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

DETERMINTION ACCURACY OF MEASUREMENT IN NANOMETROLOGY

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Jan Šrámek

AUTHOR

ŠKOLITEL — doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2019

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 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 rovněž 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 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.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

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.

KEY WORDS

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

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

ŠRÁMEK, Jan. *Stanovení přesnosti měření v nanometrologii.* Brno, 2019. Disertační práce. Vysoké Učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství, školitel doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

PODĚKOVÁNÍ:

Autor děkuje v prvé řadě své rodině, svým kolegům z Oddělení primární nanometrologie a technické délky na ČMI OI Brno a VUT v Brně, kteří mu poskytli zázemí, prostor a čas na tuto disertační práci. Dále pak jmenovitě:

Doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc., mému odbornému vedoucímu disertační práce.

Mgr. Petru Klapetkovi, Ph.D., vedoucímu Oddělení primární nanometrologie a technické délky v ČMI OI Brno, za poskytnutí odborné pomoci a prostoru pro tvorbu disertační práce.

Doc. Ing. Jiřímu Pernikářovi, CSc., za spolupráci na tvorbě disertační práce a Mgr. Magdaleně Dvořákové za překlad abstraktu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně na základě doposud získaných znalostí, odborných konzultací a s využitím dostupné literatury a dalších podkladů uvedených v této práci.

V Brně dne 30. 8. 2019 Ing. Jan Šrámek

OBSAH

1 ÚVOD 11

2 MOTIVACE A CÍL PRÁCE 13

3 PRINCIP ČINNOSTI A CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE 17

3.1 Obecná charakteristika přístroje 17

3.2 Softwarové vybavení přístroje 19

3.3 Snímací systém přístroje 20

3.4 Další parametry a možnosti využití přístroje 21

4 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY (SHRNUTÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ) A PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ 23

4.1 Základní pojmy a definice 23

4.1.1 Přesnost měření a její kvantifikace 23

4.1.2 Chyby měření 26

4.1.3 Hodnocení výsledků měření 28

4.2 Požadavky na stanovení přesnosti měření 30

4.2.1 Metrologická návaznost a její vztah k přesnosti měření 30

4.2.2 Splnění podmínek opakovatelnosti měření a reprodukovatelnosti měření 31

4.2.3 Kvantifikace přesnosti měření pomocí nejistoty měření 31

4.3 Nástroje použité ke stanovení preciznosti měření 31

4.3.1 Kontrola odlehlých hodnot 31

4.3.2 Použité statistické nástroje 31

4.3.4 Dodržení podmínek reprodukovatelnosti 33

4.4 Stanovení rozšířené nejistoty měření 34

4.4.1 Stanovení standardní nejistoty vyhodnocované způsobem A 34

4.4.2 Stanovení standardní nejistoty vyhodnocované způsobem B při přímém měření 35

4.4.3 Stanovení kombinované nejistoty a rozšířené nejistoty měření 36

4.5 Kalibrace měřicích přístrojů 37

4.5.1 Zásady kalibrace standardního CMM 38

4.5.2 Zásady kalibrace CMM v nanometrologii 40

4.5.3 Původní stav metrologické návaznosti nano-CMM NMM-1 42

4.6 Metoda Monte Carlo 43

4.6.1 Metoda MCM – princip 43
4.6.2 Návrh simulace metodou Monte Carlo 45
4.7 Modul pro rychlý výpočet nejistoty měření 46
5 POSTUP PLĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE 47
5.1 Návrh řešení cílů disertační práce 47
5.2 Volba vhodného etalonu 47
5.3 Návrh, výroba a odzkoušení upínacího přípravku 49
5.4 Zvolené metody měření součástí 51
5.5 Měření rozměru rubínových kuliček 53
5.5.1 Dotykové měření rozměru kuliček na přístroji nano-CMM NMM-1 53
5.5.2 Dotykové měření na délkoměru s interferometrem 54
5.5.3 Bezdotykové měření na CT přístroji GE 57
5.5.4 Bezdotykové měření na CT přístroji Rigaku 57
5.6 Vyhodnocení parametrů textury povrchu kuliček 59
5.7 Posouzení výsledků a statistické vyhodnocení 62
6 POUŽITÉ METODY STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ 69
6.1 Nejistota měření CMM při použití multipoziční metody 70
6.1.1 Stanovení korigované hodnoty měřeného objektu 71
6.1.2 Obecný vztah pro nejistoty měření 71
6.1.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{rep} 72
6.1.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{geo} 72
6.1.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{corrL} 73
6.1.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp} 73
6.1.7 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob} 76
6.1.8 Stanovení složky nejistoty měření u_{L} 76
6.2 Nejistota měření CMM při použití substituční metody 76
6.2.1 Obecný vztah pro nejistoty měření 76
6.2.2 Stanovení složky nejistoty měření u_{r} 78
6.2.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob} 78
6.2.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{a} 78
6.2.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{e} 79
6.2.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp} 79
6.2.7 Stanovení složky nejistoty měření u_{cl} 79

6.2.8 Stanovení složky nejistoty měření u_u 81
6.2.9 Stanovení složky nejistoty měření u_{nt} 81
6.2.10 Stanovení složky nejistoty měření u_{pe} 81
6.3 Metoda monte carlo při stanovení nejistoty měření 82
6.3.1 Matematického model měření pro multipoziční metodu 83
6.3.2 Definice matematického modelu měření pro substituční metodu 84
6.3.3 Popis skriptu v programu MatLab® 84
7 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ PRŮMĚRU RUBÍNOVÝCH KULIČEK MULTIPOZIČNÍ METODOU 87
7.1 Výpočet nejistoty měření multipoziční metodou kuličky d = 1mm 87
7.1.1 Stanovení složky nejistoty měření u_{rep1} 87
7.1.2 Stanovení složky nejistoty měření u_{geo1} 89
7.1.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{corrL1} 89
7.1.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp1} 90
7.1.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob1} 90
7.1.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{L1} 91
7.1.7 Stanovení rozšířené nejistoty měření U_{mult1} 91
7.2 Vyhodnocení výpočtu nejistoty měření multipoziční metodou 93
8 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ PRŮMĚRU RUBÍNOVÉ KULIČKY SUBSTITUČNÍ METODOU 99
8.1 Výpočet nejistoty měření substituční metodou kuličky d = 1mm 100
8.1.1 Stanovení složky nejistoty měření u_{r1} 100
8.1.2 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob1} 100
8.1.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{a1} 101
8.1.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{e1} 102
8.1.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp1} 102
8.1.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{cl1} 103
8.1.7 Stanovení rozšířené nejistoty měření U_{subs1} 103
8.2 Vyhodnocení výpočtu nejistoty měření substituční metodou 104
9 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ POMOCÍ METODY MONTE CARLO 111
9.1 Výpočet nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro kuličku o d = 1mm 111
9.2 Výpočet nejistoty měření stanovené substituční metodou pro kuličku o d = 1mm 112

9.3 Vyhodnocení výsledků simulace metodou Monte Carlo 114

10 SHRNUTÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ 117

10.1 Shrnutí použitých metod stanovení nejistoty měření 118

10.2 Návrh vhodného etalonu - ball plate 121

10.3 Modul pro rychlý výpočet nejistoty měření 126

11 ZÁVĚR A POKRAČOVÁNÍ VĚDECKÉ PRÁCE 129

12 POUŽITÁ LITERATURA 135

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN 145

14 SEZNAM OBRÁZKŮ 149

15 SEZNAM TABULEK 153

16 SEZNAM PŘÍLOH 155

17 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ 157

1 ÚVOD

Rozvoj nanotechnologií v minulých desetiletích lze pozorovat v každodenním životě kolem nás. S tím souvisí i lidská potřeba měření v nanoměřítku. Problematika přesného měření malých přesně vyrobených součástí (nástrojů, měřidel, etalonů) je aktuální již poměrně dlouhou dobu. Dnes nám masivní nástup nanotechnologií umožňuje docílit mnohem větších rozlišení měřené veličiny při zkoumání měřených objektů. Jsme schopni dosáhnout zcela jiné kvality i kvantity naměřených dat, než bylo v minulosti možné [39]. Současné technologie nám umožňují zkoumat za pomocí nástrojů používaných v nanometrologii měřené objekty malých rozměrů, se kterými se setkáváme běžně v metrologické praxi, a to jak v systému metrologické návaznosti kalibrační laboratoře, tak i ve výrobní praxi při nejpřesnější výrobě různých komponentů a přístrojů.

Nároky na přesně opracované součásti různých přístrojů a zařízení lze vysledovat už v polovině minulého století. Lze je zařadit do souhrnného oboru – nanometrologie. Tyto nároky se postupem času, s rozšiřující se miniaturizací a zvyšujícími se nároky na kvalitu, spolehlivost a bezpečnost, dále zvyšují. Jedním z přístrojů používaných v nanometrologii jsou přesné souřadnicové měřicí stroje (CMM). Inovace v oblastech elektroniky, mechaniky, mechatroniky, optiky a informatiky jsou v oblasti nanotechnologií široce používány. Tyto inovace nemohou být použity bez vědeckých poznatků, které jsou výsledkem vývoje v oblasti nanometrologie [49, 50, 51], která se zabývá přesným měřením v oblasti nanotechnologií. Tento vývoj znamenal převzetí a rozšíření tradiční metrologie geometrických veličin a stal se platformou pro většinu moderních technologických řešení. Nanometrologie je neustále rozvíjená a překonává hranice dosavadních znalostí prostřednictvím nových metod měření a způsobů hodnocení přesnosti měření [6, 44, 53, 54, 55].

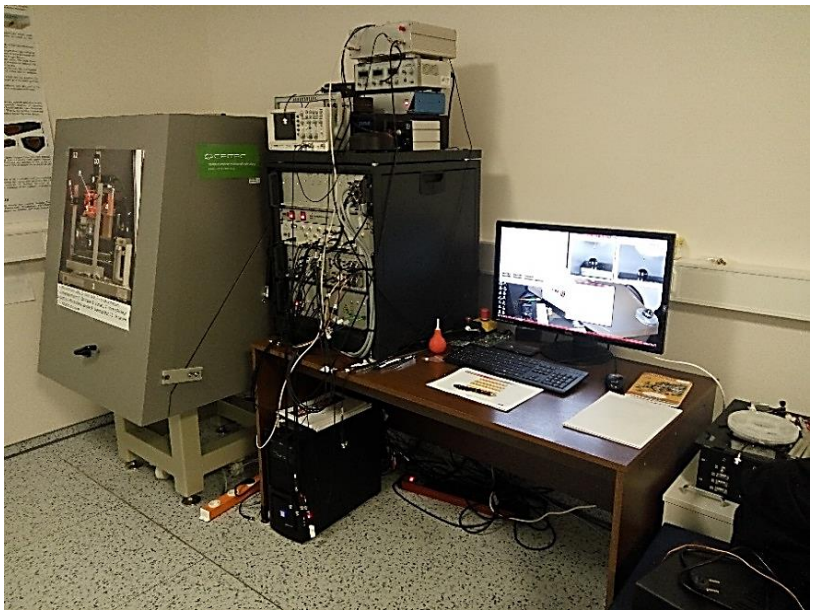
Obr. 1.1 Souřadnicový měřicí stroj SIOS nano-CMM NMM-1 [1].

V disertační práci je řešena problematika přesnosti délkových 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 1.1.

Toto kontaktní měření bylo zkoumáno podrobně, včetně stanovení přesnosti měření při použití dotykové nano-sondy Gannen XP na tomto přístroji. Výrobcem přístroje je německá firma SIOS Meßtechnik GmbH [1] (dále jen SIOS) ve spolupráci s Technickou univerzitou v Ilmenau. Přístroj je v majetku výzkumného institutu CEITEC v Brně a je umístněn v podzemní laboratoři nanometrologie ČMI Brno, se kterým CEITEC dlouhodobě spolupracuje. Pohled do podzemní laboratoře je uveden na obrázku 1.2 vpravo.

Zvolená struktura disertační práce vychází ze zavedené praxe na FSI VUT v Brně [4]. V práci je kladen důraz zejména na přesné vymezení řešené problematiky stanovení přesnosti měření, které je základem pro určení odpovídajících výsledků provedených měření. Disertační práce je členěna do tří částí, které na sebe navazují v přirozené posloupnosti dle obrázku 1.2 vlevo.

Struktura Doktorské Disertační Práce
1. část
1. Úvod
2.Výběr metodiky jednotlivých měření
3.Návrh způsobu uchycení rubínových kuliček
4.Volba vhodných metodik měření kuliček
5.Návrh řešení zkoumaného problému
2. část
6.Realizace měření na přístroji nano-CMM
7.Vytvoření matematického modelu měření
8.Realizace jednotlivých měření na vhodných přístrojích za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti.
9.Popis hlavních vlivů na dosahovanou přesnost měření
10.Kvantifikace přesnosti měření, nejistota měření
3. část
11.Porovnání a analýza naměřených
12.Vytvoření *sw* modulu MS Excel pro rychlé stanovení nejistoty měření
13.Návrh vhodného hmotného etalonu délky
14.Závěr a pokračování vědecké práce



Obr. 1.2 Struktura disertační práce vpravo a celkový pohled na přístroj nano-CMM NMM-1 v laboratoři ČMI OI Brno vlevo [autor].

Poznámka:

Hodnoty v jednotlivých tabulkách i grafech uvedených v disertaci jsou zapsány s desetinnou tečkou v souladu s nastavením *sw* použitých měřicích přístrojů a výpočtovým modulem pro rychlý výpočet nejistoty měření.

2 MOTIVACE A CÍL PRÁCE

V současné době, kdy je evidentní rostoucí zájem na posouzení a stanovení přesnosti měření měřicích přístrojů je tento jev patrný i v oblasti nanometrologie délkových veličin. Neexistuje veřejně dostupný 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, 15, 19, 102, 103], bez zdůraznění náročnosti stanovení složek nejistoty měření a kvantifikaci jejich příspěvků.

V případě přístroje nano-CMM NMM-1 je vhodné zdůraznit 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 specifičností dodávaných přístrojů, kdy se jedná o prakticky kusovou výrobu na zakázku s určitou danou mírou specializace provedení a taktéž různorodostí použití jak jednotlivých dodávaných snímacích systémů, tak i specifičností 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.

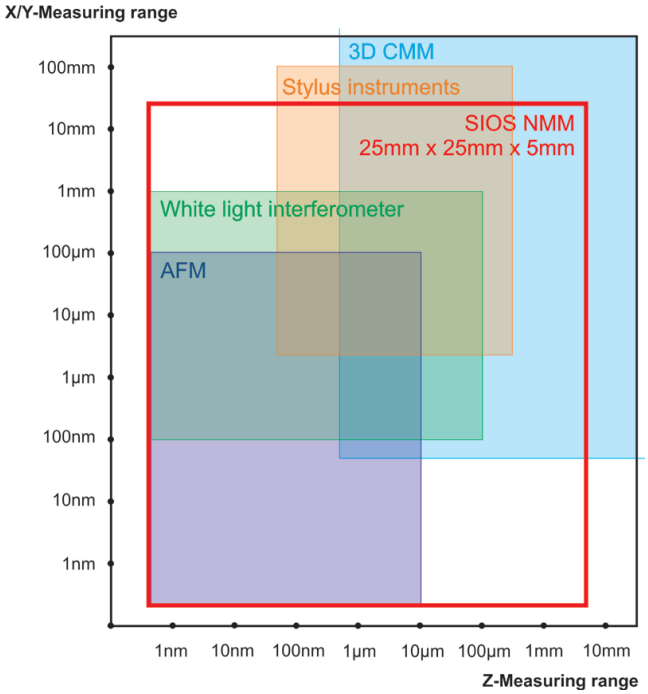
Faktory ovlivňující nejistotu měření, například zejména tvar a textura povrchu měřené součásti u každé použité metody byly studovány s cílem připravit metodiku pro určení nejistoty měření za použití dotykové nano-sondy Gannen XP. Takový postup se v dosavadních běžně dostupných vědeckých publikací nevyskytuje [6, 7, 9, 12, 19, 24, 25, 39, 41, 44 - 51]. Tato skutečnost je dána zejména specifičností 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 v rozsahu vhodném pro nanometrologii je motivací k zadání této 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 entitu, nikoliv pro vlastní odměřování měřené veličiny.

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.

Na obrázku 2.1 je uveden graf, ve kterém jsou znázorněny měřicí rozsahy různých měřicích systémů užívaných v praxi. Oblast pokrytá přístrojem nano-CMM NMM-1 je vyznačena červeně a poskytuje představu o univerzálnosti tohoto přístroje pro oblast nanometrologie. Oblast, kterou pokrývají standardní CMM používané ve strojírenství je znázorněna světle modrou barvou a její hlavní část je mimo rozsah tohoto grafu.



Obr. 2.1 Oblast použití souřadnicového měřicího stroje NMM-1[1].

Hlavním cílem předkládané disertační práce mělo být především, dle požadavku praxe v ČMI Brno, stanovení přesnosti měření na souřadnicovém měřicím stroji SIOS nano-CMM NMM-1. Praktickou motivací ke stanovení přesnosti měření jsou požadavky na využití tohoto přístroje ze strany výzkumného centra CEITEC a v rámci zajišťování metrologické návaznosti akreditované laboratoře ČMI Brno.

K dosažení požadovaného cíle je nutné provést rozsáhlý soubor dostatečně precizních měření za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti, což vyžaduje vývoj a využití různých měřicích metod a různých měřicích přístrojů. Taktéž tvorbu měřicích postupů a přípravků, které by bylo možné použít na různých měřicích přístrojích.

Hlavní cíl:

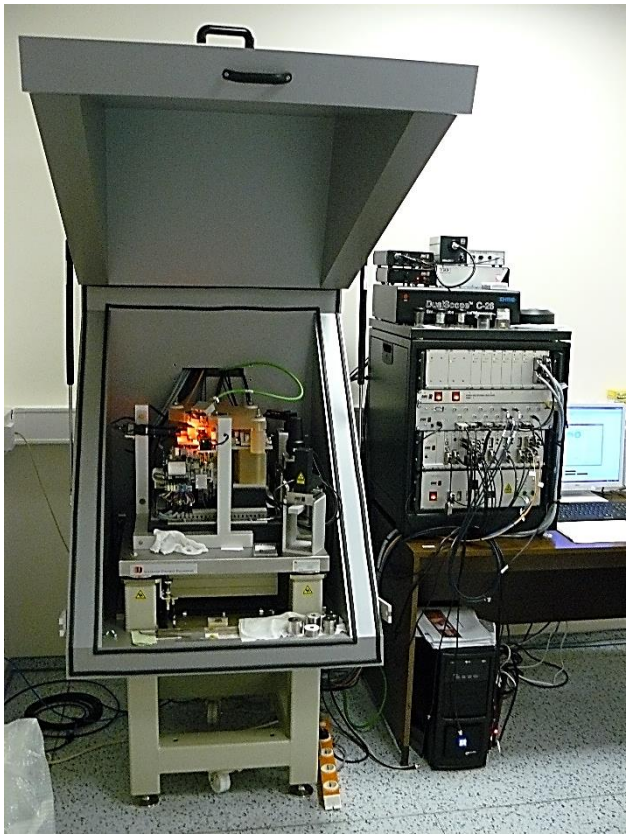
Vytvoření metodiky pro stanovení přesnosti měření při použití dotykové nano-sondy Gannen XP na souřadnicovém měřicím stroji SIOS nano-CMM NMM-1 v rámci akreditované kalibrační laboratoře.

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 PRINCIP ČINNOSTI A CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE

Pro snadnější orientaci v problematice stanovení přesnosti měření tak specifického přístroje jakým je nano-CMM NMM-1 je nutný důkladný rozbor a popis jeho konstrukce, která má zásadní vliv na sledované a vyhodnocované charakteristiky měřicího přístroje. V kapitole 3.1 je uvedena obecná charakteristika přístroje nano-CMM NMM-1 s vysvětlením principu jeho funkce. V kapitole 3.2 je popsáno *sw* vybavení přístroje a v kapitole 3.3 je uveden podrobný popis použitého snímacího systému.



Obr. 3.1 Přístroj nano-CMM NMM-1 v laboratoři ČMI Brno [autor].

3.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE

Přístroj nano-CMM NMM-1 od firmy SIOS, který je uveden na obrázku 3.1, je určen pro trojrozměrné měření v rozsahu (25x25x5) mm s rozlišením až 0,1 nm [1]. Unikátní systém konstrukce přístroje, jejíž kritické části jsou vyrobeny z materiálu Zerodur® (koeficient tepelné roztažnosti $\alpha = 0 \pm 0{,}1 \cdot 10^{-6}\,K^{-1}$), umožňuje eliminaci Abbého chyby pro všechny tři osy měření. Pro odměřování délky slouží tři laserinterferometry, jejichž osy měření se protínají v kontaktním bodě snímacího systému a měřeného objektu. Měřený objekt je umístěn na posuvné základní desce, jejíž součástí je sdružený koutový odražeč. Základní deska, která je vyrobena z materiálu Invar (koeficient tepelné roztažnosti $\alpha = 1{,}2 \pm 0{,}1 \cdot 10^{-6}\,K^{-1}$), je pohyblivá ve třech osách [1] dle obrázku 3.2.

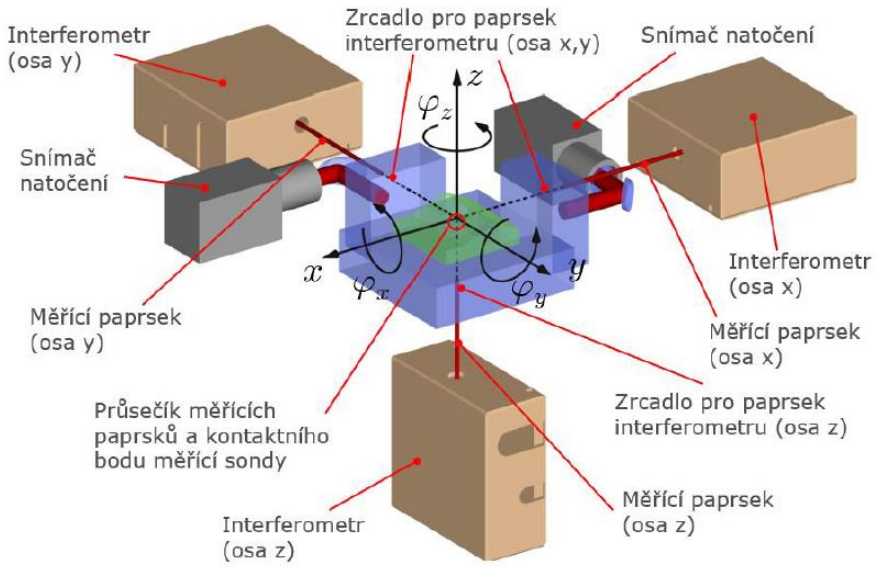
Součástí sestavy přístroje je zásobník s výměnnými snímacími systémy, které jsou umístěny ve směru osy z, nad měřicí základnou. Při všech měření, které byly využity pro vypracování disertační práce, byla využita dotyková nano-sonda Gannen XP.

Souřadnicový měřicí přístroj nano-CMM NMM-1 pracuje na principu využití laserinterferometru o vlnové délce 633 nm s vysoce stabilní frekvencí a softwarově ovládaným přístrojovým vybavením. Konstrukce všech tří interferometrů je odvozena od Michelsonova principu. Jakékoliv úhlové odchylky, které mohou nastat během posuvu základny, jsou monitorovány a korigovány pomocí dvou úhlových snímačů. Paprsky stabilizovaných laserů jsou vedeny pomocí optických vláken přímo z elektronické jednotky (zdroje) laserinterferometru, přes interferometrické děliče paprsku do sdruženého koutového odražeče (zrcadla) dle obrázku 3.2. Toto řešení poskytuje kompaktní a stabilní řešení z hlediska požadavků na odolnost vůči teplotním vlivům, zejména z hlediska délkové roztažnosti materiálů [1].

Srdcem elektroniky přístroje nano-CMM NMM-1 je DSP (Digital Signal Processor), který zpracovává všechny vstupní signály, ovládá pohonný systém a řídí vlastní proces měření [1]. Vlastní jednotka je umístěna v samostatném boxu a tím je dosažena minimalizace nežádoucích vlivů na činnost nano-CMM a vlastní měřicí proces.

Základní charakteristiky přístroje nano-CMM NMM-1 [1]:

- Robustní konstrukce přístroje s minimální Abbého chybou (menší než 0,1 nm).
- Přesný referenční souřadný systém definovaný pomocí koutových odražečů.
- Chyby přímosti lineárních vodicích prvků nemají vliv na výsledky měření, protože je užito interferometrického měření polohy.
- Kompenzacemi chyb vodících drah se dosáhne řídicího systému s uzavřenou smyčkou.
- Úhlové řídicí systémy kompenzují tři úhlové chyby φ_{xy},φ_{yz} a φ_{zx} dle obrázku 4.5 v kapitole 4.5.1.

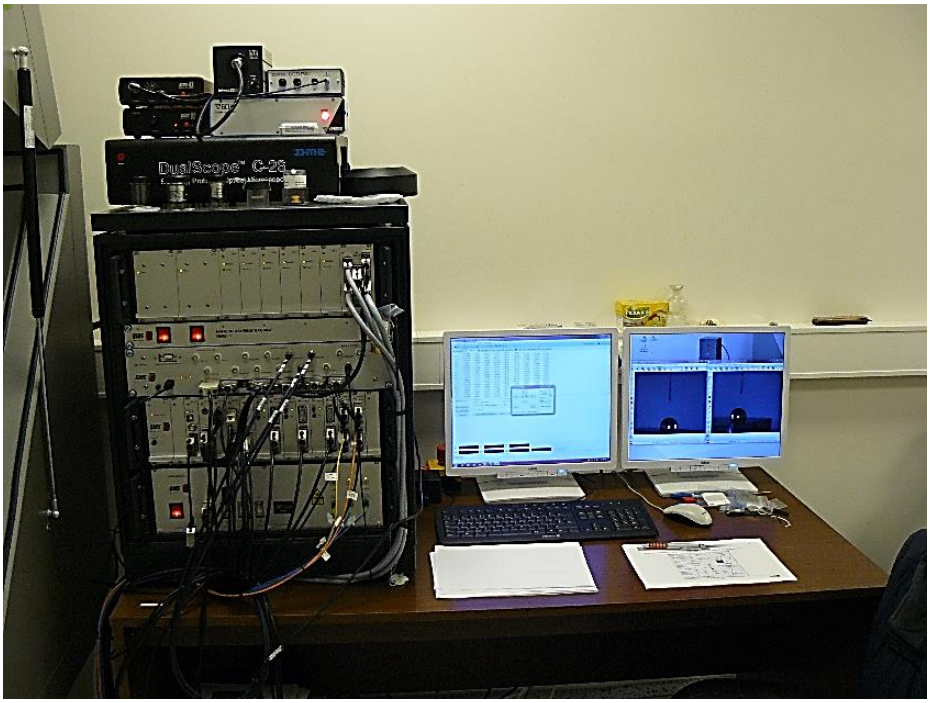


Obr. 3.2 Schéma principu přístroje nano-CMM NMM-1 [1].

Měřicí základna je umístěna na odpružených prvcích vyrobených z materiálu Zerodur. Celý prostor, ve kterém se nachází zařízení, lze od okolního prostředí odizolovat pomocí uzavíratelného boxu. V sestavě přístroje nano-CMM NMM-1 hraje podstatnou roli také *sw* vybavení, které je popsáno v další části této kapitoly.

3.2 SOFTWAROVÉ VYBAVENÍ PŘÍSTROJE

Pro ovládání přístroje slouží výrobcem dodávaný software 3D Firmware. Ten umožňuje nastavit všechny potřebné parametry přístroje a v neposlední řadě slouží k propojení a přenosu dat mezi řídicí jednotkou přístroje a uživatelem. Obsluha přístroje pracuje v dodaném programu na PC, který využívá operační systému Windows7 jak je patrné z obrázku 3.3. Spolu s využitím uvedeného programu lze pro řízení přístroje využít vlastních skriptů, napsaných např. v programovém prostředí Matlab®.



Obr. 3.3 Pohled na elektronickou jednotku DSP a pracoviště obsluhy přístroje [autor].

Pro snadnější manipulaci a ovládání přístroje, zejména při translačních posuvech pracovního stolku nebo pro kontrolu vlastního prostoru, ve kterém se provádí měření, slouží dvojice digitálních kamer. Tyto kamery jsou namontovány na stavitelné držáky a monitorují prostor měření ve smyslu posuvu v osách x a y. Kamery jsou připojeny přímo do PC přes komunikační rozhraní USB a k jejich ovládání slouží *sw* microEye.

3.3 SNÍMACÍ SYSTÉM PŘÍSTROJE

Jak již bylo uvedeno, součástí sestavy přístroje je zásobník s výměnnými snímacími systémy, které jsou umístěny ve směru osy z, nad měřicí základnou. V případě všech měření, které byly využity pro vypracování disertační práce, byla využita dotyková nano-sonda Gannen XP (obrázek 3.4) vybavená safírovou kuličkou o průměru d_{saf} = (0,12; 0,3 nebo 0,5) mm.

Použitá nano-sonda Gannen XP má nejlepší nejistotu měření ze všech dotykových snímacích systémů dostupných na trhu. To v kombinaci s izotropní tuhostí, extrémně nízkou hmotností a kompatibilní konstrukcí umožňuje přesné 3D měření malých nebo křehkých součástí, které by nemohly být měřeny standardními CMM s dotykovými sondami.

Základem nano-sondy Gannen XP je křemíkový čip s integrovanými piezoelektrickými prvky. Jednobodové snímání a skenování je možné s vysoukou přesností. Sonda je lehká s hmotností přibližně 34 mg v závislosti na průměru snímače. V kombinaci s její tuhostí do 150 $N \cdot m^{-1}$ to umožňuje rychlé měření s detekčními silami až na úrovni několik mikroNewtonů v závislosti na použitém typu daného nano-CMM. Sonda je výrobcem kalibrována tak, aby byl stanoven vztah mezi posunutím hrotu (kuličky) sondy a signálem měřeným piezoizolačními tenzometry. Kalibraci lze provádět na samotném přístroji nano-CMM nebo na speciálním přístroji XPRESS Precision Engineering [15].

Obr. 3.4 Detail dotykové nano-sondy Gannen XP [15].

Měření pomocí sondy XPRESS ukázala nejistotu měření 50 nm v prostoru a opakovatelnost měření 2 nm (směrodatná odchylka) v jakémkoliv směru jednotlivých os a v celém rozsahu měření. Drift sondy je způsoben hlavně teplotními odchylkami. Pro odchylky teploty 0,1 K nebo menší, je odchylka přibližně 10 nm [15].

Obecné specifikace nano-sondy [15]:

- Opakovatelnost je 2 nm (směrodatná odchylka v celém rozsahu měření a v jakémkoliv směru potvrzená nezávislými publikacemi),
- dostupné průměry hrotu nano-sondy jsou 120, 300 a 500 mikrometrů.

Parametry ovlivňující nejistotu měření nano-sondy Gannen XP uváděné výrobcem [15]:

- Nejistota měření typu A snímače (k = 3) je 10 nm (analýza je založena na trojnásobku směrodatné odchylky a maximálnímu posunutí špičky senzoru o velikosti 10 mikrometrů v prostředí s řízenou teplotou (aktivní klimatizační systém), kde jsou změny teploty v rozmezí plus minus 0,1 K),

- kalibrace hrotu (kuličky) sondy je 40 nm (uvedená hodnota je určena především strojovou nejistotou a kalibrační metodou),
- odchylky teploty (ΔT <0,1 K),
- deformace hrotu a obrobku <10 nm, jiné odchylky <10 nm,
- kombinovaná 3D nejistota měření nano-sondy Gannen XP je U = 45 nm.

Kontaktní síly, při kterém nano-sonda zaregistruje měřený objekt [15]:

- „Srážková hmota“ na hrotu sondy 50 mg,
- moment síly na špičce hrotu 400 N m^{-1} (izotropní),
- typická kontaktní síla je 0,4 mN.

Měřicí rozsah nano-sondy [15]:

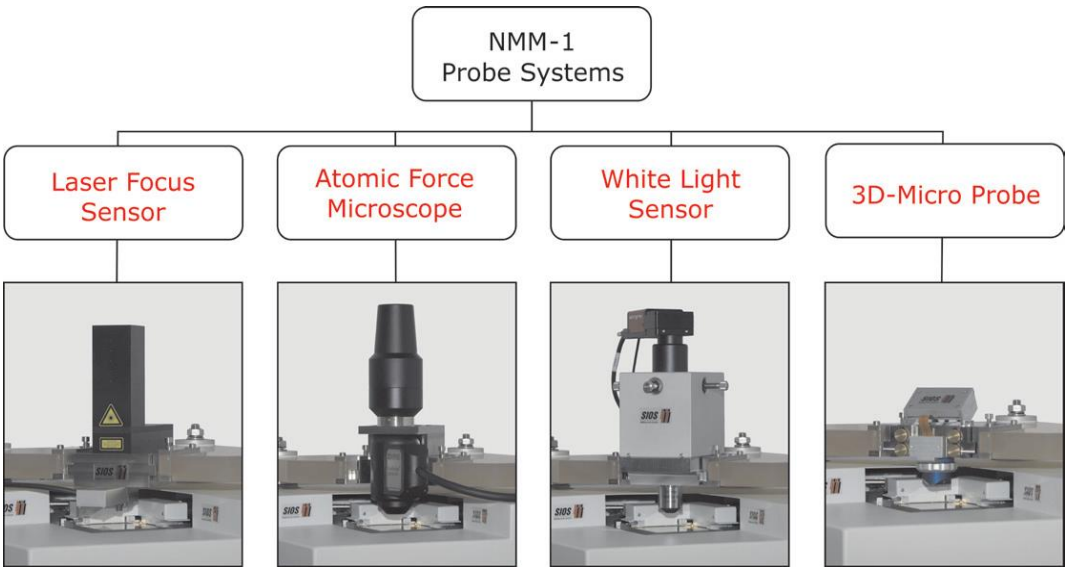
- Rozsah měření 30 mikrometrů v prostoru,
- lineární rozsah měření 10 mikrometrů.

Použitá dotyková sonda umožňuje přesné snímání měřeného objektu. Její umístění je statické, vlastní translační pohyb ve třech osách vykonává pohyblivá základna přístroje. Tento princip umožňuje v maximální míře zajistit plynulý a rovnoměrný posun během měření, stejně tak i přesnou realizaci definované přítlačné síly dotykové nano-sondy.

3.4 DALŠÍ PARAMETRY A MOŽNOSTI VYUŽITÍ PŘÍSTROJE

Přístroj nano-CMM NMM-1 je univerzální konstrukce, která umožňuje použití různých snímacích systémů dle přání zákazníka. Výrobce provádí konečnou realizaci měřicího systému v návaznosti na přání konečného zákazníka a jeho požadavky na měření [1, 81]. Na obrázku 3.5 jsou zobrazeny některé standardně dodávané snímací systémy jako příslušenství přístroje. Jedná se zejména o Laser-Focus senzor, AFM mikroskop a interferometrický senzor pracující s bílým světlem.

V disertační práci je k měření využívána pouze dotyková nano-sonda Gannen XP, odpovídající popisu obrázku 3D-Micro Probe. V popisu výrobce nano-sondy je uváděn přívlastek „micro“ a z tohoto pohledu je přistupováno i k vlastnímu stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1. Už během prvních měření s touto nano-sondou se ukazoval kvalifikovaný odhad nejistoty měření v řádech desítek až stovek nanometrů, to znamená, že přívlastek „micro“ je pravděpodobně zcela na místě. Přístroj nano-CMM NMM-1 pracuje s otevřenou architekturou, která umožňuje použití i dalších snímacích systémů dodávaných výrobcem obr 3.5) nebo vlastní konstrukce, které jsou vybaveny komunikačním rozhraním umožňující datové propojení s elektronickou jednotkou DSP.



Obr. 3.5 Snímací systémy použitelné na nano-CMM NMM-1 [1].

4 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY (SHRNUTÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ) A PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ

V současnosti, kdy se již dostatečně v praxi zažito stanovení nejistoty měření, často se opomíjí původní postup – vyhodnocování chyby měření. A to i přes fakt, že tyto dva postupy se spíše doplňují, než nahrazují. Proto bylo v disertační práci přistoupeno k použití obou těchto postupů, což není v soudobé literatuře, která se zabývá oblastí nanometrologie, doposud publikováno [45, 46, 52, 53, 80, 81, 82]. Vztah a průsečíky těchto dvou modelů jsou popsány v následujících kapitolách. V kapitole 4.1 jsou shrnuty základní pojmy a definice. V kapitole 4.2 jsou formulovány obecné požadavky na stanovení přesnosti měření včetně zásad statistického vyhodnocení. V kapitole 4.3 je uveden obecný postup pro stanovení rozšířené nejistoty měření.

4.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Pro celkový a ucelený přehled v problematice stanovení přesnosti měření přístrojů používaných v nanometrologii včetně nejistoty přesného měření je dobré si uvést základní pojmy a definice, z kterých bylo při vypracování disertační práce čerpáno.

4.1.1 Přesnost měření a její kvantifikace

Při potřebě získání relevantních dat o rozměrech dané součásti zvolíme vhodný typ měřidla, respektive měřicího přístroje, provedeme požadované měření a získáme očekávaný výsledek. Jaká je však přesnost výsledku? Odpověď na tyto otázky není obecně jednoduchá a vyžaduje určité praktické i teoretické znalosti, které tvoří důležitou součást metrologie [7].

Přesnost měření

je obecně uváděna jako těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny [8]. Přesnost měření jako taková je kvalitativní pojem, nedá se zcela objektivně a jednoduše kvantifikovat. Kvantitativní charakteristika, která vyjadřuje přesnost výsledku, je například nejistota měření. Při vyhodnocování měření se často kvantifikují dvě základní charakteristiky [9]:

- Odhad průměru (střední hodnoty, polohy) – hodnotí správnost (pravdivost) měření.
- Odhad variability (rozptylu, rozpětí) – hodnotí preciznost měření.

Správnost měření

je definována jako těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu měření veličiny a referenční hodnoty měřené veličiny [8]. Správnost měření má přímý vliv na systematickou chybu. Tyto pojmy nejsou veličinami a nejsou dány číselnými hodnotami. Tato definice se nedá samozřejmě jednoduše kvantifikovat. Jedná se prakticky o systematickou chybu měření. V metrologické praxi se tato charakteristika nazývá též strannost. Systematická chyba se eliminuje pomocí korekce [9].

Preciznost měření

se uvádí jako těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném nebo podobném objektu, např. za dodržení podmínek opakovatelnosti nebo reprodukovatelnosti měření [8]. Preciznost se nejčastěji kvantifikuje pomocí charakteristik variability (rozptylu nebo rozpětí). Pro tyto účely se ve statistické praxi používá rozpětí [9]:

$$R = y_{\max} - y_{min}\,, \tag{4.1}$$

kde je:

$y_{\max}$ maximální naměřená hodnota měřené veličiny,

$y_{\min}$ minimální hodnota měřené veličiny.

