bylo přistoupeno k dodržení preciznosti měření za podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření [16]. Pro vyhodnocení splnění těchto podmínek bylo určeno porovnání výsledků měření dvou stěžejních metod měření rozměru kuliček, které jsou uvedeny v tabulce 4.1. Jednalo se o měření na AFM mikroskopu Accurex II.L a přesném kruhoměru Taylor Hobson TR 595S. První metoda představuje akreditovaný kalibrační postup ČMI Brno a byla dostatečnou zárukou validace celého experimentu měření textury povrchu kuliček. Měření parametrů textury povrchu kuličky o $d = 1\text{mm}$ bylo provedeno pouze 3x, z důvodu značné časové náročnosti na vlastní měření a matematického zpracování naměřených dat, obdobně jako u předešlé metody CT snímání.

Tab. 4.2 Vyhodnocená data textury povrchu kuličky o $d = 1\text{ mm}$ z přístrojů AFM Accurex a TR 595S.

Číslo měření	Drsnost povrchu kuličky R_a		Vysvětlivky:	
	TR 595S (nm)	AFM (nm)		
1	5.2	6.4	R - rozpětí naměřených hodnot	
2	5.2	6.5	$\bar{x}$ - aritmetický průměr	
3	5.1	6.3	s_r - směrodatná odchylka opakovatelnosti	
			v_r - variační koeficient opakovatelnosti	
			s_R - směrodatná odchylka reprodukovatelnosti	
			v_R - variační koeficient reprodukovatelnosti	
			k_r - koeficient korelovatelnosti	
			CD_r - kritický rozdíl opakovatelnosti	
			CD_R - kritický rozdíl reprodukovatelnosti	
			Podmínka přijatelnosti výsledků:	
			$ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \leq CD$	
			Nesplněna	Nesplněna
			Splněna	

4.7.3 Interpretace a zhodnocení získaných výsledků

Pro závazné vyhodnocení parametrů textury povrchu rubínových kuliček a jejich vlivu na přesnost měření přístroje nano-CMM NMM-1 byly zvoleny dvě akreditované kalibrační metody používané na pracovišti Primární nanometrologie ČMI OI Brno. První metodou bylo měření parametrů textury povrchu na přesném kruhoměru Talyrond TR595S. Druhou metodou pak bylo použití přístroje AFM mikroskopu Accurex II.L.

Vyhodnocené statistické parametry z naměřených souborů ukazují na vysokou míru korelovatelnosti naměřených dat průměru rubínových kuliček z přístroje nano-CMM NMM-1 a přístrojů SIP 1002M a XL 80. Koeficient korelovatelnosti k_{r1} se blíží hodnotě 1 (0,785). U těchto souborů měření bylo prokázáno dodržení preciznosti měření za podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, když jednotlivé variační koeficienty opakovatelnosti $v_{r1} = 0,184$ a $v_{r2} = 0,077$ dosahovaly minimálních hodnot. Podobně koeficient reprodukovatelnosti $v_{R1} = 0,002$. Byly splněny podmínky přijatelnosti výsledků, když absolutní hodnota rozdílu středních hodnot obou porovnávaných souborů byla menší než kritické rozdíly opakovatelnosti respektive reprodukovatelnosti.

V případě vyhodnocení naměřených dat rozměrů kuliček pomocí CT přístrojů GE a Rigaku ve srovnání s měřením na přístroji nano-CMM NMM-1 bylo dosaženo řádově horších výsledků při statistickém vyhodnocení. Hlavním důvodem byla technologie použitá pro bezdotykové snímání rozměru kuliček. I při použití nejmenšího zorného pole přístroje Rigaku (0,9 x 0,7) mm nebylo možné dosáhnout požadované přesnosti měření rozměru ruliček o jmenovitých průměrech $d = 1$ a 2 mm . Koeficient korelovatelnosti k_{r2} se také blíží hodnotě 1, ale má nižší hodnotu (0,684). U těchto souborů jednotlivé variační koeficienty opakovatelnosti $v_{r3} = 0,184$ a $v_{r4} = 0,005$ dosahovaly minimálních hodnot. Podobně koeficient reprodukovatelnosti $v_{R2} = 0,004$.

Nebyly splněny podmínky přijatelnosti výsledků, když absolutní hodnota rozdílu středních hodnot obou porovnávaných souborů byla větší než kritický rozdíl opakovatelnosti. Nicméně CT přístroje mají těžiště svého využití jinde než v provádění nejpresnějších délkových měření.

Vyhodnocení naměřených dat textury povrchu poukazují na vysokou preciznost měření pomocí AFM mikroskopu Accurex, které dosahuje řádově přesnějších výsledků měření oproti dotykovému měření na přesném kruhoměru TR 595S. Koeficient korelovatelnosti k_{r3} se také blíží hodnotě 1 (0,866). U těchto souborů jednotlivé variační koeficienty opakovatelnosti $v_{r5} = 0,912$ a $v_{r6} = 1,275$ dosahovaly nejvyšších hodnot ze všech použitých metod měření. Podobně koeficient reprodukovatelnosti nabýval nejvyšší hodnoty $v_{R3} = 0,107$.

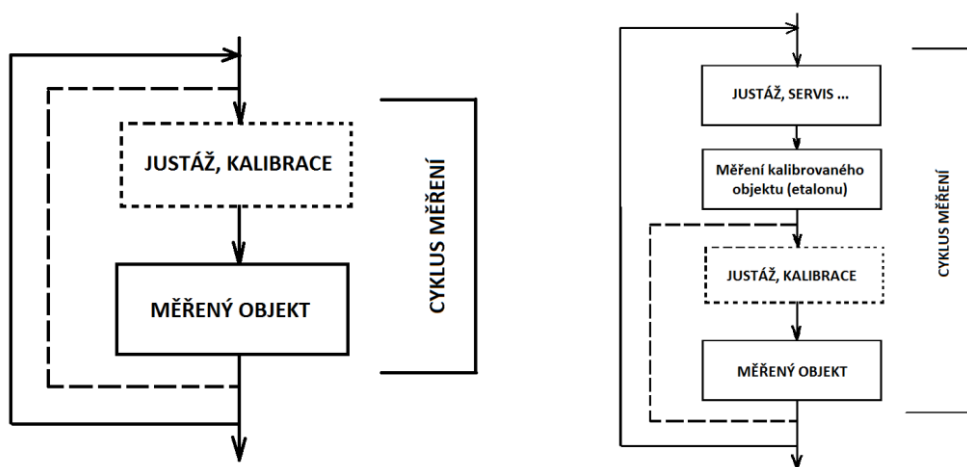
Nebyly splněny podmínky přijatelnosti výsledků, když absolutní hodnota rozdílu středních hodnot obou porovnávaných souborů byla větší než kritické rozdíly opakovatelnosti i reprodukovatelnosti. V tomto případě se ukázala jako limitní hodnota poloměru diamantového hrotu snímače přístroje TR 595S, která je až 2 μm . Nicméně měření povrchu rubínových kuliček na AFM mikroskopu bylo nezbytnou podmínkou pro kvantifikaci jedné ze složek nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1.

Z dosažených výsledků se prokázal očekávaný fakt, že nejpřesnějšího měření průměru kuliček je dosahováno na jednoosém délkoměru SIP 1002M, který byl doplněn o velmi přesné snímání délky pomocí průmyslového laserinterferometru Renishaw XL80. Je zřejmé, že kvalitní provedení délkoměru – speciálního jednoúčelového měřicího přístroje slouží jako vhodná základna pro přesná délková měření. Po doplnění o laserinterferometr XL80 dostáváme výjimečnou platformu pro jednoosé měření délkových rozměrů a návaznost etalonů v nanometrologii. Limitem tohoto postupu bylo jeho omezení z hlediska tvarově složitějších měřicích úloh. Naproti tomu měřicí schopnost tomografu GE se pro přesné měření kuliček malých rozměrů jeví jako nedostatečná. Byly zjištěny nedostatečné hodnoty opakovatelnosti naměřených hodnot, respektive jejich velkého rozptylu. Je patrné, že tomograf s velkým rozsahem měření není vhodný pro měření takto malých objektů, což samozřejmě nebylo v úmyslu jak výrobce přístroje, tak ani samotného uživatele tohoto přístroje. Použití rubínových kuliček se v tomto případě nabízí v oblasti etalonáže pro tyto měřicí přístroje, zejména Rigaku nano 3DX.

5. POUŽITÉ METODY STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ

V současné vědecké literatuře se poměrně často vyskytuje problematika stanovení nejistoty měření standardních CMM pomocí různých metod [4, 38, 39, 40, 45, 46, 49, 50, 51]. V oblasti přístrojů nano-CMM je situace zcela odlišná, pokud je odborná literatura k dispozici, týká se spíše obecného přístupu k nanometrologii [14, 24, 39, 40] nebo problematika nejistoty měření nano-CMM není jejich hlavním tématem [48, 49, 50, 38]. Proto je v této disertační práci přistoupeno k úpravě stávajících metod stanovení nejistoty měření pro oblast nano-CMM. Pro vlastní postup stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 byla zvolena strategie tzv. klasického (nesimulativního) způsobu stanovení nejistoty měření CMM. Konkrétně se jedná o dvě metody, které byly doplněny simulativní metodou Monte Carlo:

- „nesubstituční metoda“, která využívá k měření nekalibrovaný objekt a korigovaná indikace CMM je považována za výsledek měření [4, 11, 20, 23, 26, 97, 98]. Její schéma je uvedeno na obrázku číslo 5.1 vlevo.



Obr. 5.1 Schéma nesubstituční (multipoziční) metody stanovení přesnosti měření CMM (vlevo) a substituční metody stanovení přesnosti měření CMM (vpravo) [4, 11].

Tuto metodu lze zařadit taktéž mezi *Multipoziční metody stanovení přesnosti CMM*. Základem těchto metod je provedení souboru měření daného objektu v různých polohách a orientacích v rámci měřicího rozsahu CMM. Analýza výsledků těchto měření se provádí na základě vyhodnocení standardních odchylek sledované charakteristiky CMM nebo měřeného objektu, která má vliv na stanovení nejistoty měření.

- „substituční metoda“, která využívá k měření kalibrovaný objekt (etalon) a nekorigovaná indikace CMM je považována za výsledek měření [4, 11, 40 - 51]. Její schéma je uvedeno na obrázku 5.1 vpravo.

Tato metoda se vyznačuje použitím vhodného etalonu délky s dostatečně nízkou nejistotou měření. Jednotlivé složky nejistoty měření byly analyzovány a stanoveny v souladu se zavedenou praxí v akreditovaných laboratořích a řídí se mezinárodními dokumenty [2, 6, 9, 11].