Dále je za vhodný ukazatel preciznosti měření považován výběrový rozptyl nebo jeho druhá odmocnina - výběrová směrodatná odchylka [9]:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}\,, \tag{4.2}$$

kde je:

n celkový počet měření dané veličiny,

i číslo měření,

y_i i-tá hodnota měřené veličiny y,

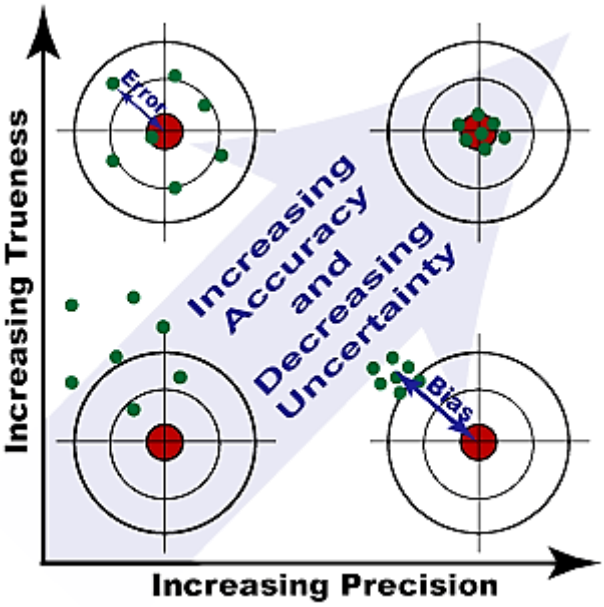
$\bar{y}$ aritmetický průměr ze všech měření.

Podle specifikovaných podmínek, za kterých je měření uskutečněno, se rozeznává [9]:

- preciznost za podmínek opakovatelnosti,
- preciznost za podmínek reprodukovatelnosti,
- mezilehlá preciznost.

Poznámka: Podmínky mezilehlé preciznosti měření se běžně ve strojírenství nepoužívají.

Na obrázku 4.1 je znázorněn princip posuzování přesnosti a nejistoty měření použitého měřidla, respektive měřicího přístroje. Za ideální stav je považováno dosažení co nejnižší hodnoty nejistoty měření při dosažení co nejvyšší míry přesnosti měření. Tento stav předpokládá nízké hodnoty chyby měření a biasu (rozdílu mezi naměřenou hodnotou získanou z opakovaných měření stejného vzorkem a referenční hodnotou) naměřených hodnot [23]. Požadovaný stav nastává, když při rostoucí přesnosti měření (increasing accuracy) nám klesá hodnota nejistoty měření (decreasing uncertainty).



Obr. 4.1 Princip přesného měření [23].

V praxi neexistuje žádná metoda měření ani měřicí zařízení, které by bylo absolutně přesné, což znamená, že naměřená a skutečná hodnota sledované veličiny jsou dva rozdílné pojmy. Rozdíl mezi skutečnou a naměřenou hodnotou je tvořen mnoha rozličnými faktory, případně různými kombinacemi dílčích faktorů. Při zjišťování hodnoty sledované veličiny dochází k různým chybám, které ovlivňují celkový výsledek [23].

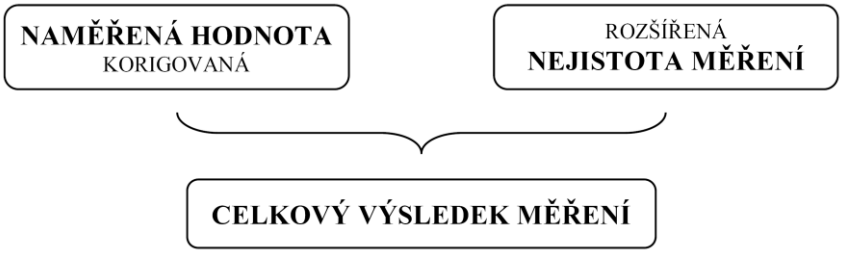
Výsledek měření se vždy pohybuje v jistém rozmezí kolem skutečné hodnoty, kterou prakticky přesně nikdy neznáme. Z tohoto důvodu se v praxi přistupuje ke stanovení nejistoty měření k uváděnému výsledku měření. Nejistota měření je nedílnou součásti aparátu stanovení přesnosti měření pomocí daného přístroje, umožňuje nám její kvantifikaci [7].

Hodnoty měřené veličiny:

- **Pravá hodnota** (skutečná), absolutně přesná, nedá se zjistit (neexistuje absolutně přesné měřidlo) [8].
- **Naměřená hodnota –** hodnota získaná měřením se pravé hodnotě blíží [8].
- **Konvenční hodnota** – hodnota získaná pomocí etalonu, nebo obecně přesnějším měřením. Její přesnost ve formě nejistoty měření se pro konkrétní případ určí dohodou (konvencí). Nahrazuje hodnotu pravou [8].
- **Referenční hodnota je rovna konvenční hodnotě** (termín se používá při kalibracích měřidel a etalonů) [8].

Úplný výsledek měření:

Dle definice [8,9] je úplný výsledek měření uváděn formou: Naměřená hodnota ± nejistota měření (informace o její přesnosti). Na obrázku 4.2 je znázorněno schéma pro stanovení celkového výsledku měření dané veličiny.



Obr 4.2 Výsledek měření [9].

4.1.2 Chyby měření

Skutečnou hodnotu měřené veličiny tedy nejsme schopni přesně určit, jelikož naměřené hodnoty veličiny jsou vždy ovlivněny existencí chyby měření.

Chyba měření

je uváděna jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou veličiny a referenční hodnotou veličiny [8].

Podle původu můžeme chyby měření konzervativně rozdělit na [9]:

- náhodné chyby,
- systematické chyby,
- hrubé chyby.

Za předpokladu vyloučení hrubých chyb je možno dle [9] konstatovat: Celková chyba se skládá z chyby **systematické** a **náhodné**.

Náhodné chyby

Náhodná chyba měření je výsledek měření mínus střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny uskutečněné za podmínek opakovatelnosti [9] a reprodukovatelnosti. Jsou to chyby měření, které nemůžeme při měření kontrolovat ani definovat, jelikož vznikají spolupůsobením velkého počtu náhodných vlivů. Neexistuje měřící proces, který není zatíženou náhodnou chybou. Náhodné chyby ovlivňují zejména přesnost měření [9].

Při vyhodnocování výsledků experimentálního měření jen nutné stanovit nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny a zároveň stanovit její přesnost – vymezit vliv náhodných chyb a kvantitativně vyhodnotit, jak náhodné chyby ovlivňují výsledek měření. Náhodná chyba je náhodná veličina a řídí se zákony pravděpodobnosti. Malé chyby se vyskytují mnohem častěji než chyby velké.

Náhodná chyba měření je v literatuře uváděna jako složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem [8]. Její objektivní popis je možný pouze s využitím statistických metod

Systematické chyby

Systematická chyba je definována jako rozdíl střední hodnoty, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny, uskutečněných za podmínek opakovatelnosti (reprodukovatelnosti) a pravé hodnoty měřené veličiny [9].

Systematické chyby jsou způsobeny např. použitím nevhodné měřící metody, nepřesným měřidlem či měřicím přístrojem. Oproti chybám náhodným, chyby systematické ovlivňují správnost každého měření. Zkreslují výsledek měření zcela pravidelným způsobem – výsledek systematicky zvětšuje či zmenšuje, a to při libovolném počtu opakovaných měření. Jsme schopni určit, z jakých příčin soustavné chyby vznikají, proto můžeme odhadnout jejich velikost, a tím eliminovat výslednou chybu měření [9].

Systematická chyba měření je uváděna jako složka chyby měření, která zůstává během měření konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem [8]. Matematický zápis systematické chyby měření [9]:

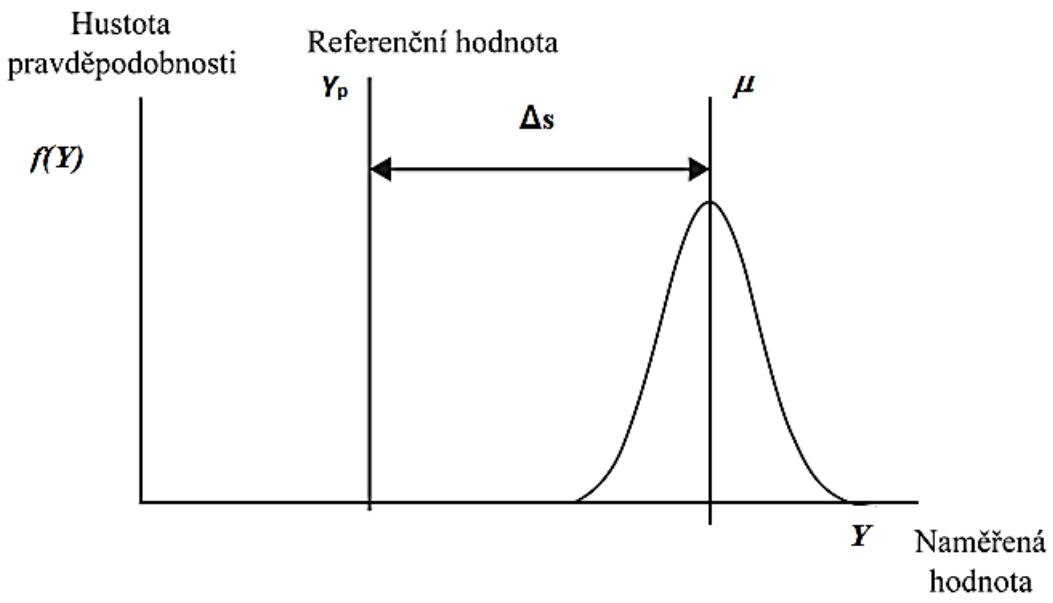
$$\Delta_S = \mu - Y_P \,, \tag{4.3}$$

kde je:

μ střední hodnota měřené veličiny,

Y_P konvenční hodnota měřené veličiny.

Na obrázku 4.3 je znázorněno grafické vyjádření systematické chyby měření dané veličiny.



Obr. 4.3 Grafické vyjádření systematické chyby měření [9].

Hrubé chyby

Jsou to chyby měření zpravidla viditelné a snadno odstranitelné, vznikají omylem při odečtení nebo zapsání údaje naměřené hodnoty, v případě, že měřící aparatura přestala správně pracovat, při nesprávném experimentálním uspořádání a nastavení pokusu atd. Naměřená hodnota zatížená touto chybou se výrazně liší od ostatních hodnot. Měření zatížené touto chybou se ze zpracování výsledků vylučuje – zamezení zkreslení výsledků měření [9].

Všechny tyto chyby se mohou při měření vyskytovat současně a je třeba realizovat jejich analýzu, identifikaci a kvantifikaci, aby bylo možné rozeznat, jakou měrou ovlivňují konečný

výsledek. Tento typ chyby měření je nutné v metrologické praxi zcela vyloučit. Hrubá chyba je naprosto nepřípustná a platí zásada, že dobrý metrolog nesmí udělat hrubou chybu [9].

Eliminace chyb měření

Systematickou chybu eliminujeme pomocí korekce, kterou přičteme k nekorigovanému výsledku měření. **Korekce má hodnotu systematické chyby, ale opačné znaménko**. Eliminace je pouze částečná, protože neznáme přesnou střední hodnotu, ani pravou hodnotu veličiny [9].

Náhodná chyba může nabývat při opakovaném měření s vysokou pravděpodobností maximálních hodnot plus nebo mínus 3s (směrodatné odchylky). Snížit ji můžeme tak, že výsledek měření vypočítáme jako aritmetický průměr z naměřených hodnot za podmínek opakovatelnosti. Při vlastním měření je nutné dodržet všechny podmínky opakovatelnosti [9].

Pro stanovení přesnosti měření v nanometrologii je nezbytně nutné provést soubor experimentů, jejichž výsledkem je statistický soubor, který splňuje požadavky na přesnost měření (nejistota měření), správnost měření (systematická chyba), preciznost měření (podmínky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti) [9].

V této disertační práci je vytvořen postup pro stanovení nejistoty měření na přístroji nano-CMM NMM-1. Samotná měření byla prováděna z důrazem na dosažení co možná nejmenší systematické chyby, při maximálním možném počtu provedených měření. Při vyhodnocování výsledků měření je provedena korekce výsledných hodnot od vlivů snímacího systému nano-sondy Gannen XP a teplotního driftu během měření. Vlastní měření na přístroji nano-CMM NMM-1 je tedy nutné provést v souladu s podmínkami opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření.

Opakovatelnost a reprodukovatelnost

Jsou pojmy, kterými vyjadřujeme přesnost měření za jasně daných podmínek.

Opakovatelnost měření je uváděna jako preciznost měření za souboru podmínek opakovatelnosti měření [8]. Tyto podmínky lze shrnout jako - stejné měřidlo, stejný operátor, stejné podmínky okolního prostředí, stejný postup měření, na stejném objektu, v krátkém časovém úseku.

Reprodukovatelnost měření je uváděna jako preciznost měření za souboru podmínek reprodukovatelnosti měření [8]. Podmínky reprodukovatelnosti zahrnují použití různých postupů měření za různých podmínek při opakovaných měřeních jednoho objektu.

4.1.3 Hodnocení výsledků měření

Odpovídající hodnocení výsledků měření je nedílnou součástí metrologické praxe. Pro snadnější objasnění problematiky lze použít obrázek 4.4. Nutností je znalost specifikace použití přístroje a reálných podmínek, ve kterých přístroj pracuje. Samotné vyhodnocení výsledků měření závisí taktéž na požadavcích na měřicí přístroj, lidově řečeno: „Co vlastně od přístroje očekáváme a s jakou přesností jej chceme používat?“

Na obrázku 4.4 je znázorněno grafické vyjádření vztahů mezi precizností, správností, přesností a nejistotou měření dané veličiny. Rozdíl mezi měřenou hodnotou veličiny a referenční hodnotou veličiny (etalonu) je nazýván chybou měření (Total error) a skládá se ze dvou základních částí –

systematické a náhodné chyby, což je znázorněno v levé části obrázku 4.4. V metrologické praxi často místo samotných chyb pracujeme s odhadem chyb jako výkonnostní charakteristikou [10].

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.

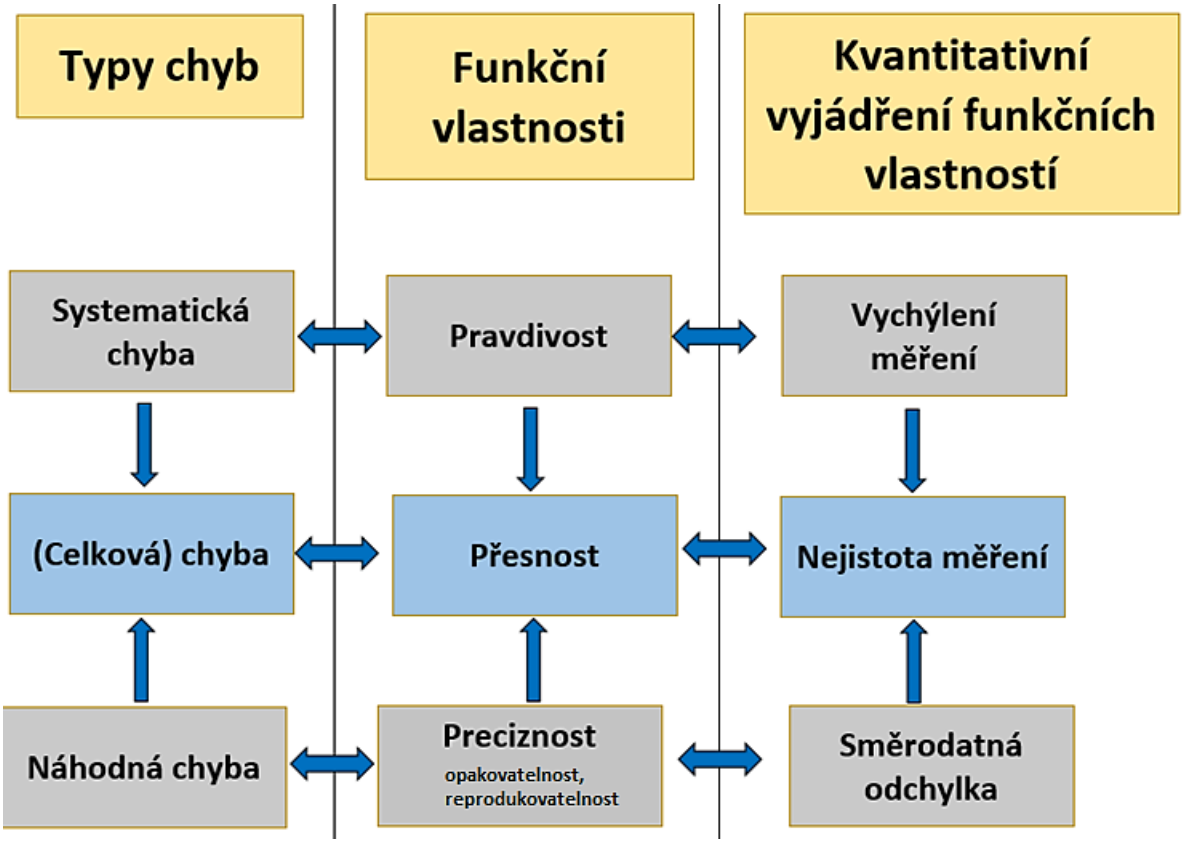
Pro získání "pravé" přesnosti měření bychom museli udělat nekonečný počet opakovaných měření. Existují různé typy přesnosti měření, v závislosti na podmínkách, za kterých je stanovena přesnost, např. opakovatelnost, reprodukovatelnost.

Přesnost měření tedy zahrnuje pravdivost i preciznost a považuje se za popis úplné chyby měření [10].

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 preciznosti.

Tyto dva prvky lze zahrnout do aparátu odhadu nejistoty měření, který lze považovat za kvantitativní vyjádření přesnosti měření [10].



Obr. 4.4 Vztah mezi přesností měření a nejistotou měření [10].

Stanovení přesnosti měření je chápáno jako komplexní problematika, která se opírá o potřebu dosažení co nejmenší chyby měření, vyhodnocení nejistoty měření dané veličiny za dodržení zejména podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Tato inovovaná aplikace popsaná v této kapitole byla zvolena jako vhodná pro stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 za dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Ke kvantifikaci přesnosti měření je v disertační práci použita nejistota měření. Dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti je doloženo pomocí statistického vyhodnocení.

4.2 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 přetechnizovaném 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 [7, 80]. Následující text je věnován problematice metrologické návaznosti, kalibraci měřicích přístrojů v oboru měření délky [7].

4.2.1 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 nepřerušený řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření [8]. Nesporným důvodem ke stanovení přesnosti CMM je také bouřlivý vývoj měřicích přístrojů v posledních třech desetiletích. Přístroje jsou konstruovány a řízeny v sestavách s výpočetní technikou a k získání výsledku měření dochází rovněž za aktivní účasti výpočetního softwaru, kde úloha metrologa postupně přechází do polohy operátora měřicího systému, aniž by ten mohl ovlivňovat indikaci, ze které je výsledek měření získáván automaticky [7]. Metrologická návaznost se v souladu s právním prostředím v České republice [5] zajišťuje pomocí kalibrace. Zásady kalibrace měřicích přístrojů jsou popsány v kapitole 4.5.

S výše uvedenou citací zdroje [7] lze v obecném slova smyslu souhlasit, zejména pokud bereme na zřetel zaběhnutou praxi v průmyslových podnicích. Jinak tomu může být v některých akreditovaných kalibračních nebo primárních kalibračních laboratořích. U těchto subjektů může nastat požadavek na možnost ovlivnění *sw* parametrů CMM, které je použito v systému metrologické návaznosti etalonů a pracovních měřidel. Je tomu tak např. v laboratořích odd. Technické délky na ČMI OI Praha, kde pracovníci mohou aktivně ovlivňovat měřicí řetězec realizovaný na CMM SIP a Werth, tím že mají oprávnění vstupovat do *sw* knihoven jinak nepřístupných souborů.

Podobně je tomu tak i v případě nano-CMM NMM-1 v laboratoři ČMI OI v Brně, kde sice není využíváno aktivního vstupu do nastavení řídícího *sw* přístroje, ale je zde vznesen požadavek na detailní posouzení měřicího systému nano-CMM NMM-1 z kvalitativního hlediska pro jeho použití při přesném měření, zejména v systému návaznosti etalonáže.

Proto je zvolen specifický způsob řešení dané problematiky stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 při použití dotykové nano-sondy Gannen XP, který úzce souvisí se zajištěním

metrologické návaznosti tohoto přístroje. Tento způsob je dále popsán v následujících dvou podkapitolách této disertační práce.

4.2.2 Splnění podmínek opakovatelnosti měření a reprodukovatelnosti měření

Měření zvolených parametrů rubínových kuliček proběhlo na pracovištích ČMI Brno a CEITEC Brno. Bylo 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 precitnosti měření na nano-CMM NMM-1 i jiných přístrojích.

4.2.3 Kvantifikace přesnosti měření pomocí nejistoty měření

V souladu s popisem problematiky uvedeném v kapitole 4.1 bylo v disertační práci zvoleno řešení, kdy byl aparát stanovení nejistoty měření 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 byly použity stanadardní nástroje, které splňovaly nároky na ně kladené v závazných dokumentech [3,5, 8,11,14,20].

4.3 NÁSTROJE POUŽITÉ KE STANOVENÍ PRECIZNOSTI MĚŘENÍ

Pro stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 jsou zvoleny specifikované podmínky preciznosti měření za dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. K tomuto je použit následující postup.

4.3.1 Kontrola odlehlých hodnot

Před samotným dosazením do dříve uvedených rovnic a výpočtem složek nejistoty měření bylo nutné naměřené hodnoty zkontrolovat. V souladu se zněním normy ČSN ISO 5725-2 [31] se nejprve provede vyloučení odlehlých hodnot. Odlehlé hodnoty se zjistí pomocí Grubbsova testu, který je v uvedené normě popsán. Vlastní testování se provádí v programovém prostředí Minitab, ve kterém je obsažen modul pro provádění testů odlehlých hodnot právě pomocí Grubbsova testu. Testy standardně probíhají na hladině významnosti α=0,05. Příklad prezentace výsledků testování je uveden v kapitole 5.6, kde na obrázcích 5.23 a 5.24 jsou uvedeny výsledky testu pro hodnoty kuličky o jmenovitém průměru d = 3 mm.

Po vyloučení všech neplatných měření se provádí základní statistické vyhodnocení, které se skládá z určení následujících statistických parametrů:

4.3.2 Použité statistické nástroje

Pro statistické zpracování souboru naměřených hodnot se používají parametry: rozpětí naměřených hodnot R dle vztahu (4.1) a výběrového průměru ze všech měření dle vztahu [11, 42]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \ . \tag{4.4}$$

Výběrová směrodatná odchylka ze všech měření dle vztahu (4.2). Variační koeficient, který je charakteristikou variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny [24]:

$$v = \frac{s_y}{\bar{y}} 100 [\%], \tag{4.5}$$

kde s_y je výběrová směrodatná odchylka a $\bar{y}$ je výběrový průměr z naměřených hodnot.

Korelace znamená vzájemný vztah mezi znaky či hodnotami *x* a *y*. Její míru vyjadřuje korelační koeficient, který může nabývat hodnot v intervalu od -1 až po +1. Pokud je výsledek vztahu (4.6) [24] kladný, značí přímou lineární závislost hodnot *y* na hodnotách *x*. Při výsledné hodnotě korelačního koeficientu blížícímu se hodnotě +1 můžeme prohlásit, že dva vzorky *x* a *y* jsou přímo závislé. Naopak při hodnotě blížící se k nule by oba vzorky nebyly ve vzájemné lineární závislosti, byly by neporovnatelně rozdílné. Hodnota korelace -1 by nám označila oba vzorky jako nepřímo závislé, jedná se o tzv. antikorelaci [24].

$$k_r = \frac{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}_1)}{s(x)s(y)}, \tag{4.6}$$

kde je:

k_r koeficient korelace,

n počet měření,

x_i naměřená hodnota z měřicího systému č. 1,

y_i naměřená hodnota z měřicího systému č. 2,

$\bar{x}$ aritmetický průměr z naměřených hodnot měřicího systému č. 1,

$\bar{y}_1$ aritmetický průměr z naměřených hodnot měřicího systému č. 2,

$s_{(x)}$ výběrová odchylka z naměřených hodnot měřicího systému č. 1,

$s_{(y)}$ výběrová odchylka z naměřených hodnot měřicího systému č. 2.

- Dodržení podmínek opakovatelnosti

Směrodatná odchylka opakovatelnosti vychází ze vztahu (4.2) a jedná se o výběrovou směrodatnou odchylku výsledků měření získaných za podmínek opakovatelnosti [31]:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{ir} - \bar{y}_r\right)^2}. \tag{4.7}$$

Variační koeficient opakovatelnosti slouží k porovnání souborů dat, které mají různý aritmetický průměr. Vypočítá se jako podíl směrodatné odchylky opakovatelnosti s_r a aritmetického průměru všech měření $\bar{y}_r$ dle rovnice, která vychází ze vztahu (4.5) [31]:

$$v_r = \frac{s_r}{\bar{y}_r} 100 [\%]. \tag{4.8}$$

Mez opakovatelnosti r je hodnota, o které lze s pravděpodobností 95% (P = 0,95) tvrdit, že pod ní bude ležet nebo jí bude rovna absolutní hodnota rozdílu mezi dvěma výsledky měření získanými za podmínek opakovatelnosti. Vypočítá se ze vztahu [31]:

$$r = f_{(n)} s_r \,, \tag{4.9}$$

kde $f_{(n)}$ je součinitel kritického rozpětí a pro počet měření n = 10 je $f_{(n)}$ = 4,5 [31]. Přijatelnost výsledků porovnávaných souborů naměřených hodnot získaných za podmínek opakovatelnosti má označení CD_r a je za podmínek kdy není specifikována mezilaboratorní variabilita dán vztahem [31]:

$$CD_r = 2{,}8 s_r \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{n+1}{n}\right)} \,. \tag{4.10}$$

4.3.4 Dodržení podmínek reprodukovatelnosti

Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti vychází ze vztahu (4.2) a jedná se o výběrovou směrodatnou odchylku výsledků měření získaných za podmínek reprodukovatelnosti [31]:

$$s_R = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{iR} - \bar{y}_R\right)^2} \,. \tag{4.11}$$

Variační koeficient reprodukovatelnosti slouží k porovnání souborů dat, které mají různý aritmetický průměr. Vypočítá se jako podíl směrodatné odchylky reprodukovatelnosti s_R a aritmetického průměru všech měření $\bar{y}_R$ dle rovnice, která vychází ze vztahu (4.5) [31]:

$$v_R = \frac{s_R}{\bar{y}_R} 100 [\%] \,. \tag{4.12}$$

Mez reprodukovatelnosti R je hodnota, o které lze s pravděpodobností 95% (P = 0,95) tvrdit, že pod ní bude ležet nebo jí bude rovna absolutní hodnota rozdílu mezi dvěma výsledky měření získanými za podmínek reprodukovatelnosti. Vypočítá se ze vztahu [31]:

$$R = f_{(n)} s_R \,. \tag{4.13}$$

Přijatelnost výsledků porovnávaných souborů naměřených hodnot získaných za podmínek reprodukovatelnosti má označení CD_R a je za podmínek kdy není specifikována mezilaboratorní variabilita dán vztahem [31]:

$$CD_R = 2{,}8 s_R \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{n+1}{n}\right)} \,. \tag{4.14}$$

Jsou-li za podmínek opakovatelnosti nebo reprodukovatelnosti porovnávány dvě skupiny výsledků měření charakterizovaných počty výsledků měření n_1 , n_2 a středními hodnotami $\bar{x}$, $\bar{y}$, potom pro přijatelnost výsledků platí, že kritický rozdíl CD je menší než absolutní hodnota rozdílu dvou skupin výsledků [31]. Platí tedy:

$$\left|\bar{x} - \bar{y}\right| \le CD \,. \tag{4.15}$$

Toto základní statistické zpracování souboru naměřených hodnot sloužilo k odstranění nežádoucích hodnot měření, k ověření splnění podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření souborů korelovaných dat a tím splnění požadavku pro kvantifikaci přesnosti měření pomocí nejistoty měření. Veškeré názvosloví bylo specifikováno v souladu s mezinárodním metrologickým slovníkem VIM3 [6] a normativních dokumentů [31].

4.4 STANOVENÍ ROZŠÍŘENÉ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Dle definice [8, 11, 14] je standardní nejistota vyhodnocená způsobem A stanovena výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny. V praxi to znamená, že pokud je proveden opakovaný odečet hodnoty neměnné měřené veličiny a existuje měřicí přístroj s dostatečným rozlišením, vznikne určitý rozptyl naměřených hodnot.

Předpokládáme, že se během tohoto opakovaného měření významným způsobem nemění ani daná měřená veličina, ani ovlivňující faktory, které na dané měření působí. Dále se předpokládá, že vhodnou mírou nejistoty typu A je výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru. (Výběrová odchylka proto, že naměřené hodnoty y představují určitý malý výběr z prakticky neomezeného množství hodnot, kterých veličina může nabývat. Výběrového průměru proto, že hodnota, která se uvádí jako výsledek měření, se získá výpočtem aritmetického průměru z opakovaně provedených odečtů.) [8]. Postupy určování kombinovaných a rozšířených nejistot se budou lišit podle toho, zda se jedná o přímé nebo nepřímé měření. Měření na přístroji nano-CMM NMM-1 je měření přímé, je podrobněji popsáno v dalších částech této kapitoly.

4.4.1 Stanovení standardní nejistoty vyhodnocované způsobem A

Standardní nejistota typu A (u_a) při přímém měření se stanoví z n opakovaných a nezávislých měření stejné hodnoty a za stejných podmínek. Odhad měřené hodnoty veličiny Y je dán výběrovým průměrem z naměřených hodnot y_1, y_2, ... y_n. Výběrový průměr se určí ze vztahu (4.4) [11,24,36,42]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \,.$$

Výběrová směrodatná odchylka s_y se vypočítá z naměřených hodnot (náhodný výběr) dle vztahu (4.2):

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \,.$$

Výběrová směrodatná odchylka s_y charakterizuje rozptýlení naměřených hodnot kolem výběrového průměru $\bar{y}$. Výběrový průměr udává odhad hodnoty měřené veličiny a protože se určuje z náhodného výběru, má náhodný charakter. To znamená, že např. při čtyřech opakováních bude náhodná chyba měření 2krát menší než směrodatná odchylka $s_{\bar{y}}$, která je dána vztahem [11,24,36,42]:

$$s_{\bar{y}} = \frac{s_y}{\sqrt{n}} \,. \tag{4.16}$$

Výběrová směrodatná odchylka výběrových průměrů $s_{\bar{y}}$ charakterizuje rozptyl hodnot výběrových průměrů, a je proto zvolena jako míra nejistoty výběrového průměru $\bar{y}$ (míra nejistoty odhadu hodnoty veličiny Y). Standardní nejistota typu A je v tomto případě rovna směrodatné odchylce výběrových průměrů [11, 24, 36, 42]:

$$u_A = s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{n-1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} = \frac{s_y}{\sqrt{n}} \tag{4.17}$$

Pro platnost tohoto vztahu je vhodné, aby počet odečtených měření byl větší než 10 ($n \geq 10$), ze kterých se standardní nejistota typu A vypočítá. Není-li možné dodržet tuto podmínku, je nutno provést doplňkovou korekci pro zohlednění malého počtu opakovaných měření danou vztahem [11, 24, 36, 42]:

$$u_A(y) = k_s s_{\bar{y}}\,, \tag{4.18}$$

kde k_s je koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření n a vychází ze Studentova rozdělení pravděpodobnosti. Pokud nejsme schopni provézt dostatečně velký počet měření dané veličiny je možné nejistotu měření vyhodnotit způsobem B.

4.4.2 Stanovení standardní nejistoty vyhodnocované způsobem B při přímém měření

Postup pro stanovení standardní nejistoty vyhodnocované způsobem B je založen na stanovení nejistoty jiným než statistickým vyhodnocením série pozorování. V tomto případě vychází stanovení nejistoty z určitých odborných znalostí a racionálního úsudku pracovníka, který měření provádí a nejistoty následně vyhodnocuje. Tyto nejistoty mohou být odvozeny na základě [11, 36, 42]:

- údajů a zkušeností z dříve provedených měření,
- zkušeností s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a měřicího vybavení, popřípadě jejich obecné znalosti,
- údajů výrobce měřicí techniky,
- údajů uváděných v kalibračních listech,
- analýz použité metody měření,
- nejistot referenčních údajů převzatých s příruček a jiných dokladů,
- podmínek prostředí při vlastním měření.

Při určování nejistoty způsobem B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů $u_B(z_j)$. Je-li známa maximální odchylka j-tého zdroje nejistoty $z_{j\,\max}$, určí se nejistota $u_B(z_j)$ podle následujícího vztahu [11,24,36,42]:

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k} = \frac{z_{j\max}}{\chi}\,, \tag{4.19}$$

Kde U je rozšířená nejistota měření, k je koeficient rozšíření standardní nejistoty měření a χ je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistot řídí, pro normální

(Gaussovo) rozdělení je $k = 2$, popř. 3, pro rovnoměrné rozdělení $\chi = \sqrt{3}$ atd. Výsledná nejistota se určí metodou B pro p zdrojů z_1, z_2, ... z_j, z_p dle následujícího vztahu [11,24,36,42]:

$$u_B(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} A_j^2 u_B^2(z_j)}\,, \tag{4.20}$$

kde: $u_B(z_j)$ jsou nejistoty jednotlivých zdrojů a A_j jejich součinitele citlivosti. Touto úpravou se nejistotě typu B dostává charakteru směrodatné odchylky a jako s takovou se s ní dále pracuje.

Použití rovnoměrného rozdělení představuje přiměřené statistické vyjádření nedostatečné znalosti citlivosti vstupní (měřené) veličiny y na vliv příslušného zdroje nejistoty měření, pokud o ní nejsou známy jiné informace, než jsou např. limity její variability. Pokud ale víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu intervalu hodnot je vyšší než pravděpodobnost výskytu hodnot v krajích intervalu, může být vhodnější použití trojúhelníkového nebo normálního rozdělení. Naopak, pokud je výskyt hodnot v mezích intervalu pravděpodobnější než ve středu intervalu, může být vhodnější použití „U“ rozdělení.

4.4.3 Stanovení kombinované nejistoty a rozšířené nejistoty měření

V reálné praxi vystačíme s jedním typem nejistoty měření jen výjimečně (v případě, že nelze statisticky vyhodnotit standardní nejistotu typu A). V drtivé většině případů se stanovuje kombinovaná nejistota měření, která je nejčastěji výsledkem kombinace obou typů standardních nejistot měření A i B, popřípadě zahrnutí dílčích složek nejistoty měření s využitím Gaussova zákona šíření nejistoty měření. Máme-li tedy měřenou veličinu popsanou modelem $Y=f(Y_1,Y_2,\ldots,Y_n)$, pak standardní nejistota pro y, kde y je odhad měřené veličiny Y a výsledek měření se tedy stanovuje příslušnou kombinací standardních nejistot odhadů vstupů $y_1,y_2,\ldots y_n$. Tato kombinovaná standardní nejistota odhadu y je označena $u_c(y)$ a je to kladná hodnota druhé odmocniny kombinovaného rozptylu, který se pro nekorelované vstupní veličiny získá ze vztahu [11, 24, 36, 42]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial y_i}\right)^2 u^2(y_i)}\,. \tag{4.21}$$

Tato rovnice se spolu s jejím tvarem pro korelované veličiny se nazývá Gaussův zákon šíření nejistot. Jak již bylo v textu uvedeno, výše uvedeným postupem se získá kombinovaná standardní nejistota. Označení „standardní“ vyjadřuje, že při skládání této nejistoty byly použity hodnoty směrodatných odchylek naměřených hodnot.

Za určitých podmínek (centrální limitní věta) je možno považovat rozdělení takto určené nejistoty za přibližně normální. Z toho je zřejmé, že takto vypočtená nejistota měření pokrývá asi 68,3% možných variant výsledků. Jinými slovy až 1/3 výsledků měření se může ocitnout mimo takto stanovené pásmo nejistot.

Z metrologického hlediska je taková situace nepřípustná, proto je nutné přistoupit k vynásobení standardní nejistoty měření koeficientem rozšíření, který nám umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. V praxi se nejčastěji používá zjednodušený postup určení koeficientu rozšíření dohodou pro určitou odhadovanou pravděpodobnost pokrytí výsledku měření. Z vlastností normálního rozdělení jsou doporučeny tyto základní koeficienty:

$k = 2$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 95,45%,

$k = 2{,}58$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 99,01%,

$k = 3$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 99,73%.

Rozšířenou nejistotu měření vypočteme ze vztahu [11, 36, 42]:

$$U = k \times u_c(y). \tag{4.22}$$

Z výše uvedeného textu je patrné, že ke kvantifikaci přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 je možné použít standardní způsob stanovení nejistoty měření v souladu s platnými dokumenty [3, 5, 11, 14, 40]. Tato skutečnost je důležitá z pohledu budoucího využití nově vyvinutého postupu v prostředí akreditované kalibrační a zkušební laboratoře.

4.5 KALIBRACE MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ

S pojmem kalibrace se běžně setkáváme v oblasti použití pracovních měřidel, měřicích přístrojů a také etalonů, v souladu s platným zněním Zákona o metrologii [5]. Nejinak je tomu i v oblasti nanometrologie, kdy je kalibrace jednou ze základních prvků systému metrologické návaznosti.

V následujícím textu je citována úplná definice pojmu „kalibrace“ tak, jak je uvedena v TNI 01 0115:2009 Mezinárodní metrologický slovník [8]:

„Kalibrace je činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace“.

Poznámka 1.

Kalibrace smí být vyjádřena údajem, kalibrační funkcí, kalibračním diagramem, kalibrační křivkou nebo kalibrační tabulkou. V některých případech se smí skládat ze součtových nebo násobných korekcí indikace s přidruženou nejistotou měření [8].

Poznámka 2.

Kalibrace nemá být zaměňována s justováním měřicího systému, často mylně nazývaným „samokalibrace“, ani s ověřením kalibrace [8].

Poznámka 3.

Samotný první krok ve výše uvedené definici je často chápán jako kalibrace“ [8].

Příklad:

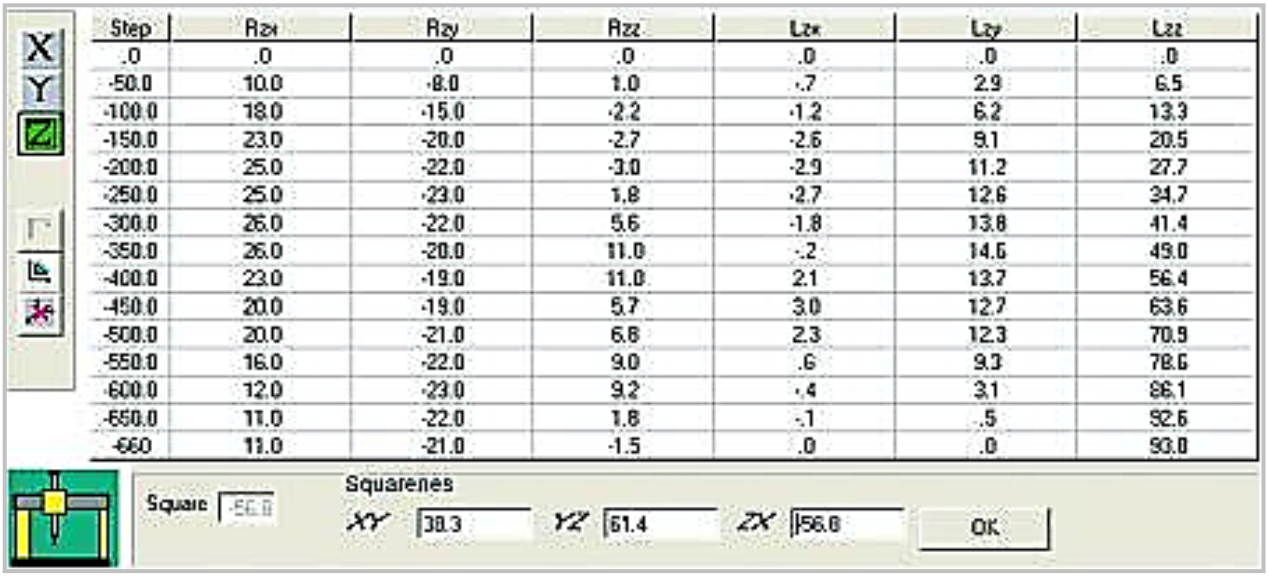
U běžného souřadnicového měřicího stroje (Coordinate Measuring Machine – dále jen CMM) jsou většinou kalibrovány jednotlivé měřicí komponenty, abychom v konečné fázi z informací od všech dílčích indikací dostali jeden výsledek měření, kterým jsou v nejjednodušším případě souřadnice bodu v měřicím prostoru nebo rozměr měřeného prvku, včetně rozšířené nejistoty [7]. Obdobně lze k dané problematice přistupovat v oblasti nanometrologie, konkrétně v případě nano-CMM NMM-1. Samozřejmě je nutné respektovat specifika vycházející z konstrukčních odlišností nano-CMM NMM-1 oproti standardním průmyslovým CMM.

4.5.1 Zásady kalibrace standardního CMM

Souřadnicový měřicí stroj je měřicí přístroj a současně splňuje i klasifikaci měřicího systému, protože jsou v něm zakomponovány tři a více odměřovacích systémů s vlastními indikacemi, zpravidla i snímači teploty a dalšími pomocnými systémy podle konstrukce CMM [7].

V dalším popisu problematiky kalibrace CMM se omezíme jen na veličinu délky, jejíž měření je hlavní činnost CMM a např. měření teplot je podpůrné k dosažení vyšší přesnosti měření. Kalibrací CMM v prvém kroku se zjistí chyby vedení snímacího systému ve směru tří souřadných os v závislosti na poloze uvnitř rozsahu každé souřadnice. Tyto chyby souvisí s tím, že mechanismus má obecně šest stupňů volnosti v jednom směru pohybu [7].

Jde o celkem šest nelineárních funkcí, které jsou získány experimentálně za použití unikátních etalonů a kalibračních postupů. Například v ose x to jsou to tři funkce rotačních chyb R_{xx}, R_{xy} a R_{xz}, dvě funkce translačních chyb T_{xy} a T_{xz} a konečně funkce nelinearity měřítka L_{xx}. Podle rozsahu v příslušné ose se tato měření provedou s krokem 10, 20, 50, 100 nebo 200 mm. Větší krok se zpravidla již nepoužívá. Pro CMM s rozsahem 6 000 mm v nejdelší ose, na kterých se proměřují celé karoserie aut, to standardně obnáší desítky hodnot. Po zjištění chybových funkcí ve směru všech tří souřadných os je třeba ještě zjistit chyby pravoúhlosti vedení φ_{xy}, φ_{yz} a φ_{zx}, protože výpočetní software provádí matematické výpočty v pravoúhlém euklidovském prostoru, které jsou proti výpočtu v obecném nepravoúhlém prostoru značně jednodušší [7].



Step	Rzx	Rzy	Rzz	Lzx	Lzy	Lzz
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-50.0	10.0	-8.0	1.0	-.7	2.9	6.5
-100.0	18.0	-15.0	-2.2	-1.2	6.2	13.3
-150.0	23.0	-20.0	-2.7	-2.6	9.1	20.5
-200.0	25.0	-22.0	-3.0	-2.9	11.2	27.7
-250.0	25.0	-23.0	1.8	-2.7	12.6	34.7
-300.0	26.0	-22.0	5.6	-1.8	13.8	41.4
-350.0	26.0	-20.0	11.0	-.2	14.6	49.0
-400.0	23.0	-19.0	11.0	2.1	13.7	56.4
-450.0	20.0	-19.0	5.7	3.0	12.7	63.6
-500.0	20.0	-21.0	6.6	2.3	12.3	70.9
-550.0	16.0	-22.0	9.0	.6	9.3	78.6
-600.0	12.0	-23.0	9.2	-.4	3.1	86.1
-650.0	11.0	-22.0	1.8	-.1	.5	92.6
-660	11.0	-21.0	-1.5	.0	.0	93.0

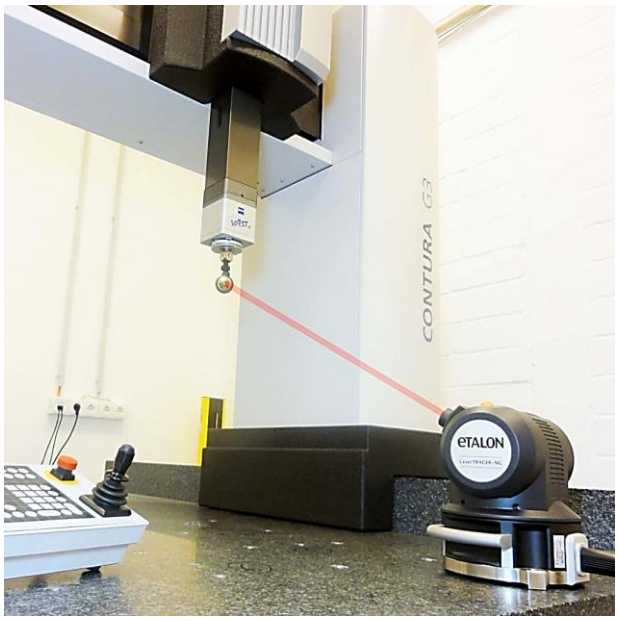
Obr. 4.5 Náhled mapy korekcí portálového CMM pro osu z včetně konstant ke korekci chyb pravoúhlosti v rovinách xy, yz a zx [7].

Na obrázku 4.5 je příklad tabulky pro šest funkcí v závislosti na zvoleném kroku portálového CMM s údaji ke korekci v ose z včetně tabulky údajů korekce chyb pravoúhlosti všech tří souřadných os. Tabulky pro osy x a y jsou obdobné [7].

Při měření s CMM v praxi dojde v místě sejmutí snímaného bodu na měřeném objektu, software zaznamená polohu v mapě korekcí podle jednotlivých indikací, polohu porovná k nejbližším osmi diskrétně korigovaným bodům a zobrazí výsledek měření (snímaný bod se nachází uvnitř některého kvádru, na které je měřicí prostor korekční mapou rozdělen). Účast

snímacího systému je při měření neopomenutelná a s jeho vyloučením nelze provádět měření ani kalibraci. Provedená úplná kalibrace CMM ve dvou krocích ještě nedává záruku, že výsledky měření splňují požadavky metrologické návaznosti, CMM je metrologicky způsobilý a je ve shodě se specifikací [7].

Je tedy zřejmé, že proces kalibrace CMM je obsáhlý proces, který obnáší potřebu zajištění potřebných etalonů a vhodných postupů, které umožní provést kalibraci a vyhodnocení kalibrace v potřebném rozsahu a s přiměřenou hodnotou nejistoty měření [80, 82, 83]. K vlastní kalibraci CMM se nejčastěji používají hmotné délkové etalony, nejčastěji ocelové koncové měrky, které jsou uvedeny na obrázku 4.6. Koncové měrky jsou metrologicky navázány v souladu s mezinárodní normou ČSN EN ISO 3650 [16]. Použití koncových měrek je vhodné zejména pro kalibrace CMM vybavených dotykovým snímacím systémem a je uvedeno na obrázku 4.6 vlevo.



Obr. 4.6 Ukázka kalibrace portálového CMM pomocí koncových měrek [7] vlevo a kalibrace portálového CMM pomocí přístroje lasertracer Etalon [17] vpravo.

V závislosti na měřicím rozsahu CMM, zejména u větších hodnot rozsahu než 1m, je vhodné použít jako etalon průmyslový laserinterferometr nebo jiný vhodný přístroj např. lasertracer, který je uveden na obrázku 4.6 vpravo. V případě kalibrace multisenzorových CMM je vhodné kombinovat různé typy použitých etalonů, opět v závislosti na konstrukci CMM a jeho rozsahu. Pro přístroje vybavené optickým snímáním se v běžné praxi používají skleněná čárková měřítka, skleněné mřížky, případně jejich kombinace s průmyslovým laserinterferometrem, který je zobrazen na obrázku 4.7.

Obr. 4.7 Ukázka kalibrace CMM s optickým snímáním pomocí laserinterferometru Renishaw XL80 [autor].

Ve všech popsaných případech se jedná o vysoce sofistikované, ale vzhledem k měřicímu rozsahu běžných CMM, rozměrově náročné metody kalibrací. Vyžadují dostatečný prostor pro ustavení použitých etalonů v požadovaných orientacích, které v podmínkách použití při kalibraci měřicích přístrojů v nanometrologii nejsou realizovatelné. Obdobné omezení platí i z hlediska hmotnosti používaných etalonů. Tato omezení vylučují provedení kalibrace nano-CMM standardními postupy, které se využívají v případě průmyslových CMM. V případě použití XL80 by byly nutné zásahy do konstrukce nano-CMM NM-1 a úpravy řídícího *sw*, které jsou v běžném uživatelském prostředí neřešitelné.

4.5.2 Zásady kalibrace CMM v nanometrologii

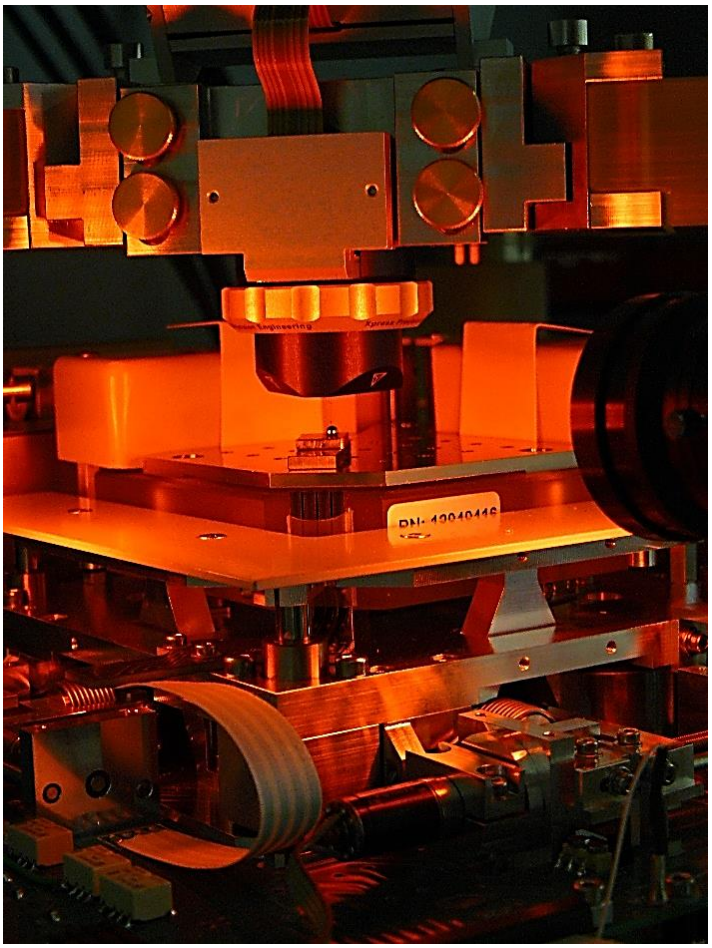
Ještě přísnější nároky a specifikace na preciznost kalibrace lze vysledovat v oblasti nanometrologie, kde se využívají souřadnicové měřicí přístroje nazývané nano-CMM. V principu je možné vysledovat nutnost použití stejných kalibračních metod, minimálně z hlediska platnosti stejných normativních dokumentů a závazných postupů [3, 11, 14, 20]. Nicméně konstrukční odlišnosti přístrojů nano-CMM, jejich menší rozměry a požadovaná vyšší přesnost měření, kladou na proces kalibrace zcela jiné, vyšší nároky. Tyto nároky nelze za použití běžně používaných etalonů a kalibračních postupů pro CMM v oblasti nanometrologie splnit. Proto je v rámci této disertační práce přistoupeno k návrhu, vývoji, výrobě a aplikaci vhodného hmotného etalonu délky, který je použitelný pro kalibraci nano-CMM. V první fázi řešení cílů této práce se jednalo o samostatné rubínové kuličky, v další fázi o jejich aplikaci na přípravek, který se později stal základem pro plošný etalon s kuličkami (dále jen ball plate).

Dále může být problémem faktická neexistence dostatečně přesného etalonu, respektive etalonu, který má provedenou kalibraci s dostatečně nízkou hodnotou nejistoty měření. Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje situaci v oblasti nano-CMM je, na rozdíl od běžných CMM, poměrně široké spektrum snímacích systémů. V případě běžných CMM se z velké části jedná o dotykové

snímací systémy, které jsou v menší míře doplněny CMM s optickým snímáním, respektive multisenzorovými přístroji. Naopak nano-CMM jsou často vybaveny snímacími systémy na principu AFM mikroskopů, Laser-fokus senzorů a interferometrických snímačů.

V případě použití těchto „bezdotykových“ snímacích metod se nemusí jednat o plnohodnotné měření ve 3D prostoru jak je znázorněné na obrázku 4.5. V těchto případech se často posuv v osách *x* a *y* používá pouze k najetí na měřený prvek nebo oblast, ve kterém je vlastní „nano“ měření realizováno.

V případě použití dotykového snímacího systému, vybaveného miniaturní kuličkou, se ovšem jedná o plnohodnotné měření ve 3D prostoru [20, 53, 83]. Proto je také nutné v souladu s předchozím popisem problematiky kalibrace nano-CMM NMM-1 vybavených dotykovým snímáním (obr. 4.8) přistupovat. Dále je vhodné rozlišovat mezi přístupy k vlastní kalibraci a možnostmi samotných výrobců nano-CMM a jejich uživatelů, kteří často nemají takové technické vybavení, popř. znalosti, které by uživatelům umožňovaly zásahy do konstrukce nano-CMM, respektive upravovat řídící *sw* přístroje. Velkou roli hraje samozřejmě i ekonomická stránka problému.



Obr. 4.8 Ukázka pracovního prostoru nano-CMM NMM-1[autor].

Z těchto důvodů je nutné pro kalibraci nano-CMM NMM-1 volit užití speciálních etalonů vhodných pro použití v „nano“ měřítku snímání veličiny. Pokud tyto etalony nejsou k dispozici, je

nutné zvolit vhodnou metodu umožňující stanovení nejistoty měření, respektive přesnosti měření nano-CMM NMM-1. Jako vhodné metody v souladu s normativními dokumenty [3, 8, 11, 14, 18] a vědeckými publikacemi [6, 7, 9, 43, 45,] jsou zvoleny dvě základní metody stanovení přesnosti měření – multipoziční a substituční. Tyto metody jsou podrobně popsány v dalších částech disertační práce (kapitola 6). Před kalibrací je nutné stabilizovat podmínky prostředí v laboratoři, aby se minimalizovala změna teploty během měření. Pro získání metrologické návaznosti je nutné použít etalony, které jsou navázány (kalibrovány) na národní metrologický orgán – ČMI Brno nebo jiný zahraniční oprávněný metrologický orgán.

Standardní výpočtový aparát může být použit pro stanovení nejistoty měření při kalibraci nano-CMM NMM-1 pomocí vhodného etalonu – ball plate, jehož konstrukce je popsána v dalších částech této disertační práce (kapitola 10.2).

Jako doplňkovou metodu stanovení přesnosti měření nano-CMM NMM-1, respektive její kvantifikaci pomocí nejistoty měření nano-CMM NMM-1 lze použít metodu Monte Carlo. Základní charakteristika a princip této metody jsou taktéž popsány v kapitole 4.6.

4.5.3 Původní stav metrologické návaznosti nano-CMM NMM-1

Vzhledem ke způsobu použití uvedeného přístroje, s aspektem na typ použitých snímacích sond (kapitola 3.4), nebyl v minulosti kladen důraz na metrologickou návaznost přístroje nano-CMM NMM-1 jako celku. Byla řešena pouze návaznost jeho vlastního odměřovacího systému, který pracoval pouze v omezené oblasti, která je definována použitým snímacím systémem a velikostí měřeného objektu. Nejednalo se tak o 3D měření v pravém slova smyslu, většinou se odměřování přístroje v osách *x, y, z* používalo pouze k ustavení měřeného objektu do polohy, ve kterém bylo vlastní měření prováděno daným snímacím systémem. Výstupní hodnota z měření se realizovala prostřednictvím použitých snímačů. Jinak je tomu v případě použití dotykového snímacího systému nano-sondy Gannen XP, který slouží pouze k sejmutí snímaného bodu při kontaktu s měřeným objektem. Vlastní odměřování polohy snímaného objektu je realizováno odměřovacím systémem přístroje nano-CMM NMM-1, který je tvořen laserinterferometry.

Výrobce přístroje uvádí v technické dokumentaci [1] pouze jeho rozlišení a rozsah bez jakéhokoliv údaje o přesnosti měření, který by byl kvantifikován pomocí nejistoty měření. Ani během předávání nově instalovaného přístroje uživateli nebyl vystaven odpovídající protokol, který by splňoval nároky stanovené v normě ČSN EN ISO 17025:2015 [3]. Tato skutečnost vytváří požadavek na návrh vhodného délkového etalonu a vytvoření kalibrační metody, která pokryje celý měřicí rozsah nano-CMM. Pouze tímto způsobem lze zajistit metrologickou návaznost nano-CMM na odpovídající úrovni, která zaručí plnohodnotné stanovení přesnosti měření tohoto přístroje pro plánované použití v akreditované kalibrační laboratoři ČMI Brno.

Důvodem k zamyšlení nad tímto přístupem je předpoklad, že při použití dotykového snímání u nano-CMM se v každém bodě kontaktu snímače s měřeným objektem zobrazí akumulace chyb. Proto jsou tyto chyby uváděny jako vektor, který se skládá ze součtu vektorů geometrických chyb nano-CMM. Má systematickou a náhodnou část popisovanou s nejistotou elipsoidu [50, 51, 52] a tvoří základ pro nový koncept popsaný v odborné literatuře - vektorový model přesnosti měření souřadnic [53, 54, 55]. Rovněž je s tímto konceptem spojen problém stanovení nejistoty měření.

To se provádí pomocí kompenzačních algoritmů používaných k výpočtu ideálních prvků, tvarových dílů měřených ve více bodech. Nepochybně je třeba rozlišovat příspěvky Lotze, Hartmanna a Teichmanna [56-63], zejména jejich vývoj této problematiky pro 2D měření, které byly následně upraven autory pro 3D měření [54, 70]. Tento trend hodnocení přesnosti měření je také reprezentován maticovou metodou vyvinutou prof. Sladkem [64-69]. Tato metoda je nezávislá na způsobu snímání měřené veličiny. Může být použita jak při měření na kontaktních CMM, tak i bezkontaktních CMM, například při počítačové tomografii. V praxi se pro zajištění kalibrace používají délkové etalony s referenčními tvarovými prvky ve formě kuliček, otvorů nebo mřížky, které pokrývají co největší rozsah CMM

Důsledkem tohoto přístupu jsou moderní simulační modely, virtuální stroje, nejnovější nástroj pro odhad nejistoty, vyvinutý v LCM CUT, pomocí umělé neuronové sítě [64, 71, 72, 73] nebo metoda Monte Carlo [74, 75, 76, 77].

Dále se jeví jako důležité použít vhodný délkový etalon, který je dostatečně přesně změřen s dostatečně nízkou nejistotou měření a to nejlépe akreditovanou kalibrační metodou. Tato skutečnost, vzhledem k požadovaným rozměrům a přesnosti délkového etalonu vhodného pro použití v nanometrologii, se může stát podstatným problémem [45, 52, 81, 83], a to jak z technického, tak i ekonomického hlediska, kde se může cena vhodného etalonu vyšplhat až k částkám dosahující jednotek milionů Kč. Proto se disertační práce zabývá analýzou možností řešení použitíí kalibrovaného etalonu pro stanovení nejistoty měření, tak i metodou, která umožňuje použít etalon, který neprošel kalibračním procesem.

4.6 METODA MONTE CARLO

Při stanovení přesnosti měření na nano-CMM se nabízí využití této metody, která za jistých okolností umožní určení střední hodnoty měřené veličiny V tomto případě se jedná o průměr etalonové kuličky a nejistotu měření přístroje nano-CMM NMM-1 vybaveného dotykovou sondou Gannen XP.

Metoda Monte Carlo (dále jen MC) je vybrána jako doplňující metoda ke klasickému aparátu stanovení nejistoty měření dle GUM [14], což umožňuje simulaci mnohem vyššího počtu měření, než bylo možné reálně provést na přístroji nano-CMM NMM-1 [80, 84, 85, 86].

4.6.1 Metoda MCM – princip

Metoda MC byla formulována již ve 40. letech 20. století a svého využití se dočkala ještě v průběhu druhé světové války. Jejími zakladateli byli Stanislaw Marcin Ulman a John von Neumann, kteří v té době pracovali v americké Národní laboratoři Los Alamos, kde zkoumali chování neutronů. Především je zajímalo, jaké množství neutronů projde různými materiály (např. nádrží vody) [13].

Základní myšlenka této metody je relativně jednoduchá - chceme určit střední hodnotu veličiny, která je výsledkem náhodného děje. Vytvoří se počítačový model toho děje a po proběhnutí dostatečného množství simulací se mohou data zpracovat klasickými statistickými metodami, třeba určit aritmetický průměr a směrodatnou odchylku [12]. Velkou výhodou této metody je, že

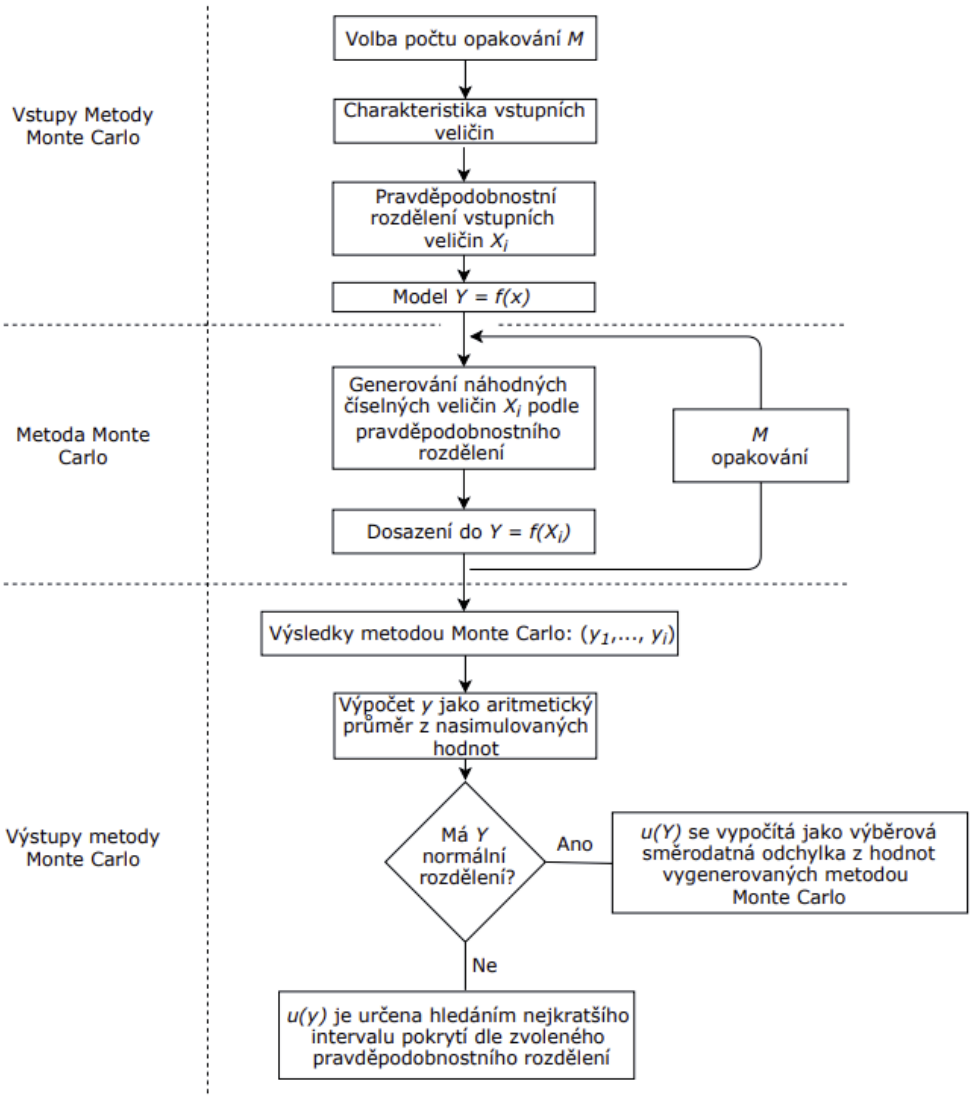
nemusíme znát vnitřní vztahy mezi výsledky jednotlivých experimentů. Postačí pouze vyjasnit soubor podmínek, při jejichž realizaci má místo vnější souvislost. Úspěch výpočtu metodou MCM je dán třemi základními faktory [25]:

- kvalitou generátoru náhodných čísel,
- výběrem správného algoritmu výpočtu,
- kontrolou přesnosti získaného výsledku.

K užití opravdu náhodných čísel v simulaci na PC je třeba vhodný hardwarový generátor, který je založen na určitých náhodných fyzikálních pokusech. Například měření šumu polovodičového přechodu. Tato metoda spočívá v digitalizaci náhodných šumů na polovodičovém přechodu. Šumy jsou zcela náhodné a po nahrání do PC je získán soubor zcela náhodných dat. Pro testování těchto generátorů se užívají různé metody, jako jsou frekvenční test, test náhodnosti výskytu [12, 25]. Například grafický test spočívá v generování náhodných dvojic čísel, které jsou graficky vynášené, a z jejich rozložení je možné stanovit náhodnost děje. Pro simulace lze také užít generátor pseudonáhodných čísel. Tyto generátory generují čísla vytvářející posloupnost, která se jeví jako náhodná. Ve skutečnosti tyto generátory využívají pro generování deterministický algoritmus. Posloupnost vygenerovaných čísel je periodická, po určité době se cyklus začne opakovat [12].

Jedno z možných využití metody MC je stanovení nejistoty měření [43]. Při určování nejistoty touto metodou je třeba vytvořit přesný matematický model měřeného děje. Po vytvoření tohoto modelu je třeba stanovit hustotu pravděpodobnosti vstupních veličin. Po určení hustoty pravděpodobnosti je třeba provést dostatečný počet simulací. Dalším krokem je zpracování vypočtených hodnot pomocí stochastických metod. Na závěr se určí nejpravděpodobnější hodnoty a nejistoty. Řešení problému metodou MCM můžeme rozdělit do tří kroků [12] v souladu s obrázkem 4.9:

1. Analýza problému a návrh modelu – z hlediska řešení problému se jedná o nejdůležitější krok. I když je MCM použitelná prakticky u všech problémů a její formulace není složitá, nalezení vhodného postupu může nezkušenému řešiteli dělat problémy.
2. Generování hodnot náhodných veličin, jejich transformace na veličiny s daným pravděpodobnostním rozdělením. Rychlost konvergence chyby výsledku k nulové hodnotě je u MCM rovna přibližně převrácené hodnotě odmocniny z počtu realizovaných pokusů M, z čehož plyne, že nepatří mezi metody nejefektivnější.
3. Statistické zpracování výsledků – hledaná hodnota je zpravidla dána některým z momentů statistických veličin, nejčastěji aritmetickým průměrem.



Obr. 4.9 Schéma postupu při použití MCM [43].

4.6.2 Návrh simulace metodou Monte Carlo

Simulace experimentálního měření, respektive určení nejistoty měření bylo provedeno po upřesnění a konečné definici matematického modelu, který optimálně popisoval vazby při měření na nano-CMM NMM-1 s využitím dotykové nano-sondy Gannen XP. Vlastní simulace byla provedena ve spolupráci z Oddělením primární etalonáže tlaku ČMI OI Brno za použití programového prostředí MatLab®.

Metoda MCM nezahrnuje pouze jednu hodnotu – např. průměr z měření, ale zkoumá chování systému pro různé hodnoty rozdělení pravděpodobnosti vstupních veličin. Tyto hodnoty se mění v blízkosti průměrné hodnoty měřené veličiny $\bar{y}$, proto může být rovnice popisující matematický model nano-CMM NNM- 1 sestavena způsobem uvedeným v kapitole 6.3. Pro takto popsaný model můžeme s úspěchem použít systém generování náhodných čísel, který vychází z konkrétního rozdělení pravděpodobnosti vstupních funkcí. Odběr vzorků je založen na generátoru čísel o obdélníkovém rozdělení pravděpodobnosti. Poté co dojde k vygenerování čísla (nebo několika čísel) o obdélníkovém rozdělení R (0,1), je možné, použitím vhodných

transformací, přijímat do modelu náhodně zvolené o jakémkoliv jiném typu rozdělení pravděpodobnosti [6,9].

Postup pro provádění transformace je popsán v dodatku GUM [14]. Pro obdélníkové rozdělení byl zvolen Wichmann – Hill generátor náhodných čísel, který prošel testem „správnosti“ a používá se také pro validaci účinku generátorů pseudonáhodných čísel. Pro pravděpodobnostní pokrytí P = 0,95 bylo zvoleno pokusů M = 10^6, které je dostatečné pro správné stanovení rozdělení pravděpodobnosti výstupní veličiny metodou MC [6]. Po vyčerpání počtu iterací M pro všechna rozdělení, byla čísla vloženy do matematického modelu. Tímto způsobem bylo dosaženo počtu M hodnot měřené (vstupní) veličiny, které na druhé straně, po provedení příslušných transformací, představuje pravděpodobnostní rozdělení výstupních veličin. Na základě tohoto modelu (funkce), bylo možné určit žádané parametry výstupní veličiny – předpokládanou hodnotu standardní nejistoty měření [6, 12, 25].

4.7 MODUL PRO RYCHLÝ VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ

Součástí disertační práce je taktéž vytvoření jednoduchého a přehledného modul pro rychlé stanovení nejistoty měření pomocí dotykové nano-sondy Gannen XP. Modul bude sloužit pro rychlé a uživatelsky jednoduché stanovení nejistoty měření v praxi metrologické laboratoře. Odpadne tak provádění časově náročných výpočtů s možností vzniku chyby.

Pro jeho přesnou specifikaci je nutné doplnění o všechny příspěvky k nejistotě měření, které jsou v rámci disertační práce identifikovány a kvantifikovány. Automatické vyhodnocování nejistot měření implementuje výsledky měření provedených experimentů a výpočtů nejistoty měření, reflektuje užívané akreditované pracovní postupy používané v laboratoři ČMI Brno a musí splňovat tyto podmínky:

- jednoduchá obsluha a editace nastavení,
- minimální náklady na používaný *sw* a *hw*,
- univerzálnost (možnost použití na pobočkách ČMI v LPM Praha a OI Liberec),
- možnost přenosu naměřených dat z měřicího *sw* Sios 3D Firmware a Matlab®;
- možnost přenosu výsledků nejistot z modulu do kalibračního protokolu.

Aplikace MS Excel byla vybrána z důvodu jejího masivního rozšíření ve všech Oblastních inspektorátech ČMI a její všeobecnou znalost použití u zaměstnanců ČMI. Umožňuje rychlé a přesné zjištění hodnoty nejistoty daného měření. Je dostatečně univerzální, aby mohla být použita a upravena i pro jiné typy interferometrického měření, než jen na přístroji nano-CMM NMM-1. Popřípadě je možné využití modulu po určité úpravě i pro jiná měření délky. Výhodou je také možnost on-line provozu při vlastním procesu měření:

- záznam naměřených hodnot a jejich vyhodnocení,
- výpočet nejistoty,
- tvorba kalibračního certifikátu.

Výsledná podoba vytvořeného modulu pro rychlý výpočet nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 je uvedena v kapitole 10.3.

5 POSTUP PLĚNÍ 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.

5.1 NÁVRH ŘEŠENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

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

1. Volba vhodného délkového etalonu (kapitola 5.2).
2. Návrh, výroba a odzkoušení upínacího přípravku (kapitola 5.3).
3. Volba vhodných metod měření měřeného objektu (kapitola 5.4).
4. Měření na přístroji nano-CMM NMM-1 za dodržení podmínek opakovatelnosti (kapitola 5.5.1).
5. Realizace měření na ostatních přístrojích za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti (kapitoly 5.5.2 až 5.5.4).
6. Porovnání a vyhodnocení naměřených odchylek zvolených parametrů kuliček (kapitola 5.6).
7. Popis hlavních vlivů na dosahovanou přesnost (kapitoly 5.7).
8. Kvantifikace nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 (kapitoly 6 a 7).
9. Vytvoření *sw* modulu pro rychlé stanovení nejistoty měření (kapitola 10.3).
10. Návrh vhodného délkového etalonu – ball plate (kapitola 10.2).

Toto finální řešení zkoumané problematiky bylo diskutováno s kolegy a nadřízenými v ČMI Brno, stejně tak i s odborníky VUT v Brně. Na základě jejich doporučení a požadavků bylo výsledné řešení problematiky několikrát aktualizováno.

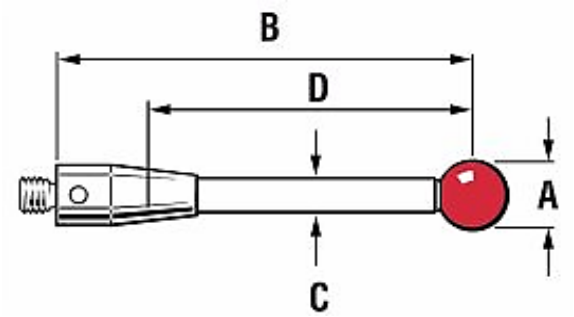
5.2 VOLBA VHODNÉHO ETALONU

Pro stanovení nejistoty měření přístroje používaného v nanometrologii je nutné použít vhodný 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 bylo 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*.

Po té bylo přikročeno k výběru rozměrově vhodného a přesného délkového etalonu kulovitého tvaru. Jednalo se 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 byla společnost Edmund Optics, Inc. z USA [37]. V další fázi provádění experimentů bylo přikročeno k návrhu, konstrukci modelu, odzkoušení a následné výrobě speciálního přípravku, který sloužil k uchycení měřených kuliček.

Rubínové kuličky se v metrologické a strojírenské praxi často používají jako součásti dotykových snímačů přesných měřicích přístrojů. Na obrázku 5.1 je uvedeno schéma dotykové sondy Renishaw, která se často používá jako snímací systém u standardních CMM i jiných měřicích přístrojů. Vlastní rubínové kuličky byly zvoleny za hmotný etalon délky pro své kompaktní rozměry, precizně zpracovaný povrch a vhodné fyzikální vlastnosti rubínu. Současně bylo využito faktu, že snímací systém nano-sondy Gannen XP je tvořen safírovou kuličkou o průměrech d_{saf} = 0,3 mm nebo d_{saf} = 0,5 mm.



Obr. 5.1 Schéma dotykové sondy Renishaw s rubínovou kuličkou [2].

A = průměr kuličky, B = délka doteku, C = průměr dříku, D = efektivní činná délka doteku

Průmyslovým standardům i požadavkům na optimální materiál kuličky vyhovuje u převážné většiny měřicích aplikací rubín – jeden z nejtvrdších materiálů. Syntetický rubín je oxid hlinitý Al_2O_3 s čistotou 99 %, který použitím Verneuilovy metody vytváří při teplotě 2 000 °C krystaly. Krystaly jsou pak nařezány a postupně obrobeny do přesného kulovitého tvaru. Rubínové kuličky mají výjimečně hladký povrch, vynikající pevnost v tlaku a vysokou odolnost proti mechanickému poškození [26]. Další vlastnosti materiálu kuliček jsou uvedeny ve výřezu z tabulky na obrázku 5.2. Dle údajů výrobcem použité normy DIN 5401:2002 [27] jsou standardně používané kuličky pro běžné typy snímacích doteků klasifikovány pro stupeň přesnosti Grade 3.

Vlastnosti materiálu kuličky

Typ doteku	Materiál	Grade	Odchylka kulovitosti	Struktura	Složení	Čistota	Hustota	Tvrdost	Pevnost v tlaku	Pevnost vohybu	Lomová houževnatost K1c
			(µm)	–	(wt%)	(%)	(g/cm^3)	HV	(MPa)	(MPa)	(MN/m$^{3/2}$)
Doteky s rubínovou kuličkou AL_2O_3	Monokrystalický syntetický rubín	Stupeň přesnosti Grade 5*	0,13	mono	99% AL_2O_3	99,90	3,90	2300	2100	400-700	1

Obr. 5.2 Výřez z tabulky vlastností materiálu rubínových kuliček [28].

Rubínové kuličky použité jako hmotný etalon délky byly dodavatelem klasifikovány pro stupeň přesnosti Grade 5 dle normy DIN 5401:2002 [27] dle obrázku 5.3.

H-1000-3001-0A-A

Styli ball grading

RENISHAW
apply innovation™

When precision counts

- The sphericity of your stylus ball can affect your CMM measurements.
- To ensure the accuracy of your measurements, use DIN 5401:2002 Grade 5 balls.
- As standard, Renishaw uses Grade 5 styli balls with a sphericity of 0,13 microns and not the lesser Grade 10 that most manufacturers use as standard. Grade 3 balls are also offered.

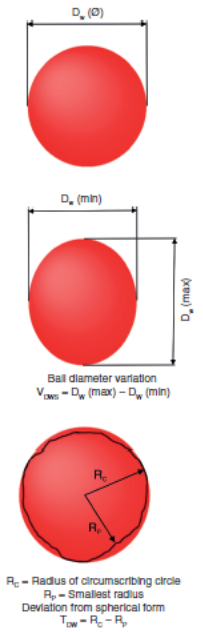
DIN 5401:2002

Grade	D_w Nominal size in mm		Size deviations* µm	Tolerances on one ball: Ball dia. variation (µm) V_{DWS}	Deviation from sphere form (µm) t_{DW}	Surface roughness (µm) R_a
	over	up to				
3	–	12	±5.32	0.08	0.08	0.010
5	–	12	±5.63	0.13	0.13	0.014
10	–	25	±9.75	0.25	0.25	0.020
16	–	25	±11.4	0.40	0.40	0.025
20	–	38	±11.5	0.50	0.50	0.032

* Values relate to the mean diameter of a ball, D_{WM}

- The use of a Grade 10 ball instead of Renishaw's Grade 5 can result in CMM first term measurement errors increasing by up to 15%**.

** Based on a CMM tested to BS EN ISO 10360-2:2009 accuracy specification of MPE_E (0,8 + 2L/1000)µm.



Nominal ball diameter D_w

The diameter value used to identify the ball size.

Ball diameter variation V_{DWS}

The difference between the largest and smallest diameters of one ball.

Deviation from a spherical form, t_{DW}

The greatest radial distance in any radial plane between a sphere circumscribed around the ball surface and any point on the ball surface.

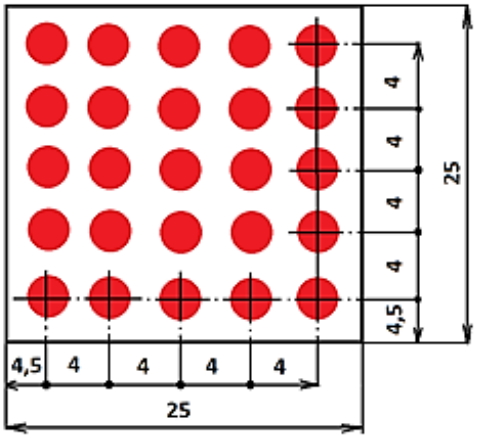
www.renishaw.com

© 2006 – 2018 Renishaw plc. All rights reserved.

Obr. 5.3 Parametry rubínových kuliček dle normy DIN 5401:2002 [29].