5.1 NEJISTOTA MĚŘENÍ CMM PŘI POUŽITÍ MULTIPOZIČNÍ METODY

Multipoziční metoda (též nesubstituční metoda) [4, 11, 20, 23, 26, 97, 98] byla zvolena z důvodu možné nedostupnosti vhodné a dostatečně přesné kalibrační metody na provedení metrologické návaznosti použitého etalonu. Je dobré si uvědomit, že v nanometrologii se rozlišení měřených délek pohybuje v řádu nanometrů, což je pro většinu používaných metod měření délky za jejich fyzikálními hranicemi. Mezi hlavní zdroje nejistoty měření, které byly identifikovány a analyzovány během provádění souboru měření, je možno zahrnout:

- vliv snímacího dotyku Gannen XP,
- standardní odchylka z opakovaných měření,
- nejistota měření způsobená geometrickými chybami nano-CMM NMM-1,
- nejistota znalosti teplotní roztažnosti měřeného objektu (rubínové kuličky),
- nejistota znalosti teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,
- nejistota měření průměru rubínových kuliček pomocí laserinterferometru XL80,
- nejistota měření skutečné teploty v pracovním prostoru nano-CMM NMM-1.

Obecný vztah (5.1) pro stanovení rozšířené nejistoty měření nano-CMM NMM-1 je vytvořený v souladu s obecně zavedenou praxí oblasti průmyslových CMM. Vychází z mezinárodních dokumentů [6, 9, 11], interních předpisů ČMI Brno, technických norem [2, 13, 12, 15] i vědeckých publikací [4, 14].

$$U = |E_D| + |E_L| + k \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corrL}^2 + u_{temp}^2 + u_{prob}^2} . \quad (5.1)$$

Vzhledem k zavedeným zvyklostem a pravidlům v rámci akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno bylo přistoupeno k úpravě obecného vztahu. Úprava reflektuje zvolenou metodiku měření a zohledňuje hlavní zdroje nejistoty měření, které byly analyzovány během provádění rozsáhlého souboru měření. Došlo k úpravě rovnice (5.1), kdy do rozšířené nejistoty měření nezahrnujeme vlastní korekce eliminující systematickou chybu vzniklou použitím nekalibrovaného objektu, ale jejich vliv je promítnut formou směrodatné odchylky v souladu s evropskými dokumenty [6, 9, 11].

$$U_{mult} = k \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corrL}^2 + u_{temp}^2 + u_{prob}^2 + u_L^2} , \quad (5.2)$$

kde ve vztazích (5.1) a (5.2) je:

k	koeficient rozšíření,
E_D	korekce rozměru měřeného objektu (rubínové kuličky) získaná při jejím měření,
E_L	průměrná chyba měření délky pomocí laserinterferometru XL80,
u_{rep}	standardní nejistota měření způsobená opakovatelností nano-CMM NMM-1,
u_{geo}	standardní nejistota měření způsobená geometrickou chybou nano-CMM NMM-1,
u_{corrL}	standardní nejistota měření průměru rubínové kuličky pomocí laserinterferometru XL80,
u_{temp}	standardní nejistota měření způsobená vlivem změny teploty během měření,
u_{prob}	standardní nejistota měření způsobená dotykovým snímacím systémem Gannen XP,
u_L	standardní nejistota stanovení korekce pro měření nekalibrovaného etalonu.

5.2 NEJISTOTA MĚŘENÍ CMM PŘI POUŽITÍ SUBSTITUČNÍ METODY

Substituční metoda se od předchozí liší zejména tím, že v procesu kalibrace přístroje nano-CMM NMM-1 jsou použity vhodné kalibrované etalony délky – rubínové kuličky, ke kterým jsou přiloženy kalibrační listy s naměřenými hodnotami a rozšířenou nejistotou měření. Naměřené hodnoty není tedy nutné korigovat o systematickou chybu vzniklou při použití nekalibrovaného objektu. Etalony délky je možné použít i při běžném měření na nano-CMM NMM-1 a tudíž mají nezastupitelný vliv na stanovení přesnosti měření tohoto přístroje. Tato metoda je pro standardní CMM dostatečně popsána v odborné literatuře [4, 11, 41 - 52], ovšem pro oblast nano-CMM je nutné ji upravit. Obecný vztah (5.3) pro výpočet rozšířené nejistoty měření nano-CMM NMM-1 je taktéž vytvořen v souladu s obecně zavedenou praxí, která je popsána v mezinárodních dokumentech [2, 5, 9, 11] i vědeckými publikacemi [4, 14].

$$U = k \sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2}, \quad (5.3)$$

kde je:

k	koeficient rozšíření,
u_e	standardní nejistota měření způsobená použitým etalonem,
u_p	standardní nejistota měření vyhodnocená způsobem A,
u_w	standardní nejistota měření způsobená náhodnými změnami materiálu, měřeného objektu a vlivy během jeho výroby, je také závislá na strategii měření,
u_b	standardní nejistota měření spojená se stanovením systematické chyby měření rozměru etalonu.

Na základě získaných zkušeností z provedených měření a vzhledem k zavedeným zvyklostem a pravidlům v rámci akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno bylo přistoupeno k úpravě, respektive upřesnění uvedené definice. Toto upřesnění reflektuje zvolenou metodiku měření a zohledňuje hlavní zdroje nejistoty měření, které byly identifikovány a analyzovány během provádění rozsáhlého souboru měření:

- rozlišitelnost odměřovacího systému nano-CMM NMM-1,
- vliv snímacího dotyku Gannen XP,
- standardní odchylka z opakovaných měření,
- nejistota kalibrace použitého etalonu,

- nejistota znalosti teplotní roztažnosti měřeného objektu,
- nejistota znalosti teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,
- nejistota kalibrace použitého teploměru,
- nejistota měření skutečné teploty v pracovním prostoru nano-CMM NMM-1,
- vliv čištění měřeného objektu,
- vliv upnutí použitého etalonu,
- nehomogenita teploty použitého etalonu,
- vliv kvality povrchu použitého etalonu.

Výsledná podoba vztahu pro stanovení rozšířené nejistoty měření vyhodnocenou substituční metodou po odstranění zanedbaných položek je tato:

$$U_{subs} = k \sqrt{u_r^2 + u_{prob}^2 + u_a^2 + u_e^2 + u_{temp}^2 + u_{cl}^2}. \quad (5.4)$$

kde je:

- k koeficient rozšíření,
- u_r standardní nejistota měření způsobená vlivem rozlišitelnosti nano-CMM NMM-1,
- u_{prob} standardní nejistota měření způsobená použitým etalonem,
- u_a standardní nejistota měření vyhodnocená způsobem A,
- u_e standardní nejistota měření způsobená použitým etalonem,
- u_{temp} standardní nejistota měření skutečné teploty v pracovním prostoru nano-CMM NMM-1,
- u_{cl} standardní nejistota měření způsobená vlivem nečistoty měřeného objektu.

5.3 METODA MONTE CARLO PŘI STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

V disertační práci, je stanoven jednoduchý způsob odhadu nejistoty pomocí metody Monte Carlo (Monte-Carlo Simulation). Popisované metody stanovení přesnosti měření (multipoziční a substituční) předpokládají, že jednotlivé komponenty standardní nejistoty měření mají stabilní rozdělení pravděpodobnosti. Jedním ze základních prvků této metody je stanovení matematického modelu popisujícího měřicí systém nano-CMM. Pro popis reálného matematického modelu byl jako základ použit vztah (5.5) pro vyjádření chyby měření Δ sledovaného systému. Obecný vztah pro vyjádření hodnoty měřené (korigované) veličiny y_{cor} má tvar:

$$y_{cor} = \bar{y} - \Delta_s, \quad (5.5)$$

kde je:

- $\bar{y}$ aritmetický průměr indikací nano-CMM NMM-1 veličiny y v daném měřicím cyklu,
- Δ_s systematická chyba nano-CMM NMM-1.

Matematický model pro multipoziční metodu stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1, lze popsat jako funkci, která nám slouží ke zjištění korigované hodnoty výstupní veličiny y_{cor} a lze ji popsat vztahem, který vychází z vědeckých publikací [4, 14] a normativních dokumentů [2, 13, 15]:

$$y_{cor} = \bar{y}(1 + \alpha_N \Delta t) - L \frac{1}{n_3} \sum_{j=1}^{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} \frac{L_{meast_{ij}}(1 + \alpha_w \Delta t) - L_{calstd_{ij}}}{L_{calstd_{ij}}} - \frac{1}{n_5} \sum_{i=1}^{n_5} (D_{meas_i} - D_{cal_i}). \quad (5.6)$$

Odpovídající úpravou této rovnice pro multipoziční metodu je matematický model měření zahrnující vyjádření hodnot E_L a E_D ze vztahů (5.1) a (5.2), který je vyjádřen tímto vztahem:

$$y_{\text{corm}} = \bar{y}(1 + \alpha_N \Delta t) - L \frac{L_{\text{measstd}}(1 + \alpha_W \Delta t) - L_{\text{calstd}}}{L_{\text{calstd}}}, \quad (5.7)$$

kde je:

- y_{corm} korigovaný výsledek měření pro multipoziční metodu,
- $\bar{y}$ průměrná hodnota ze všech měření dané charakteristiky objektu,
- Δt odchylka teploty kuliček a těla nano-CMM NMM-1 při měření od 20°C,
- α_W koeficient délkové roztažnosti materiálu rubínových kuliček,
- α_N koeficient délkové roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,
- L měřená délka,
- L_{measstd} výsledek měření etalonu délky,
- L_{calstd} kalibrační hodnota etalonu délky,
- D_{meas} výsledek měření vnitřního rozměru etalonu délky,
- D_{cal} kalibrační hodnota vnitřního rozměru etalonu délky,
- n_3 celkový počet orientací kuličky při měření,
- n_5 celkový počet měření etalonu laserinterferometrem XL80.

Pro úplnost a možnost plnohodnotného porovnání byl vytvořen matematický model měření přístroje nano-CMM NMM-1 pro substituční metodu stanovení nejistoty měření. Tento vztah opět vychází z vědeckých publikací [4, 14] a normativních dokumentů [2, 13, 15]:

$$y_{\text{cors}} = \bar{y}(1 + \alpha_W \Delta t) - (y_w - x_{cw}), \quad (5.8)$$

kde je:

- y_{cors} korigovaný výsledek měření pro substituční metodu,
- $\bar{y}$ průměrná hodnota ze všech měření dané charakteristiky objektu,
- α_W koeficient délkové roztažnosti materiálu měřeného objektu,
- Δt odchylka teploty měřeného objektu od 20°C,
- y_w průměrná hodnota ze všech měření etalonu (pomocí nano-CMM),
- x_{cw} hodnota etalonu uvedená v kalibračním protokolu.