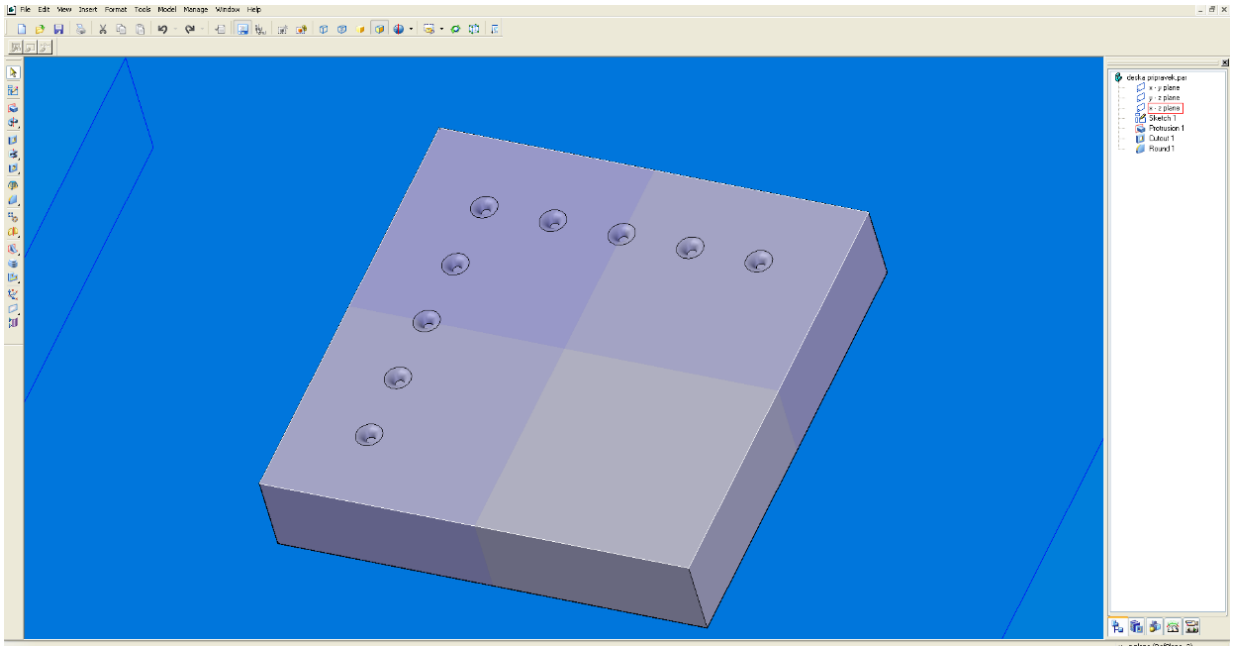
5.3 NÁVRH, VÝROBA A ODZKOUŠENÍ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU

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 5.4. Pokrytí měřicího rozsahu přístroje v ose *z* bylo řešeno volbou různých jmenovitých průměrů rubínových kuliček.



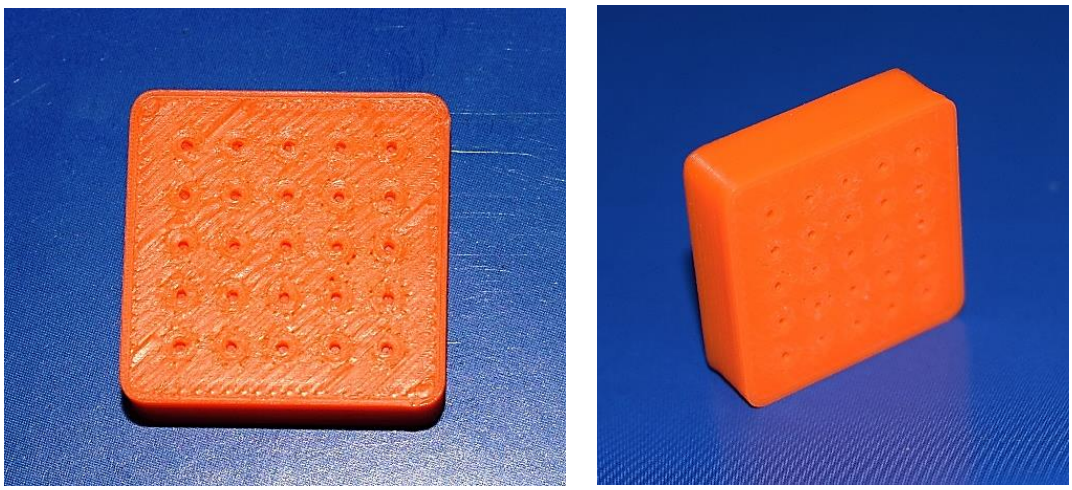
Obr. 5.4 Schéma rozmístění měřicích bodů na přípravku[autor].

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 *sw* prostředí Solid Edge. Částečný model ve 3D zobrazení je uveden na obrázku 5.5. Tento model sloužil k ověření správnosti myšlenky a ke kontrole rozměrů.



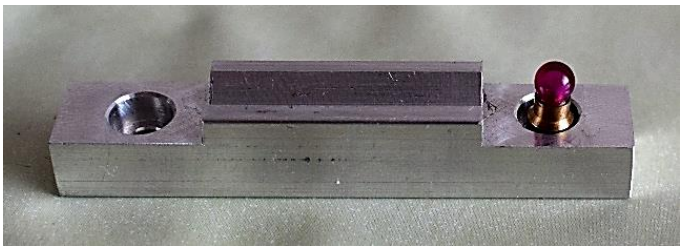
Obr. 5.5 Částečný 3D model přípravku pro uchycení vzorků vytvořený v Solid Edge [autor].

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 5.6.



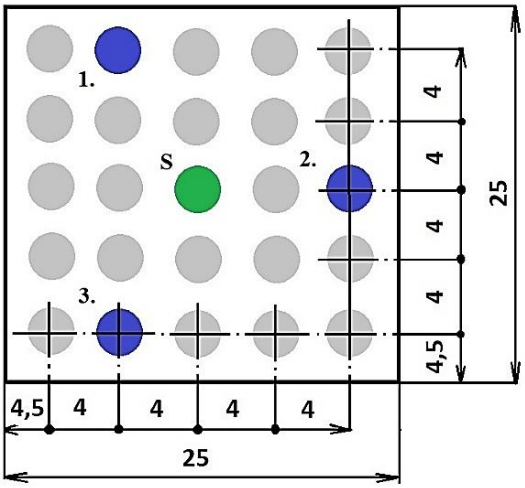
Obr. 5.6 Prototyp přípravku pro uchycení vzorků vytištěný na 3D tiskárně [autor].

Na základě těchto vývojových prací bylo následně přistoupeno k výrobě vlastního přípravku ve finální podobě. Byl zvolen materiál s minimální teplotní roztažností Invar. Tento přípravek, uvedený na obrázku 5.7 se stal základem pro vytvoření nového přesného etalonu délky – ball plate, který bude sloužit k zajištění metrologické návaznosti přístroje nano-CMM NMM-1.



Obr. 5.7 Univerzální přípravek pro uchycení vzorků pro měření[autor].

Pro zvolené metody stanovení nejistoty měření, které jsou popsány v dalších částech této práce, byly v souladu s odbornými publikacemi [6,9] zvoleny polohy upínacího přípravku, ve kterém byly dané rubínové kuličky uchyceny. Tyto polohy jsou znázorněny na obrázku 5.8 modrou a zelenou barvou.



Obr. 5.8 Určené polohy pro uchycení měřených kuliček. Polohy pro multipoziční metodu jsou označeny modrou barvou a substituční zelenou barvou [autor].

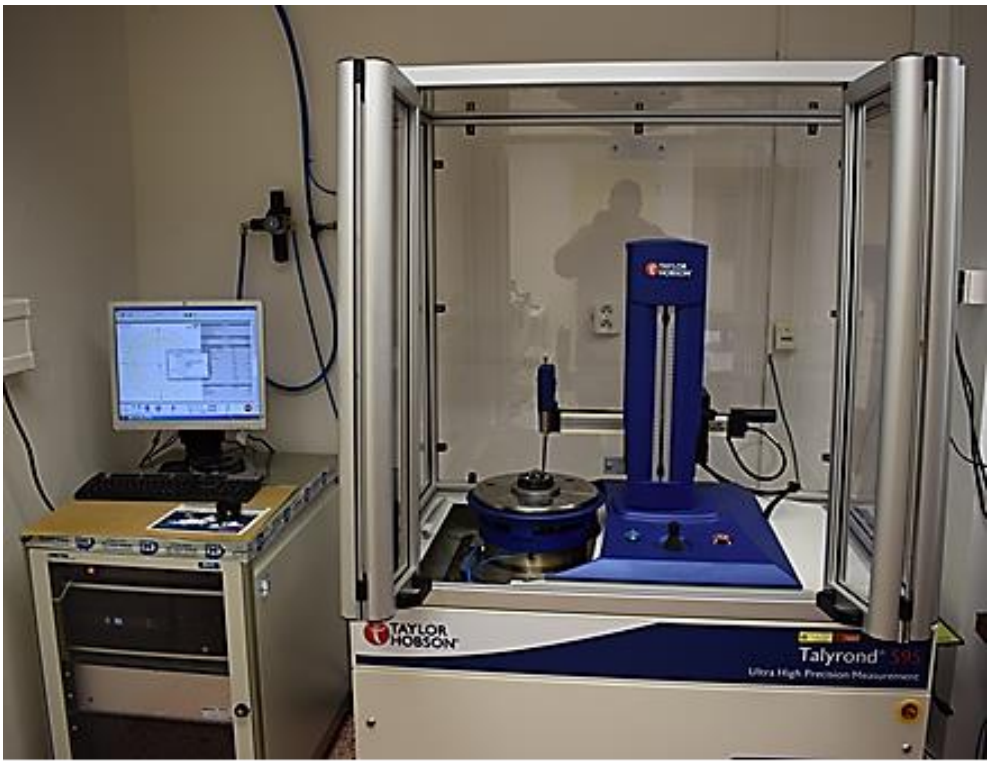
5.4 ZVOLENÉ METODY MĚŘENÍ SOUČÁSTÍ

V letech 2014 až 2015 proběhla první testovací série dotykových měření dotykovou sondou na nano-CMM NMM-1 v laboratoři ČMI OI Brno. Po vyřešení počátečních problémů a ujasnění priorit z hlediska měřených parametrů kuliček byla provedena série měření kuliček o jmenovitém průměru d = (1, 2, 3 a 4) mm. Měření poskytla dostatečně velký soubor naměřených dat měřených veličin – průměru a kulovitosti rubínových kuliček pro upřesnění podmínek provádění dalších experimentů. Měření proběhlo za dodržení podmínek opakovatelnosti, protože měření proběhla pouze na výše uvedeném přístroji.

Pro zajištění podmínek reprodukovatelnosti bylo realizováno několik sérií dotykových měření na délkoměru SIP 1002M spojeným s laserinterferometru XL80. Použitá metoda měření se opírala o akreditované kalibrační metody používané v ČMI Brno. Tato měření poskytla dostatečně velký soubor naměřených dat měřené veličiny – průměru rubínových kuliček. Měření proběhlo taktéž za dodržení podmínek opakovatelnosti.

Pro doplnění obou předchozích měřicích metod a otestování parametrů CT měřicí techniky bylo provedeno měření rubínových kuliček o jmenovitém průměru d = (1, 2 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, který je uveden na obrázku 5.9. 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.



Obr. 5.9 Přesný kruhoměr Taylor Hobson Talyrond TR595S [autor].

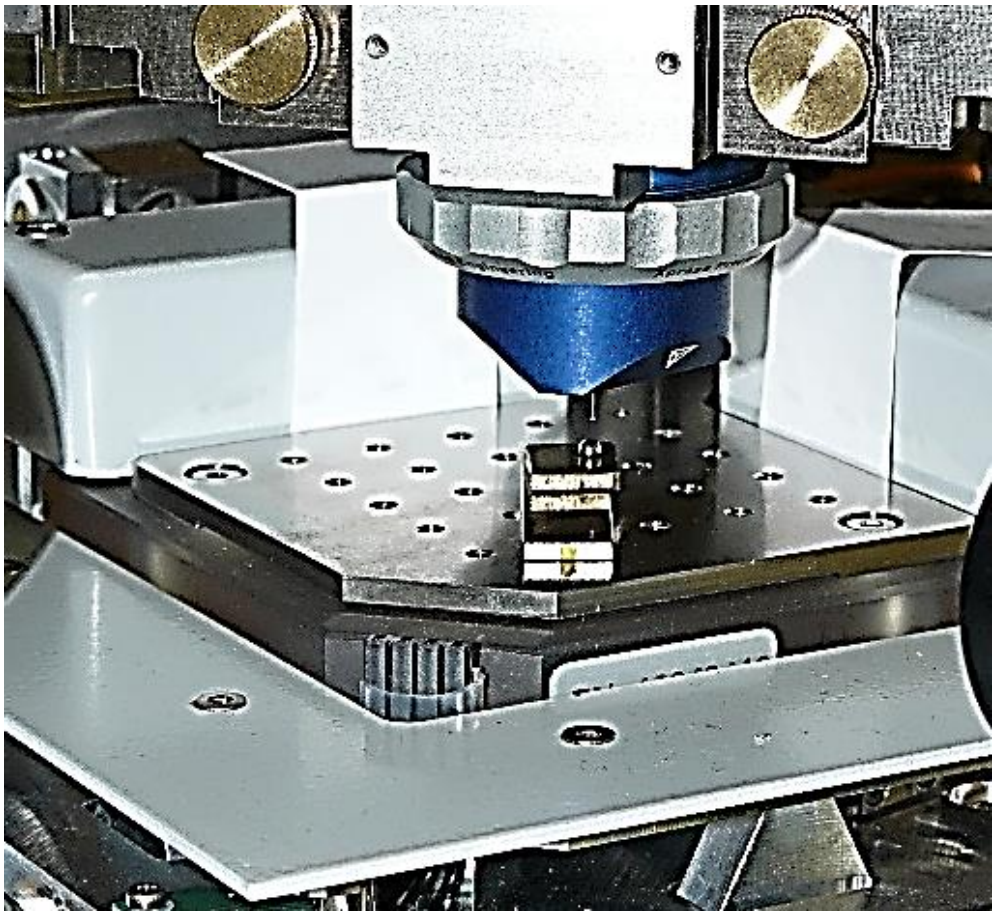
Posouzení naměřených dat z hlediska dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti bylo nutnou podmínkou úspěšného stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1. K tomuto účelu bylo použito vícero měřicích metod a postupů. Vyhodnocení výsledků experimentů může sloužit jako návod pro uživatele různých měřicích přístrojů užívaných pro přesná délková měření v nanometrologii, a to jak v institutu CEITEC, tak i na pracovišti Oddělení primární nanometrologie a technické délky ČMI OI Brno.

5.5 MĚŘENÍ ROZMĚRU RUBÍNOVÝCH KULIČEK

Vlastní opakované měření rozměru rubínových kuliček o jmenovitém rozměru d = (1; 2; 3 a 4) mm bylo realizováno za použití tří měřicích metod na různých měřicích přístrojích. Díky tomu bylo možné zajistit plnění podmínek reprodukovatelnosti i opakovatelnosti měření.

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

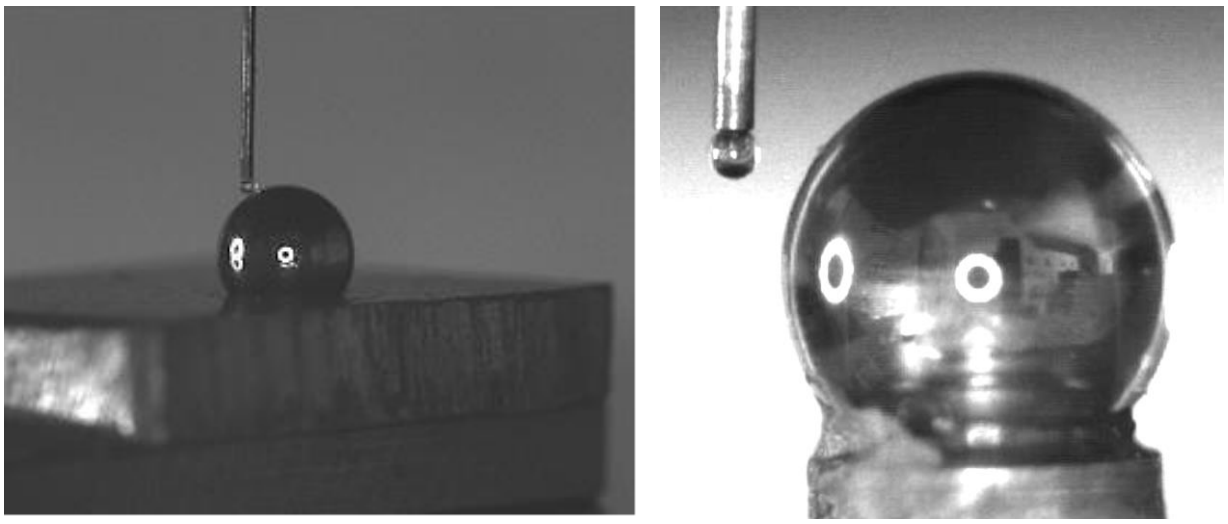
Tato měřicí metoda představuje časově nejnáročnější část disertační práce. Slouží jako základ ke stanovení nejistoty měření na přístroji SIOS NMM-1. Vlastní měření proběhlo v podzemní laboratoři ČMI OI Brno, kde je přístroj nano-CMM NMM-1 umístněný. Detail měřicího prostoru tohoto přístroje je uveden na obrázku 5.10. Jedná se zejména o pracovní stolek z materiálu Invar, který umožňuje uchycení rubínových kuliček v různých přípravcích a držácích. V ose z je namontována dotyková nano-sonda Gannen XP.



Obr. 5.10 Měření kuličky dotykovou sondou – detail [autor].

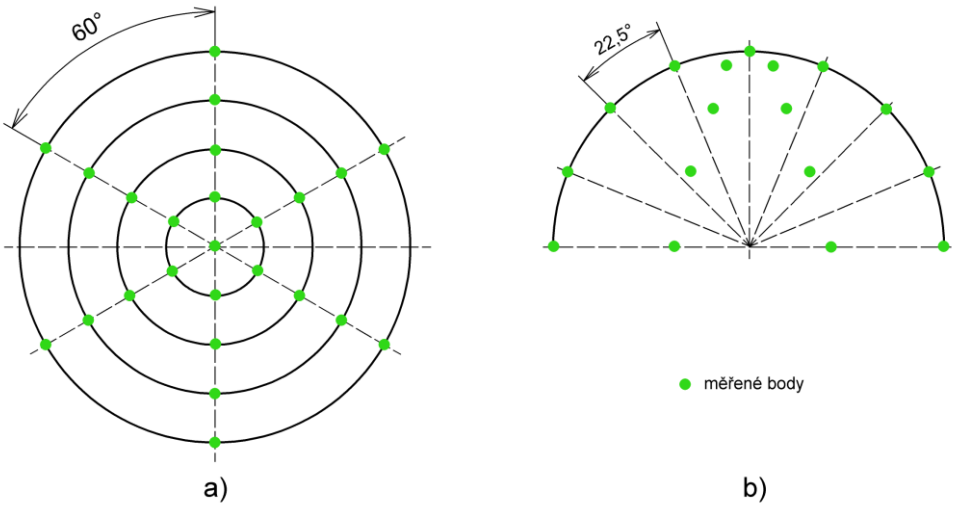
Pro uchycení kuliček, které byly přilepeny ke kevlarové tyčince dvousložkovým epoxidovým tmelem, byl vyroben speciální přípravek, který umožňuje dostatečně pevné polohování kuličky a zároveň rozměrově ani hmotnostně nepřesahuje limity nutné k použití na přístroji nano-CMM NMM-1. Vlastní pracovní prostor přístroje byl kontinuálně snímán dvěma digitálními kamerami

umístněných ve směru posuvu stolku v osách *x* a *y*. Snímaný detailní obraz byl přenášen na obrazovku monitoru, tak jak je uvedeno na obrázku 5.11.



Obr. 5.11 Měření kuličky dotykovou sondou – detail [autor].

Po provedení zkoušek různých variant byla zvolena strategie měření, tedy rozmístění a počet měřených bodů. Při každém měření se snímalo 25 bodů na vrchní polokouli rubínové kuličky. Konkrétní rozmístění bodů zachycuje schéma na obrázku 5.12. Počet snímaných bodů a jejich poloha na kouli je volena v souladu s normou ČSN EN ISO 10 360-2 [20].



Obr. 5.12 Rozmístění měřených bodů na kuličce; a) pohled ze shora, b) pohled z boku [33].

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. Měření bylo prováděno opakovaně 10x v každé definované poloze kuličky dle obrázku 5.8 uvedeného v kapitole 5.2.

5.5.2 Dotykové měření na délkoměru s interferometrem

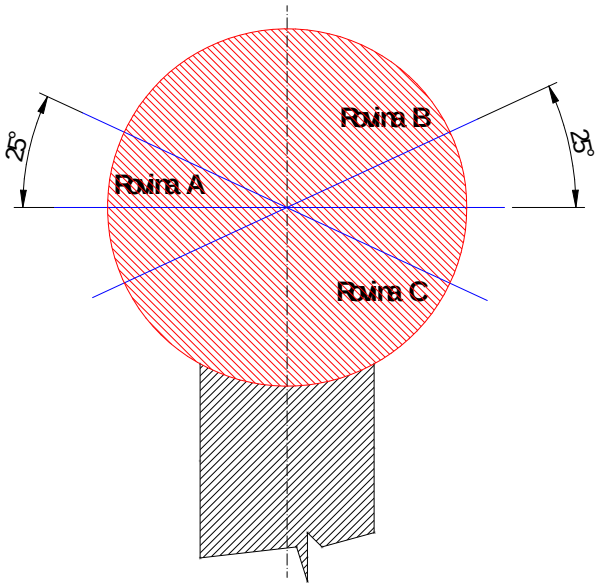
Z důvodu zajištění reprodukovatelnosti naměřených hodnot průměru rubínových kuliček byla zvolena další dotyková metoda měření na přesném délkoměru SIP 1002M, se kterým byl propojen průmyslový laserinterferometr Renishaw LX 80. Oba tyto přístroje jsou v majetku ČMI OI Brno. Vlastní digitální délkoměr 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. Délkoměr je vybaven nastavitelným stolkem ve třech osách, což umožňuje precizní ustavení a vyrovnání měřené součásti. Dále délkoměr disponuje bohatým přídavným vybavením, které umožňuje měření různých typů měřidel a kalibrů, včetně vnitřních rozměrů. Tato měřicí metoda je používána ke kalibracím etalonů a je akreditována ČIA s udávanou hodnotou CMC: (0,3 + 0,4L) µm, kde L je měřená délka v metrech.

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 5.13. Taktéž tato měřicí metoda pro kalibrace laserinterferometrem je akreditována ČIA s udávanou hodnotou CMC: (0,05 + 0,5L) µm, kde L je měřená délka v metrech.

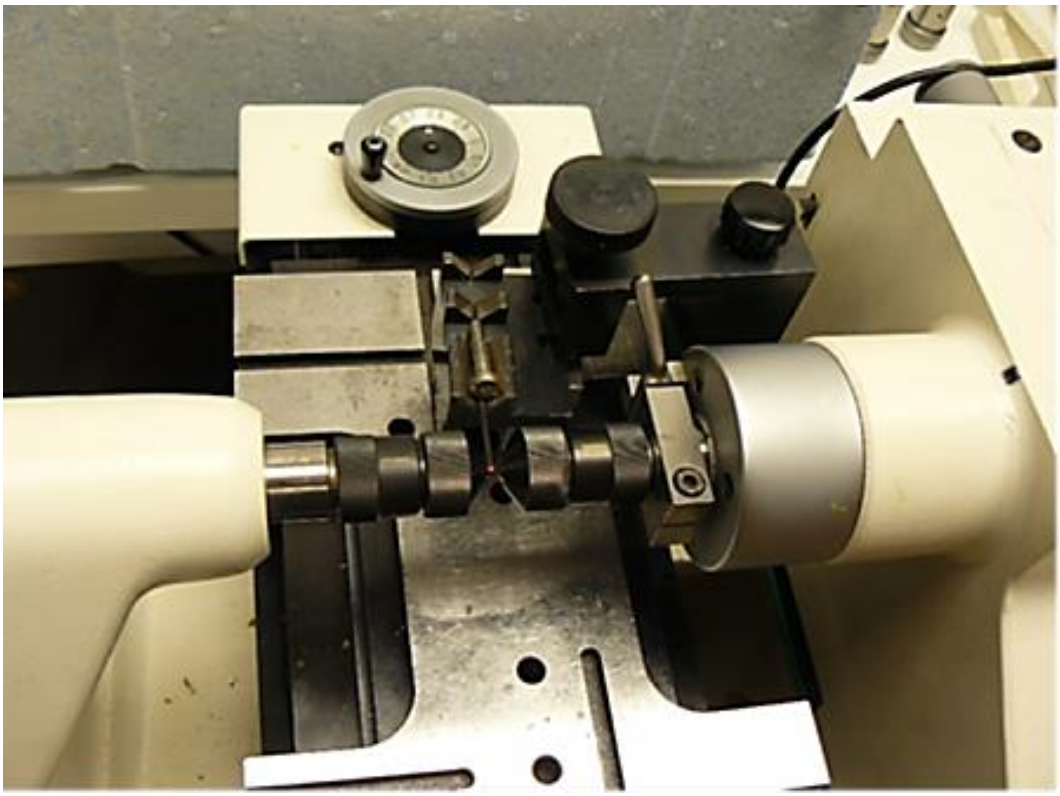
Obr. 5.13 Měření na délkoměru SIP doplněném o LI HP [autor].

Vlastní měření probíhalo za pomocí upraveného přípravku, který umožňoval uchycení rubínových kuliček včetně jejich definovatelné orientace vůči měřicí rovině, tak jak je uvedeno na obrázku 5.14. Tyto měřicí roviny byly zvoleny tak, abychom dosáhli porovnatelných výsledků měření s použitou metodou na přístroji nano-CMM NMM-1.



Obr. 5.14 Znázornění měřicích rovin při měření na délkoměru SIP a XL80 [autor].

K měření kuliček o jmenovitém průměru d = (1, 2, 3 a 4) mm se používalo redukcí vybavených kulovými doteky, které jsou standardním příslušenstvím délkoměru SIP 1002M a jsou uvedeny na obrázku 5.15. Měřicí síla byla nastavena na hodnotu menší než 0,25N. Teplota okolí a měřicího přístroje byla standardně monitorována a pohybovala se v rozmezí 20°C ± 0,3°C v souladu s nároky na přesné délkové měření [7, 9].

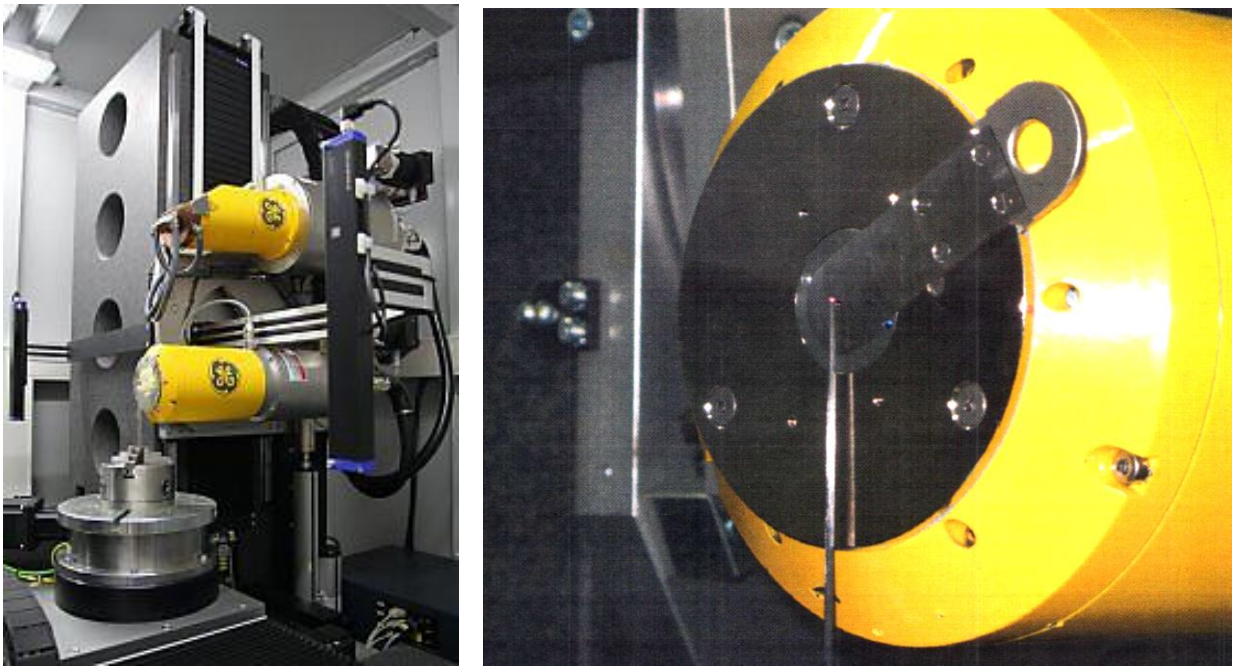


Obr. 5.15 Měření průměru rubínových kuliček [autor].

Měřeny byly všechny výše uvedené kuličky. Provedl se soubor opakovaných měření, tak aby byl získán dostatečný objem dat pro vyhodnocení opakovatelnosti této měřicí metody a zároveň byl vytvořen dostatečně soubor naměřených dat pro vyhodnocení reprodukovatelnosti měření.

5.5.3 Bezdotykové měření na CT přístroji GE

Měření rozměrů vybraných kuliček bylo realizováno ve spolupráci s institutem CEITEC, konkrétně s pracovištěm X-ray mikro a nano CT výzkumná laboratoř, jehož sídlo se nachází v areálu FSI VUT v Brně. Vlastní měření proběhlo na tomografu General Electric V TOME X L 240, jehož pracovní prostor je uveden na obrázku 5.16 vlevo.



Obr. 5.16 Pracovní prostor tomografu GE [34]vlevo a ukázka měření kuličky o d = 1mm na tomografu GE [autor].

Vlastní tomograf GE je vysoce přesný přístroj, který umožňuje provádět přesná 3D měření do rozsahu objemu rotačního válce o rozměrech D = 500 mm a L = 800 mm s rozlišením menším než 0,001 mm při použití zdroje – 180 kV nanofokus X-ray trubice. Pro vlastní měření byly kuličky uchyceny na tyčinky z uhlíkového vlákna, jehož fyzikální vlastnosti jsou vhodné pro práci s RTG zářením, toto řešení je uvedeno na obrázku 5.16 vpravo. Pro měření byly použity kuličky o jmenovitých průměrech d = 1 a 2 mm.

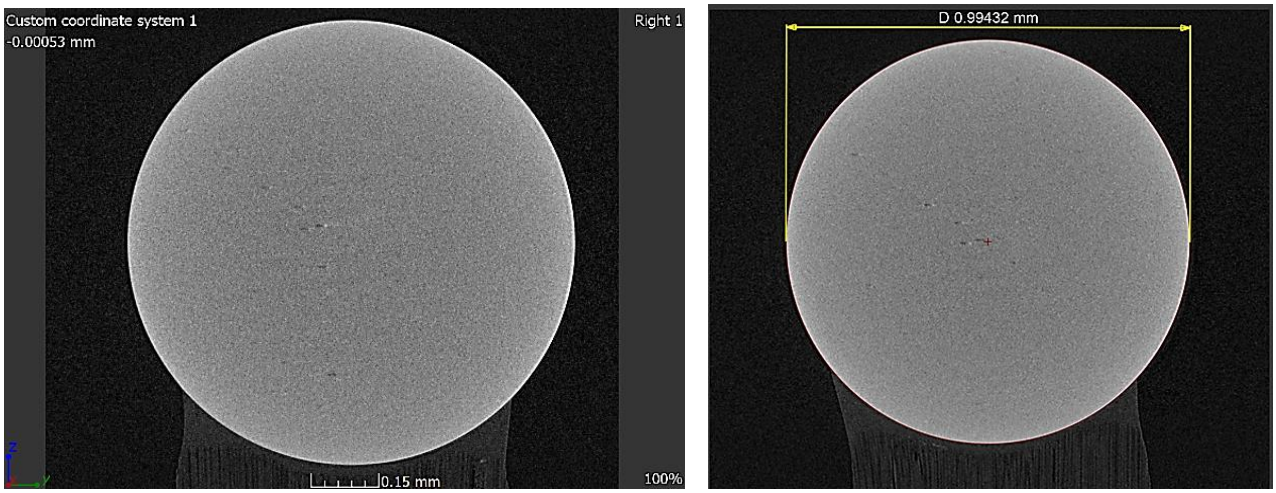
Z důvodu značné časové náročnosti na vlastní měření (skenování) i následné zpracování naměřených dat se provedlo 5 měření daných rozměrů kuliček. Z naměřených dat se vyhodnocuje průměr a kulovitost měřeného objektu. Tyto data jsou použity pro vyhodnocení opakovatelnosti této měřicí metody. Měření proběhlo za standardních podmínek pro akreditovanou zkušební laboratoř na pracovišti CEITEC Brno. Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 5.6.1 a v příloze A této disertační práce.

5.5.4 Bezdotykové měření na CT přístroji Rigaku

Pro zajištění přesnějších výsledků měření bylo provedeno další měření na přístroji Rigaku nano3DX, který je uveden na obrázku 5.17. Tento přístroj umožňuje dosažení menšího rozlišení měřené veličiny oproti předchozímu přístroji GE.

Obr. 5.17 Celkový pohled na tomograf Rigaku nano3DX vlevo[34] a měřicí prostor přístroje s umístěnou kuličkou d = 1 mm vpravo [autor].

Vlastní tomograf Rigaku je vysoce přesný přístroj, který umožňuje provádět přesná 3D měření do maximálního rozsahu zorného pole přístroje (7,2 x 5,4) mm s nejmenším rozlišením 0,27 μm při použití zorného pole (0,9 x 0,7) mm. Použitý zdroj záření je X-ray trubice o 20 až 50 kV. Jako detektor je použita rentgenová CCD kamera. Přesnost osy rotace měřeného objektu je menší než 0,5 μm [34].



Obr. 5.18 Ukázka naměřených dat z tomografu Rigaku nano3DX vlevo a vyhodnocení naměřených dat kuličky o d = 1 mm vpravo [CEITEC].

Ukázka analyzovaných dat je uvedena na obrázku 5.18. Vybavení přístroje umožňuje: 3D kvantitativní analýzu obrázku za použití *sw* nano3DCalc, 2D a 3D zobrazení měřeného objektu, ořezávání, filtraci a další operace. Dále je možno provádět kvantitativní měření (objem, plocha, poloha těžiště a směr gravitace). Laboratoř používá 3D zobrazovací *sw* INTAGE Realia Professional.

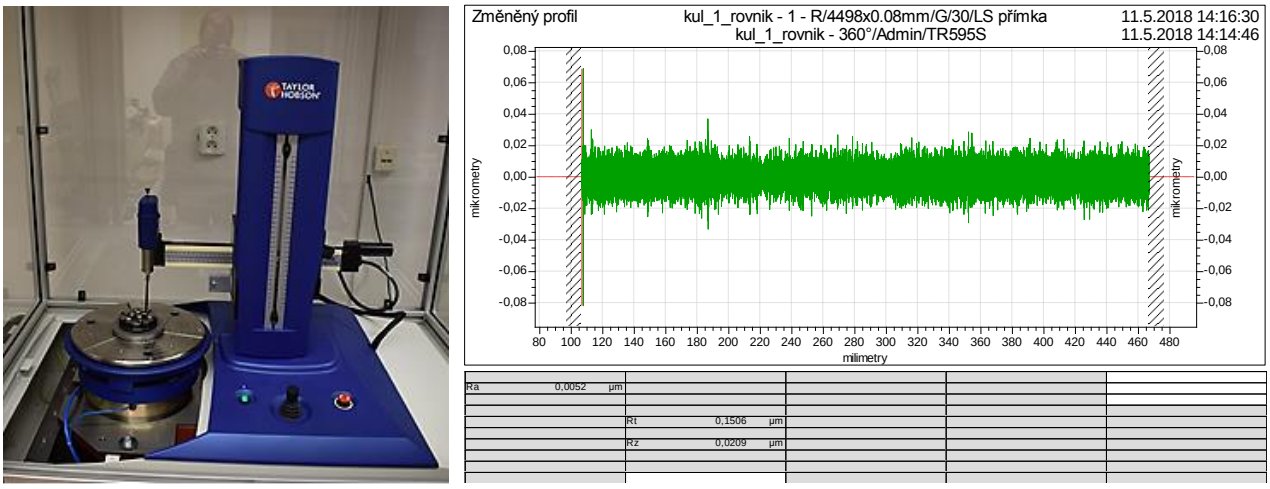
Měření proběhlo za standardních podmínek pro akreditovanou zkušební laboratoř na pracovišti CEITEC Brno. Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 5.7.1 a úplně v příloze A této disertační práce.

5.6 VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU KULIČEK

Vyhodnocení parametrů textury povrchu rubínových kuliček o jmenovitém průměru d = (1; 2; 3 a 4) mm bylo realizováno opět za použití tří měřicích metod na různých měřicích přístrojích. Díky tomu bylo možné posoudit hodnotu předpokládaného vlivu parametrů textury povrchu na přesnost měření přístroje nano-CMM NMM-1.

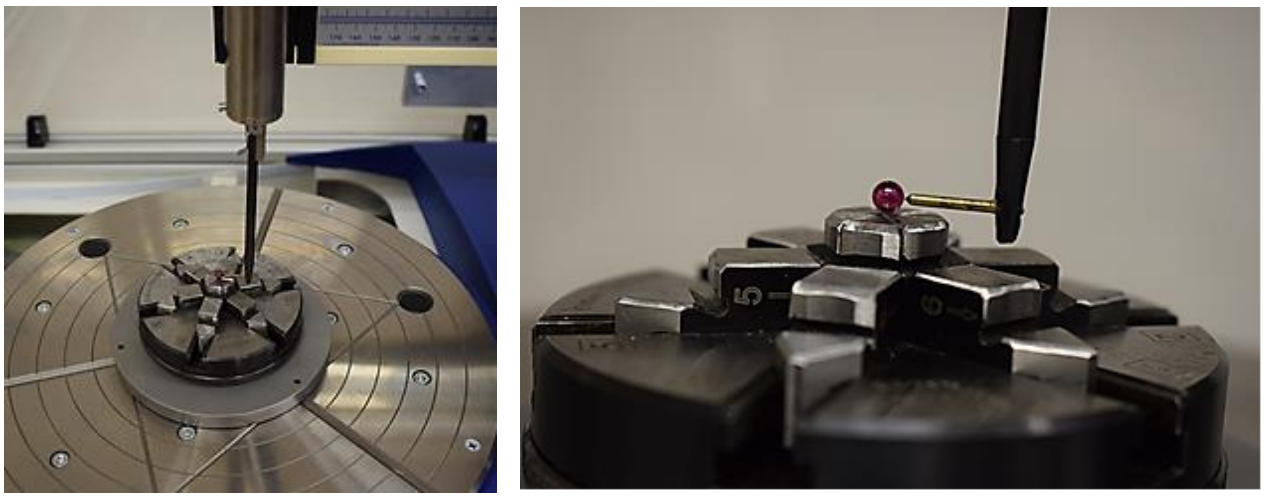
5.6.1 Dotykové měření na přístroji Talyrond TR 595S

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 5.19.



Obr. 5.19 Pracovní prostor přístroje Talyrond TR595S vlevo a ukázka naměřených dat analyzovaných v sw Ultra 300 vpravo [autor].

Měření proběhlo v laboratoři 23 Oddělení primární nanometrologie a technické délky ČMI Brno. K měření kuliček o jmenovitém průměru d = (1, 2, 3 a 4) mm se používalo doteku s diamantovým hrotem o poloměru 2 µm, který je standardním příslušenstvím přesného kruhoměru TR595S. Měřicí síla byla nastavena na hodnotu 0,20N v souladu s uživatelskou příručkou přístroje [35]. Teplota v uzavřeném boxu měřicího přístroje byla standardně monitorována a pohybovala se v rozmezí 20°C ± 0,3°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, které je uvedeno na obrázku 5.20 vlevo.



Obr. 5.20 Upnutí rubínové kuličky v přesném sklíčidle vlevo, snímač v kontaktu s kuličkou vpravo [autor].

Vlastní měření bylo realizováno v jednotlivých řezech pro měření kruhovitosti. Základní řez byl zvolen v oblasti rovníku měřených rubínových kuliček. Snímač vybavený diamantovým hrotem v kontaktu s povrchem rubínové kuličky je uveden na obrázku 5.20 vpravo.

Jeho přesná poloha byla získána pomocí odečítání dat z měřicího dotyku při vertikálním pohybu ramene přesného kruhoměru. Další dva řezy byly zvoleny v určitých vzdálenostech nad a pod rovníkem rubínové kuličky. Hodnoty těchto vzdáleností byly zvoleny dle jmenovitého průměru dané kuličky a jsou uvedeny v tabulce 5.1.

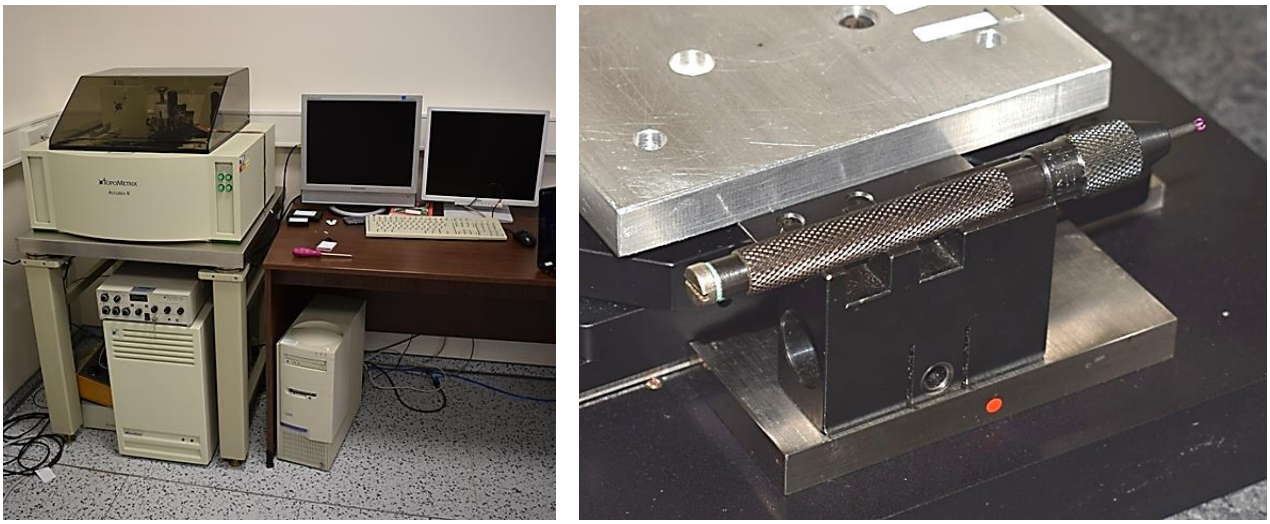
Tab. 5.1 *Vzdálenosti řezů měření kruhovitosti od rovníku kuličky*

jmenovitý průměr kuličky [mm]	vzdálenost řezu nad rovníkem [mm]	vzdálenost řezu pod rovníkem [mm]
1	0,5	0,5
2	1,0	1,0
3	1,5	1,5
4	2,0	2,0

Pro zpracování a vyhodnocení naměřených dat byl použit software Ultra 300, který umožňuje i vyhodnocení parametrů textury povrchu. Výsledky všech měření jsou uvedeny v příloze A této disertační práce.

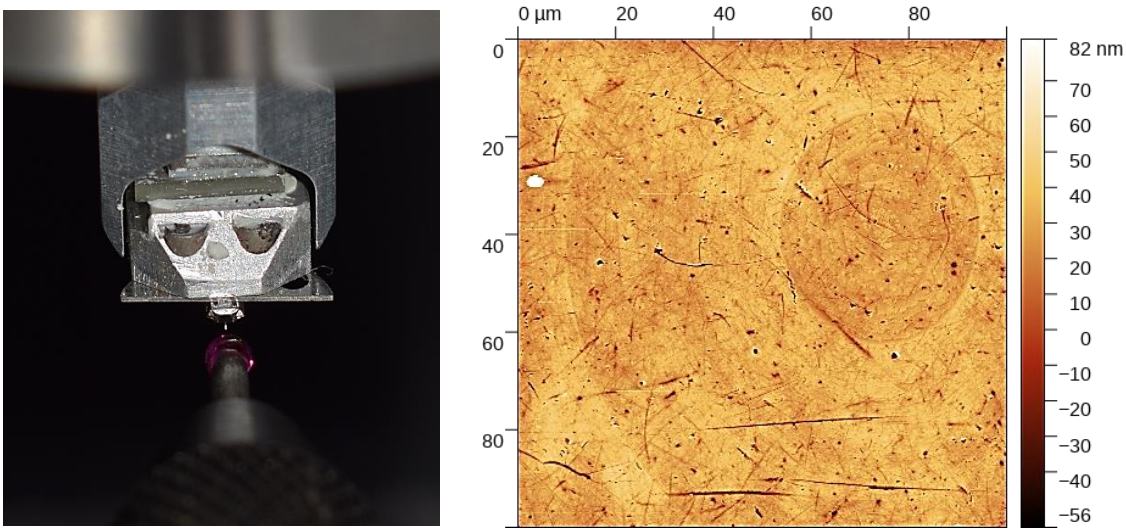
5.6.2 Bezdotykové měření na AFM mikroskopu

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 5.21 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 [78, 79].



Obr. 5.21 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°. Toto řešení je uvedeno na obrázku 5.21 vpravo. Pro vlastní měření byl použit hrot PPP_CONTR od výrobce Nanosensors™ ze Švýcarska, který je uveden na obrázku 5.22 vlevo. Během měření bylo využito tzv. „kontaktního“ režimu měření textury povrchu rubínových kuliček. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat probíhalo v programovém prostředí Gwyddion, jehož ukázka je uvedena na obrázku 5.22 vpravo[30].



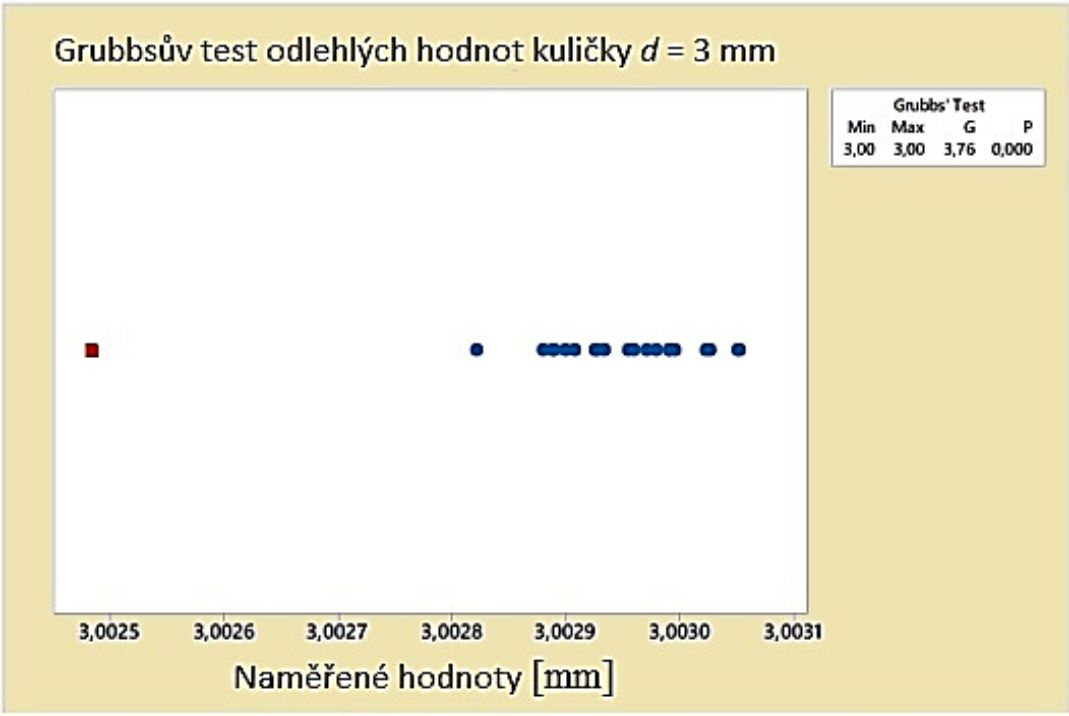
Obr. 5.22 Detailní pohled na hrot PPP_CONTR vlevo [autor], ukázka prezentace naměřených dat textury povrchu v sw Gwyddion vpravo [30].

Výsledky všech měření textury povrchu jsou uvedeny v příloze A této disertační práce333.

5.7 POSOUZENÍ VÝSLEDKŮ A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

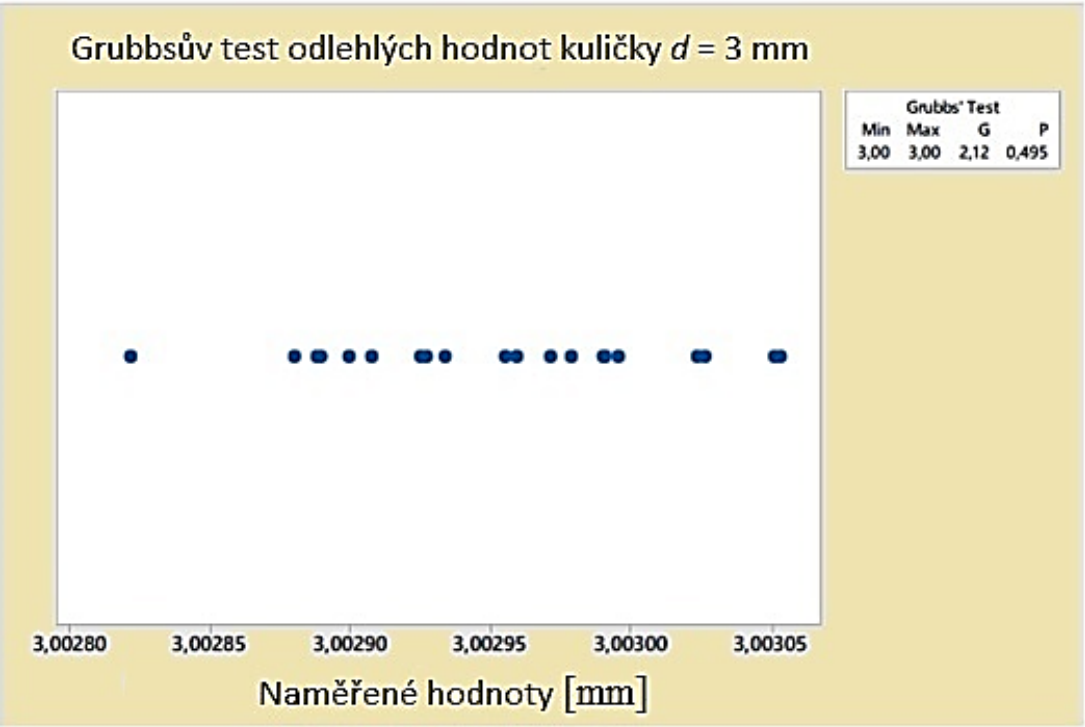
Na základě získaných výsledků ze souborů naměřených dat, které byly statisticky zpracovány, bylo v disertační práci provedeno vyhodnocení těchto výsledků z hlediska výskytu odlehlých hodnot, dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Posouzení zvolených metod měření a upřesnění jednotlivých 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 [31] se nejprve provedlo vyloučení odlehlých hodnot. Pro tento krok bylo použito *sw* prostředí Minitab. Testování probíhalo na hladině významnosti α = 0,05. Obrázek 5.23 ukazuje výsledky testování měřených hodnot rubínové kuličky o jmenovitém průměru d = 3mm.



Obr. 5.23 Grubbsův test odlehlosti naměřených hodnot před vyloučením odlehlé hodnoty[autor].

Z uvedeného obrázku vyplývá, že se v datech nachází odlehlá hodnota (červený bod). Ta byla odstraněna a test byl opakován. Výsledek opakovaného Grubbsova testu po odstranění odlehlé hodnoty je uveden na obrázku 5.24. Z obrázku 5.24 vyplývá, že 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. Výsledky testování hodnot pro všechny ostatní kuličky jsou uvedeny v příloze A této disertační práce.



Obr. 5.24 Grubbsův test odlehlosti naměřených hodnot po vyloučení odlehlé hodnoty[autor].

5.7.1 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 a preciznosti měření za reprodukovatelnosti měření. Pro vyhodnocení splnění těchto podmínek bylo určeno porovnání výsledků měření dvou stěžejních metod měření rozměru kuliček.

První metoda měření se uskutečnila na přístrojích nano-CMM NNM 1 a délkoměru SIP 1002M spojeného s laserinterferometrem XL 80. Výsledky vyhodnoceného měření kuličky o d = 1mm jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Druhá metoda, která zahrnovala použití dvou akreditovaných kalibračních postupů ČMI Brno, byla dostatečnou zárukou validace celého experimentu měření rozměru kuliček. Výsledky vyhodnoceného měření kuličky o d = 1mm jsou uvedeny v tabulce 5.3. Pro vyhodnocení bylo použito nástrojů uvedených v kapitole 4.3. Shrnutí a závěr je uveden v kapitole 5.7.3.

Tab. 5.2 *Vyhodnocená data z měření průměru kuličky o d= 1mm na přístrojích nano-CMM NMM-1 a SIP 1002M / XL 80.*

Číslo měření	Průměr kuličky d = 1mm			
	NNM-1 (mm)	SIP/XL (mm)		
1	0.957971	0.959343		
2	0.959900	0.959544		
3	0.959742	0.959434		
4	0.963979	0.961944		
5	0.956974	0.959440		
6	0.959795	0.959667		
7	0.959911	0.959417		
8	0.959812	0.959544		
9	0.961399	0.959443		
10	0.960176	0.959667		
R	0.007005	0.002601		
$\bar{x}$	0.959966	0.959744		
$s_{r1,2}$	0.001768	0.000740		
$v_{r1,2}$	0.184138	0.077117		
s_{R1}	0.0013595935			
v_{R1}	0.0014164570		Podmínka přijatelnosti výsledků:	
k_{r1}	0.784857		$\lvert\bar{x}_1 - \bar{x}_2\rvert \leq CD$	
CD_{r1}	0.003671	0.001537	**Splněna**	**Splněna**
CD_{R1}	0.002823		**Splněna**	

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

Druhou použitou metodou bylo provedení srovnávacího měření rozměru rubínových kuliček na přístrojích nano-CMM NMM-1 a CT přístroji Rigaku nano3DX. Přístroj Rigaku je umístěn na pracovišti CEITEC Brno, jenž je součástí akreditované zkušební laboratoře, kterou zastřešuje ČMI Brno. Měření rozměru kuličky o d = 1mm bylo provedeno pouze 3x, z důvodu značné časové náročnosti na vlastní měření (skenování) a matematický zpracování naměřených dat. S metodou CT snímání rubínových kuliček se počítá v blízké budoucnosti v rámci zajištění metrologické návaznosti přístrojů ve zkušební laboratoři CEITEC.

Tab. 5.3 *Vyhodnocená data průměru kuliček na přístrojích nano-CMM NMM-1 a CT Rigaku.*

Číslo měření	Průměr kuličky d = 1mm			
	NNM-1 (mm)	CT (mm)		
1	0.957971	0.969432		
2	0.959900	0.969444		
3	0.959742	0.969434		
4	0.963979			
5	0.956974			
6	0.959795			
7	0.959911			
8	0.959812			
9	0.961399			
10	0.960176			
R	0.007005	0.000012		
$\bar{x}$	0.959966	0.969437		
$s_{r3,4}$	0.001768	0.000005		
$v_{r3,4}$	0.184138	0.000541		
s_{R2}	0.00428081			
v_{R2}	0.00444921		Podmínka přijatelnosti výsledků:	
k_{r2}	0.684299		$\lvert\bar{x}_1 - \bar{x}_2\rvert \leq CD$	
CD_{r2}	0.003671	0.000011	**Nesplněna**	**Nesplněna**
CD_{R2}	0.008889		**Nesplněna**	

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

Vyhodnocená data z měření kuliček o jmenovitých průměrech d = 2, 3 a 4mm jsou uvedeny v příloze A této práce. Slovní komentář a vyhodnocení výsledků měření povrchu jsou uvedeny v kapitole 5.6.3.

5.7.2 Statistické vyhodnocení výsledků měření textury povrchu

Pro vyhodnocení možného vlivu textury povrchu rubínových kuliček na přesnost měření bylo určeno porovnání výsledků měření dvou metod měření textury povrchu kuliček. 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 = 1mm bylo provedeno pouze 3x, z důvodu značné časové náročnosti na vlastní měření a matematické zpracování naměřených dat, obdobně jako u předešlé metody CT snímání.

Tab. 5.4 *Vyhodnocená data textury povrchu kuličky o d = 1mm z přístrojů AFM Accurex a TR 595S.*

Číslo měření	Drsnost povrchu kuličky Ra	
	TR 595S (nm)	AFM (nm)
1	5.2	6.4
2	5.2	6.5
3	5.1	6.3
R	0.100000	0.200000
$\bar{x}$	5.166667	6.400000
$s_{r5,6}$	0.047140	0.081650
$v_{r5,6}$	0.912396	1.275776
s_{R3}	0.62025980	
v_{R3}	0.10724953	
k_{r3}	0.866025	
CD_{r3}	0.097889	0.169548
CD_{R3}	1.287992	

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**
Splněna	

Vyhodnocená data z měření kuliček o jmenovitých průměrech d = 2, 3 a 4 mm jsou uvedeny v příloze B této práce. Slovní komentář a vyhodnocení výsledků měření povrchu jsou uvedeny v následující kapitole 5.6.3.

5.7.3 Interpretace a zhodnocení získaných výsledků

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 korelace k_{r1} se blíží hodnotě 1 (0,785). U těchto soborů měření bylo potvrzeno 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 uvedených v kapitole 5.3 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 korelace k_{r2} se také blíží hodnotě 1, ale má nižší hodnotu (0,684). U těchto soborů jednotlivé variační koeficienty opakovatelnosti v_{r3} = 0,184 a v_{r4} = 0,0005 dosahovaly minimálních hodnot. Podobně koeficient reprodukovatelnosti v_{R2} = 0,004.

Nebyly splněny podmínky přijatelnosti výsledků podle [31], 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 nejpřesnějších délkových měření. Do budoucna se plánuje vytvoření hmotného délkového etalonu právě na bázi rubínových kuliček o jmenovitém průměru d = 0,3 mm.

Vyhodnocení naměřených dat textury povrchu v tabulce 5.4 poukazují na vysokou preciznost měření pomocí AFM mikroskopu Accurex, které dosahuje řádově přesnějších výsledků měření oproti dotykovému měření na přesném kruhoměru TR 595S. Koeficient korelace k_{r3} se také blíží hodnotě 1 (0,866). U těchto soborů 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 popsané v kapitole 6.2.10.

Z dosažených výsledků se prokázal očekávaný fakt, že nejpřesnějšího měření průměru kuliček je dosahováno na jednoosém délkoměru SIP 1002M, který byl doplněn o přesné snímání délky pomocí průmyslového laserinterferometru Renishaw XL80. Je zřejmé, že kvalitní provedení délkoměru – speciálního jednoúčelového měřicího přístroje slouží jako vhodná základna pro řesná 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.

Dále se potvrzuje skutečnost, že přesné nano-CMM NMM-1 je taktéž vhodné pro dotykové měření v nanometrologii, navíc umožňuje měření a vyhodnocování více rozměrů a složitějších měřicích úloh oproti délkoměru SIP 1002M.

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. Výsledky z provedených měření na přístroji GE

nebyly do vyhodnocení zařazeny, poněvadž zjištěné odchylky rozměru rubínových kuliček od hodnot získaných dotykovou metodou se pohybovaly v řádech setiny milimetru.

Proto bylo po jednání se zástupci institutu CEITEC přistoupeno k využití nově pořízeného menšího přístroje – CT tomografu Rigaku, který disponuje vyšším rozlišením snímané veličiny. Toto měření průměru kuliček se stalo spolu s vyhodnocováním parametrů jejich textury povrchu základem pro budoucí zajištění návaznosti etalonů délky pro nejpřesnější měření prováděných na CT přístrojích v rámci zkušební laboratoř CEITEC Brno.

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. Výsledky měření získané první metodou nelze považovat za dostatečně validní, poněvadž jejich hodnoty jsou srovnatelné s limitními hodnotami dosahovanými při kalibraci přístroje TR 595S, ke které se používá etalon kruhovitosti – skleněná hemisféra Taylor Hobson. Zjednodušeně lze napsat, že vyhodnocené parametry drsnosti povrchu rubínových kuliček (Ra = 5,2 nm) odpovídají „šumu“ systému přístroje TR 595S. Zásadním omezujícím faktorem bylo použití snímače pro měření drsnosti povrchu, který byl vybaven hrotem s poloměrem 2 μm.

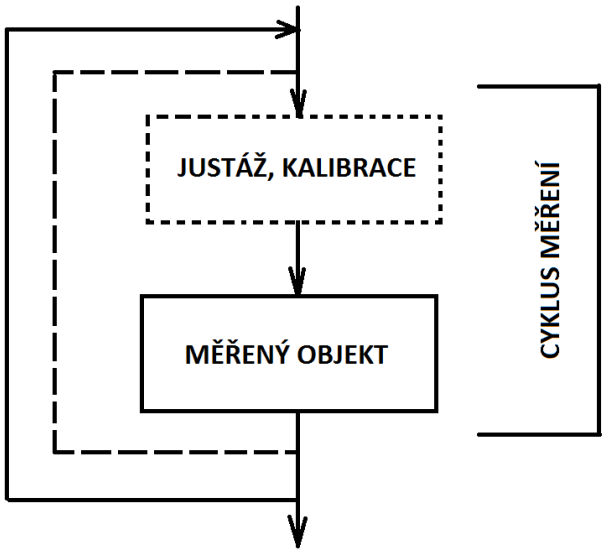
6 POUŽITÉ METODY STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ

V současné vědecké literatuře se poměrně často vyskytuje problematika stanovení nejistoty měření standardních CMM pomocí různých metod [6, 45, 46, 49, 50, 51, 82, 83]. V oblasti přístrojů nano-CMM je situace zcela odlišná, pokud je dostupná literatura k dispozici, týká se spíše obecného přístupu k nanometrologii [19, 39, 83] nebo problematika nejistoty měření nano-CMM není jejich hlavním tématem [48, 49, 50, 81]. Proto je v této disertační práci přistoupeno k úpravě stávajících metod stanovení nejitoty 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. K tomuto kroku nás vedlo několik okolností:

- menší náročnost na dostupné *sw* prostředí, které je pro simulační metody nezbytné,
- zajištění metrologické návaznosti použité metody,
- předpoklad vytvoření akreditovaného kalibračního postupu pomocí standardizovaných metod v ČMI Brno.

Konkrétně se jedná o dvě metody, které byly doplněny simulativní metodou Monte Carlo (MC):

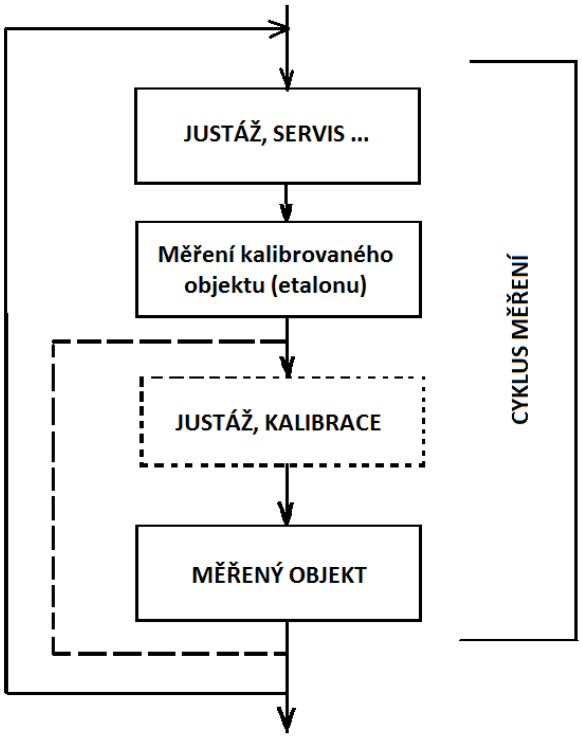
- „nesubstituční metoda“, která využívá k měření nekalibrovaný objekt (etalon) a korigovaná indikace CMM je považována za výsledek měření [6, 14, 31, 38, 41, 97, 98].



Obr. 6.1 Schéma nesubstituční metody stanovení přesnosti měření CMM [6, 14].

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 [6, 14, 87 - 96].



Obr. 6.2 Schéma substituční metody stanovení přesnosti měření CMM [6, 14].

Jednotlivé složky nejistoty měření byly analyzovány a stanoveny v souladu se zavedenou praxí v akreditovaných laboratoří a řídí se mezinárodními dokumenty [3,8,11,14]. Hlavním přínosem tohoto postupu je aplikace standardních postupů v oblasti stanovení přesnosti měření CMM a metrologické návaznosti v akreditované kalibrační laboratoři na měření délky v oblasti nanometrologie za pomocí unikátního přístroje nano-CMM NMM-1.

6.1 NEJISTOTA MĚŘENÍ CMM PŘI POUŽITÍ MULTIPOZIČNÍ METODY

Multipoziční metoda (též nesubstituční metoda) [6, 14, 31, 38, 41, 97, 98] byla zvolena z důvodu možné nedostupnosti vhodné a dostatečně přesné kalibrační metody na zajištění metrologické návaznosti vhodného etalonu. Tato metoda řeší problém omezené přesnosti měření dostupných kalibračních metod ve smyslu složitého dosažení ultranízkých hodnot nejistoty měření při kalibraci etalonů. Je dobré si uvědomit, že v nanometrologii se rozlišení měřených délek pohybuje v řádu nanometrů, což je pro drtivou většinu používaných metod měření délky za jejich fyzikálními hranicemi. Proto byl za jeden z cílů disertační práce zvoleno vytvoření metodiky pro stanovení přesnosti měření nano-CMM NMM-1 pomocí této nesubstituční metody, která nevyžaduje použití kalibrovaného etalonu.

6.1.1 Stanovení korigované hodnoty měřeného objektu

Za skutečnou hodnotu charakteristiky měřeného objektu (průměr rubínové kuličky) považujeme aritmetický průměr všech měření dané charakteristiky rubínové kuličky korigovaný průměrnou chybou měření délky použitého etalonu E_L a hodnotou korekce pro měření rozměru rubínové kuličky E_D. Korigovanou hodnotu měřeného objektu y_{cor} získáme ze vztahu [6]:

$$y_{cor} = \bar{y} - E_L - E_D \,, \tag{6.1}$$

kde je:

$\bar{y}$ průměrná hodnota ze všech měření dané charakteristiky měřeného objektu (rubínové kuličky),

E_D korekce rozměru měřeného objektu (rubínové kuličky) získaná při jejím měření,

E_L průměrná chyba měření délky pomocí laserinterferometru XL80, kterou získáme pomocí vztahu [6]:

$$E_L = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{L_{measstd_i} - L_{calstd_i}}{L_{calstd_i}} \,, \tag{6.2}$$

kde je:

n_1 celkový počet měření rubínové kuličky laserinterferometrem XL80,

L_{calstd} délka měřeného objektu (rubínové kuličky) získaná při jeho měření,

$L_{measstd}$ průměrná hodnota délky měřeného objektu (rubínové kuličky) získaná při jeho měření.

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.

Poznámka: Z použitých vztahů uvedených v odborné literatuře [6] není zřejmé jaké znaménko (+ nebo -) je u hodnot přiřazovaných k E_L a E_D.

6.1.2 Obecný vztah pro nejistoty měření

Obecný vztah pro výpočet rozšířené nejistoty měření nano-CMM NMM-1 je vytvořena v souladu s obecně zavedenou praxí, která je popsána v mezinárodních dokumentech [3, 8, 11, 14], interních předpisech ČMI Brno, technických normách i nejnovějších vědeckých publikací [6, 19].

$$U = |E_D| + |E_L| + k\sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corrL}^2 + u_{temp}^2 + u_{prob}^2}\ . \tag{6.3}$$

Vzhledem k zavedeným zvyklostem a pravidlům v rámci akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno bylo přistoupeno k úpravě uvedené definice. Úprava reflektuje zvolenou metodiku měření a zohledňuje hlavní zdroje nejistoty měření, které byly analyzovány během provádění rozsáhlého souboru měření. Navíc, v souladu se zněním kapitoly 4.4.1 došlo k úpravě rovnice (6.3), 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 [3, 8, 11, 14].

$$U_{mult} = k\sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corrL}^2 + u_{temp}^2 + u_{prob}^2 + u_L^2}\ , \tag{6.4}$$

kde je:

k koeficient rozšíření,

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.

6.1.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{rep}

Standardní nejistota měření způsobená opakovatelností nano-CMM NMM-1 je definována pomocí vztahu [6]:

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n_2}\sum_{j=1}^{n_2} s_j^2}\ , \tag{6.5}$$

kde s_j je směrodatná odchylka vypočítaná pro každou polohu rubínové kuličky vyjádřena pomocí rovnice, která vychází ze vztahu (4.2):

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{(n_2 - 1)}\sum_{i=1}^{n_2}(y_{ij} - \bar{y}_j)^2}\ , \tag{6.6}$$

kde je:

y_{ij} výsledek měření průměru kuličky v *j*-té orientace a při *i*-tém počtu opakování měření,

$\bar{y}_j$ aritmetický průměr výsledků měření v *j* orientacích měřeného objektu,

n_2 je celkový počet měření průměru kuličky při multipoziční metodě.

6.1.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{geo}

Standardní nejistota měření způsobená geometrickými chybami nano-CMM je definována pomocí vztahu [6]:

$$u_{geo} = \frac{1}{\sqrt{n_2}} \sqrt{\frac{1}{(n_2 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} (\bar{y}_j - y_{mul})^2} \,, \tag{6.7}$$

kde y_{mul} je průměrná hodnota ze všech měření, která může být vypočtena za použití rovnice [6]:

$$y_{mul} = \frac{1}{n_2 n_3} \sum_{j=1}^{n_3} \sum_{i=1}^{n_2} y_{ij} \,, \tag{6.8}$$

kde n_3 je celkový počet orientací kuličky při měření.

6.1.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{corrL}

Standardní nejistota korekce měření průměru rubínové kuličky zjištěné pomocí laserinteferometru XL80 je určena pomocí vztahu v souladu s mezinárodními dokumenty [11,14] a vychází z hodnoty rozšířené nejistoty měření rubínových kuliček získané za použití akreditovaného kalibračního postupu ČMI Brno:

$$U_{RUB} = (0.02 + 0.4L)[\mu m] \,. \tag{6.9}$$

Kde L je měřená délka v metrech. Pro standardní nejistotu měření průměru rubínové kuličky pomocí laserinteferometru XL80 platí vztah:

$$u_{corrL} = \frac{U_{RUB}}{k} \,, \tag{6.10}$$

kde k je koeficient rozšíření.

6.1.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp}

Standardní nejistota měření způsobená teplotními vlivy na měření je definována pomocí vztahu [6]:

$$u_{temp} = L\sqrt{(u_t^2 + u_{cal}^2)\alpha_{mo}^2 + (u_t^2 + u_{cal}^2)\alpha_{cmm}^2 + (u_{\alpha mo}(T_{mo} - 20))^2 + (u_{\alpha cmm}(T_{cmm} - 20))^2} \,, \tag{6.11}$$

kde je:

T_{mo} průměrná teplota kuliček během měření [°C],

T_{cmm} průměrná teplota těla nano-CMM NMM-1 během měření [°C],

$u_{\alpha mo}$ standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu kuliček,

$u_{\alpha cmm}$ standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,

α_{mo} koeficient délkové roztažnosti materiálu kuliček,

α_{cmm} koeficient délkové roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,

u_t standardní nejistota měření použitého teploměru při měření,

u_{cal} standardní nejistota kalibrace použitého teploměru.

- *Stanovení složky nejistoty měření* $u_{\alpha mo}$

Při stanovení standardní nejistoty určení teplotní roztažnosti měřeného objektu vycházíme z faktu, že měřicí přístroj a měřený objekt jsou vyrobeny z více rozdílných materiálů. Pro potřeby stanovení této složky nejistoty měření odhadneme meze rozdílu koeficientů na $\Delta\alpha = \pm 0{,}1 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$. (V případě použití jiných materiálů měřených objektů bude tato hodnota odlišná.) Jako střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti rubínu bereme v úvahu hodnotu: $\alpha_{mo} = 4{,}5 \cdot 10^{-6}\ K^{-1} = 4{,}5\ \mu m \cdot m^{-1}\ °C$.

Pro stanovení složky standardní nejistoty předpokládáme rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení, a proto platí rovnice vztah pro výpočet standardní nejistoty způsobené určení teplotní roztažnosti měřeného objektu:

$$u_{\alpha mo} = \frac{\Delta\alpha_{mo}}{\chi}, \tag{6.12}$$

kde je:

$\Delta\alpha_{mo}$ hodnota předpokládané odchylky určení hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti měřeného objektu,

χ koeficient odvozený pro rovnoměrné rozdělení.

- *Stanovení složky nejistoty měření* $u_{\alpha cmm}$

Při stanovení standardní nejistoty neznalosti teplotní roztažnosti materiálu nano-CMM vycházíme z předpokladu, že konstrukční celky měřicího přístroje jsou vyrobeny z více rozdílných materiálů, nicméně hlavní části těla nano-CMM SIOS NMM-1 jsou vyrobeny z materiálu Zerodur, který vyniká malou hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti materiálu. Pro potřeby stanovení této složky nejistoty měření odhadneme meze rozdílu koeficientů na $\Delta\alpha = \pm 0{,}1 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$. (V případě použití jiných materiálů konstrukce přístroje bude tato hodnota odlišná, pravděpodobně větší.) Pro střední hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti sklokeramického materiálu Zerodur bereme v úvahu hodnotu: $\alpha_{cmm} = (0 \pm 0{,}1) \cdot 10^{-6}\ K^{-1} = (0 \pm 0{,}1)\ \mu m/m\ °C$.

Pro stanovení složky standardní nejistoty předpokládáme rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení, a proto platí rovnice:

$$u_{\alpha cmm} = \frac{\Delta\alpha_{cmm}}{\chi}, \tag{6.13}$$

kde je:

$\Delta\alpha_{cmm}$ hodnota předpokládané odchylky určení hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti nano-CMM NMM-1,

χ koeficient odvozený pro rovnoměrné rozdělení (4.19).

- *Stanovení složky nejistoty měření* $u_{\Delta t}$

I když se snažíme o co nejlepší vyrovnání teplot nano-CMM a měřeného objektu, vlivem přenosu teploty lidského těla a dalších vlivů se mohou obě teploty lišit. Pro potřeby našeho měření, které realizujeme v uzavřeném a izolovaném boxu, postačí, když odhadneme meze rozdílu teplot měřeného objektu a tpřístroje na $\Delta t = 0{,}5$ °C. Standardní nejistota rozdílu teplot (rovnoměrné rozdělení) je:

$$u_{\Delta t} = \frac{\Delta t}{\chi}, \tag{6.14}$$

kde je:

Δt hodnota meze rozdílu teplot,

χ koeficient odvozený pro rovnoměrné rozdělení (4.19).

V tabulce 6.1 je uveden záznam z měření teploty v pracovním prostoru přístroje nano-CMM NMM-1. Rozmístění snímacích čidel teploměru Amet bylo zvoleno tak, aby byl pokryt rovnoměrně celý prostor uzavíratelného boxu přístroje. Kryt byl během měření vždy uzavřen z důvodu dosažení maximální stability teplotních parametrů vzduchu, těla konstrukce přístroje i vlastních rubínových kuliček. Osvit pracovního prostoru byl realizován pomocí LED osvětlení digitálních kamer, které se vyznačuje minimálními teplotními ztrátami.

Tab. 6.1 *Záznam měření teploty v pracovním prostoru přístroje v laboratoři (°C).*

Číslo měření	Teplota v boxu NNM-1	Teplota v laboratoři
1	20.1	20.4
2	20.1	20.5
3	20.2	20.6
4	20.2	20.3
5	20.4	20.5
6	20.5	20.7
7	20.6	20.8
8	20.7	20.6
9	20.8	20.8
10	21.0	20.7
Průměr	20.5	20.6

- *Stanovení složky nejistoty měření* u_{cal}

Standardní nejistota měření způsobená použitím etalonu – přenosného teploměru Amet vychází z hodnoty rozšířené nejistoty měření získané při kalibraci přístroje za použití akreditovaného kalibračního postupu v laboratořích Oddělení měření teploty ČMI Brno. Hodnota rozšířené nejistoty měření uvedená na kalibračním listě je popsána vztahem U_{tep} = 0,1°C. Pro standardní nejistotu měření způsobenou použitím etalonu – laserinteferometru XL80 platí vztah:

$$u_{cal} = \frac{U_{tep}}{k}, \tag{6.15}$$

kde $k = 2$ je koeficient rozšíření.

6.1.7 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob}

Dle údajů uváděných výrobcem snímacího zařízení Gannen XP [8] je rozšířená nejistota měření tohoto dotykového snímače dána hodnotou U_{prob} = 45nm. S koeficientem rozšíření k = 2. Pro stanovení složky standardní nejistoty měření způsobené snímacím dotykem proto platí rovnice:

$$u_{prob} = \frac{U_{prob}}{k}, \tag{6.16}$$

kde je:

k koeficient rozšíření,

U_{prob} rozšířená nejistota měření snímače uváděná výrobcem.

6.1.8 Stanovení složky nejistoty měření u_L

Standardní nejistota měření stanovení korekce pro měření nekalibrovaného objektu na nano-CMM NMM-1 je definována pomocí vztahu popsaného rovnicí (6.2). Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení pravděpodobnosti s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $\chi = \sqrt{3}$. Pro stanovení složky standardní nejistoty měření způsobené snímacím dotykem proto platí rovnice:

$$u_L = \frac{E_L}{\chi}, \tag{6.17}$$

kde je:

E_L průměrná chyba měření délky pomocí laserintefrerometru XL 80,

χ koeficient odvozený pro rovnoměrné rozdělení (4.19).

Pro lepší názornost slouží tabulka 6.3, kde jsou zobrazeny jednotlivé příspěvky standardní nejistoty měření nano-CMM NMM-1.

6.2 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 popsaná v odborné literatuře [6, 14, 87 - 96], ovšem pro oblast nano-CMM je nutné ji upravit.

6.2.1 Obecný vztah pro nejistoty měření

Obecný vztah pro výpočet rozšířené nejistoty měření nano-CMM NMM-1 je taktéž vytvořen v souladu s obecně zavedenou praxí, která je popsána v mezinárodních dokumentech [3, 5, 11, 14] i vědeckými publikacemi [6, 19].

$$U = k\sqrt{u_e^2 + u_p^2 + u_w^2 + u_b^2}\,, \tag{6.18}$$

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 a 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.