6 VYHODNOCENÍ VÝPOČTU NEJISTOTY MĚŘENÍ MULTIPOZIČNÍ METODOU

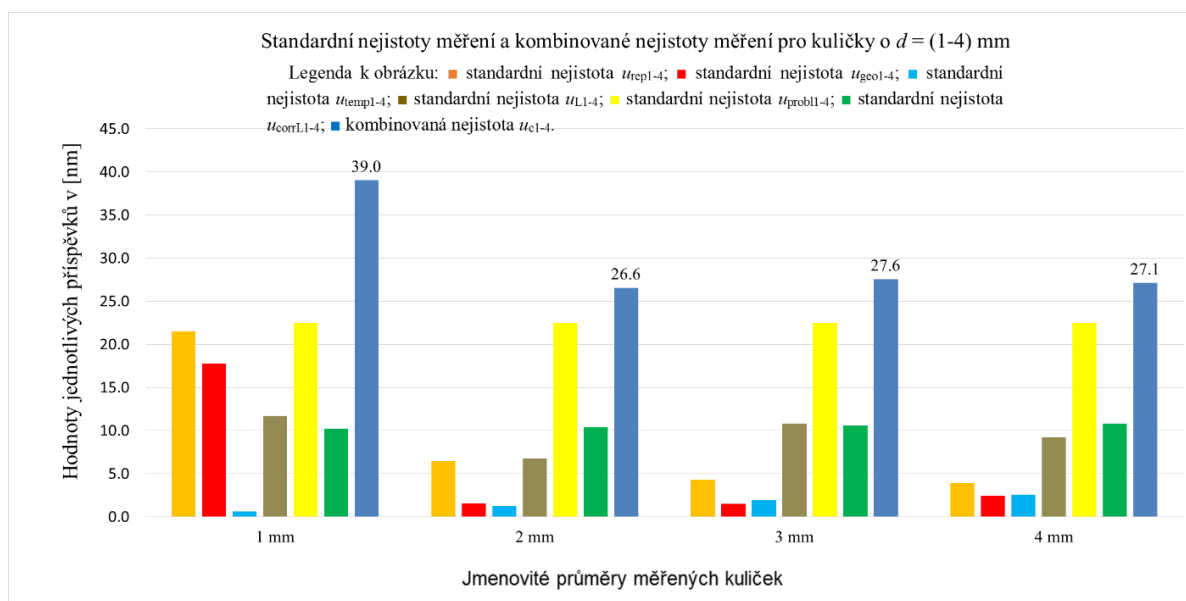
Pro vlastní stanovení přesností měření přístroje nano-CMM NMM-1 bylo přikročeno k určení kombinované nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro všechny průměry použitých kuliček. Toto řešení zajistilo pokrytí celého měřicího rozsahu přístroje nano-CMM NMM-1. V přehledové tabulce 6.1 jsou uvedeny všechny hodnoty kombinovaných a rozšířených nejistot měření jednotlivých průměrů kuliček. Výsledkem je určení rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro měřicí rozsah přístroje nano-CMM NMM-1 (1–4) mm.

Tab. 6.1 Porovnání jednotlivých příspěvků nejistoty měření stanovené multipoziční metodou (nm).

Označení příspěvku	Hodnoty pro $d = 1\text{ mm}$	Hodnoty pro $d = 2\text{ mm}$	Hodnoty pro $d = 3\text{ mm}$	Hodnoty pro $d = 4\text{ mm}$
$u_{\text{rep1-4}}$	21.5	6.4	4.3	3.9
$u_{\text{geo1-4}}$	17.8	1.6	1.5	2.5
$u_{\text{corrL1-4}}$	10.2	10.4	10.6	10.8
$u_{\text{temp1-4}}$	0.6	1.3	1.9	2.5
$u_{\text{probl1-4}}$	22.5	22.5	22.5	22.5
$u_{\text{L1-4}}$	11.7	6.7	10.8	9.2
$u_{\text{c1-4}}$	39.0	26.6	27.6	27.1
$U_{\text{mult1-4}}$	78.1	53.2	55.2	54.3

V následující části této kapitoly jsou podrobněji analyzovány jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření. Pro názornost a jednoduchost bylo zvoleno použití sloupcových grafů. Pro snadnější přehlednost koresponduje výběr barev řádků v tabulce 6.1 s barevným řešením sloupcového grafu pro jednotlivé příspěvky. Dle hodnot uvedených v tabulce 6.1 můžeme konstatovat, že hodnoty rozšířených nejistot měření se pohybují v rozmezí (53,2 až 78,1) nm.

Dále je na obrázku 6.1 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky kombinovaných nejistot měření kuliček o jmenovitém průměru $d = (1-4)$ mm stanovené multipoziční metodou, společně s jednotlivými příspěvky kombinované nejistoty měření kuliček o průměru $d = (1-4)$ mm stanovené multipoziční metodou. Hodnoty kombinovaných nejistot měření korespondují s hodnotami rozšířených nejistot jednotlivých kuliček. Opět zde vychází jako nejvyšší hodnota kombinované nejistoty měření kuličky o $d = 1\text{ mm}$, která se blíží hodnotě 38,5 nm. Ostatní hodnoty kombinovaných nejistot měření se pohybují v pásmu (53,2 až 55,2) nm. Jejich hodnoty se zvyšují s rostoucím průměrem d měřených kuliček. Lze konstatovat, že pro měřicí rozsah 1 mm platí hodnota rozšířené hodnoty $U_{\text{mult1}} = 80\text{ nm}$. Pro rozsah měření do 2 mm do 4 mm platí hodnota $U_{\text{mult2-4}} = 60\text{ nm}$.



Obr. 6.1 Graf všech jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou.

Barevné rozlišení jednotlivých příspěvků je koncipováno shodně jako v tabulce 6.1. Z grafu jasně vyplývá proporcionální rozložení hodnot jednotlivých příspěvků kombinované nejistoty měření. Nejvyšších hodnot (nad 20nm) dosahují složky $u_{cprob1-4}$ a u_{rep1} . Na tyto složky je v případě zájmu o snížení výsledné hodnoty rozšířené nejistoty měření potřeba se soustředit.

Na první pohled upoutá vyšší hodnota kombinované nejistoty měření kuličky o jmenovitém průměru $d = 1\text{mm}$, která se nabývá hodnoty 39 nm. Hodnoty kombinovaných nejistot měření kuliček ostatních průměrů se pohybují v rozsahu (26,6 až 27,6) nm. Tento rozdíl v hodnotách rozšířené nejistoty měření různých průměrů kuliček je dle dosavadních zkušeností způsoben hraničními rozměry měřené součásti a vlastního snímacího dotyku nano-sondy Gannen XP.

Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat, které jsou v disertační práci prezentovány v jednotlivých tabulkách, obrázcích a grafech vyplývá několik faktů. Jednak je zřejmé, že použitím dotykové nano-sondy Gannen XP se dostáváme, na rozdíl od použití jiných typů snímání použitelných na přístroji nano-CMM NMM-1, do oblasti pokrývající spíše přístroji kategorie micro-CMM (μCMM).

Dále pak je patrná vyšší hodnota nejistoty měření způsobenou opakovatelností nano-CMM u_{rep1} pro kuličku o jmenovitém průměru $d = 1\text{mm}$. Ukazuje to na limity použití snímacího systému Gannen XP, který je vybaven safírovou kuličkou o průměru $d_{saf} = 0,3\text{ mm}$, a to zejména při měření vnějších rozměrů menších než 1mm. Je tedy nutné dále pečlivě zvažovat možnosti uplatnění použité nano-sondy při měření objektů o vnějších i vnitřních rozměrech menších než 1 mm.

Dle analýzy statisticky zpracovaných dat z měření všech kuliček a v souladu se závaznými dokumenty [3, 5, 6, 9, 11, 15] lze zapsat hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro rozsah měření (1 až 4) mm jako maximální z vypočtených hodnot takto:

$$U_{mult} = 78\text{nm}.$$

Úplný výsledek měření průměru kuličky o jmenovitém průměru $d = 1\text{ mm}$ lze pak uvést takto:

$$X_{mult} = Y_{mult} \pm U_{mult} = 0.959795 \pm 0.000078\text{mm}.$$

Tyto zjištěné výsledky a zejména limity použití dotykové nano-sondy Gannen XP je možné využít pro další pokračování vývoje nových měřicích metod v oblasti nanometrologie. Například pro vývoj a výrobu vhodného etalonu délky, který bude splňovat nároky na metrologickou návaznost v oblasti nanometrologie. Dílčím závěrem této kapitoly je konstatování, že použití multipoziční metody stanovení rozšířené nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 je jednou z vhodných možností, která nám za určitých okolností umožňuje stanovit přesnost měření měřicího přístroje bez nutné potřeby vhodného etalonu délky.

7 VYHODNOCENÍ VÝPOČTU NEJISTOTY MĚŘENÍ SUBSTITUČNÍ METODOU

Pro vlastní vyhodnocení nejistoty měření bylo přikročeno ke stanovení celkové nejistoty měření stanovené substituční metodou pro všechny průměry použitých kuliček, stejně tak jako v minulé kapitole. V tabulce 8.1 jsou uvedeny podrobně jednotlivé příspěvky standardních nejistot měření, které byly stanoveny pro všechny jmenovité průměry použitých kuliček $d = (1-4)\text{ mm}$. Výsledkem je stanovení celkové rozšířené nejistoty měření stanovené pomocí substituční metody.

Tab. 7.1 Porovnání jednotlivých příspěvků celkové nejistoty měření stanovené substituční metodou.

Označení příspěvku	Hodnoty pro $d = 1\text{ mm}$	Hodnoty pro $d = 2\text{ mm}$	Hodnoty pro $d = 3\text{ mm}$	Hodnoty pro $d = 4\text{ mm}$
u_{r1-4}	0.06	0.06	0.06	0.06
$u_{\text{probl}1-4}$	22.50	22.50	22.50	22.50
u_{a1-4}	2.23	0.05	0.07	0.36
u_{e1-4}	10.20	10.40	10.60	10.80
$u_{\text{temp}1-4}$	0.64	1.27	1.91	2.55
u_{c11-4}	14.45	14.45	14.45	14.45
u_{c1-4}	28.7	28.7	28.8	28.9
$U_{\text{subst}1-4}$	57.4	57.5	57.7	57.9

Barevné rozlišení jednotlivých příspěvků je koncipováno shodně v tabulce 7.1 i v následujícím sloupcovém grafu 7.1. Dle hodnot uvedených v tabulce 7.1 můžeme konstatovat, že hodnoty rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou se pohybují v rozmezí (57,4 až 57,9) nm.

Dále je na obrázku 7.1 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky kombinovaných nejistot měření kuliček o průměru $d = (1-4)$ mm stanovené substituční metodou, společně s jednotlivými příspěvky kombinované nejistoty měření kuliček o průměru $d = (1-4)$ mm stanovené touto metodou. Hodnoty kombinovaných nejistot měření korespondují s hodnotami rozšířených nejistot jednotlivých kuliček. Hodnoty kombinovaných nejistot měření se pohybují v pásmu (28,7 až 28,9) nm. Jejich hodnoty se nepatrně zvyšují s rostoucím jmenovitým průměrem d měřených kuliček. Tento průběh odpovídá obvyklému stavu při vyhodnocování nejistoty měření délkových veličin, kdy nejistota měření roste se zvyšující se hodnotou měřené délky.



Obr. 7.1 Graf všech jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou.

Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat, které jsou prezentovány v jednotlivých tabulkách, obrázcích a grafech v kapitole číslo 7 se potvrzují dříve uvedené fakty z kapitoly číslo 6. Použitím dotykové nano-sondy Gannan XP se skutečně dostáváme do oblasti pokrývající přístroji kategorie μCMM . Na první pohled upoutá, oproti hodnotám zjištěných multipoziční metodou, téměř konstantní průběh hodnot rozšířené nejistoty měření souběžně s rostoucím průměrem měřených kuliček. Hodnoty rozšířených nejistot měření kuliček ostatních průměrů se pohybují v pásmu (57,4 až 57,9) nm. Tento rozdíl v hodnotách rozšířené nejistoty měření různých průměrů kuliček je odpovídající hodnotě rozlišení udávané výrobcem přístroje nano-CMM NMM-1, které je 0,1nm. V předchozí kapitole popsany trend, že použitím dotykové nano-sondy Gannan XP se dostáváme, na rozdíl od použití jiných typů snímání použitelných na přístroji nano-CMM NMM-1, do oblasti pokrývající spíše přístroji kategorie μCMM se i nadále potvrzuje.

Dále pak se potvrzuje vyšší hodnota standardní nejistoty měření vyhodnocované způsobem A_{u1} , obdobně jak tomu bylo v případě multipoziční metody a standardní nejistoty měření způsobené opakovatelností nano-CMM NMM-1 $u_{\text{rep}1}$ pro kuličku o jmenovitém průměru $d = 1\text{mm}$. Ukazuje to na odlišnosti v přístupu ke stanovení rozšířené nejistoty měření u obou použitých metod. Je tedy vhodné dále pečlivě zvažovat možnosti uplatnění obou těchto metod v metrologické praxi.

Dle analýzy statisticky zpracovaných dat z měření všech kuliček a v souladu se závaznými dokumenty [2, 3, 6, 9, 11] lze zapsat hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené substituční metodou takto: Rozšířená nejistota měření průměru kuličky stanovená substituční metodou:

$$U_{\text{subs}} = 58\text{nm}.$$

Úplný výsledek měření průměru kuličky o jmenovitém průměru $d = 1\text{ mm}$ lze uvést takto:

$$X_{\text{subs}} = Y_{\text{subs}} \pm U_{\text{subs}} = 0,959810 \pm 0,000058\text{mm}.$$

Tyto zjištěné výsledky a zejména limity použití dotykové nano-sondy Gannan XP je možné využít pro další pokračování vývoje nových měřicích metod v oblasti nanometrologie. Prokázalo se, že vývoj a výroba vhodného etalonu délky, který bude splňovat nároky na metrologickou návaznost v oblasti nanometrologie, je nutností. Použití substituční metody stanovení rozšířené nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 je jednou z vhodných možností, která nám umožňuje kvantifikovat přesnost měření měřicího přístroje za použití vhodného etalonu délky – rubínové kuličky. Bylo tedy použito vhodného etalonu s dostatečně nízkou hodnotou rozšířené nejistoty měření při jeho kalibraci pomocí laserinterferometru Renishaw XL 80. Rubínová kulička pak představuje vhodný etalon.

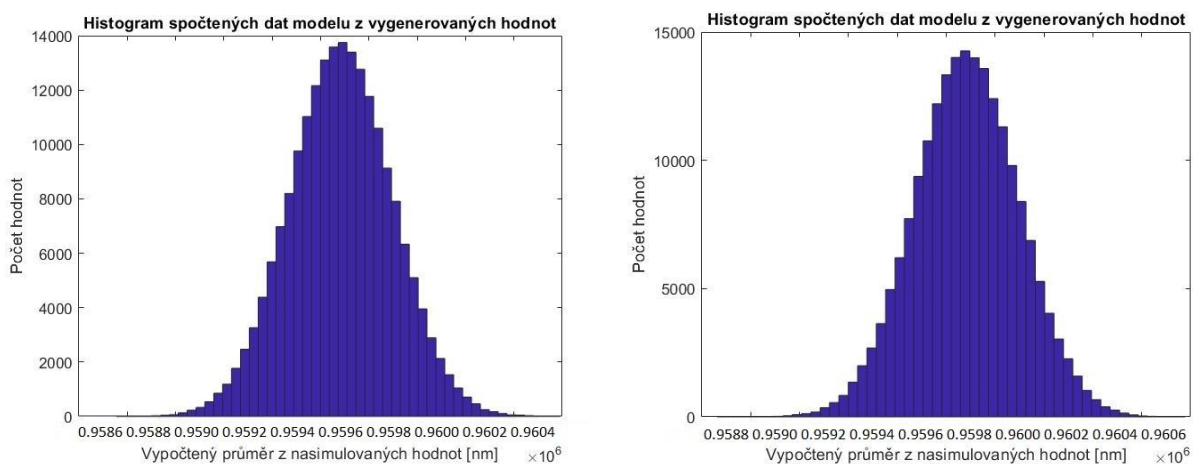
8 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ POMOCÍ METODY MONTE CARLO

Simulace stanovení rozšířené nejistoty měření metodou Monte Carlo (dále jen MC) byla provedena pomocí sw MatLab[®]. Pro ověření správnosti vyvinutého modelu měření byly provedeny simulace obou metod – multipoziční i substituční. V souladu s principy těchto metod byla také určeny obě rozšířené nejistoty měření a hodnoty měřeného průměru kuliček. Hodnoty získané výpočtem jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Tab. 8.1 Vypočtené hodnoty metodou MC pro multipoziční a substituční metodu.

Parametr standard	Význam parametru	Vypočtené hodnoty [nm]
$\bar{y}_{\text{mult}}$	Aritmetický průměr výsledků měření dle zvoleného modelu	$0.959687 \cdot 10^6$
$\bar{y}_2$	Aritmetický průměr souboru naměřených dat	$0.959863 \cdot 10^6$
s_2	Směrodatná odchylka naměřených dat	33.6
$u_{\text{mult}1}$	Standardní nejistota měření dle zvoleného modelu	37.8
$U_{\text{mult}1}$	Rozšířená nejistota měření dle zvoleného modelu	75.6
$\bar{y}_{\text{subs}}$	Aritmetický průměr výsledků měření dle zvoleného modelu	$0.9597488 \cdot 10^6$
$\bar{y}$	Aritmetický průměr souboru naměřených dat	$0.9598096 \cdot 10^6$
s_1	Směrodatná odchylka naměřených dat	0.71
$u_{\text{subs}1}$	Standardní nejistota měření dle zvoleného modelu	27.9
$U_{\text{subs}1}$	Rozšířená nejistota měření dle zvoleného modelu	55.8

Na obrázku 8.1 jsou uvedeny histogramy spočtených dat z matematických modelů pro obě použité metody.



Obr. 8.1 Histogram spočtených dat modelu z vygenerovaných hodnot pro kuličku o $d = 1\text{ mm}$ při použití multipoziční a substituční metody. Popis: osa y – počet vygenerovaných hodnot. Osa x – hodnoty měřené veličiny v mm.

Dle analýzy statisticky zpracovaných dat z měření všech kuliček o jmenovitém průměru $d = (1-4)\text{ mm}$ v souladu s normativními dokumenty [2, 3, 8, 9, 11] lze hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou simulací MC zapsat takto: $U_{\text{mult}}^{\text{MC}} = 75,6\text{ nm}$ a hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené substituční metodou simulací MC lze zapsat takto: $U_{\text{subs}}^{\text{MC}} = 55,8\text{ nm}$.

8.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE METODOU MONTE CARLO

Výsledky simulace obou použitých metod stanovení nejistoty měření rubínové kuličky o jmenovitém průměru $d = 1\text{mm}$ metodou MC prokázaly správnost zvolených matematických modelů pro tuto simulaci. Taktéž byla potvrzena správnost a funkčnost aparátů stanovení nejistoty měření pro obě použité metody. Je možné konstatovat, že při správně zvoleném matematickém modelu pro metodu MC se jedná o metodu vhodnou k určení nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1. Toto konstatování vychází z hodnot rozdílů výsledků při měření etalonu mezi zmíněnými metodami a metodou MC. Hodnoty naměřeného rozměru kuličky $Y_{\text{mult}}^{\text{MC}}$, rozšířené nejistoty měření $U_{\text{mult}}^{\text{MC}}$ a směrodatné odchylky $s_{\text{mult}}^{\text{MC}}$ pro multipoziční metodu jsou uvedeny v tabulce číslo 8.2.

Tab. 8.2 Vypočtené hodnoty metodou MC a podle ISO 15530 [23] pro multipoziční metodu.

multipoziční metoda	Y_{mult} [mm]	U_{mult} [nm]
ISO 15530-2	0.959795	78.0
metoda MC	0.959687	75.6

Rozdíly hodnot, které jsou malé, se pohybují v řádech jednotek nanometrů. To znovu potvrzuje správnost zvoleného matematického modelu použitého pro metodu MC. Hodnoty naměřeného rozměru kuličky $Y_{\text{subst}}^{\text{MC}}$, rozšířené nejistoty měření $U_{\text{subst}}^{\text{MC}}$ a směrodatné odchylky $s_{\text{subst}}^{\text{MC}}$ pro substituční metodu jsou uvedeny v tabulce číslo 8.3.

Tab. 8.3 Vypočtené hodnoty metodou MC a podle ISO 15530 [23] pro substituční metodu.

substituční metoda	Y_{subst} [mm]	U_{subst} [nm]
ISO 15530-2	0.959810	58.0
metoda MC	0.959749	55.8

Zároveň je možné konstatovat, že pomocí rozšířené nejistoty měření byla kvantifikována přesnost měření přístroje nano-CMM NMM-1 při použití dotykové nano-sondy Gannan XP s průměrem dotyku $d_{\text{saf}} = 0,3\text{mm}$. Výsledné hodnoty měření rozměru rubínové kuličky o $d = 1\text{mm}$ $X_{\text{mult}}^{\text{MC}}$ získané pomocí simulace metodou MC lze pro multipoziční metodu zapsat po zaokrouhlení takto:

$$X_{\text{mult}}^{\text{MC}} = Y_{\text{mult}}^{\text{MC}} \pm U_{\text{mult}}^{\text{MC}} = 0.959687 \pm 0.000076\text{mm}.$$

Obdobně je tomu u substituční metody, kde platí zápis úplného výsledku simulace měření rozměru $X_{\text{subst}}^{\text{MC}}$ rubínové kuličky o $d = 1\text{mm}$:

$$X_{\text{subst}}^{\text{MC}} = Y_{\text{subst}}^{\text{MC}} \pm U_{\text{subst}}^{\text{MC}} = 0.959749 \pm 0.000056\text{mm}.$$

9 SHRUTÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Hlavním cílem práce bylo kvantifikovat přesnost měření přístroje pomocí nejistoty měření. V rámci disertace byl proveden rozsáhlý soubor měření etalonů – rubínových kuliček na různých měřicích přístrojích za použití různých měřicích metod. Tato měření měla za cíl prokázat preciznost daných měření za podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

9.1 SHRUTÍ POUŽITÝCH METOD STANOVENÍ NEJISTOTY

MĚŘENÍ

Nejistota měření přístroje nano-CMM NMM-1 byla stanovena za využití dvou nesimulativních a jedné simulativní metody:

- Multipoziční metoda za použití upínacího přípravku (otvorové destičky) pro uchycení etalonových rubínových kuliček, která pokrývá celý měřicí rozsah nano-CMM NMM-1. V souladu s principy multipoziční metody byla také určena rozšířená nejistota měření.
- Substituční metoda za použití etalonů délky, které byly dostatečně přesně změřeny a mají známé hodnoty včetně standardní nejistoty tohoto měření. V souladu s principy substituční metody byla také určena rozšířená nejistota měření.
- Simulace Monte Carlo pro obě metody stanovení nejistoty měření. Touto metodou byla taktéž stanovena rozšířená nejistota měření pro obě výše uvedené metody.

Byl proveden rozsáhlý soubor měření rozměrů rubínových kuliček. Byly stanoveny nejistoty měření pro obě nesimulativní metody (ISO 15530-2:2004) [23] a pomocí metody Monte Carlo [17], jejichž výsledky jsou uvedeny v předešlých kapitolách číslo 6, 7 a 8.

Multipoziční metoda stanovení nejistoty měření se vyznačuje absencí použití vhodného délkového etalonu, respektive nemožností provést metrologickou návaznost přístroje nano-CMM standardní cestou. Oproti substituční metodě bylo provedeno řádově více jednotlivých měření rubínových kuliček v jejich jednotlivých polohách v upínacím přípravku dle obrázku číslo 5.3. Pro získání korigovaného výsledku měření bylo nutné provést korekci odečtením systematické chyby přístroje nano-CMM NMM-1. Tato skutečnost měla záporný vliv na celkovou hodnotu nejistoty měření stanovenou touto metodou.

Naopak použití substituční metody stanovení nejistoty měření se vyznačuje zahrnutím kalibrovaného délkového etalonu do procesu měření. Bylo možné provést menší počet jednotlivých měření, protože systematická chyba přístroje nano-CMM NMM-1 byla korigována již před zahájením vlastního měření. Tato skutečnost měla kladný vliv na celkovou hodnotu nejistoty měření stanovenou touto metodou. Naopak do této metody byly zahrnuty i další vlivy, které mohou ovlivňovat výslednou nejistotu měření přístroje nano-CMM NMM-1. A to zejména s ohledem na jeho budoucí využití v systému akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno.

Hlavním problémem, se kterým bylo nutné při užívání metody Monte Carlo se vypořádat, bylo vytvoření adekvátního matematického modelu pro použití nano-CMM NMM-1 a vhodné přiřazení rozdělení pravděpodobnosti k jednotlivým vstupním veličinám. Analýzou použití metody Monte Carlo lze dospět k závěru, že je mnohem praktičtější než tradiční přístup [2, 9, 11, 13, 23] pro stanovení nejistoty měření pro obě metody – substituční i nesubstituční. Prezentace reálných výpočtů a jejich vyhodnocení byly náplní předešlých kapitol číslo 6, 7 a 8.

Byly stanoveny hodnoty rozšířené nejistoty měření pro všechny rozměry měřených rubínových kuliček. Tyto hodnoty rozšířené nejistoty měření jsou uvedeny v tabulce 9.1 a pro lepší přehlednost jsou zobrazeny v grafu na obrázku 9.1. Většina z nich se pohybuje v rozmezí (51,8 až 57,9) nm. Tyto hodnoty odpovídají obvyklým parametrům přístrojů kategorie nano-CMM vybavených dotykovou sondou.

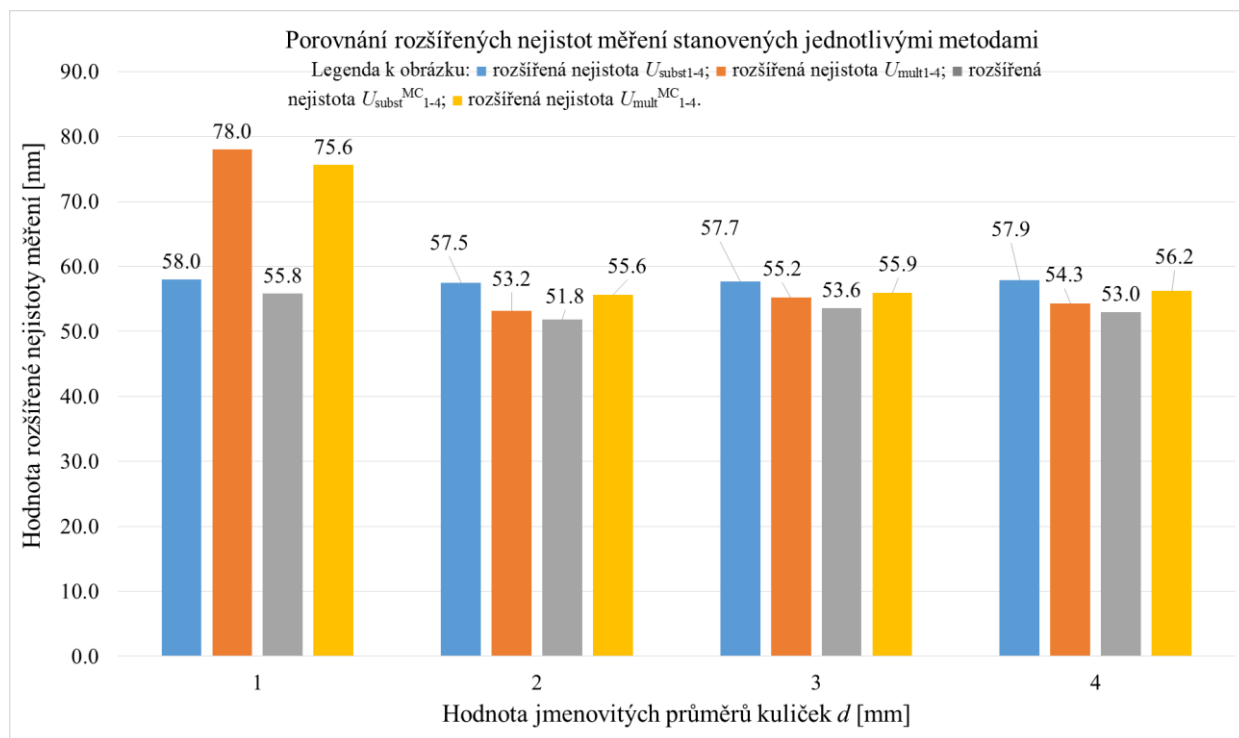
Tab. 9.1 Hodnoty rozšířené nejistoty měření pro všechny metody.

Porovnání metod	$d = 1\text{mm}$ [nm]	$d = 2\text{mm}$ [nm]	$d = 3\text{mm}$ [nm]	$d = 4\text{mm}$ [nm]
U_{subst}	58.0	57.5	57.7	57.9
U_{mult}	78.0	53.2	55.2	54.3
U_{substMC}	55.8	51.8	53.6	53.0
U_{multMC}	75.6	55.6	55.9	56.2

Pouze u rozšířené nejistoty pro multipoziční metodu rozměru rubínové kuličky o $d = 1\text{mm}$ stanovenou jak nesimulativním, tak i simulativním způsobem pozorujeme vyšší hodnoty v rozmezí (75,6 až 78,1) nm. V případě použití přístroje nano-CMM NMM-1 při výše uvedeném nastavení všech parametrů měření a při stejné velikosti použité dotkové nano-sondy Gannen XP ($d_{\text{saf}} = 0,3\text{mm}$) lze konstatovat, že pro měření délkových rozměrů do 2 mm je vhodné počítat s nejistotou měření v hodnotě dosahující 79 nm po zaokrouhlení. V případě měření objektů velkých (2 až 4) mm je možné počítat s klesající hodnotou rozšířené nejistoty měření (maximální hodnota 58 nm po zaokrouhlení), jak je uvedeno v tabulce 9.1 a grafu na obrázku 9.1.

Tato skutečnost je způsobena použitím snímacího dotyku nano-sondy Gannen XP o průměru $d_{\text{saf}} = 0,3\text{ mm}$. Tudiž při měření rozměrů pohybujících se v okolí hodnoty 1 mm a menším dochází k nežádoucímu efektu, kdy malý rozdíl mezi rozměry snímaného objektu a dotkového snímače způsobuje kvalitativně horší výsledky měření. Oproti obecně zavedené praxi v klasické metrologii [5, 27], kdy se doporučuje volit co největší možný průměr kuličky snímacího dotyku (volbou větší kuličky se volí větší průměr stopky dotyku a tím se zvýší tuhost dotyku a dále se zmenšuje vliv nedokonalosti textury povrchu kuličky dotyku) se tato skutečnost při měření velmi malých rozměrů v oblasti nanometrologie nepotvrdila.

Jako přínosné do budoucna se jeví pořízení menších dotkových nano-sond pro přístroj nano-CMM NMM-1. Ty se pro nano-sondu Gannex XP vyrábí v rozměrech $d_{\text{saf}} = (0,12; 0,3 \text{ a } 0,5)\text{ mm}$. Při použití dotkové nano-sondy o $d_{\text{saf}} = 0,5\text{ mm}$ je při měření objektů menších než 2 mm rozšířená nejistota měření (na poměry nano-CMM) příliš velká a se zmenšující se velikostí měřeného objektu roste. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit menší průměry dotkové sondy a řešením by mělo být pořízení nano-sondy o $d_{\text{saf}} = 0,12\text{ mm}$. U této velikosti dotkové sondy se zvyšuje význam kvality povrchu safírové kuličky pro přesnost měření.



Obr. 9.1 Sloupcový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených všemi metodami.

Barevné rozlišení jednotlivých příspěvků je koncipováno shodně v tabulce 9.1 i v jednotlivých sloupcích grafu. Z uvedené tabulky 9.1 a grafu na obrázku 9.1, které vyobrazují rozdíly hodnot rozšířené nejistoty měření nesimulativních metod a metody Monte Carlo pro měření rozměru jednotlivých rubínových kuliček a jejich závislost na velikosti měřeného objektu, jsou patrné minimální rozdíly mezi hodnotami rozšířených nejistot měření. To umocňuje již uvedené vyhodnocení malého rozdílu mezi metodami při měření rozměru rubínových kuliček o jmenovitých průměrech $d = (2, 3 \text{ a } 4) \text{ mm}$. Pro měření rozměrů v oblasti 1 mm nebo menších a také vnitřních rozměrů je vhodné použít dotykovou nano-sondu s co možná nejmenším průměrem kuličky $d_{\text{saf}} = 0,12 \text{ mm}$.