Po provedení této analýzy má upřesněný vztah pro výpočet rozšířené nejistoty měření pomocí substituční metody tento tvar:

$$U_{subs} = k\sqrt{u_r^2 + u_{prob}^2 + u_a^2 + u_e^2 + u_{\alpha mo}^2 + u_{\alpha cmm}^2 + u_{kt}^2 + u_{tcmm}^2 + u_{cl}^2 + u_u^2 + u_{nt}^2 + u_{pe}^2}\,,$$

který po zjednodušení zápisu standardních nejistot vlivem teplotních podmínek při měření má tvar:

$$U_{subs} = k\sqrt{u_r^2 + u_{prob}^2 + u_a^2 + u_e^2 + u_{temp}^2 + u_{cl}^2 + u_u^2 + u_{nt}^2 + u_{pe}^2}\,, \tag{6.19}$$

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,

$u_{\alpha mo}$ standardní nejistota neznalosti teplotní roztažnosti měřeného objektu,

$u_{\alpha cmm}$ standardní nejistota neznalosti teplotní roztažnosti konstrukce nano-CMM NMM-1,

u_{kt} standardní nejistota měření kalibrace použitého teploměru,

u_{tcmm} standardní nejistota měření skutečné teploty v pracovním prostoru nano-CMM NMM-1,

u_{cl} standardní nejistota měření způsobená vlivem nečistoty měřeného objektu,

u_u standardní nejistota měření způsobená upnutím použitého etalonu,

u_{nt} standardní nejistota měření způsobená nestabilitou teploty použitého etalonu,

u_{temp} standardní nejistota měření způsobená nestabilitou teploty konstrukce nano-CMM NMM-1,

u_{pe} standardní nejistota měření způsobená vlivem textury povrchu použitého etalonu.

6.2.2 Stanovení složky nejistoty měření u_r

Standardní nejistota měření způsobená vlivem rozlišitelnosti odměřovacího systému nano-CMM je odvozena od údaje výrobce nano-CMM NMM-1, který udává hodnotu 0,1 nm. U této hodnoty předpokládáme rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Vztah pro výpočet standardní nejistoty způsobené vlivem rozlišitelnosti nano-CMM NMM-1 má tvar:

$$u_r = \frac{D}{\chi}, \tag{6.20}$$

kde D je hodnota rozlišení měřicího systému nano-CMM a χ je koeficient odvozený pro rovnoměrné rozdělení.

6.2.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob}

Dle údajů uváděných výrobcem snímacího zařízení Gannen XP [8] je rozšířená nejistota měření tohoto dotykového snímače U_{prob} = 45nm s koeficientem rozšíření k = 2. Pro stanovení složky standardní nejistoty měření způsobené snímacím dotykem proto platí rovnice 6.16. Pro lepší názornost slouží tabulka 6.3, kde jsou zobrazeny jednotlivé příspěvky standardní nejistoty měření nano-CMM NMM-1.

6.2.4 Stanovení složky nejistoty měření u_a

Standardní nejistota měření vyhodnocená způsobem A je definována pomocí vztahu (4.6), kde je směrodatná odchylka vypočítaná pro každou polohu rubínové kuličky vyjádřena:

$$u_{rep} = u_a(y) = \sqrt{\frac{1}{(n_4 - 1)} \sum_{i=1}^{n_4} (y_i - \bar{y})^2}\ , \tag{6.21}$$

kde je:

n_4 počet měření kuličky při substituční metodě,

y_i výsledek měření *i*-tého měření,

$\bar{y}$ aritmetický průměr výsledků měření.

6.2.5 Stanovení složky nejistoty měření u_e

Standardní nejistota měření způsobená použitím etalonu – laserinteferometru XL80 vychází z hodnoty rozšířené nejistoty měření získané při kalibraci přístroje za použití akreditovaného kalibračního postupu v laboratořích primární metrologie ČMI Brno. Hodnota rozšířené nejistoty měření uvedená na kalibračním listě je dána hodnotou U_{las} = (0,02 + 0,4*L*) nm, kde *L* je měřená délka v *mm*. Pro standardní nejistotu měření způsobenou použitím etalonu – laserinteferometru XL80 platí vztah:

$$u_e = \frac{U_{las}}{k}, \tag{6.22}$$

kde *k* je koeficient rozšíření.

6.2.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp}

Standardní nejistota měření způsobená teplotními vlivy na měření je definována pomocí vztahu (6.11), který je zde uveden pouze pro lepší přehlednost:

$$u_{temp} = L\sqrt{(u_t^2 + u_{cal}^2)\alpha_{mo}^2 + (u_t^2 + u_{cal}^2)\alpha_{cmm}^2 + (u_{\alpha mo}(T_{mo} - 20))^2 + (u_{\alpha cmm}(T_{cmm} - 20))^2},$$

kde je:

T_{mo} průměrná teplota kuliček během měření [°C],

T_{cmm} průměrná teplota těla nano-CMM NMM-1 během měření [°C],

$u_{\alpha mo}$ standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu kuliček,

$u_{\alpha cmm}$ standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,

α_{mo} koeficient délkové roztažnosti materiálu kuliček,

α_{cmm} koeficient délkové roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,

u_t standardní nejistota měření použitého teploměru při měření,

u_{cal} standardní nejistota kalibrace použitého teploměru.

6.2.7 Stanovení složky nejistoty měření u_{cl}

Při přesných měření v oblasti nanometrologie je nutné počítat i s ovlivňujícími faktory, které se při standardních měření téměř nevyskytují nebo jsou z hlediska přesnosti měření nepodstatné, tudíž si můžeme dovolit je zanedbat. Jedním z těchto faktorů může být vliv znečištění povrchu snímaného objektu. Před každým měřením se předpokládá pečlivé očištění povrchu měřeného objektu a uzavření krytu ochranného boxu nano-CMM během vlastního měření. Nicméně, nelze

vyloučit možnost, že dojde během měření v boxu k usazení prachových částic, které obsahuje filtrovaný vzduch v laboratoři, na povrch měřeného objektu.

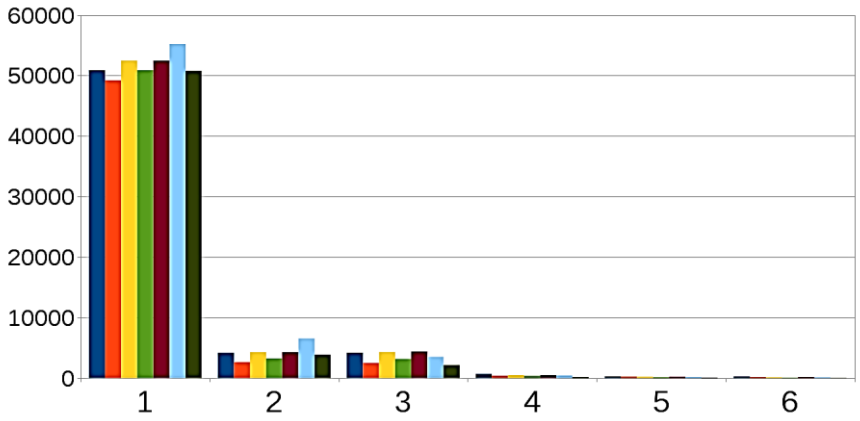
V případě použití optických, či jiných bezdotykových metod snímání, lze použít různých forem *sw* filtrace k potlačení vlivu prachových nečistot na přesnost měření. Tento postup však u dotykového snímání pomocí sondy Gannen-XP zvolit nemůžeme. Proto se na základě těchto poznatků přistoupilo ke stanovení složky nejistoty měření způsobené možnými nečistotami na povrchu objektu. Jako základ pro stanovení tohoto příspěvku byly zvoleny výsledky souboru laboratorních měření vzduchu v podzemních laboratořích ČMI Brno. K těmto měřením bylo použito zařízení na kalibraci přenosných čítačů nečistot vzduchu v laboratorních prostorách.

Měření probíhala při různých režimech zařízení, mimo jiné i v režimu, kdy byly odpojeny oba generátory pevných částic, všechny typy filtrů a do systému tak byl nasáván neupravený vzduch z laboratoře. I v případě, že je do laboratoře dodán filtrovaný a teplotně stabilizovaný vzduch [21, 22], není možné vyloučit přítomnost jemných pevných částic prachu v tomto vzduchu.

Tab. 6.2 *Rozdělení velikostí částic prachu dle snímacích kanálů etalonového čítače částic [21].*

Číslo kanálu	Rozměr částic prachu [nm]
1	větší než 300
2	větší než 500
3	větší než 1000
4	větší než 3000
5	větší než 5000
6	větší než 10000

Na základě výsledků měření počtu pevných částic v laboratorním vzduchu, které jsou uvedeny na obrázku 6.3 a v tabulce 6.2, lze odhadnout meze velikosti částic prachu s nejvyšším číslem výskytu na Δp = 150nm.



Obr. 6.3 Měřená data vzduchu v laboratoři, sedm samostatných měření. Popis: osa x – číslo kanálu čítače částic. Osa y – počet pevných částic v laboratorním vzduchu. Zvolený objem vzduchu byl 0.1 m^3 pro každé měření [21].

Pro stanovení složky standardní nejistoty měření způsobené nečistotou měřeného objektu proto platí vztah:

$$u_{cl} = \frac{\Delta p}{\chi}, \tag{6.23}$$

kde je:

Δp hodnota velikosti prachové částice o nejvyšším výskytu,

χ koeficient odvozený pro rovnoměrné rozdělení (4.19).

6.2.8 Stanovení složky nejistoty měření u_u

Umístění rubínových kuliček je vyřešeno pomocí upínacího přípravku o 25 otvorech, který umožňuje pokrýt celý měřicí rozsah nano-CMM v osách *x* a *y*. Otvory jsou vyvrtány s daným zahloubením, které umožňuje stabilní polohu kuličky v každém otvoru. Vzhledem k malé snímací síle dotykové sondy Gannen XP a směru jejího vektoru do středu kuličky, tzn. ve směru proti desce přípravku, je toto řešení dostatečné. Přípravek je upevněn ke stolku nano-CMM pomocí dvou šroubů M5. Toto řešení a hodnoty opakovatelnosti výsledků měření dovolují složku nejistoty měření způsobenou upnutím měřeného objektu nebo etalonu zanedbat.

6.2.9 Stanovení složky nejistoty měření u_{nt}

Přístroj nano-CMM nachází v podzemní laboratoři, která se vyznačuje stabilními podmínkami prostředí pro měření. Měřený objekt i celý přístroj nano-CMM je umístěn v uzavíratelném a izolovaném boxu. Měřené objekty, respektive etalon mají kompaktní tvar a jsou vyrobeny z homogenního materiálu. Před každým měřením dochází k dostatečné teplotní stabilizaci v řádu několika hodin. Rozdíl aktuální teploty při měření od stanovené teploty pro měření délky 20°C[40] je zahrnut složky nejistoty měření u_{temp}. Tyto skutečnosti dovolují složku nejistoty měření způsobenou nestabilitou teploty použitého etalonu zanedbat.

6.2.10 Stanovení složky nejistoty měření u_{pe}

V rámci souboru měření bylo realizováno měření parametrů textury povrchu jednotlivých rubínových kuliček na přístroji AFM mikroskopu Accurex II.L, který je umístěn v laboratoři ČMI Brno. Jeho výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.4 a dopady na výslednou nejistotu měření byly shledány jako zanedbatelné, vzhledem k použití dotykové nano-sondy Gannen XP s průměrem d_{saf} = 0,3mm. Tyto skutečnosti dovolují složku nejistoty měření způsobenou vlivem textury povrchu použitého etalonu zanedbat.

Pro lepší názornost pokrytí všech nejvýznamnějších vlivů slouží tabulka 6.3, ve které jsou uvedeny všechny významné vlivy na výslednou nejistotu měření přístroje nano-CMM NMM-1 a jejich forma zápisu v disertační práci.

Tab. 6.3 Zdroje nejistoty při měření na přístroji nano-CMM NMM-1.

Nejistota měření	**Zápis jednotlivých vlivů**		
způsobená vlivem	u_{rep}	u_{geo}	E_L, u_{corr}
Opakovatelnost měření	X		
Výsledek měření	X		
Znečištění povrchu kuliček	X		
Drsnost povrchu kuliček	X		
Chyby geometrie CMM		X	
Vliv snímacího dotyku		X	
Průměr snímacího dotyku		X	
Malý počet měřicích bodů	X		
Proložení souřadného systému CMM	X	X	
do těla měřeného objektu			
Průměrná chyba měření délky			X
Rozdíl teplot, drift	X	X	X
Změna teploty během měření	X	X	X
Ustavení, manipulace		X	
Korekce teploty nano-CMM		X	X
Korekce teploty měřeného objektu		X	X
Dynamické chyby vyplývající	X		
z vlastního měření			

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

$$U_{subs} = k\sqrt{u_r^2 + u_{prob}^2 + u_a^2 + u_e^2 + u_{temp}^2 + u_{cl}^2}\ . \tag{6.24}$$

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_{cl} standardní nejistota měření způsobená vlivem nečistoty měřeného objektu,

u_{temp} standardní nejistota měření způsobená nestabilitou teploty konstrukce nano-CMM NMM-1.

6.3 METODA MONTE CARLO PŘI STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Tato metoda je určena pro rychlý odhad nejistoty měření s přiměřenou spolehlivostí a redukuje zátěž na uživatele CMM, ať už operátora nebo metrologa. Z hlediska metrologické návaznosti nejpřesnějších měřicích přístrojů a etalonů hraje určení nejistoty měření zásadní roli. Realita však je taková, že nejistota měření může být analyticky počítána pouze ve zjednodušeném modelovém případu. Například, v případě měření se souřadnicovým měřicím strojem (CMM), se jedná o složitou strukturu prostorového měření, kde také uživatel (operátor) může libovolně měnit konfiguraci měření, včetně samotného postupu pro vyhodnocení naměřených výsledků [6].

To vyžaduje značné úsilí uživatele na vyhodnocení nejistoty měření a standardní způsob stanovení se obtížně aplikuje na komplikovaná měření. Jedním z omezujících faktorů může být

omezený počet provedených měření z důvodů ekonomické a časové náročnosti. Za účelem vyřešení tohoto problému, lze využít aparát odhadu nejistoty pomocí simulace MC. V disertační práci, je stanoven jednoduchý způsob odhadu nejistoty pomocí metody MC (Monte-Carlo Simulation).

Metody stanovení přesnosti měření (multipoziční a substituční) předpokládají, že jednotlivé komponenty standardní nejistoty měření mají stabilní rozdělení pravděpodobnosti. Popis vhodného způsobu použití metody MC je popsán v kapitole 4.6. 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 (4.3) pro vyjádření chyby měření Δ sledovaného systému. Obecný vztah pro vyjádření hodnoty měřené (korigované) veličiny y_{cor} má tvar:

$$y_{cor} = \bar{y} - \Delta_S \,, \tag{6.25}$$

kde je:

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

Δ_S je systematická chyba nano-CMM NMM-1.

6.3.1 Matematický model měření pro multipoziční metodu

Matematický model měření na přístroji 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 [6, 19] a normativních dokumentů [18, 20]:

$$y_{cor} = \bar{y}(1+\alpha_N \Delta t) - L\frac{1}{n_3}\sum_{j=1}^{n_3}\sum_{i=1}^{n_3}\frac{L_{measstd_{ij}}(1+\alpha_W \Delta t) - L_{calstd_{ij}}}{L_{calstd_{ij}}} - \frac{1}{n_5}\sum_{i=1}^{n_5}(D_{meas_i} - D_{cal_i}) \,. \tag{6.26}$$

Odpovídající úpravou této rovnice pro multipoziční metodu je matematický model měření zahrnující vyjádření hodnot E_L a E_D ze vztahů (6.1) a (6.2), který je vyjádřen tímto vztahem:

$$y_{corm} = \bar{y}(1+\alpha_N \Delta t) - L\frac{L_{measstd}(1+\alpha_W \Delta t) - L_{calstd}}{L_{calstd}} \,, \tag{6.27}$$

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.

6.3.2 Matematický model měření pro substituční metodu

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 nejnovějších vědeckých publikací [6, 19] a normativních dokumentů [18, 20]:

$$y_{cors} = \bar{y}(1+\alpha_W \Delta t) - (y_w - x_{cw}), \tag{6.28}$$

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.

6.3.3 Popis skriptu v programu MatLab®

Měření etalonů délky bylo simulováno pomocí metody MC, s jejíž pomocí byla taktéž stanovena nejistota měření. Vlastní provedení metody MC bylo provedeno v *sw* prostředí MatLab®. Získané výsledky jsou prezentovány v kapitole 7 této disertační práce. Jsou porovnatelné (korelovatelné) mezi sebou, což dokazuje, že vyvinutý model je správný. V další fázi se přiřadilo odpovídající rozdělení pravděpodobnosti pro vstupní proměnné. Stejně jako u obou nesimulativních metod, i zde se nejdříve provedl Grubbsův test odlehlých hodnot.

Nejdříve se naměřená data transformovala do matice A. Data byla uložena v jednoduchém textovém editoru ve formátu *.txt tak, že každý řádek obsahuje jednu naměřenou hodnotu (zapsanou s desetinou tečkou místo čárky). Měřené hodnoty byly v matici zapsány v řádu nanometrů. Dále byla provedena volba příslušných parametrů, získaných během měření. Jedná se o tyto parametry:

- počet simulovaných hodnot,
- minimální a maximální hodnota teplotního koeficientu délkové roztažnosti,
- minimální a maximální odchylka teploty během měření od teploty 20 °C,
- hodnoty z kalibrace etalonu (střední hodnota průměru etalonu a standardní nejistota měření),
- nominální hodnotu etalonu,
- model pro výpočet průměru z vygenerovaných hodnot.

Skript po jeho spuštění a provedení matematických operací vykreslil histogram rozdělení spočtených dat modelu z vygenerovaných hodnot a uložil ho do samostatného souboru. Pro

vykreslení bylo nastaveno 50 tříd histogramu z důvodu lepší přehlednosti rozložení vypočtených dat použitého modelu. Zobrazily se také vypočtené hodnoty průměru, standardní nejistoty a rozšířené nejistoty z vygenerovaných dat, taktéž v jednotkách nanometrů. Nejsložitější fází při použití metody MC bylo stanovení vhodných matematických modelů pro výpočet průměru rubínových kuliček z vygenerovaných hodnot pro obě použité metody stanovení nejistoty měření. Použité modely, uvedené v popisovaných skriptech, vycházejí ze zkušeností získaných během měření a z modelů uvedených v odborné literatuře [6, 19, 39, 41, 45, 48, 52, 82, 83]. Parametry rozdělení pravděpodobnosti nejdůležitějších vstupních veličin jsou uvedeny v kapitole 10.

Před spuštěním skriptu bylo nutné doplnit potřebné charakteristiky vstupních veličin, uvedené v kapitolách 6.3.1 a 6.3.2 a ověřit správnost zvolených pravděpodobnostních rozdělení. Pro naměřené hodnoty se předpokládalo normální rozdělení. Podoba uvedeného skriptu s příslušnými hodnotami jednotlivých parametrů pro substituční metodu je uvedena v příloze E a F. Výstupem této metody je histogram rozdělení vypočtených dat modelu, hodnoty průměru, standardní nejistoty a rozšířené nejistoty z vygenerovaných dat. Ty jsou uvedené v kapitole 9.

7 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ PRŮMĚRU RUBÍNOVÝCH KULIČEK MULTIPOZIČNÍ METODOU

Pro splnění cílů disertační práce - stanovení přesnosti měření na přístroji nano-CMM NMM-1 bylo zvoleno měření rubínových kuliček o jmenovitém průměru d = (1, 2, 3 a 4) mm, které byly umístěny postupně ve třech určených pozicích speciálního přípravku (obr. 5.5 a 5.6), které sloužily k uchycení rubínových kuliček o jmenovitých průměrech d v rozsahu (1 až 4) mm.

Vlastní měření průměru rubínových kuliček (ve 25 bodech dotyku snímače v souladu s normou ČSN EN ISO 10360-2 [20]) bylo provedeno 10x ve třech rozdílných polohách upínacího přípravku dle obrázku 5.8 v kapitole 5.3. Vlastní výpočet nejistoty měření průměru rubínové kuličky multipoziční metodou vychází ze vztahu (6.4) pro rozšířenou nejistotu měření:

$$U_{mult} = k\sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corrL}^2 + u_{temp}^2 + u_{prob}^2 + u_L^2}\ .$$

V následující kapitole 7.1 je uveden výsledek experimentu – měření průměru rubínové kuličky o jmenovitém průměru d = 1 mm a stanovení nejistoty měření průměru multipoziční metodou. V kapitole 7.2 jsou naměřená data zpracována statisticky v souladu s platnými normativními dokumenty [3, 18, 20, 22, 27, 31, 38, 40] a publikacemi [6, 7, 9, 12, 19, 24, 25, 39, 41, 44 - 51]. Zpracování slouží pro porovnání statistických výsledků pro jednotlivé příspěvky k nejistotě měření pro dané jmenovité průměry kuliček a zároveň pro porovnání obou použitých metod stanovení rozšířené nejistoty měření.

Vyhodnocení je zpracováno formou přehledných bilančních tabulek a grafů. Vyhodnocení je dále doplněno slovním komentářem, který se opírá o vlastní zkušenosti z oblasti přesných délkových měření. V samostatné příloze C jsou uvedeny statisticky zpracovaná data ze všech provedených měření rubínových kuliček o jmenovitých průměrech d = (2 až 4) mm určených pro stanovení nejistoty měření multipoziční metodou.

7.1 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ MULTIPOZIČNÍ METODOU KULIČKY D = 1MM

Postup výpočtu rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou je teoreticky popsán v kapitole 6.1. Čerpá z vědeckých publikací [6, 7, 9, 12, 19, 24, 25, 39, 41, 44 - 51] a implementuje do vlastního postupu stanovení přesnosti měření normativní dokumenty [3, 18, 20, 22, 27, 31, 38, 40], včetně interních předpisů závazných pro akreditovanou kalibrační laboratoř.

7.1.1 Stanovení složky nejistoty měření u_{rep1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobené opakovatelností nano-CMM NMM-1 vychází ze vztahů (6.5) a (6.6). V tabulce 7.1 jsou uvedeny výsledky měření rubínové kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm v jednotlivých orientacích a výsledek výpočtu hodnoty u_{rep1}. Dále jsou v tabulce 7.1 uvedeny hodnoty aritmetického průměru $\bar{y}$ dle vztahu (4.4), rozpětí R dle vztahu (4.1) a výběrové směrodatné odchylky s_y dle vztahu (4.2). Uváděné údaje jsou zaokrouhlovány na sedm desetinných míst, vlastní výpočty jsou provedeny dle reálných hodnot z *sw* 3D Firmware přístroje nano-CMM NMM-1.

Tab. 7.1 *Tabulka naměřených hodnot y_{ij} pro kuličku o průměru 1 mm.*

Naměřené hodnoty průměru rubínové kuličky d = 1mm v [mm]					
$y_{1,1}$	0.9594628	$y_{1,2}$	0.9597820	$y_{1,3}$	0.9598723
$y_{2,1}$	0.9595499	$y_{2,2}$	0.9597875	$y_{2,3}$	0.9598507
$y_{3,1}$	0.9596500	$y_{3,2}$	0.9598874	$y_{3,3}$	0.9599060
$y_{4,1}$	0.9596967	$y_{4,2}$	0.9598980	$y_{4,3}$	0.9599260
$y_{5,1}$	0.9596890	$y_{5,2}$	0.9599004	$y_{5,3}$	0.9598987
$y_{6,1}$	0.9596279	$y_{6,2}$	0.9598752	$y_{6,3}$	0.9597700
$y_{7,1}$	0.9596800	$y_{7,2}$	0.9599000	$y_{7,3}$	0.9598778
$y_{8,1}$	0.9597342	$y_{8,2}$	0.9598718	$y_{8,3}$	0.9598042
$y_{9,1}$	0.9597600	$y_{9,2}$	0.9597966	$y_{9,3}$	0.9599036
$y_{10,1}$	0.9596874	$y_{10,2}$	0.9598741	$y_{10,3}$	0.9599202
$\bar{y}_1$	0.9596538	$\bar{y}_2$	0.9598573	$\bar{y}_3$	0.9598730
y_{max1}	0.9597600	y_{max2}	0.9599004	y_{max3}	0.9599260
y_{min1}	0.9594628	y_{min2}	0.9597820	y_{min3}	0.9597700
R_1	0.0002972	R_2	0.0001183	R_3	0.0001560
s_1	0.0000886	s_2	0.0000486	s_3	0.0000512
		$\boldsymbol{u_{rep1}}$ **=**	**0.0000215**		

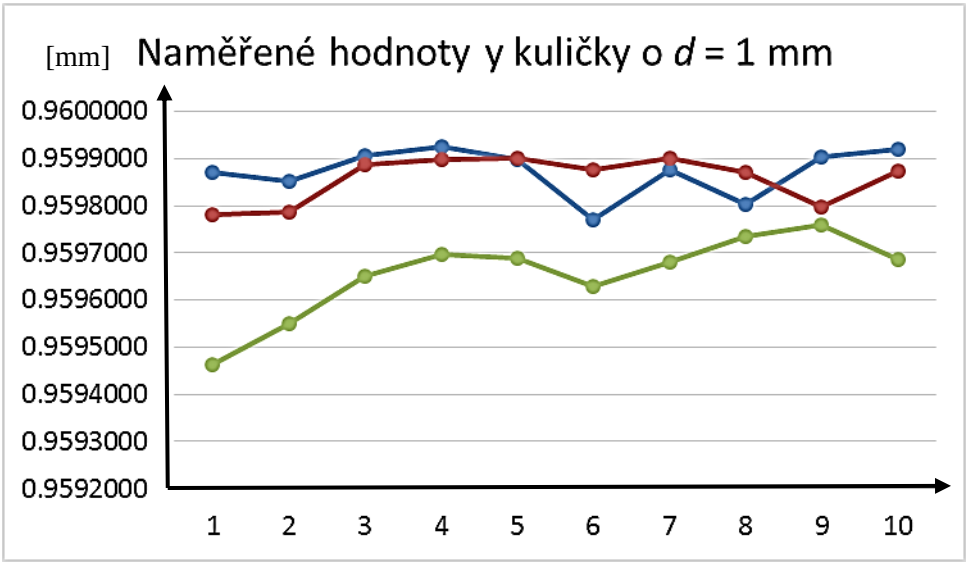
Dle prvního sloupce tabulky 7.1 můžeme konstatovat, že naměřené hodnoty průměru kuličky v základní poloze orientace č. 1 (dle obrázku 5.8) se pohybují od 0,9594628 mm do 0,9597600 mm (výběrové rozpětí je 0,0002972 mm). Aritmetický průměr těchto hodnot je 0,9596538 mm a výběrová směrodatná odchylka je 0,0000886 mm.

V druhém sloupci tabulky 7.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty průměru kuličky v poloze orientace č. 2 (dle obrázku 5.8). Pohybují se od 0,9597820 mm do 0,9599004 mm (výběrové rozpětí je 0,0001183 mm). Aritmetický průměr těchto hodnot je 0,9598573 mm a výběrová směrodatná odchylka 0,0000486 mm.

V třetím sloupci tabulky 7.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty průměru kuličky v poloze orientace č. 3 (dle obrázku 5.8). Pohybují se od 0,9597700 mm do 0,9599260 mm (výběrové rozpětí je 0,0001560 mm). Aritmetický průměr těchto hodnot je 0,9598730 mm a výběrová směrodatná odchylka 0,0000512 mm.

Rozdíly v hodnotách rozpětí R naměřených hodnot mezi jednotlivými polohami kuliček se pohybují v řádu desetin mikrometrů, což dokazuje působení významných vlivů na vlastní měření na přístroji nano-CMM NMM-1 za použití dotykové nano-sondy Gannen XP. Standardní nejistota měření způsobená opakovatelností nano-CMM NMM-1 je po zaokrouhlení: u_{rep1} = 21,5 nm.

Na obrázku 7.1 je uveden spojnicový graf naměřených hodnot průměru kuličky y ve třech orientacích po deseti měření v každé orientaci. Grafické znázornění naměřených hodnot koresponduje s barevným řešením horní části tabulky 7.1. Je zde nejvíce patrný rozdíl mezi hodnotami rozpětí R_1 a hodnotami rozpětí R_2 a R_3.



Obr. 7.1 Graf výsledků měření hodnot průměru rubínové kuličky jmenovitém průměru d = 1 mm.

Popis: Osa x – počet měření. Osa y – naměřené hodnoty y v mm.

Pro zápis naměřených hodnot, statistického vyhodnocení a zápisu výsledků stanovení jednotlivých nejistot měření bylo zvoleno zaokrouhlení v řádu desetin nanometrů. Toto řešení koresponduje s údajem výrobce [1] o hodnotě rozlišení měřicího systému přístroje nano-CMM NMM-1.

7.1.2 Stanovení složky nejistoty měření u_{geo1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobené geometrickými chybami nano-CMM NMM-1 vychází ze vztahů (6.7) a (6.8), které jsou uvedeny v kapitole 6.1.4. V tabulce 7.2 je uveden výsledek výpočtu standardní nejistoty měření způsobené geometrickými chybami konstrukce nano-CMM NMM-1 u_{geo1}, který vychází ze vztahu (6.8).

Tab. 7.2 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{geo1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
počet měření n_1=	10	---
počet orientací n_2=	3	---
u_{geo1} =	**0,0000178**	**mm**

Výsledek tohoto výpočtu koresponduje se statistickými daty, která jsou uvedena v kapitole 7.1.1. Je zde patrný vliv vlastní konstrukce těla nano-CMM NMM-1 na výsledky měření a taktéž zde vyplývá důležitost precizního uchycení měřeného objektu. Standardní nejistota měření způsobená geometrickými chybami nan-CMM NMM-1 je po zaokrouhlení: u_{geo1} = 17,8 nm.

7.1.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{corrL1}

Výpočet standardní nejistoty měření průměru rubínové kuličky pomocí laserinterferometru XL80 vychází ze vztahů (6.9) a č. (6.10), které jsou uvedeny v kapitole 6.1.5. V tabulce 7.3 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření průměru rubínové kuličky pomocí laserinterferometru XL80 u_{corrL1}, který vychází ze vztahu (6.10).

Tab. 7.3 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{corrL1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
rozšířená nejistota U_{RUB} =	(0,02 + 0,4L)	µm
koeficient rozšíření k =	2	---
jmenovitý průměr kuličky d =	1,0	mm
měřená délka L =	0,001	m
u_{corrL1} =	**0,0000102**	**mm**

Výsledek výpočtu odpovídá hodnotám vstupních údajů, zejména měřené délce dosazené v metrech. Pro zjednodušení a urychlení výpočtů nejistoty měření byly dosazovány jmenovité průměry měřených kuliček zaokrouhlené na celé u všech průměrů kuliček. Standardní nejistota měření průměru rubínové kuličky pomocí laserinterferometru XL 80 je po zaokrouhlení: u_{corrL1} = 10,2 nm.

7.1.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobené teplotními vlivy na měření vychází ze vztahů (6.11) až (6.15), které jsou uvedeny v kapitole 6.1.6. V tabulce 7.4 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření způsobené teplotními vlivy na měření u_{temp1}, který vychází ze vztahu (6.11).

Tab. 7.4 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{temp1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
T_{mo} – průměrná teplota kuliček během měření	20,2	°C
T_{cmm} – průměrná teplota těla nano-CMM NNM-1 během měření	20,2	°C
$u_{\alpha mo}$ – standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu kuliček	0,1	K^{-1} (10^{-6})
$u_{\alpha cmm}$ – standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM	0,1	K^{-1} (10^{-6})
α_{mo} – koeficient délkové roztažnosti materiálu kuliček	4,5	K^{-1} (10^{-6})
α_{cmm} – koeficient délkové roztažnosti materiálu těla nano-CMM NNM-1	0,1	K^{-1} (10^{-6})
u_t – standardní nejistota měření použitého teploměru při měření	0,1	°C
u_{cal} – standardní nejistota kalibrace použitého teploměru	0,1	°C
L – měřená délka	0,001	m
u_{temp1} =	**0,0000064**	**mm**

Na výslednou hodnotu tohoto příspěvku standardní nejistoty měření má při nízkých hodnotách koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1 a malých odchylkách monitorované teploty během měření od 20°C (stanovená teplota pro délková měření [40]) největší vliv měřená délka, tzn. jmenovitý průměr měřených kuliček d. Standardní nejistota měření způsobená teplotními vlivy na měření je po zaokrouhlení: u_{temp1} = 6,4 nm.

7.1.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob1}

Výpočet standardní nejistoty měření dotykovým snímacím systémem Gannen XP vychází ze vztahu (6.16), který vychází z materiálů poskytnutých výrobcem snímacího systému [15] a je uveden v kapitole 6.1.7. V tabulce 7.5 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu

standardní nejistoty měření dotykovým snímacím systémem Gannen XP u_{prob1}, který vychází z údaje U_{prob} udávaného výrobcem nano-sondy Gannen XP [15].

Tab. 7.5 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{prob1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
rozšířená nejistota U_{prob} =	45	nm
koeficient rozšíření k =	2	---
u_{prob1} =	**0,0000225**	**mm**

Výsledek i postup výpočtu hodnoty tohoto příspěvku je shodný pro všechna měření za použití dotykového snímacího systému Gannen XP. Standardní nejistota měření dotykovým snímacím systémem Gannen XP je po zaokrouhlení: u_{prob1} = 22,5 nm.

7.1.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{L1}

Výpočet standardní nejistoty měření stanovení korekce pro měření nekalibrovaného objektu na přístroji nano-CMM NMM-1 vychází ze vztahu (6.17), které jsou uvedeny v kapitole 6.1.8. V tabulce 7.6 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření stanovení korekce pro měření nekalibrovaného objektu na přístroji nano-CMM NMM-1 u_{L1}, který je definován vztahem (6.17).

Tab. 7.6 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{L1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
počet měření laserinterferometrem n_3	10	---
průměrná hodnota ze všech měření $L_{measstd}$	0,9598203	mm
hodnota etalonu získaná při kalibraci L_{calstd}	0,9598398	mm
E_{L1} =	0,0000203	mm
u_{L1} =	**0,0000117**	**mm**

Při stanovení hodnoty tohoto příspěvku se vycházelo z výsledků měření kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm provedených pomocí laserinterferometru XL80 a délkoměru SIP 1002M. Měření bylo provedeno 10x ve třech záměrně zvolených polohách měřené kuličky v upínacím přípravku. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu, že nelze považovat měřený objekt, danou kuličku, za plnohodnotný etalon. Standardní nejistota měření stanovení korekce pro nekalibrovaný objekt je po zaokrouhlení: u_{L1} = 11,7 nm.

7.1.7 Stanovení rozšířené nejistoty měření U_{mult1}

Výpočet rozšířené nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 stanovené pomocí multipoziční metody vychází ze vztahu (6.4). Výsledky jejího výpočtu jsou uvedeny v bilanční tabulce 7.7. V prvním sloupci tabulky 7.7 jsou uvedeny označení všech příspěvků kombinované nejistoty měření. V druhém sloupci jsou uvedeny vztahy pro kvalifikovaný odhad jednotlivých příspěvků, které jsou vázány na jmenovitý průměr měřené kuličky. V třetím sloupci jsou uvedeny hodnoty standardní nejistoty měření jednotlivých příspěvků v jednotkách nm.

Ve čtvrtém a pátém sloupci tabulky 7.7 je uveden typ rozdělení a koeficient citlivosti jednotlivých příspěvků. V případě měření za použití dotykové nano-sondy Gannen XP na přístroji nano-CMM NMM-1 se jedná o přímé měření, z tohoto důvodu jsou všechny vedené koeficienty rovny 1. Tabulka je koncipována jako univerzální, vychází ze zavedených zvyklostí v akreditované laboratoři a umožňuje reagovat na změny v systému měření do budoucna. V posledním, šestém sloupci tabulky 7.7, jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření, konečná hodnota kombinované nejistoty měření a výsledná hodnota rozšířené nejistoty měření.

Tab. 7.7 *Bilanční tabulka výpočtu rozšířené nejistoty* U_{mult1}.

Označení příspěvku	**Odhad pro *d* = 1mm**	**Nejistota standardní**		**Typ rozdělení**	**Koeficient citlivosti**	**Příspěvek ke komb. nejistotě [nm]**
$\boldsymbol{u}_{\mathbf{rep1}}$	0,00005*d*	21.46	nm	normální	1	21.5
$\boldsymbol{u}_{\mathbf{geo1}}$	0,00002*d*	17.78	nm	normální	1	17.8
$\boldsymbol{u}_{\mathbf{corrL1}}$	0,00002*d*	10.20	nm	normální	1	10.2
$\boldsymbol{u}_{\mathbf{temp1}}$	0,00002*d*	0.64	nm	rovnoměrné	1	0.6
$\boldsymbol{u}_{\mathbf{prob1}}$	0,000045*d*	22.50	nm	normální	1	22.5
$\boldsymbol{u}_{\mathbf{L1}}$	0,00002*d*	11.71	nm	rovnoměrné	1	11.7
Nejistota kombinovaná					u_{c1} =	39.0
Nejistota rozšířená (k = 2)					$\boldsymbol{U}_{\mathbf{mult1}}$ **=**	**78.1**

Rozšířená nejistota měření průměru kuličky o d = 1mm stanovená multipoziční metodou je po zaokrouhlení: U_{mult1} = 78,1 nm. Vyhodnocení výsledků měření dalších kuliček o jmenovitých průměrech d = (2 – 5) mm bylo provedeno shodným způsobem, v další části disertační práce 7.2 jsou uváděny pouze výsledky jednotlivých příspěvků rozšířených nejistot měření daných kuliček. Podrobný postup výpočtů rozměru kuliček o jmenovitých průměrech d = (2 – 4) mm pro multipoziční je uveden v příloze C této disertační práce.

7.2 VYHODNOCENÍ VÝPOČTU NEJISTOTY MĚŘENÍ MULTIPOZIČNÍ METODOU

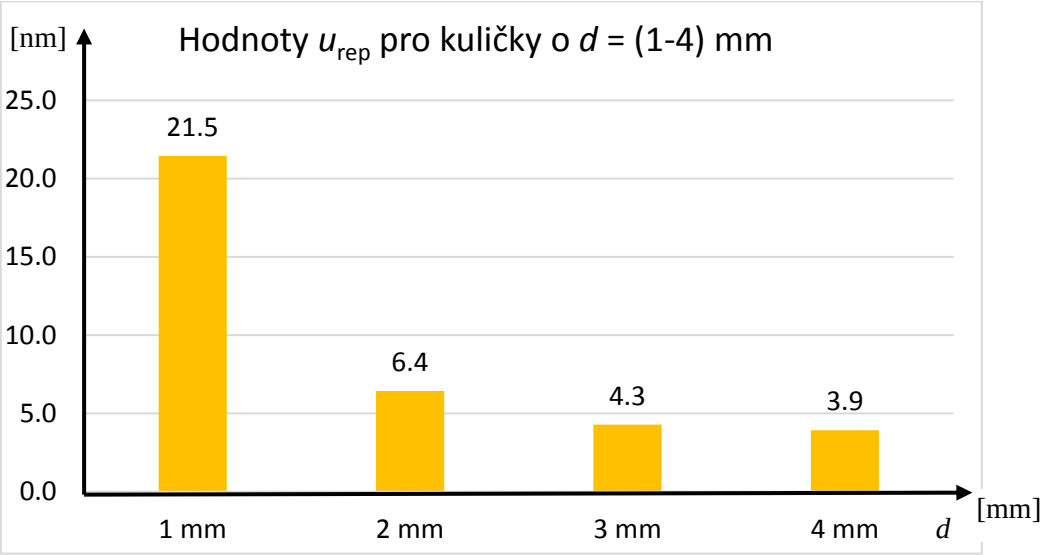
Pro vlastní stanovení přesností měření přístroje nano-CMM NMM-1 bylo přikročeno k určení kombinované nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro všechny průměry použitých kuliček. Toto řešení zajistilo pokrytí celého měřicího rozsahu přístroje nano-CMM NMM-1. V přehledové tabulce 7.8 jsou uvedeny všechny hodnoty kombinovaných a rozšířených nejistot měření jednotlivých průměrů kuliček. Výsledkem je určení rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro celý měřicí rozsah přístroje nano-CMM NMM-1.