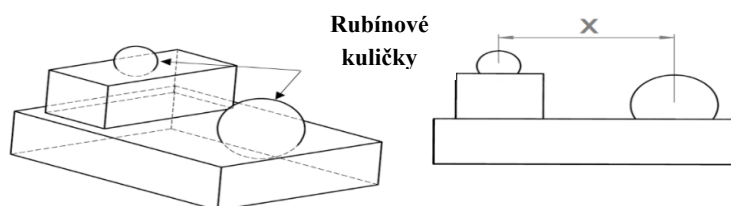
Hodnoty rozšířené nejistoty měření pro multipoziční metodu vycházeli o něco vyšší, řádově o 3 až 4 nm, což bylo způsobeno horší opakovatelností naměřených dat. Horší opakovatelnost byla důsledkem pokrytí většího rozsahu nano-CMM, což mělo za následek započítání vlivu nejistoty měření způsobené geometrickými chybami nano-CMM u_{geo} . Proto se do budoucna počítá jako s optimální metodou stanovení nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 s metodou substituční, která využívá v procesu měření kalibrovaný etalon. A to jak z hlediska metrologické návaznosti v systému akreditované kalibrační laboratoře, tak i pro zajištění návaznosti délkových etalonů pro CT přístroje ve zkušební laboratoři CEITEC Brno. Nicméně multipoziční metoda prokázala svoje výhody pro případ absence vhodného a dostupného etalonu délky.

9.2 NÁVRH VHODNÉHO ETALONU - BALL PLATE

Dalším krokem nutným pro splnění požadavku na vhodný etalon délky byl jeho návrh, vytvoření 3D modelu, kontrola prostorové kompatibility a zajištění metrologické návaznosti vlastního etalonu délky. Dalším z požadavků ČMI a CEITEC bylo použití navrhovaného etalonu k zajištění metrologické návaznosti pro akreditovanou zkušební laboratoř CT, která funguje za spolupráce obou jmenovaných organizací. Konkrétně se jednalo o zajištění metrologické návaznosti přístroje nano-CT Rigaku nano3DX, na kterém bylo také prováděno měření rubínových kuliček.

Technické řešení etalonu délky tzv. ball-plate je vhodné pro zajištění metrologické návaznosti zejména mezi jednotlivými CMM, které jsou vybaveny dostatečně přesným snímacím systémem. Jedná se zejména o metodu free-form popsanou v normě ČSN EN ISO 10-360 [15]. Bohužel toto řešení není vhodné pro použití na přístrojích CT, ať už z důvodu prostorového, tak i volby vhodného materiálu. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto původní design ball-plate nevyužít a zkonstruovat vhodný etalon délky pro oba používané přístroje nano-CMM NMM-1 a Rigaku nano3DX.

Druhý návrh etalonu délky pro toto zorné pole je podobný předchozímu, ale opětovně vychází z konceptu ball plate popsaného v normě ČSN EN ISO 10-360 [15]. V tomto případě se jedná o rubínové kuličky s rozdílnými průměry a jejich umístění v rozdílné výšce. Toto řešení reflektuje požadavky na měření CT přístrojem. Zvolený průměr pro menší rubínovou kuličku je 1 mm a pro větší kuličku průměr 2 mm. Návrh etalonu vznikl ve spolupráci s Ing. Češkem. Kalibrovaná zkušební délka X by byla v tomto případě vzdálenost středů těchto dvou kuliček, tak jak je uvedeno na obrázku číslo 9.2.



Obr. 9.2 Druhý návrh etalonu délky pro zorné pole $5,6 \times 7,2$ mm přístroje Rigaku nano3DX, kde X reprezentuje kalibrovanou zkušební délku [55].

Stejně jako u již dříve řešeného etalonu délky pro zorné pole $0,7 \times 0,9$ mm, musí být tyto etalony schopny umístění v dostatečné výšce k detektoru Rigaku nano3DX. V tomto případě je možné etalon také umístit na tyčinku většího průměru nebo zvolit uložení etalonu do polystyrénu, který bývá velmi běžným přípravkem při CT měření. Vzhledem k malým rozměrům etalonu délky, je možné tělo artefaktu (bez rubínové kuličky) vytisknout pomocí 3D tiskárny.

Na dále uvedeném obrázku 9.3 jsou ukázky 3D modelů dvou návrhů etalonů délky pro zorné pole $5,6 \times 7,2$ mm přístroje Rigaku nano3DX včetně přiložených okótovaných verzí. Tyto 3D modely slouží k následnému 3D tisku prototypů etalonu délky a k ověření jejich rozměrové kompatibility s přístroji nano-CMM NMM-1 a Rigaku nano3DX.



Obr. 9.3 3D model druhého návrhu etalonu délky pro zorné pole $5,6 \times 7,2$ mm přístroje Rigaku nano3DX (vlevo) a jeho rozměry (vpravo) [55].

Po provedení 3D tisku a aplikaci rubínových kuliček na obě provedení bylo přistoupeno k provedení ověřovacího měření na CT přístroji Rigaku nano 3DX. Výsledky těchto měření obou provedení modelů etalonů délky prokázaly jejich vhodnost pro použití na obou přístrojích. Poté následovalo vytvoření definitivní verze etalonu délky, který byl vybaven dvěma rubínovými kuličkami a základnou z materiálu Zerodur. Tato záležitost již není předmětem této disertační práce a zabývají se jí jiné publikace.

10 ZÁVĚR

Disertační práce shrnuje současný stav poznání v oblasti dotykových metod měření se zaměřením na přesné nano-CMM NMM-1 vybavené dotykovou nano-sondou Gannen XP. Zaměřuje se blíže na možnosti měření rozměru a povrchu přesných objektů v laboratorních podmínkách.

Na základě zadání byl splněn hlavní cíl disertační práce:

Stanovení přesnosti měření při použití dotykové nano-sondy Gannen XP na souřadnicovém měřicím stroji SIOS nano-CMM NMM-1. Přesnost měření byla vyjádřena formou nejistoty měření stanovené pomocí dvou nesimulačních metod a jedné simulační metody. V podmínkách akreditované kalibrační laboratoře je nutné používat kalibrované etalony. Pro praktické použití je proto možné kvantifikovat přesnost měření přístroje nano-CMM NMM-1 formou rozšířené nejistoty měření $U = 58 \text{ nm}$ (pro rozsah měření 1 – 4 mm) stanovené substituční metodou (kapitola 7).

Na základě zvoleného postupu byly dosaženy dílčí cíle řešení disertační práce:

1. Výběr metodiky jednotlivých měření (kapitoly 5.5 a 5.6 DDP).
2. Volba etalonu, návrh způsobu uchycení rubínových kuliček pro provedení experimentu, odzkoušení a výroba přípravku pro uchycení kuliček (kapitoly 5.2 a 5.3 DDP).
3. Volba vhodných metodik měření kuliček včetně stanovení nejistoty měření (kapitoly 6.1, 6.2 a 6.3 DDP).
4. Realizace měření na přístroji nano-CMM NMM-1 využívající systém dotykové nano-sondy za dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (kapitoly 7 a 8 DDP).
5. Vytvoření matematického modelu měření na přístroji nano-CMM NMM-1 a realizace simulace systému metodou Monte Carlo (kapitola 6.3 DDP).
6. Realizace jednotlivých měření na vhodných přístrojích za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti (kapitoly 5.7.1 a 5.7.2 DDP).
7. Popis hlavních vlivů na dosahovanou přesnost měření a stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 (kapitola 6 DDP).
8. Porovnání a analýza naměřených hodnot parametrů kuliček (kapitoly 7, 8 a 9 DDP).
9. Vytvoření sw modulu MS Excel pro rychlé stanovení nejistoty měření (kapitola 10.3 DDP).
10. Návrh hmotného etalonu délky – ball plate (kapitola 10.2 DDP).

Návrh vhodného hmotného etalonu délky pro kalibraci přístroje nano-CMM NMM-1. V úvodu disertační práce byly uvedeny základní definice z oblasti metrologie, související s nejistotou měření a chybami měření. Byl také popsán vzájemný vztah mezi uvedenými pojmy. Dále byl uveden obecný přístup k vyhodnocení nejistoty měření, používající se v běžné praxi. V další části disertační práce byly popsány obecné přístupy, používané ke stanovení nejistoty měření průmyslových CMM. Po jejich analýze byly vybrány dvě metody pro aplikaci na nano-CMM NMM-1. Konkrétně byla zvolena metoda substituční a multipoziční. Pro ověření správnosti zvoleného postupu a zvýšení počtu měření bylo přistoupeno k simulaci metodou Monte Carlo. Pro nutnou úpravu vybraných metod byly vzhledem ke specifikaci přístroje nano-CMM NMM-1 popsány základní konstrukční rozdíly mezi standardními CMM a tímto přístrojem. Byl kladen důraz na faktory, které mohly měření nepříznivě ovlivnit, zvláště pak v případě měření

velmi malých rozměrů v oblasti nanometrologie. V disertační práci nebyl opomenut ani důkladný popis přístroje nano-CMM NMM-1.

Na základě zmíněných poznatků a znalostí získaných během měření na uvedeném přístroji byly obě metody upraveny pro jejich aplikaci na přístroj nano-CMM NMM-1. Měření proběhla s využitím čtyř délkových etalonů – rubínových kuliček o jmenovitém průměru $d = 1$ až 4 mm. Na základě naměřených hodnot byly provedeny výpočty pomocí obou nesimulativních metod i metody Monte Carlo. Všechny metody byly vzájemně porovnány a následně byla vyhodnocena rozšířená nejistota měření přístroje nano-CMM NMM-1 při použití dotykové sondy Gannan XP. Tato rozšířená nejistota měření byla použita ke kvantifikaci přesnosti měření tohoto přístroje.

V rámci disertace byl proveden rozsáhlý soubor měření etalonů – rubínových kuliček na různých měřicích přístrojích za použití různých měřicích metod. Tato měření měla za cíl prokázat preciznost daných měření za podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Využití získaných poznatků a výsledků disertační práce bude mít praktické uplatnění, neboť budou zpracovány do kalibračního postupu pro přístroj nano-CMM v kalibrační laboratoři ČMI Brno. V budoucnu se počítá s využitím přístroje nejen pro laboratorní a vědecké účely, ale také pro metrologické návaznosti etalonů v oblasti nanometrologie, zejména ve spolupráci s CEITEC Brno.

V disertační práci jsou jednotlivé vlivy na celkovou nejistotu měření podrobně studovány a stanoveny. Nově vyvinutý postup pro stanovení přesnosti měření nano-CMM NMM-1, respektive její kvantifikace pomocí nejistoty měření vychází ze standardizovaných dokumentů [2, 6, 9, 11, 16, 13, 15, 18, 20, 23, 25] i nově doplňuje již publikované vědecké práce [4, 5, 7, 10, 14, 16, 17, 24, 26, 28 - 51], které jsou v běžné strojírenském prostředí aplikovány na standardní CMSs (Coordinate Measuring Systems). Nově tak zpracovává oblast nano-CMM pro potřeby akreditovná kalibrační a zkušební laboratoře.

Praktickým výstupem samotné disertační práce je vytvoření podkladů pro vypracování kalibračního postupu použitelného v rámci akreditované kalibrační laboratoře dle normy ČSN EN ISO 17025:2018 [3] a interních dokumentů použitelných v akreditované kalibrační laboratoři ČMI Brno, Oddělení primární nanometrologie a technické délky. Akreditovaný postup obsahuje podrobný popis při práci s nano-CMM NMM1 včetně uvedení jeho CMC – standardní měřicí schopnosti dosahované při kalibraci měřidel a etalonů, včetně stanovení nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM1. Tento postup je duševním majetkem ČMI Brno a není proto součástí vlastní disertační práce.

Získané poznatky lze využít také jako podklady pro zadání diplomových nebo disertačních prací studentů FSI VUT v Brně. Taktéž je možné je uplatnit při realizaci jednotlivých laboratorních měření.

Pokračování vědecké práce

V rámci pokračování vědecké práce je do budoucna plánováno stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 při použití i dalších snímacích systémů. Tyto snímací systémy pracují na zcela odlišných principech a opravdu o nich můžeme diskutovat s přívlastkem „nano“ sondy. Dále pak bude kladen důraz na zajištění metrologické návaznosti etalonů v mezinárodním měřítku a využití získaných poznatků v praxi a ve výuce na FSI VUT v Brně. Pro nejbližší období je možné stanovit následující úkoly:

- Stanovení přesnosti měření dalších snímacích systémů přístroje nano-CMM NMM-1 (Laser focus, AFM mikroskop, White light interferometr, Speciální senzory).
- Mezinárodní mezilaboratorní porovnání pro měření navržených etalonů.
- Využití vyvíjených etalonů v praxi.

11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Oficiální firemní stránky SIOS Meßtechnik, GmbH
<http://www.sios.de>.
- [2] ČSN EN ISO 17025:2018. *Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 48 stran. Třídící znak 015253.
- [3] Zákon č. 505/1990 Sb. *Zákon o metrologii*. Praha: Federální shromáždění České a Slovenské Federativní Republiky, 1990.
- [4] SŁADEK, Jerzy A. *Coordinate Metrology, Springer Tracts in Mechanical Engineering*. Berlín: Springer-Verlag, Německo, 2016, ISBN 978-3-662-48463-10.
- [5] SKOPAL, Miroslav a Alois FIALA. *Kalibrace a přesnost měření*. [online]. MM Spektrum, rubrika Výroba / Metrologie, strana 56, listopad 2011. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni.html>,
- [6] TNI 01 0115:2009. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 90 stran. Třídící znak 83031.
- [7] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav POSPÍŠIL. Stanovení přesnosti měření v inženýrské praxi. *Metrologie*, 2015, č. 4, s. 12-18. ISSN 1210- 3543.
- [8] Oficiální výukové stránky University Tartu, Estonsko. Dostupné z: <https://sisu.ut.ee/measurement/7-precision-trueness-accuracy>.
- [9] EA 4/02:2013. *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2), DEC 1999)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.
- [10] FABIAN, František a Zdeněk KLUIBER. *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*. Praha: PROSPEKTRUM, 1998. kap. 1.2, s. 13. [ISBN 80-7175-058-1](#).
- [11] TNI 01 4109-3.1. *Nejistota měření - Část 3: Pokyn k vyjádření nejistoty měření (GUM 1995) Doplněk 1: Šíření rozdělení užitím metod Monte Carlo (Pokyn ISO/IEC 98-3/Doplněk 1)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 118 s. Třídící znak 01 4109.
- [12] Oficiální stránky firmy Xpress Precision Engineering. *Gannen XP and XM – User manual and installation guide*. Verze 1.8. Dostupné z: <https://www.xpresspe.com/probe2.php>.
- [13] ČSN EN ISO 15530-3:2012. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Souřadnicové měřicí stroje (CMM): Metody určování nejistoty měření - Část 3: Použití kalibrovaných obrobků nebo etalonů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 24 s. Třídící znak 014101.
- [14] SEGGELEN, van, Johan K. *NanoCMM : a 3D coordinate measuring machine with low moving mass for measuring small products in array with nanometer uncertainty*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2007. ISBN 90-386-2629-0.

- [15] ČSN EN ISO10360-2. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 32 s. Třídící znak 252011.
- [16] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV Statistika a pravděpodobnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [17] KLVAŇA, Jiří. *Principy a aplikace metody Monte Carlo*. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03587-5.
- [18] DIN 5401:2002. *Balls for rolling bearings and general industrial use*. Německo: Deutsches Institut für Normung e. V., 54 s. 2002.
- [19] Oficiální stránky softwarové aplikace Gwyddion, Dostupné z: <http://gwyddion.net> .
- [20] ČSN ISO 5725-2. *Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření - Část 2: Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997. 52 s. Třídící znak 010251.
- [21] Oficiální stránky institutu CEITEC, Dostupné z: <https://www.ceitec.cz/x-ray-micro-ct-and-nano-ct-research-lab/t9851> .
- [22] Oficiální firemní stránky Edmund Optics Inc, Dostupné z: www.edmundoptics.com .
- [23] ISO/TS 15530-2:2004, *Geometrical product specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement -- Part 2: The use of multiple strategy measurements without calibrated workpiece*. International Organization for Standardization. 36 s. 2004.
- [24] Leach, Robert. *Fundamental principles of engineering nanometrology, Micro and Nano Technologies Series*. Edition 2. Velká Británie: Elsevier – druhé vydání, 2014. ISBN 978-1-4557-7753-2.
- [25] ČSN EN ISO 1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Referenční teplota pro specifikace geometrických a rozměrových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 20 s. Třídící znak 014110.
- [26] ŠRÁMEK, Jan a Róbert JANKOVÝCH. *Determination of measurement uncertainty on CMM Sios NMM-1*. MM Science Journal [online]. 2018,2238-2243 [cit. 2018-04-18]. DOI: 10.17973/MMSJ.2018_03_201796. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/march-2018.html#201796> .
- [27] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 8021433388.
- [28] SŁADEK, Jerzy A. *Modeling and accuracy assessment of coordinate machines and measurements*. No. 87. Cracow University of Technology Scientific Books - *Mechanika*, Cracow, 2001.

- [29] Hansen, Hans. N. Trapet, E.: An approach to uncertainty estimation in coordinate metrology. In: Kunzmann, H., Waldele, F., Wilkening, G., Corbet, J., MacKeow, P. P., Weck, M., Huemmler, J. (eds.) *Progress in Precision Engineering and Nanotechnology*, vol. 1, pp. 323–326. PTB - Braunschweig u. Berlin P. u. Oe., 1997.
- [30] Abacerli, A. J., Pereira, P. H., Calonego, N. *A case study on testing CMM uncertainty simulation software (VCMM)*. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. XXXII(1/9), 2010.
- [31] Balsamo, A., Pedone, P., Ricci, E., Verdi, M. *Low-cost interferometric compensation of geometrical errors*. CIRP Ann. Manuf. Technol. 58(1), 459–462, 2009.
- [32] Beaman, J., Morse, E. *Experimental evaluation of software estimates of task specific measurement uncertainty for CMMs*. Precis. Eng. 34(1), 28–33, 2010.
- [33] Hocken Robert, J., Pereira Paulo, H. *Coordinate Measuring Machines and Systems*, 2nd edn. CRC Press, Cleveland, 2011.
- [34] Weckenmann, A. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für Funktion und fertigungsgerechtes Prüfen*, Carl Hanser Verlag München, Wien 2012
- [35] Weckenmann, A. *Übersicht über Abnahme und Überwachungsverfahren für Mehrkoordinaten-Messgeräte*. VDI-B 378, pp. 1–10, 1980.
- [36] Murphy, Douglas, B. *Fundamentals of light microscopy and electronics imaging*. Wiley – Liss Inc., USA, 2001. ISBN 0-471-25391-X.
- [37] Ohlidal Ivan, Franta Daniel a Petr Klapetek. *Měření nanodrsnosti pomocí optických metod a mikroskopie atomové síly*. http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/45_Ohlidal_MUNI.pdf .
- [38] Wei Gao. *Precision Nanometrology - sensors and measuring systems for nanomanufacturing*. Londýn: Springer-Verlag , Velká Británie, 2010. ISSN 1860-5168. 0.1007/978-1-84996-254-4.
- [39] SALICONE Simona. *Measurement Uncertainty - an approach via the mathematical theory of evidence*. New York: Springer-Verlag , USA, 2007. ISBN-10: 0-387-3065502.
- [40] FLACK David. *Coordinate measuring machine task-specific measurement uncertainties. Measurement Good Practice Guide No. 130*. National Physical Laboratory Hampton Road, Teddington, Middlesex, 2013. ISSN 1368-6550.
- [41] EASYTRAC. *Project - Easier and cheaper traceability in industry by up-to-date methods of calibration*, EU Contract No. G6RDCT-2000-00188. Work package 6.3. Calibration of Free Form Parts on CMMs with Uncertainty Assessment according to the Method of Uncalibrated Objects and of Calibrated Objects - E. Savio, L. De Chiffre.
- [42] Salsbury, J. G. *A simplified methodology for the uncertainty analysis of CMM measurements*. Technical Paper, Conference on Precision Metrology/Applying Imaging and Sensing, Society of Manufacturing Engineers, Indianapolis, IN, IQ 95–155:1–22, 1995.
- [43] Śladek, J. *Modeling and accuracy assessment of coordinate machines and measurements*. Scientific Books, vol. 87. Cracow University of Technology, Cracow (2001)
- [44] Śladek, J. *The relationship between measuring machines performance specifications and*

their real capability to solve given measurement tasks. Metromet 2005 International Conference on Industrial Dimensional Metrology Bilbao (Spain), April 7–8, 2005 Euskalduna Jauregia Invited Lecture.