Tab. 7.8 *Porovnání jednotlivých příspěvků nejistoty měření stanovené multipoziční metodou (nm).*

Označení příspěvku	Hodnoty pro d = 1mm	Hodnoty pro d = 2mm	Hodnoty pro d = 3mm	Hodnoty pro d = 4mm
u_{rep1-4}	21.5	6.4	4.3	3.9
u_{geo1-4}	17.8	1.6	1.5	2.5
$u_{corrL1-4}$	10.2	10.4	10.6	10.8
$u_{temp1-4}$	0.6	1.3	1.9	2.5
$u_{prob1-4}$	22.5	22.5	22.5	22.5
u_{L1-4}	11.7	6.7	10.8	9.2
u_{c1-4}	39.0	26.6	27.6	27.1
$U_{mult1-4}$	78.1	53.2	55.2	54.3

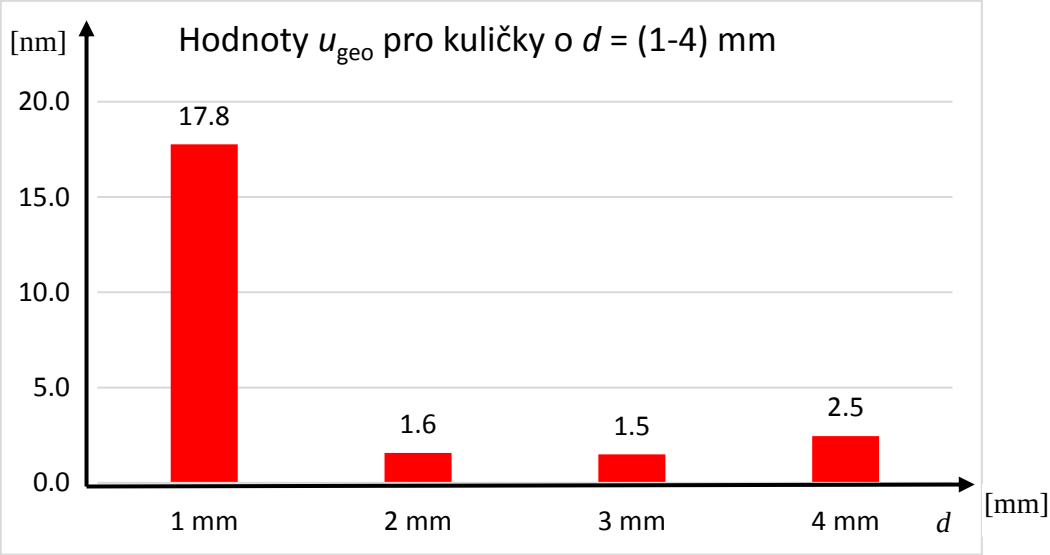
V následující části kapitoly 7.2 jsou podrobněji analyzovány jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření. Pro názornost a jednoduchost bylo zvoleno použití sloupcových grafů. Pro snadnější přehlednost koresponduje výběr barev řádků v tabulce 7.8 s barevným řešením sloupcových grafů pro jednotlivé příspěvky. Dle hodnot uvedených v tabulce 6.8 můžeme konstatovat, že hodnoty rozšířených nejistot měření se pohybují v rozmezí 53,2 až 78,1 nm.

Na obrázku 7.2 je uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené opakovatelností nano-CMM u_{rep}. Jako nejvyšší hodnota je zde standardní nejistota měření způsobená opakovatelností nano-CMM při měření kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm, která přesahuje hodnotu 20 nm. Ostatní hodnoty jednotlivých příspěvků kombinované nejistoty měření se pohybují v rozsahu 3,9 až 6,4 nm a jsou vzájemně srovnatelné. Tento průběh grafu poukazuje na omezující parametr, který vyplývá s použití snímacího dotyku o průměru 0,3 mm při měření vnějších rozměrů 1 mm a velmi pravděpodobně i menších.



Obr. 7.2 Graf příspěvků způsobených opakovatelností nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{rep1} – u_{rep5} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{rep1} – u_{rep4} v nm.

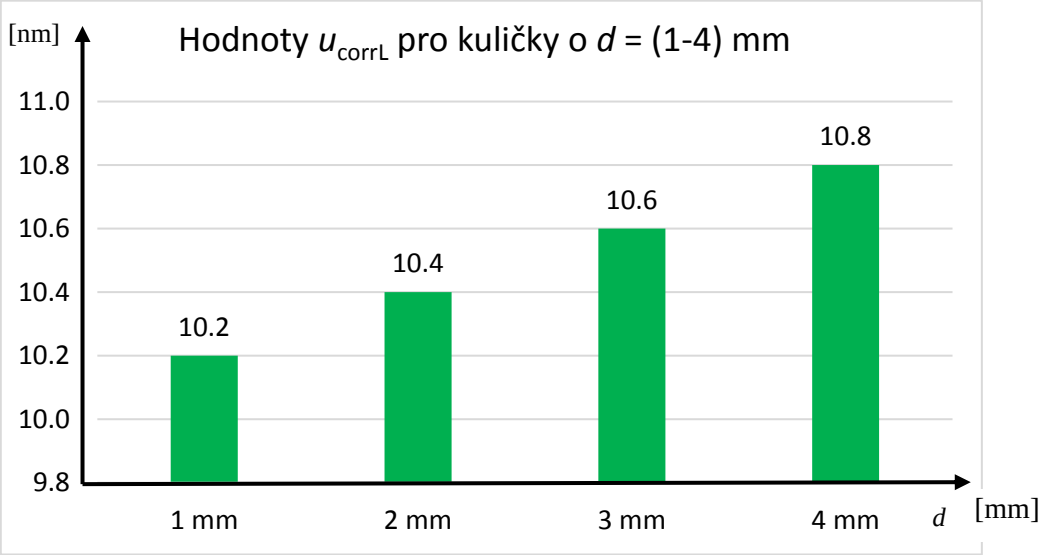
Dále je na obrázku 7.3 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené geometrickými chybami nano-CMM u_{geo}. Opět zde vychází jako nejvyšší hodnota nejistoty měření způsobenou opakovatelností nano-CMM kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm, která přesahuje hodnotu 17,8 nm. Ostatní hodnoty příspěvků ke kombinované nejistotě měření způsobených geometrickými chybami konstrukce nano-CMM se pohybují v pásmu 1,6 až 2,5 nm. Jejich hodnoty se zvyšují s rostoucím jmenovitým průměrem d měřených kuliček. Tento průběh odpovídá obvyklému stavu pří vyhodnocování nejistoty měření délkových veličin.



Obr. 7.3 Graf příspěvků způsobených geometrickými chybami nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{geo1} – u_{geo5} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{geo1} – u_{geo4} v nm.

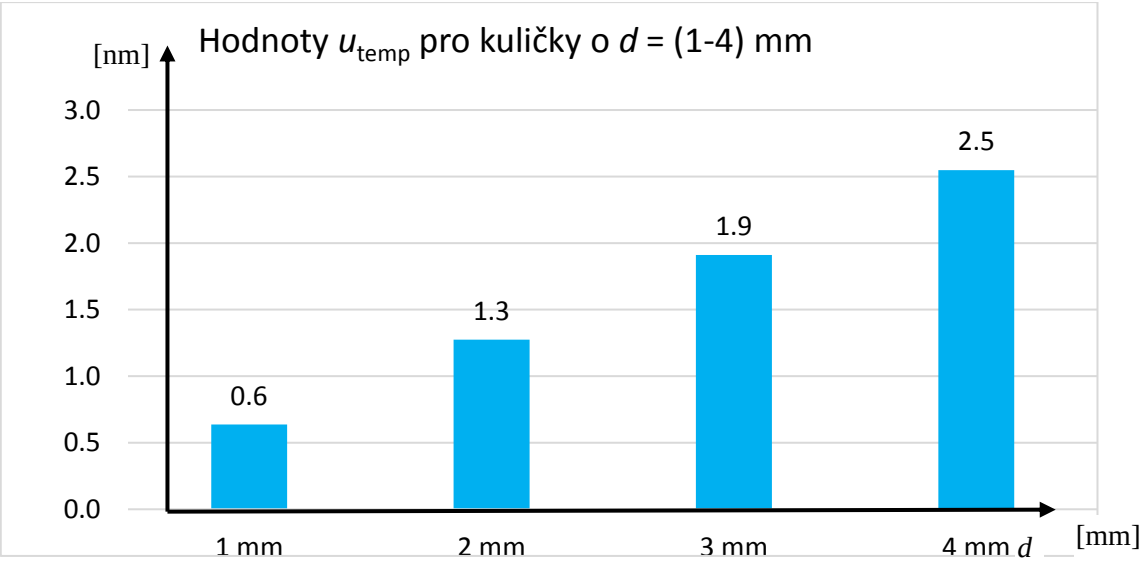
Na obrázku 7.4 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě způsobené vlivem měření průměru rubínové kuličky pomocí

laserinterferometru XL80 u_{corrL}. Velikosti hodnot těchto příspěvků korespondují se zaběhlou praxí při použití akreditované kalibrační metody, kdy při optimálních podmínkách pro měření, vlastní nejistota měření roste v závislosti na rostoucím rozměru měřené kuličky. Hodnoty příspěvků ke kombinované nejistotě způsobených vlivem měření kuliček pomocí laserinterferometru XL80 se pohybují v rozsahu 10,2 až 10,8 nm.



Obr. 7.4 Graf příspěvků způsobených měřením průměru rubínových kuliček pomocí laserinterferometru XL80 ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{corrL1} – u_{corrL4} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{corrL1} – u_{corrL4} v nm.

Na obrázku 7.5 je uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené teplotními vlivy na nano-CMM u_{temp}.

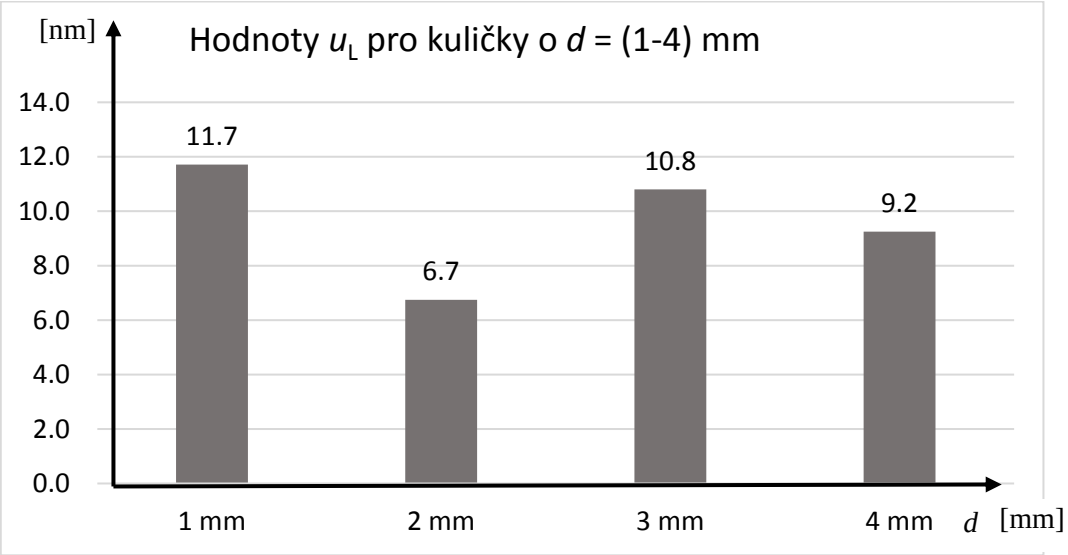


Obr. 7.5 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{temp1} – u_{temp4} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{temp1} – u_{temp4} v nm.

Velikosti hodnot těchto příspěvků korespondují se zaběhlou praxí při měření v laboratorních podmínkách akreditované laboratoře, kdy při optimálních podmínkách pro měření, vlastní nejistota

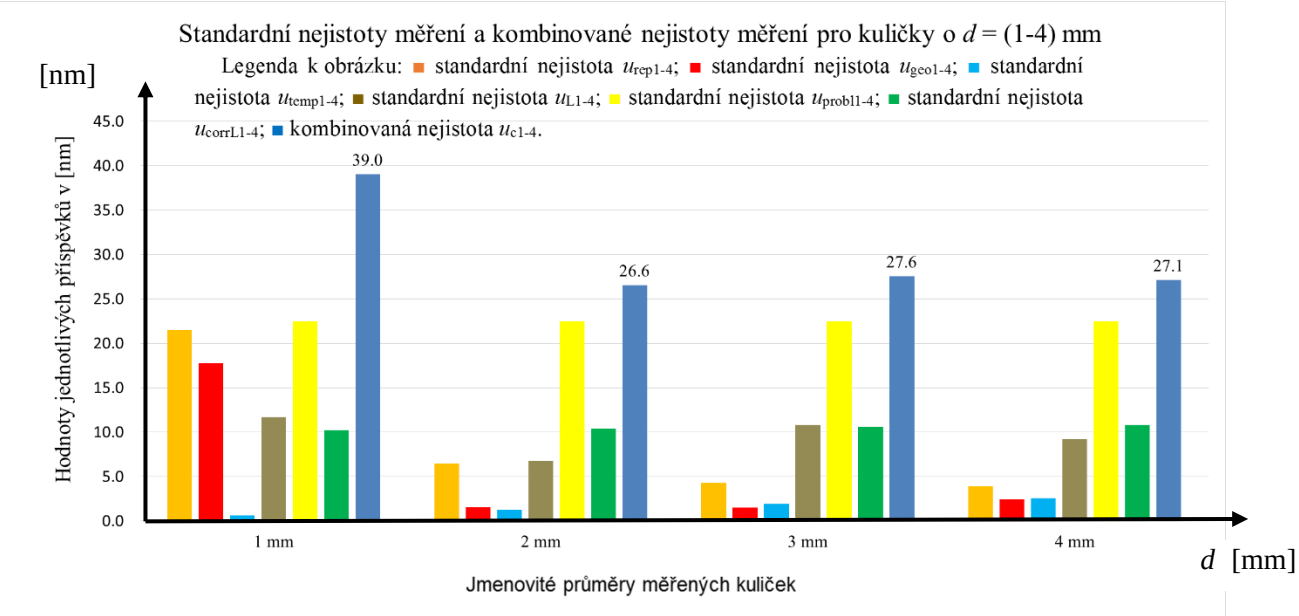
měření roste v závislosti na rostoucím rozměru měřené kuličky. Příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené teplotními vlivy na nano-CMM NMM-1se pohybují v rozsahu 0,6 až 2,5 nm. Sloupcový graf pro vyhodnocení standardní nejistoty měření způsobené dotykovým snímacím systémem Gannen XP $u_{prob1\text{-}4}$ zde není přiložen z důvodu konstantních hodnot pro všechna měření různých průměrů kuliček.

Na obrázku 7.6 je dále uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené stanovením korekce pro měření nekalibrovaného objektu na nano-CMM NMM-1 u_L. Jejich hodnoty se pohybují v rozmezí 6,7 až 11,7 nm. Hodnoty těchto příspěvků kombinované nejistoty měření vykazují závislost na dosažené opakovatelnosti měření, při vlastním měření pomocí laserinterferometru XL80.



Obr. 7.6 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM NMM-1 ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{L1} – u_{L4} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{L1} – u_{L4} v nm.

Dále je na obrázku 7.7 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 = 1mm, která se blíží hodnotě 38,5 nm. Ostatní hodnoty kombinovaných nejistoto měření se pohybují v pásmu 53,2 až 56,4 nm. Jejich hodnoty se zvyšují s rostoucím průměrem d měřených kuliček. Tento průběh odpovídá obvyklému stavu pří vyhodnocování nejistoty měření délkových veličin, kdy nejistota měření roste se zvyšující se hodnotou měřené délky.

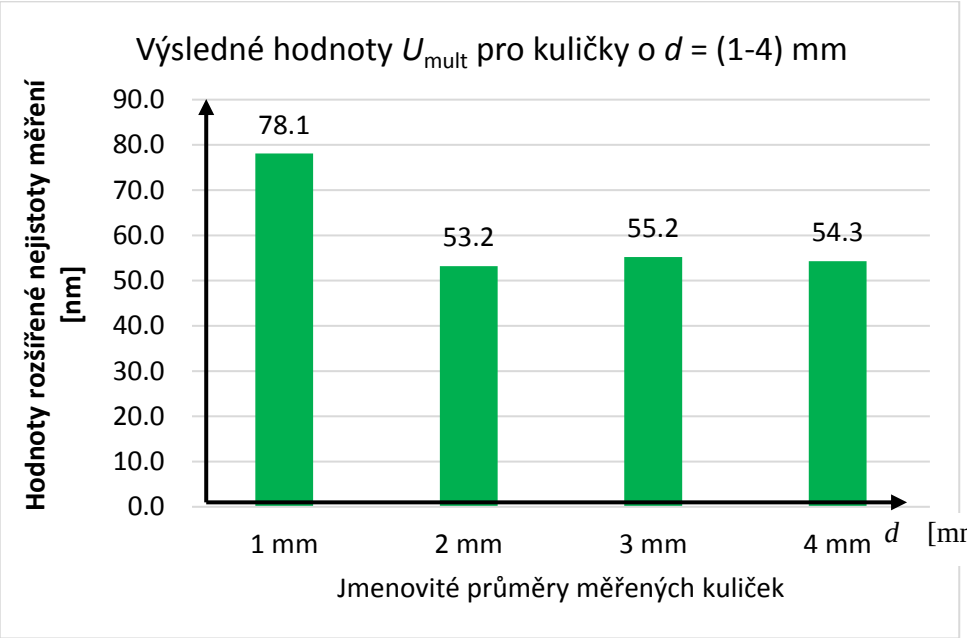


Obr. 7.7 Graf všech jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky k rozšířené nejistotě měření kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty jednotlivých příspěvků v nm.

Barevné rozlišení jednotlivých příspěvků je koncipováno shodně v tabulce 6.8 i v jednotlivých sloupcových grafech. Z grafu jasně vyplývá proporcionální rozložení hodnot jednotlivých příspěvků kombinované nejistoty měření. Nejvyšších hodnot (nad 20nm) dosahují složky $u_{prob1\text{-}5}$ a u_{rep1}. Na tyto složky je v případě zájmu o snížení výsledné hodnoty rozšířené nejistoty měření potřeba se soustředit.

Pro úplnost je na obrázku 7.8 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou znázorněny jednotlivé hodnoty rozšířených nejistot měření pro kuličky o jmenovitých průměrech d = (1 až 4) mm stanovené multipoziční metodou. Na první pohled upoutá vyšší hodnota rozšířené nejistoty měření kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm, která nabývá hodnoty 78,1 nm. Hodnoty rozšířených nejistot měření kuliček ostatních průměrů se pohybují v rozsahu 53 až 57 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 (obr. 3.5), do oblasti pokrývající spíše přístroje kategorie micro-CMM (µCMM).



Obr. 7.8 Graf rozšířených nejistot měření všech průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky rozšířených nejistot měření U_{mult1} - U_{mult4} kuliček o d = (1–4) mm.

Osa y – hodnoty rozšířených nejistot měření v nm.

Dále pak je patrná vyšší hodnota nejistoty měření způsobenou opakovatelností nano-CMM u_{rep1} pro kuličku o jmenovitém průměru d = 1mm. Ukazuje to na limity použití snímacího systému Gannen XP, který je vybaven safírovou kuličkou o průměru d_{saf} = 0,3 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, 8, 11, 14, 20] lze zapsat hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou pro rozsah měření (1 až 4) mm jako maximální z vypočtených hodnot (obr. 7.8) takto:

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

Úplný výsledek měření průměru kuličky o jmenovitém průměru d = 1 mm lze uvést tako:

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

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. Přesněji definováno – neexistence vhodného etalonu s dostatečně nízkou hodnotou rozšířené nejistoty měření jeho kalibrace.

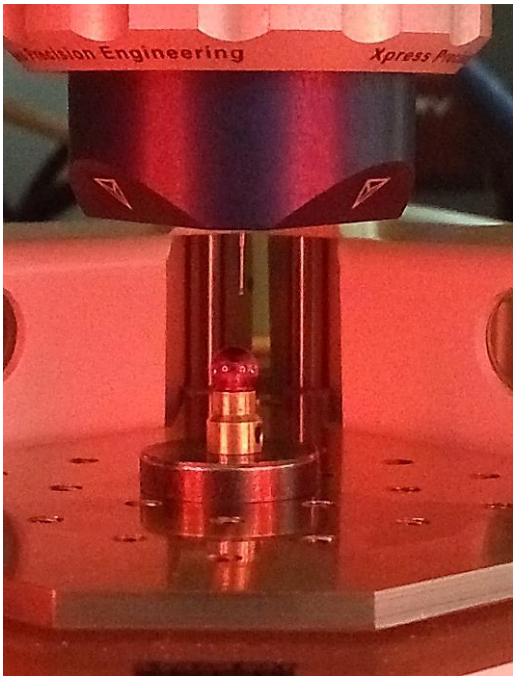
8 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ PRŮMĚRU RUBÍNOVÉ KULIČKY SUBSTITUČNÍ METODOU

Měření průměrů rubínových kuliček bylo provedeno vždy 10x ve střední poloze S upínacího přípravku dle obrázku 5.8. Teorie substituční metody je zpracována v kapitole 6.2. Vlastní výpočet nejistoty měření průměru rubínové kuličky substituční metodou vychází ze vztahu (6.24) pro rozšířenou nejistotu měření:

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

Použití různých průměrů kuliček bylo zvoleno z důvodu pokrytí téměř celého měřicího rozsahu přístroje nano-CMM NMM-1, zejména v ose *z* (5 mm). Pro plnohodnotné pokrytí měřicího rozsahu přístroje v rozsahu os *x* a *y* nano-CMM NMM-1 byl použit multipoziční speciální přípravek vyvinutý pro multipoziční metodu stanovení rozšířené nejistoty měření, který je popsán v kapitole 5.3. V následujících části kapitoly 8.1 jsou uvedeny výsledky experimentů – měření průměru rubínových kuličky o jmenovitém průměru d = 1 mm. Součástí kapitoly jsou i zpracovaná statistická data souboru naměřených dat, které slouží pro porovnání výsledků všech použitých metod stanovení nejistoty měření.

V další části 8.2 je vypracováno porovnání statisticky zpracovaných dat ze všech provedených měření rubínových kuliček o jmenovitém průměru d = (2–4) mm (obr. 8.1). Vyhodnocení je zpracováno formou přehledných bilančních tabulek a grafů. Vyhodnocení je dále doplněno slovním komentářem, který se opírá o vlastní zkušenosti z oblasti přesných délkových měření. V samostatných příloze D jsou uvedena statisticky zpracovaná data ze všech provedených měření rubínových kuliček o jmenovitých průměrech d = (2–4) mm určených pro stanovení nejistoty měření substituční metodou.



Obr. 8.1 Detail měření průměru kuličky o jmenovitém průměru d = 4 mm [autor].

8.1 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ SUBSTITUČNÍ METODOU KULIČKY D = 1MM

Postup výpočtu rozšířené nejistoty měření stanovené substituční metodou je teoreticky popsán v kapitole 6.2. Je vytvořen z vědeckých publikací [6, 9] a modifikován v souladu s normativními dokumenty [3, 5, 8, 11, 14, 20] a interními předpisy závazné pro akreditovanou kalibrační laboratoř.

Pro zápis naměřených hodnot, statistického vyhodnocení a zápisu výsledků stanovení jednotlivých nejistot měření bylo zvoleno zaokrouhlení v řádu desetin nanometrů. Toto řešení koresponduje s údajem výrobce [1] o hodnotě rozlišení měřicího systému přístroje nano-CMM NMM-1. Jedinou výjimkou je výsledná hodnota v tabulce 8.1, která je z formálních důvodů uvedena na osm desetinných míst.

8.1.1 Stanovení složky nejistoty měření u_{r1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobený vlivem rozlišení odměřovacího systému přístroje nano-CMM NMM-1 vychází ze vztahu (6.20), který je uveden v kapitole 6.2.2. V tabulce 8.1 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření způsobený vlivem rozlišení odměřovacího systému přístroje nano-CMM NMM-1 u_{r1}, který vychází z údaje o rozlišení měčicího systému D udávaného výrobcem přístroje nano-CMM NMM-1 [15].

Tab. 8.1 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{r1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
rozlišení přístroje D =	0,1	nm
koeficient rovnom. rozdělení χ =	√3	---
u_{r1} =	**0,00000006**	**mm**

Výsledek i postup výpočtu hodnoty tohoto příspěvku je shodný pro všechna měření za použití odměřovacího systému přístroje nano-CMM NMM-1. Standardní nejistota měření způsobená vlivem rozlišení odměřovacího systému je po zaokrouhlení: u_{r1} = 0,1 nm.

8.1.2 Stanovení složky nejistoty měření u_{prob1}

Výpočet standardní nejistoty měření dotykovým snímacím systémem Gannen XP vychází ze vztahu (6.16), který vychází z materiálů poskytnutých výrobcem snímacího systému [15], je popsán v kapitole 6.1.7. a je shodný s výpočtem uvedeným v kapitole 6.2.3. V tabulce 8.2 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření dotykovým snímacím systémem Gannen XP u_{prob1}, který opět vychází z údaje U_{prob} udávaného výrobcem nano-sondy Gannen XP [15], která byla použita ke všem měření průměrů kuliček.

Tab. 8.2 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{prob1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
rozšířená nejistota U_{prob} =	45	nm
koeficient rozšíření k =	2	---
u_{prob1} =	**0,0000225**	**mm**

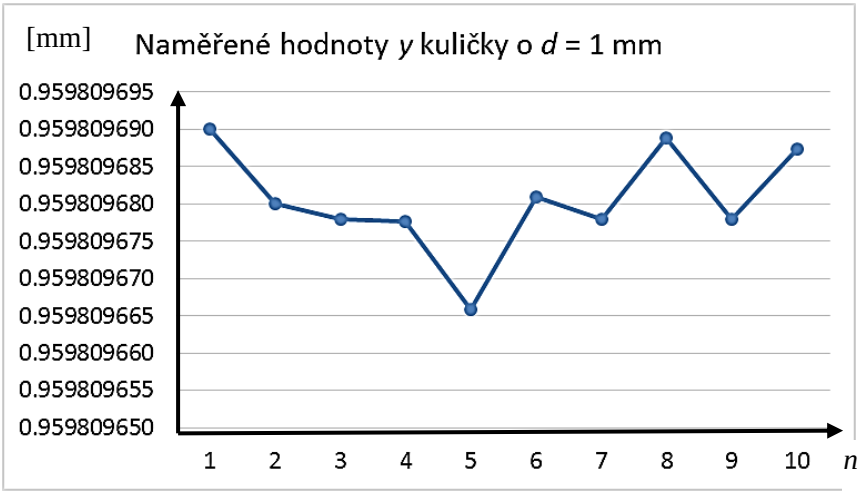
Výsledek i postup výpočtu hodnoty tohoto příspěvku je opět shodný pro všechna měření za použití dotykového snímacího systému Gannen XP i v případě aplikace substituční metody stanovení rozšířené nejistoty měření. Standardní nejistota měření dotykovým snímacím systémem Gannen XP je po zaokrouhlení: u_{prob1} = 22,5 nm.

8.1.3 Stanovení složky nejistoty měření u_{a1}

Výpočet standardní nejistoty měření vyhodnocované způsobem A přístroje nano-CMM NMM-1 vychází ze vztahu (6.21), který je uveden v kapitole 6.2.4. V tabulce 8.3 jsou uvedeny výsledky měření průměru rubínové kuličky v jednotlivých polohách pro n_1 = 10 měření, včetně statistického vyhodnocení a výsledku výpočtu standardní nejistoty měření vyhodnocované způsobem A u_{a1}. Uváděné údaje jsou zaokrouhlovány na osm desetinných míst, vlastní výpočty jsou provedeny dle reálných hodnot ze *sw* 3D Firmware přístroje nano-CMM NMM-1.

Tab. 8.3 *Tabulka naměřených hodnot průměru kuličky a statistické zpracování naměřených dat.*

Naměřené hodnoty průměru rubínové kuličky d = 1mm [mm]	
y_1	0,95980969
y_2	0,95980968
y_3	0,95980968
y_4	0,95980968
y_5	0,95980967
y_6	0,95980968
y_7	0,95980968
y_8	0,95980969
y_9	0,95980968
y_{10}	0,95980969
$\bar{y}$	0,95980968
y_{max1}	0,95980969
y_{min1}	0,95980967
R_1	0,00000241
s_1	0,00000706
u_{a1}	**0,00000223**



Obr. 8.2 Graf výsledků měření hodnot průměru rubínové kuličky Jmenovitém průměru d = 1 mm. Popis: Osa x – počet měření. Osa y – naměřené hodnoty y v mm.

Dále jsou v tabulce 8.3 uvedeny hodnoty aritmetického průměru $\bar{y}$ dle vztahu (4.4), rozpětí R dle vztahu (4.1) a výběrové směrodatné odchylky s_y dle vztahu (4.2). Na základě posouzení těchto hodnot můžeme konstatovat, že naměřené hodnoty průměru kuličky d = 1mm v základní poloze,

blíže dle obrázku 5.8 – poloha S, se pohybují od 0,95980967 mm do 0,95980969 mm (výběrové rozpětí je 0,00000241 mm). Aritmetický průměr těchto hodnot je 0,95980968 mm a výběrový směrodatná odchylka je 0,00000706 mm. Hodnota nejistoty vyhodnocené způsobem A je stanovena na 0,00000223 mm.

Na obrázku 8.1 je uveden spojnicový graf naměřených hodnot průměru kuličky y v jednotlivých polohách o celkem deseti měření. Oproti multipoziční metodě je zde nejvíce patrný rozdíl mezi hodnotami rozpětí R_1 a hodnotami rozpětí R u substituční metody. Dále lze vysledovat rostoucí trend hodnot výběrové směrodatné odchylky oproti měření pomocí přípravku pro multipoziční metodu. Standardní nejistota vyhodnocovaná způsobem A měření průměru kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm stanovená substituční metodou je po zaokrouhlení: u_{a1} = 2,23 nm.

8.1.4 Stanovení složky nejistoty měření u_{e1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobená použitým etalonem laserinterferometrem XL80 vychází ze vztahu (6.22), který je uveden v kapitole 6.2.5. V tabulce 8.4 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření způsobenou použitým etalonem laserinterferometrem XL80 u_{e1}, který vychází ze vztahu č. 5.23.

Tab. 8.4 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{e1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
rozšířená nejistota U_{las} =	(0,02 + 0,4L)	µm
koeficient rozšíření k =	2	---
jmenovitý průměr kuličky d =	1,0	mm
měřená délka L =	0,001	m
u_{e1} =	**0,0000102**	**mm**

Výsledek výpočtu odpovídá hodnotám vstupních údajů, zejména měřené délce dosazené v metrech. Pro zjednodušení a urychlení výpočtů nejistoty měření byly dosazovány jmenovité průměry měřených kuliček zaokrouhlené na celé u všech průměrů kuliček. Standardní nejistota měření způsobená použitým etalonem laserinterferometrem XL 80 je po zaokrouhlení: u_{e1} = 10,2 nm.

8.1.5 Stanovení složky nejistoty měření u_{temp1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobené teplotními vlivy na měření vychází ze vztahů (6.11) až (6.15), které jsou uvedeny v kapitole 6.1.6. V tabulce 8.5 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření způsobené teplotními vlivy na měření u_{temp}, který vychází ze vztahu (6.15). Postup stanovení této standardní nejistoty je shodný s postupem pro multipoziční metodou uvedeným v kapitole 6.1.6.

Tab. 8.5 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{temp1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
T_{mo} – průměrná teplota kuliček během měření	20,2	°C
T_{cmm} – průměrná teplota těla nano-CMM NNM-1 během měření	19,9	°C
$u_{\alpha mo}$ – standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu kuliček	0,1	$(10^{-6})\,K^{-1}$
$u_{\alpha cmm}$ – standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM	0,1	$(10^{-6})\,K^{-1}$
α_{mo} – koeficient délkové roztažnosti materiálu kuliček	4,5	$(10^{-6})\,K^{-1}$
α_{cmm} – koeficient délkové roztažnosti materiálu těla nano-CMM NNM-1	0,1	$(10^{-6})\,K^{-1}$
u_t – standardní nejistota měření použitého teploměru při měření	0,1	°C
u_{cal} – standardní nejistota kalibrace použitého teploměru	0,1	°C
L – měřená délka	0,001	m
u_{temp1} =	**0,0000064**	**mm**

Na výslednou hodnotu tohoto příspěvku standardní nejistoty měření má při nízkých hodnotách koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1 a malých odchylkách monitorované teploty během měření od 20°C (stanovená teplota pro délková měření [40]) největší vliv měřená délka, tzn. jmenovitý průměr měřených kuliček d. Standardní nejistota měření způsobená teplotními vlivy na měření je po zaokrouhlení: u_{temp1} = 6,4 nm.

8.1.6 Stanovení složky nejistoty měření u_{cl1}

Výpočet standardní nejistoty měření způsobené nečistotou měřeného objektu vychází ze vztahu (6.23), který je uveden v kapitole 6.2.7. V tabulce 8.6 jsou uvedeny vstupní hodnoty a výsledek výpočtu standardní nejistoty měření způsobený vlivem nečistoty měřeného objektu u_{cl}.

Tab. 8.6 *Tabulka výpočtu hodnoty* u_{cl1}.

Veličina	Hodnota	Jednotky
Δp =	25,0	nm
koeficient rozdělení χ =	$\sqrt{3}$	---
u_{cl} =	**0,0000145**	**mm**

Standardní nejistota měření způsobená nečistotou měřeného objektu je po zaokrouhlení: u_{cl1} = 14,5 nm.

8.1.7 Stanovení rozšířené nejistoty měření U_{subs1}

Výpočet rozšířené nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 stanovené pomocí substituční metody vychází ze vztahu (6.24). Její výpočet je uveden v bilanční tabulce 8.7. V prvním sloupci tabulky 8.7 jsou uvedeny označení všech příspěvků kombinované nejistoty měření. V druhém sloupci jsou uvedeny vztahy pro kvalifikovaný odhad jednotlivých příspěvků, které jsou vázány na jmenovitý průměr měřené kuličky. V třetím sloupci jsou uvedeny hodnoty standardní nejistoty měření jednotlivých příspěvků v jednotkách nm.

Ve čtvrtém a pátém sloupci tabulky 8.7 je uveden typ rozdělení a koeficient citlivosti jednotlivých příspěvků. V případě měření za použití dotykové nano-sondy Gannen XP na přístroji nano-CMM NMM-1 se jedná o přímé měření, z tohoto důvodu jsou všechny vedené koeficienty rovny 1. Tabulka 8.7 je opět koncipována jako univerzální, umožňuje reagovat na změny

v systému měření do budoucna. V posledním, šestém sloupci tabulky 8.7, jsou uvedeny výsledné hodnoty jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření, konečná hodnota kombinované nejistoty měření a výsledná hodnota rozšířené nejistoty měření stanovená substituční metodou.

Tab. 8.7 *Bilanční tabulka výpočtu rozšířené nejistoty* U_{subs1}.

Označení příspěvku	Odhad pro d = 1mm	Nejistota rozšířená		Typ rozdělení	Koeficient citlivosti	Příspěvek ke komb. nejistotě [nm]
u_{r1}	0,0000006d	0,06	nm	rovnoměrné	1	0,1
u_{prob1}	0,0000225d	22,50	nm	normální	1	22,5
u_{a1}	0,00000223d	2,23	nm	normální	1	2,2
u_{e1}	0,00001d	10,20	nm	normální	1	10,2
u_{temp1}	0,00000064d	0,64	nm	rovnoměrné	1	0,6
u_{cl1}	0,0000145d	14,45	nm	rovnoměrné	1	14,5
Nejistota kombinovaná					u_{c1} =	28,7
Nejistota rozšířená					U_{subs1} =	**57,4**

Rozšířená nejistota měření průměru kuličky o d = 1mm stanovená substituční metodou je po zaokrouhlení: U_{subs} = 57,4 nm. Vyhodnocení výsledků měření dalších kuliček substituční metodou o jmenovitém průměru d = (2–4) mm bylo provedeno stejným způsobem a v další části disertační práce jsou uváděny pouze výsledky jednotlivých příspěvků rozšířených nejistot měření daných kuliček. Podrobný postup výpočtů rozměru kuliček o jmenovitých průměrech d = (2 – 4) mm pro substituční metodu je uveden v příloze D této disertační práce.

8.2 VYHODNOCENÍ VÝPOČTU NEJISTOTY MĚŘENÍ SUBSTITUČNÍ METODOU

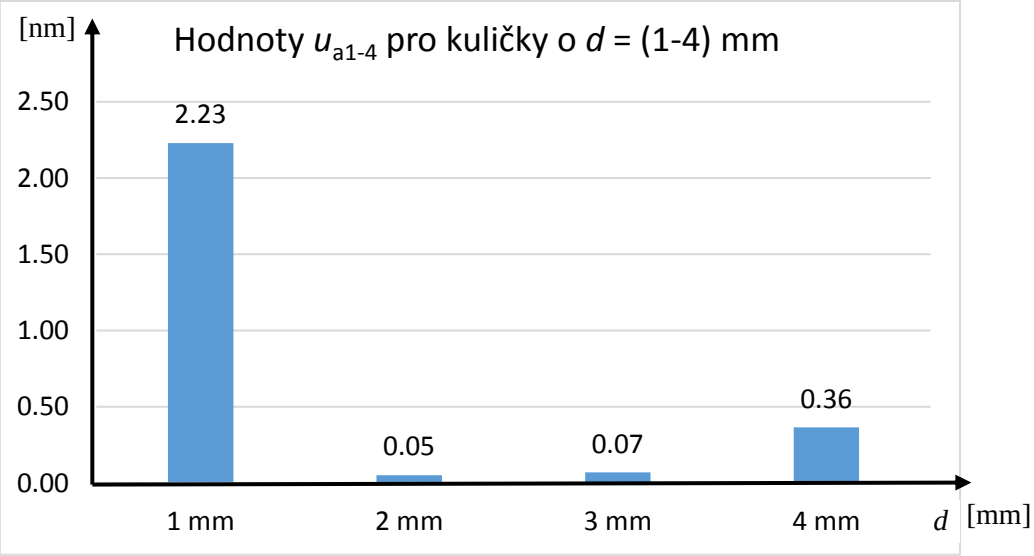
Pro vlastní vyhodnocení nejistoty měření bylo přikročeno ke stanovení celkové nejistoty měření stanovené substituční metodou pro všechny průměry použitých kuliček, stejně tak jako v minulé kapitole. V tabulce 8.8 jsou uvedeny podrobně jednotlivé příspěvky standardních nejistot měření, které byly stanoveny pro všechny jmenovité průměry použitých kuliček d = (1–4) mm. Výsledkem je stanovení celkové rozšířené nejistoty měření stanovené pomocí substituční metody.