- [45] Sładek, J., Krawczyk, M. Methods for coordinate measurements accuracy assessment. *Measurement Automation and Monitoring*, no. 9, vol. 53, pp. 478–481 (2007).
- [46] Sładek, J., Sitnik, R., Kupiec, M., Błaszczyk, P. *The hybrid coordinate measurement system as a response to industrial requirements.* Metrology Measurement Systems. XVII (1), 109–118 (2010).
- [47] Sładek, J., Błaszczyk, P. M., Kupiec, M., Sitnik, R.: The hybrid contact – optical coordinate measuring system - Elsevier. *Measurement* 44, 503–510 (2011).
- [48] Trapet, E., Wäldele, F.: Substitution method to make traceable measurements with CMMs. Working paper ISO/TC3/WG10 (1996).
- [49] Trapet, E., Franke, M., Härtig, H., Schwenke, H., Wäldele, F., Cox, M., Forbes, A., Delbressine, F., Schellekens, P., Trenk, M., Meyer, H., Moritz, G., Guth, T. H., Wanner, E. *Traceability of Coordinate Measurements According to Method of Virtual Measuring Machine.* PTB F-35, Braunschweig (1999).
- [50] Weber, H.: ISO/WD 15530 uncertainty assessment using calibrated workpieces. IVth International Scientific Conference - Coordinate Measuring Technique, Scientific Books, vol. 53, pp. 249–254. Lodz University of Technology, Bielsko-Biała (2000).
- [51] Sato, O., Osawa, S., Kondo, Y., Komori, M., Takatsuji, T.: Calibration and uncertainty evaluation of single pitch deviation by multiple-measurement technique. *Precis. Eng.* 34(1), 156–163 (2010).
- [52] Trapet, E., Savio, E., De Chiffre, L. *New advances in traceability of CMMs for almost the entire range of industrial dimensional metrology needs.* CIRP Ann. Manufacturing Technology. 53(1), 433–438 (2004).
- [53] O Kruger, F Walt and P Greef. *Ball and Hole plate development for evaluation of μ CMM.* Conference MacroScale 2011 – 4th to 6th October 2011 5s.
- [54] So Ito, Hirotaka Kikuchi, Yuanliu Chen, Yuki Shimizu, Wei Gao. *A Micro-Coordinate Measurement Machine (CMM) for Large-Scale Dimensional Measurement of Micro-Slits.* Applied Sciences - Open Access Journal, MDPI, Basilej, Switzerland, 2016.
- [55] ČEŠEK, Jakub. *Návrh vhodného etalonu délky pro oblast nanometrologie na pracovištích ČMI Brno a CEITEC Brno.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Šrámek.

12 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ, PŘÍSPĚVKŮ NA KONFERENCÍCH ATD.

1. ŠRÁMEK, Jan a Róbert JANKOVÝCH. Determination accuracy of measurement in nanometrology. *MM Science Journal*, 2019. ISSN: 1805-0476, (v tisku).
2. ŠRÁMEK, Jan a Róbert JANKOVÝCH. Determination of measurement uncertainty on CMM SIOS NMM-1. *MM Science Journal*, 2018, no. 1, p. 2238-2243. ISSN: 1805-0476.
3. ŠRÁMEK, Jan, Róbert JANKOVÝCH a Jiří ŠPERKA. The Measurement System for the Calibration of Particle Counters. *In Proceedings of the 2016 17th International Conference*

- on *Mechatronics – Mechatronika (ME) 2016*. Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2016. p. 392-396. ISBN: 978-80-01-05882-4.
4. ŠRÁMEK, Jan a Róbert JANKOVÝCH. Accuracy of measurement in nanometrology. *MM Science Journal*, 2016, no. 6, p. 1643-1647. ISSN: 1805-0476.
 5. ŠRÁMEK, Jan. Délkoměry v praktické metrologii a jejich návaznost. *Metrologie*, 2016, č. 3, s. 2-5. ISSN: 1210-3543.
 6. ŠRÁMEK, Jan. Zařízení na kalibraci čítačů částic v ČMI Brno. *Metrologie*, 2016, č. 1, s. 8-10. ISSN: 1210-3543.
 7. ŠRÁMEK, Jan. Příklady použití laserinterferometrů v metrologii. *Metrologie*, 2013, č. 2, s. 8-12. ISSN: 1210-3543.
 8. ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření při kalibracích závitových kroužků a trnů. *Metrologie*, 2012, s. 8-11. ISSN: 1210-3543.
 9. ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření při kalibracích 1 a 2 osých měřicích přístrojů. 43. konference ČKS, Skalský dvůr, Lísk u Bystřice n. Pernštejnem, 2011.
 10. ŠRÁMEK, Jan. Vyjadřování nejistoty měření při kalibraci závitových kalibrů. III. seminář ČKS Skalský dvůr, Lísk u Bystřice n. Pernštejnem, 2011.
 11. ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření při kalibracích 1 a 2 osých měřicích přístrojů. *Metrologie*, 2011, s. 8-11. ISSN: 1210-3543.

ABSTRAKT

Předkládaná disertační práce se zabývá měřením velmi malých rozměrů v nanometrologii pomocí dotykové nano-sondy, která je součástí třísouřadnicového měřicího stroje. V práci je prezentován nově vypracovaný přístup k problematice hodnocení přesnosti měření v oblasti velmi přesného měření délky. Cílem práce je rozšíření možností měření prováděných na popisovaném přístroji a vytvoření návrhu postupu měření malých součástí včetně stanovení přesnosti měření tohoto přístroje při jeho použití v nanometrologii. Práce prezentuje nově vytvořený postup výpočtu nejistoty měření, který byl základní součástí stanovení přesnosti měření přesného třísouřadnicového měřicího stroje (dále jen nano-CMM).

V první části disertační práce je uvedena analýza současného stavu v oblasti vyhodnocování přesnosti měření při realizaci přesných měření délky. Jsou zde definovány a popsány jednotlivé metody používané pro stanovení přesnosti měření nano-CMM. Je zde kladen důraz zejména na aparát stanovení nejistoty měření, kdy je čerpáno z autorových zkušeností z praxe metrologa pracujícího v laboratoři Oddělení Primární nanometrologie a technické délky Českého metrologického institutu v Brně (dále je ČMI Brno).

Druhá část disertační práce se zaměřuje na vlastní problematiku stanovení přesnosti délkových měření v nanometrologii s důrazem na provedení souboru měření za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti. Je zde popsán a vyzkoušen konkrétní simulační proces, kdy se pomocí metody Monte Carlo provádí simulaci měřicího systému nano-CMM za účelem doplnění nově vytvořeného aparátu pro stanovení nejistoty měření dotykovou nano-sondou na tomto přístroji. Podstatnou součástí této části disertační práce je podrobné vyhodnocení výsledků měření z provedených experimentů za dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti a zejména potřeby stanovení nejistoty měření nano-CMM. Nejistota měření je v disertační práci vyjádřena pro kvantifikaci přesnosti měření tohoto přístroje.

Závěr práce shrnuje získané poznatky v oblasti provedeného vědeckého výzkumu včetně jejich vyhodnocení a v rámci zvolené metodiky pro stanovení přesnosti měření v nanometrologii. Naznačuje budoucí postup možný v oblasti výzkumu i praktického použití v oblasti metrologické

návaznosti a provádění vysoce přesných měření pro zákazníky. Zabývá se i možností využití dalších snímacích systémů použitelných na zkoumaném nano-CMM.

ABSTRACT

The presented doctoral thesis deals with measurements of extremely small sizes in nanometrology using a touch probe, which constitutes a part of a three-coordinate measuring system. It addresses a newly developed method of exact measurements in nanometrology by touch probes. The aim of this work was to expand the measurement options of this device and design a methodology proposal for the measurement of small parts, including the determination of accuracy of measurement of this device when used in nanometrology. The work includes the new methodology for the calculation of uncertainty of measurement, which constitutes a keystone in determining the accuracy of measurement of a accuracy three coordinate measuring system (hereinafter only nano-CMM).

The first part of the doctoral thesis analyzes the present situation in the area of evaluation of accuracy of measurement in very accurate length measurements. It defines and describes individual methods implemented in the determination of accuracy of measurement on the instrument nano-CMM. A great emphasis is placed on the methodology of the measurement uncertainty, which draws from the author's experience as a metrologist working in the laboratories of the Department of Primary nanometrology and technical length, Czech Metrology Institute Brno (hereinafter only CMI Brno).

The second part of the doctoral thesis focuses on the determination of accuracy of length measurement in nanometrology, using a large set of measurements that were carried out under the reproducibility and repeatability conditions. There is also described and tested a model procedure utilizing the Monte Carlo method to simulate the measuring system nano-CMM in order to extent the newly created methodology of the measurement of uncertainty using a touch probe on the instrument nano-CMM. A substantial part of this doctoral thesis provides a detailed evaluation of results obtained from experiments that were executed under the repeatability and reproducibility conditions, especially for the purposes of the determination of the uncertainty of measurement. In this doctoral thesis, the uncertainty of measurement is chosen to quantify the accuracy of measurement of the instrument nano-CMM.

The final part of this thesis summarizes the knowledge obtained during the scientific research and provides its evaluation. For the methodology used to determine the accuracy of measurement in nanometrology, it also outlines the future development in the area of scientific research, including the practical use in metrological traceability and extremely accurate measurements for customers. Furthermore, it deals with the possible use of other scanning systems compatible with the instrument nano-CMM.

CV - JAN ŠRÁMEK

Osobní údaje

Datum narození: 30. března 1977
Trvalé bydliště: Svánovského 5 628 00 Brno
Telefon: +420 737 292 042
E-mail: jsramek@cmi.cz

Praxe

2013 - doposud VUT v Brně, FSI-ÚVSSR, Odbor Kvality, spolehlivosti a bezpečnosti
→asistent

2008 - doposud Český institut pro akreditaci, o.p.s. pracoviště Brno, Okružní ul.

→odborný posuzovatel pro veličiny: délka a rovinný úhel

2004 - doposud Český metrologický institut Brno, Okružní ul.

→metrolog – odd. Primární nanometrologie a technické délky

2003 - 2004 Feramo, s.r.o. Brno, Vodařská ul.

→technolog – modely odlitků v 3D, CAD, CAM

1997 - 2003 Zetor, a.s. – Výzkumně vývojová základna, Brno, Trnkova ul.

→samostatný výzkumně-vývojový pracovník (zkušební technik)

Vzdělání

2011 - doposud VUT v Brně, FSI-ÚVSSR, Odbor Kvality, spolehlivosti a bezpečnosti

→kombinované doktorské studium, obor Konstrukční a profesní inženýrství,

Téma Disertační práce: STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ V NANOMETROLOGII

2011 VUT v Brně, FSI-ÚVSSR, Odbor metrologie a řízení jakosti

→Quality Engineer pro podnikové systémy managementu jakosti a audity ve smyslu ČSN EN ISO 9001, ČSN EN ISO/IEC 17021 a ČSN EN ISO 19011.

2009 - 2011 VUT v Brně, FSI-ÚVSSR, Odbor metrologie a řízení jakosti

→kombinované magisterské studium obor Metrologie a řízení jakosti

Téma Diplomové práce: Nejistoty přesných délkových měření II.

2008 Český institut pro akreditaci, o.p.s., Praha

→školení pro externí odborné posuzovatele kalibračních laboratoří dle ČSN EN ISO 17025

2005 – 2008 VUT v Brně, FSI-ÚAI

→kombinované bakalářské studium obor Aplikovaná informatika a řízení

Téma Bakalářské práce: Nejistoty přesných délkových měření.

1994 – 1997 SPŠ Strojnická, Brno Sokolská 1

→denní studium maturitního oboru Všeobecné strojírenství

1994 – 1997 SOU strojírenské, Brno Trnkova 111

→denní studium učebního oboru Nástrojař

Zaměření

→zajišťování kalibrací délkových měřidel a přístrojů na ČMI OI Brno

→odborné posuzování při akreditaci kalibračních laboratoří při ČIA

→přednášková a školicí činnost v rámci ČMI Brno, ČKS Brno a VUT Brno

→studium AJ