Tab. 8.8 *Porovnání jednotlivých příspěvků celkové nejistoty měření stanovené substituční metodou.*

Označení příspěvku	Hodnoty pro d = 1mm	Hodnoty pro d = 2mm	Hodnoty pro d = 3mm	Hodnoty pro d = 4mm
u_{r1-4}	0.06	0.06	0.06	0.06
$u_{prob1-4}$	22.5	22.5	22.5	22.5
u_{a1-4}	2.23	0.05	0.07	0.36
u_{e1-4}	10.2	10.4	10.6	10.8
$u_{temp1-4}$	0.6	1.3	1.9	2.5
u_{cl1-4}	14.5	14.5	14.5	14.5
u_{c1-4}	28.7	28.7	28.8	28.9
$U_{subst1-4}$	57.4	57.5	57.7	57.9

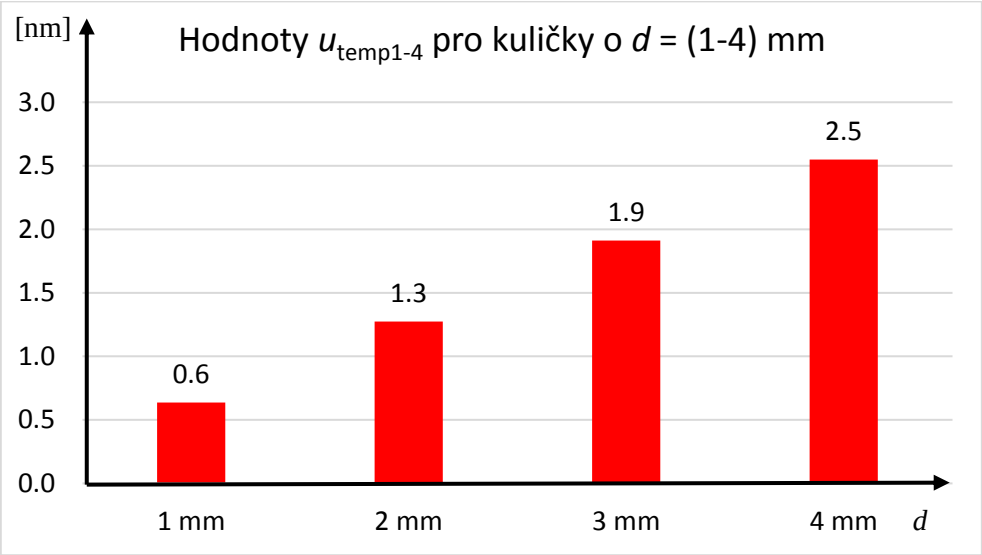
Hodnoty příspěvků kombinované nejistoty měření označené $u_{r1\text{-}4}$, $u_{prob1\text{-}4}$ a $u_{cl1\text{-}4}$ nejsou zobrazeny v samostatných sloupcových grafech, protože jejich hodnoty jsou konstantní pro všechny jmenovité průměry měřených kuliček. Hodnoty těchto příspěvků jsou uvedeny až v komplexní tabulce 9.5. Barevné rozlišení jednotlivých příspěvků je koncipováno shodně v tabulce 8.8 i v následujících sloupcových grafech. Dle hodnot uvedených v tabulce 7.8 můžeme konstatovat, že hodnoty rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou se pohybují v rozmezí 57,4 až 57,9 nm.

Na obrázku 8.3 je uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené nejistotu měření typu A u_a. Vychází zde jako nejvyšší hodnota nejistoty měření způsobenou opakovatelností nano-CMM kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm, která dosahuje hodnotu 2,2 nm. Ostatní hodnoty jednotlivých příspěvků kombinované nejistoty měření se pohybují v rozsahu 0,4 až 1,1 nm. Tento průběh grafu poukazuje na omezující parametr, který vyplývá s použití snímacího dotyku o průměru 0,3 mm, obdobným způsobem jako u multipoziční metody stanovení nejistoty měření.



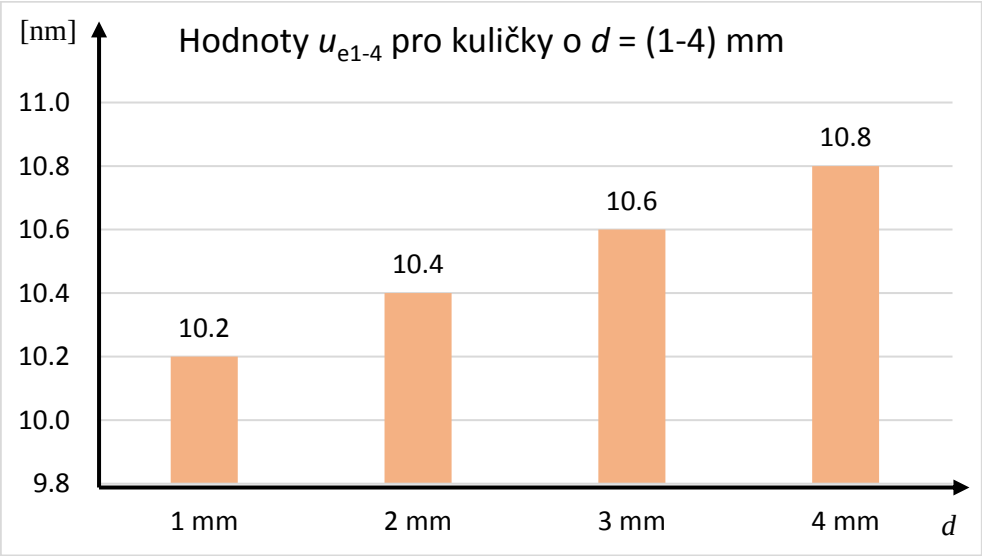
Obr. 8.3 Graf příspěvků způsobených nejistotou měření typu A ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{a1} – u_{a4} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{a1} – u_{a4} v nm.

Na obrázku 8.4 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené teplotními vlivy na nano-CMM u_{temp}. Velikosti hodnot těchto příspěvků korespondují se zaběhlou praxí při měření v laboratorních podmínkách akreditované laboratoře, kdy při optimálních podmínkách pro měření, vlastní nejistota měření roste v závislosti na rostoucím rozměru měřené kuličky. Příspěvky ke kombinované nejistotě měření způsobené teplotními vlivy na nano-CMM se pohybují, obdobně jako u multipoziční metody stanovení nejistoty měření, v rozsahu 0,64 až 2,55 nm.



Obr. 8.4 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substutuční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{temp1} – u_{temp4} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{temp1} – u_{temp4} v nm.

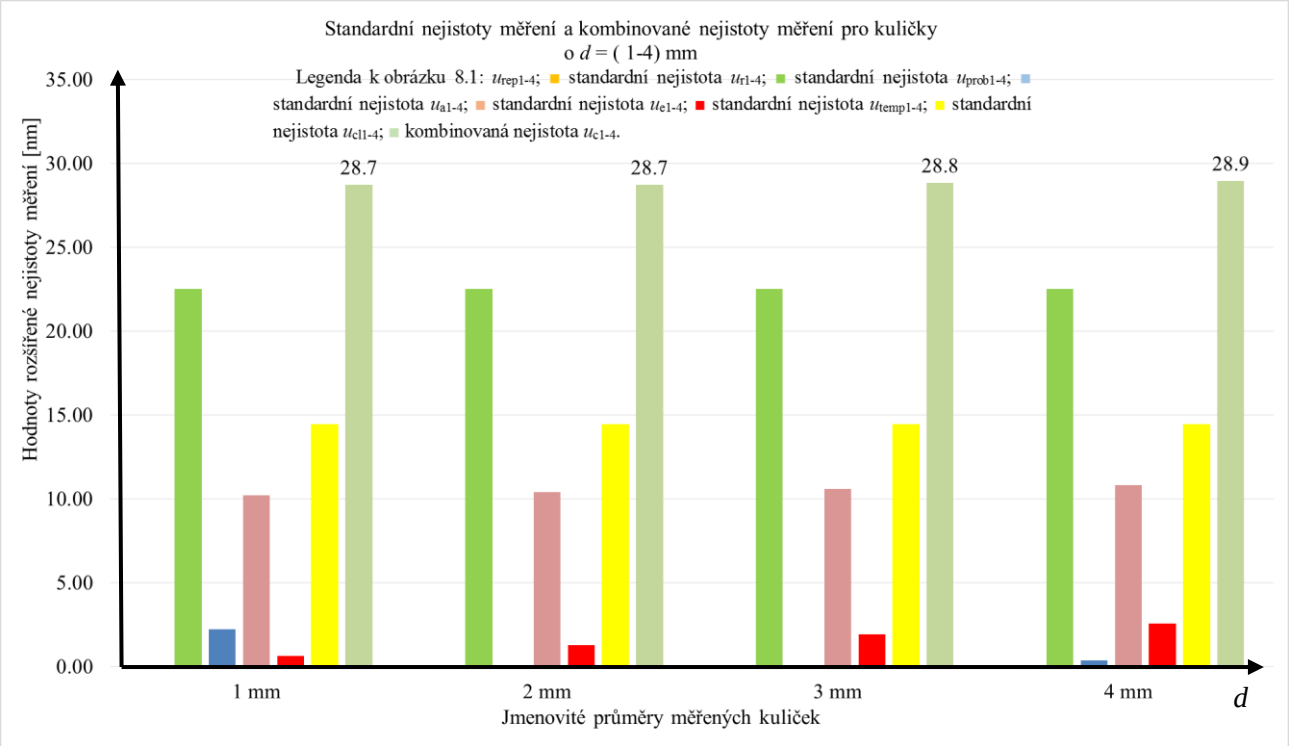
Na obrázku 8.5 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou podrobně znázorněny jednotlivé příspěvky ke kombinované nejistotě způsobené použitým etalonem laserinterferometrem XL80 u_e. Velikosti hodnot těchto příspěvků korespondují se zaběhlou praxí při použití akreditované kalibrační metody, kdy při optimálních podmínkách pro měření, vlastní nejistota měření roste v závislosti na rostoucím rozměru měřené kuličky. Hodnoty příspěvků ke kombinované nejistotě způsobených vlivem měření kuliček pomocí laserinterferometru XL80 se pohybují v rozsahu 10,2 až 10,8 nm.



Obr. 8.5 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substutuční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky u_{temp1} – u_{temp4} kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty příspěvků u_{temp1} – u_{temp4} v nm.

Dále je na obrázku 8.6 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 zvyšují s rostoucím jmenovitým průměrem *d* měřených kuliček. Tento průběh odpovídá obvyklému stavu pří vyhodnocování nejistoty měření délkových veličin, kdy nejistota měření roste se zvyšující se hodnotou měřené délky.

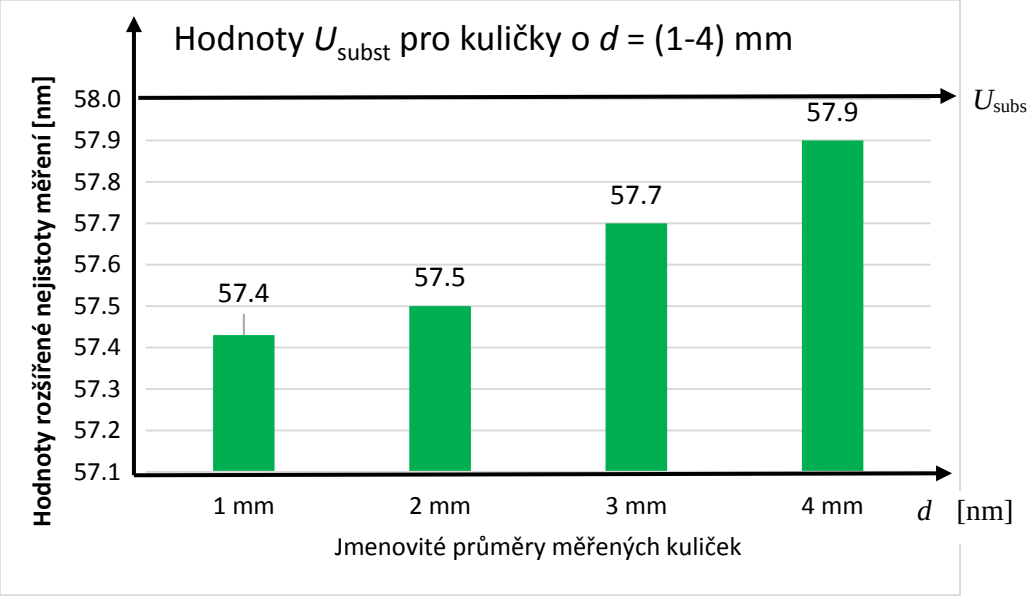


Obr. 8.6 Graf všech jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou. Popis: Osa x – jednotlivé příspěvky k rozšířené nejistotě měření kuliček o d = (1–4) mm. Osa y – hodnoty jednotlivých příspěvků v nm.

Barevné rozlišení jednotlivých příspěvků je koncipováno shodně v tabulce 6.8 i v jednotlivých sloupcových grafech. Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat, které jsou prezentovány v jednotlivých tabulkách, obrázcích a grafech v kapitole 7 se potvrzují dříve uvedené fakty z kapitoly 6. Použitím dotykové nano-sondy Gannen XP se skutečně dostáváme do oblasti pokrývající přístroji kategorie µCMM. Tyto zjištěné výsledky a zejména limity použití dotykové nano-sondy Gannen XP byly potvrzeny v dalším pokračování disertační práce – kapitole 9, ve které je uveden souhrn výsledků získaných pomocí metody MC.

Pro lepší názornost je v obrázku 8.7 uveden sloupcový graf, ve kterém jsou znázorněny jednotlivé hodnoty rozšířených nejistot měření pro kuličky o jmenovitém průměru *d* = (1–4) mm stanovené substituční metodou. 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.

Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat, které jsou v této kapitole disertační práce prezentovány v jednotlivých tabulkách, obrázcích a grafech vyplývá opět několik faktů. Samotný trend, 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 µCMM se i nadále potvrzuje.



Obr. 8.7 Graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou. Popis: osa x – jednotlivé příspěvky standardních nejistot. Osa y – hodnoty standardních nejistot měření v nm.

Dále pak se potvrzuje vyšší hodnota standardní nejistoty měření vyhodnocované způsobem A u_{a1}, obdobně jak tomu bylo v případě multipoziční metody a standardní nejistoty měření způsobené opakovatelností nano-CMM NMM-1 u_{rep1} pro kuličku o jmenovitém průměru d = 1mm. 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 [3, 5, 8, 11, 14] lze zapsat hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené substituční metodou takto: Rozšířená nejistota měření průměru kuličky (1 – 4 mm) stanovená substituční metodou (znázorněna čarou na obrázku 8.7) je po zaokrouhlení:

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

Úplný výsledek měření průměru kuličky o jmenovitém průměru d = 1 mm lze uvést tako:

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

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. Prokázalo se, že vývoj a výroba vhodného etalonu délky, který bude splňovat nároky na metrologickou návaznost v oblasti nanometrologie, je nutností.

Dílčím závěrem této kapitoly je konstatování, že použití substituční metody stanovení rozšířené nejistoty měření přístroje nano-CMM NMM-1 je jednou z vhodných možností, která

nám umožňuje stanovit přesnost měření měřicího přístroje za použití vhodného etalonu délky – rubínové kuličky. Podmínkou úspěšného použití této metody bylo použití vhodného etalonu s dostatečně nízkou hodnotou rozšířené nejistoty měření při jeho kalibraci pomocí laserinterferometru XL80.

9 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ POMOCÍ METODY MONTE CARLO

Simulace stanovení rozšířené nejistoty měření metodou MC byla provedena pomocí *sw* prostředí 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, které byly následně porovnány.

9.1 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ STANOVENÉ MULTIPOZIČNÍ METODOU PRO KULIČKU O D = 1MM

Vlastní výpočet nejistoty měření průměru rubínové kuličky multipoziční metodou vychází ze vztahu (6.27) pro definici matematického modelu měření na přístroji nano-CMM NMM-1 při použití multipoziční metody stanovení nejistoty měření:

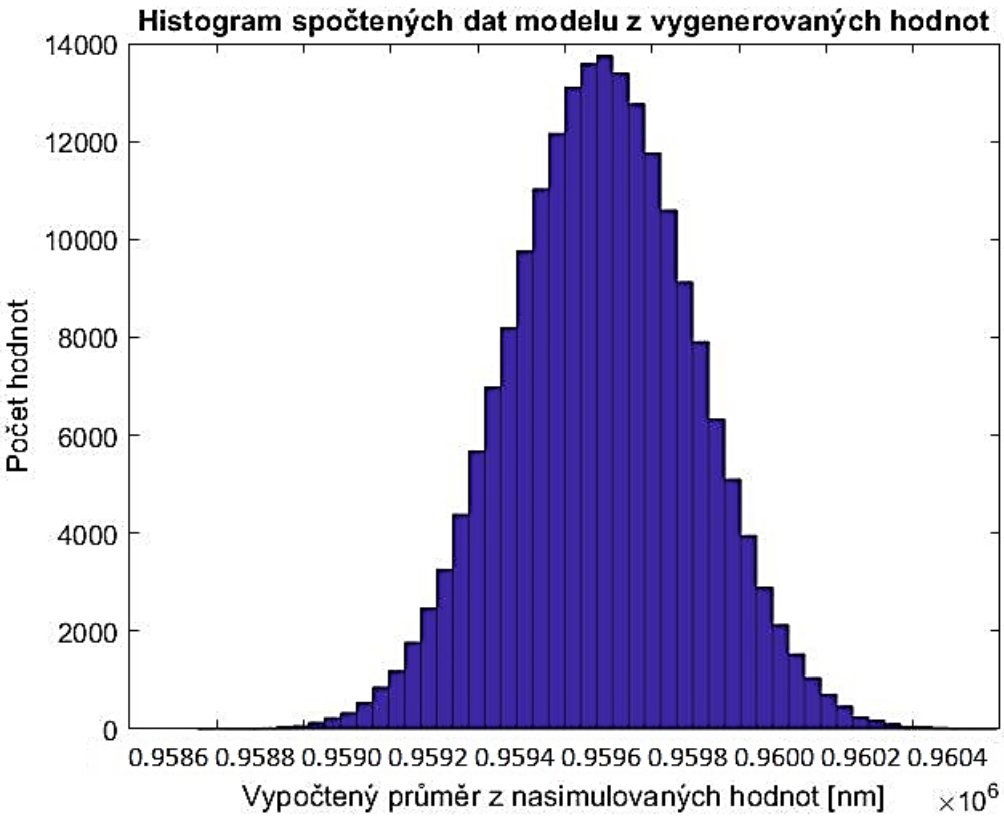
$$y_{corm} = \bar{y}(1+\alpha_N \Delta t) - L\frac{L_{measted}(1+\alpha_W \Delta t) - L_{calstd}}{L_{calstd}} .$$

Pro výše uvedený vztah pro matematický model měření bylo pomocí programu Matlab® vygenerováno generátorem náhodných čísel 10^6 čísel. Skript pro stanovení nejistoty měření metodou MC byl již popsán v kapitole 6.3.3. Stejně jako u substituční metody, i zde se nejdříve provedl Grubbsův test odlehlých hodnot ze souboru naměřených dat. Vstupní data byla použita shodná jako pro nesimulativní metodu v kapitole 7.1. Grubbsův test se tedy neopakoval. Výsledný histogram a dosažené výsledky simulace měření rubínové kuličky o d = 1 mm metodou MC pro multipoziční metodu jsou uvedeny v tabulce 9.1 a na obrázku 9.1. Histogramy a tabulky pro kuličky dalších průměrů jsou uvedeny v příloze E.

Tab. 9.1 *Vypočtené hodnoty metodou MC pro multipoziční metodu.*

Parametr standard	Parametr MatLab	Význam parametru	Vypočtené hodnoty [nm]
$\bar{y}_{mult}$	*Pr_Ys*	Aritmetický průměr výsledků měření dle zvoleného modelu	$0.959687 \cdot 10^6$
$\bar{y}_2$	*pX_Y*	Aritmetický průměr souboru naměřených dat	$0.959857 \cdot 10^6$
s_2	*uX_Y*	Směrodatná odchylka naměřených dat	48.6
u_{mult1}	*uYs*	Standardní nejistota měření dle zvoleného modelu	37.8
U_{mult1}	*UYs*	Rozšířená nejistota měření dle zvoleného modelu	75.6

Postup simulace měření kuliček o jmenovitých průměrech d = (2–4) mm pro multipoziční je uveden taktéž v příloze E této disertační práce.



Obr. 9.1 Histogram spočtených dat modelu z vygenerovaných hodnot pro kuličku o d = 1mm při použití multipoziční metody. Popis: osa y – počet vygenerovaných hodnot. Osa x – hodnoty měřené veličiny v mm.

Dle analýzy statisticky zpracovaných dat ze simulace všech kuliček o jmenovitém průměru d = (1–4) mm v souladu s normativními dokumenty [3, 5, 8, 11, 14] lze hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené multipoziční metodou simulací MC zapsat takto: U_{mult} = 75,6 nm

9.2 VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ STANOVENÉ SUBSTITUČNÍ METODOU PRO KULIČKU O D = 1MM

Vlastní výpočet nejistoty měření průměru rubínové kuličky substituční metodou vychází ze vztahu (6.28) pro definici matematického modelu měření na přístroji nano-CMM NMM-1 při použití substituční metody stanovení nejistoty měření:

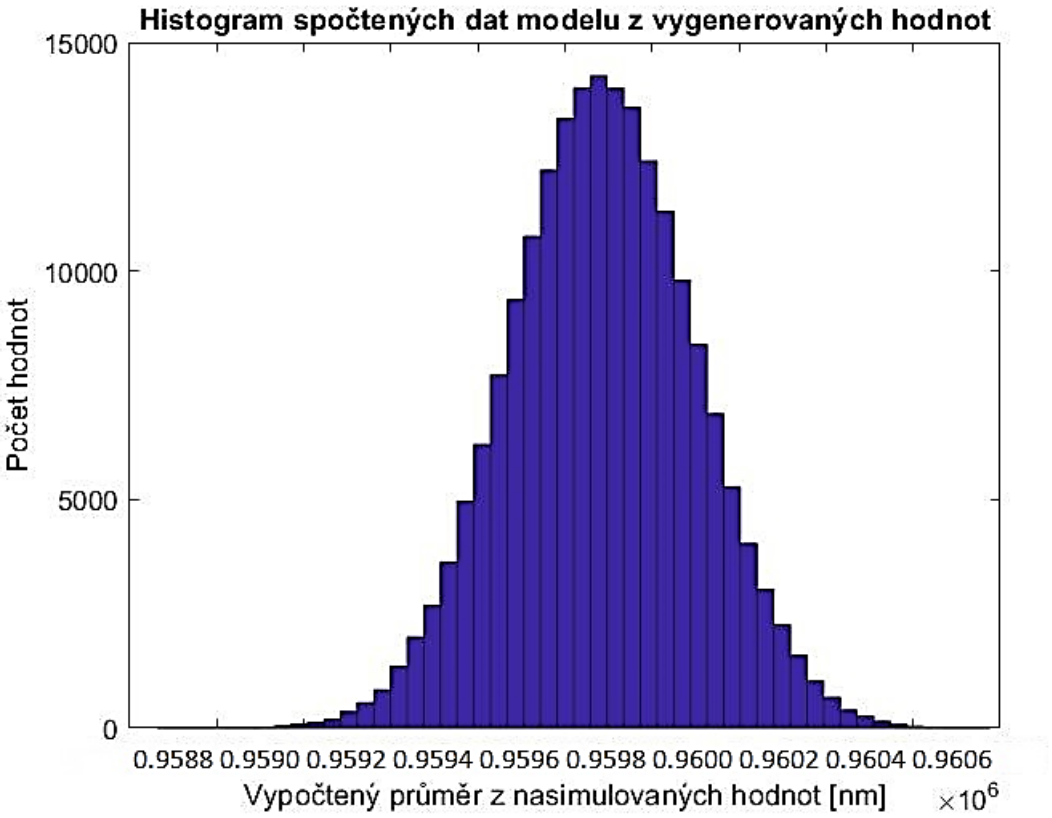
$$y_{cors} = \bar{y}(1+\alpha_W \Delta t) - (y_w - x_{cw}).$$

Pro výše uvedený vztah pro výpočet rozšířené nejistoty měření bylo opět pomocí programu Matlab® vygenerováno generátorem náhodných čísel 10^6 čísel stejně jako pro předešlou metodu. Další postup byl shodný s kapitolou 9.1. Výsledný histogram a dosažené výsledky simulace měření rubínové kuličky o d = 1 mm metodou MC pro substituční metodu jsou uvedeny v tabulce 9.2 a na obrázku 9.2. Histogramy a tabulky pro kuličky dalších průměrů jsou uvedeny v příloze F.

Tab. 9.2 *Vypočtené hodnoty metodou MC pro substituční metodu.*

Parametr standard	Parametr MatLab	Význam parametru	Vypočtené hodnoty [nm]
$\bar{y}_{subs}$	*Pr_Ys*	Aritmetický průměr výsledků měření dle zvoleného modelu	$0.9597488 \cdot 10^6$
$\bar{y}$	*pX_Y*	Aritmetický průměr souboru naměřených dat	$0.9598096 \cdot 10^6$
s_1	*uX_Y*	Směrodatná odchylka naměřených dat	0.71
u_{subs1}	*uYs*	Standardní nejistota měření dle zvoleného modelu	27.9
U_{subs1}	*UYs*	Rozšířená nejistota měření dle zvoleného modelu	55.8

Postup simulace rozměru kuliček o jmenovitých průměrech d = (2–4) mm pro substituční metodu je uveden v příloze F této disertační práce.



Obr. 9.2 Histogram spočtených dat modelu z vygenerovaných hodnot pro kuličku o d = 1mm při použití substituční metody. Popis: osa y – počet vygenerovaných hodnot. Osa x – hodnoty měřené veličiny v mm.

Dle analýzy statisticky zpracovaných dat ze simulace všech kuliček a v souladu s normativními dokumenty [3, 5, 8, 11, 14] lze hodnotu rozšířené nejistoty měření stanovené substituční metodou simulací MC zapsat takto: U_{subs} = 55,8 nm.

9.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE METODOU MONTE CARLO

Výsledky simulace obou použitých metod stanovení nejistoty měření 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_{mult}^{MC}, rozšířené nejistoty měření U_{mult}^{MC} a směrodatné odchylky s_{mult}^{MC} pro multipoziční metodu jsou uvedeny v tabulce 9.3.

Tab. 9.3 *Vypočtené hodnoty metodou MC a podle ISO 15530-2 pro multipoziční metodu.*

multipoziční metoda	Y_{mult} [mm]	U_{mult} [nm]	s_{mult} [nm]
ISO 15530-2	0,959795	78,0	62,8
metoda MC	0,959687	75,6	64,5

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_{subs}^{MC}, rozšířené nejistoty měření U_{subs}^{MC} a směrodatné odchylky s_{subs}^{MC} pro substituční metodu jsou uvedeny v tabulce 9.4.

Tab. 9.4 *Vypočtené hodnoty metodou MC a podle ISO 15530 pro substituční metodu.*

substituční metoda	Y_{subst} [mm]	U_{subst} [nm]	s_{subst} [nm]
ISO 15530-2	0,959810	58,0	7,1
metoda MC	0,959749	55,8	12,3

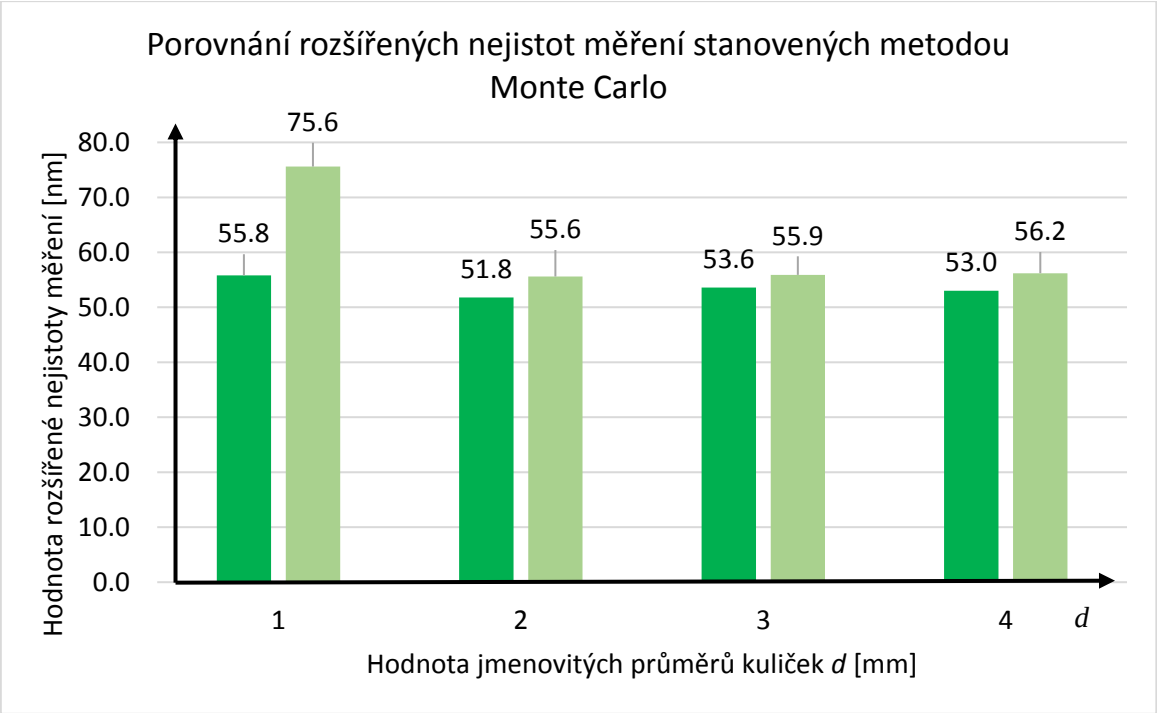
Zároveň je možné konstatovat, že pomocí rozšířené nejistoty měření byla kvantifikována přesnost měření přístroje nano-CMM NMM-1 při použití dotykové nano-sondy Gannen XP s průměrem dotyku d_{saf} = 0,3mm. Výsledné hodnoty měření rozměru rubínové kuličky o d = 1mm X_{mult}^{MC} získané pomocí simulace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

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

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

$$X_{subs}^{MC} = Y_{subs}^{MC} \pm U_{subs}^{MC} = 0.959749 \pm 0.000056 mm\,.$$

Na obrázku 9.3 je uveden pro lepší přehlednost sloupcový graf, na kterém jsou zobrazeny všechny hodnoty rozšířených nejistot měření získaných pomocí simulace metodou MC. Jak je patrné všechny hodnoty nejistoty měření korelují s hodnotami nejistot měření získaných nesimulativními metodami, jak je uvedeno v grafech na obrázcích 7.7 a 8.5.



Obr. 9.3 Sloupcový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených metodou MC.

10 SHRNUTÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tato disertační práce se zabývá problematikou stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1, který je v majetku institutu CEITEC a je umístněný v laboratoři ČMI Brno. Hlavním cílem práce bylo kvantifikovat přesnost měření přístroje pomocí nejistoty měření. K vlastnímu měření byla použita dotyková nano-sonda Gannen XP. 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.

V rámci disertační práce jsou podrobně posouzeny různé metody měření se zaměřením na porovnání nejpřesnějších metod bezkontaktních měření s dotykovou metodou měření prováděnou na přístroji nano-CMM NMM-1. Zvolený experimentální model byl v průběhu vědecké práce opakovaně revidován, a to jak z hlediska samotné správnosti zvolených metod vyhodnocení nejistoty měření, tak i z hlediska nároků na dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti měření.

Pro měření jsou použity přesné rubínové kuličky jako hmotné etalony délky o jmenovitých průměrech d = 1, 2, 3 a 4 mm (podobnější popis je v kapitole 5.1). Proto bylo během tvorby disertační práce přikročeno k identifikaci a kvantifikaci nejdůležitějších vlivů, které ovlivňují proces měření na nano-CMM NMM-1. Tato kvantifikace přesnosti měření vychází ze zkušeností získaných při měření, z dostupných údajů poskytnutých výrobcem přístroje SIOS [1, 15]. Postup při vlastní kvantifikaci přesnosti měření je vyvinut v souladu s platnými normativními dokumenty [18, 20, 38] a nejnovějšími poznatky v oblasti stanovení přesnosti CMM [6, 19, 39, 42, 83] tak, aby jej bylo možno implementovat do systému akreditované kalibrační laboratoře.

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 [3, 8, 11, 14, 16, 18, 20, 27, 31, 38, 40] i nově publikovaných vědeckých prací [6, 7, 9, 12, 19, 24, 25, 39, 41, 44 - 51], které jsou v běžné strojírenském prostředí aplikovány na standardní CMSs (Coordinate Measuring Systems).

V disertační práci je dále postup pro stanovení přesnosti měření nově rozvinut a upraven pro systém nano-CMM NMM-1, konkrétně pro dotykové měření za použití dotykové nanosondy Gannen XP-1. Byly zvažovány a porovnávány dvě metody stanovení přesnosti měření nano-CMM. V souladu s výše uvedeným byla k měření použita sada rubínových kuliček. Použití precizních kuliček jako etalonů umožnilo pokrýt celý měřicí rozsah nano-CMM NMM-1 (25 x 25 x 5) mm.

Jako doplňková metoda stanovení přesnosti měření, respektive nejistoty měření nano-CMM NMM-1 je zvolen způsob jejího stanovení pomocí metody Monte Carlo. Toto řešení je zvoleno záměrně, aby se potvrdila správnost výpočtů pomocí nesimulačních metod a jejich vzájemná korelace.

10.1 SHRNUTÍ POUŽITÝCH METOD STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistota měření přístroje nano-CMM NMM-1byla 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 (25 x 25 x 5) mm přístroje 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 MC 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) [38] a pomocí metody MC, jejichž výsledky jsou uvedeny v předešlých kapitolách 7, 8 a 9. Parametry rozdělení pravděpodobnosti nejdůležitějších vstupních veličin jsou zobrazeny v tabulce 10.1 [6].

Tab. 10.1 *Parametry rozdělení pravděpodobnosti zdrojů nejistoty měření.*

Veličina	Rozdělení pravděpodobnosti	Parametry rozdělení				
		μ (mm)	σ (mm)	v	a	b
y	$t_v(\mu,\sigma^2)$	0.96022500	0.00022287	16		
α_{mo}	$R(a,b)$	0.1	---		$11 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}	$12 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}
α_{cmm}	$R(a,b)$	0.1	---		$11 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}	$12 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}
Δt	$R(a,b)$	0.5	---		0.5°C	0.5°C
$L_{measstd}$	$t_v(\mu,\sigma^2)$	1.00350600	0.00236100	8		
L_{calstd}	$N(\mu,\sigma^2)$	1.00342310	---			

Multipoziční metoda stanovení nejistoty měření se vyznačovala 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 5.8. 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 vyznačovalo 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 MC 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 MC lze dospět k závěru, že je mnohem praktičtější než tradiční přístup [3, 11, 14, 18, 38] pro stanovení nejistoty měření pro obě metody – substituční i nesubstituční.

Byly stanoveny hodnoty rozšířené nejistoty měření pro všechny rozměry měřených rubínových kuliček. Tyto hodnoty rozšířené nejistoty měření jsou uvedeny v tabulce 10.2 a pro lepší přehlednost jsou zobrazeny v grafu na obrázku 10.1. 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. 10.2 *Hodnoty rozšířené nejistoty měření pro všechny metody.*

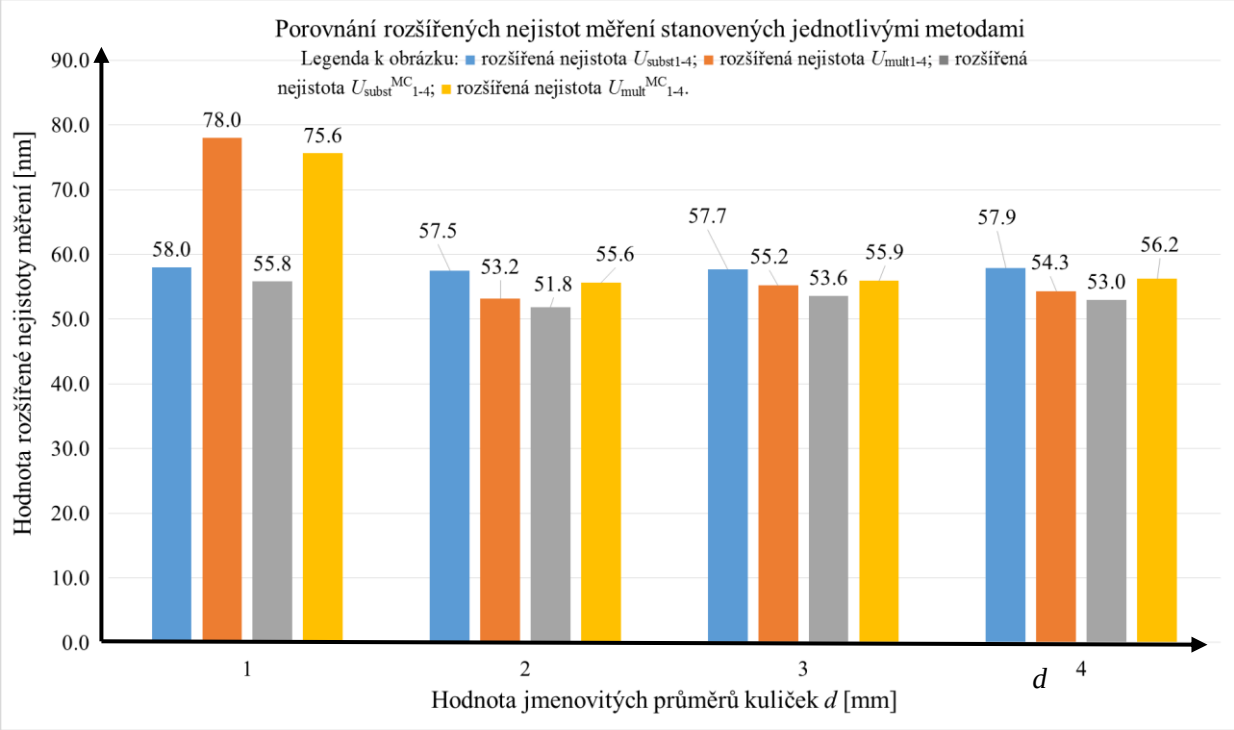
Porovnání metod	d = 1mm [nm]	d = 2mm [nm]	d = 3mm [nm]	d = 4mm [nm]
U_{subst}	58.0	57.5	57.7	57.9
U_{mult}	78.0	53.2	55.2	54.3
$U_{substMC}$	55.8	51.8	53.6	53.0
U_{multMC}	75.6	55.6	55.9	56.2

Pouze u rozšířené nejistoty pro multipoziční metodu rozměru rubínové kuličky o d = 1mm 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 dotykové nano-sondy Gannen XP (d_{saf} = 0,3mm) lze konstatovat, že pro měření délkových rozměrů do 2 mm je vhodné počítat s nejistotou měření v hodnotě dosahující 78,1 nm. V případě měření objektů velkých (2 až 4) mm je možné počítat s klesající hodnotou rozšířené nejistoty měření (maximální hodnota 57,9 nm), jak je uvedeno v tabulce 10.2 a grafu 10.1.

Tato skutečnost je způsobena použitím snímacího dotyku nano-sondy Gannen XP o průměru d_{saf} = 0,3 mm. Tudíž při měření rozměrů pohybujících se v okolí hodnoty 1 mm a menším dochází k nežádoucímu efektu, kdy malý rozdíl mezi rozměry snímaného objektu a dotykového snímače způsobuje kvalitativně horší výsledky měření. Oproti obecně zavedené praxi v klasické metrologii [2, 42], 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 malých rozměrů v oblasti nanometrologie nepotvrdila.

Jako přínosné do budoucna se jeví pořízení menších dotykových nano-sond pro přístroj nano-CMM NMM-1. Ty se pro nano-sondu Gannex XP vyrábí v rozměrech d_{saf} = (0,12; 0,3 a 0,5) mm. Při použití dotykové nano-sondy o d_{saf} = 0,5 mm je při měření objektů menších než 2 mm

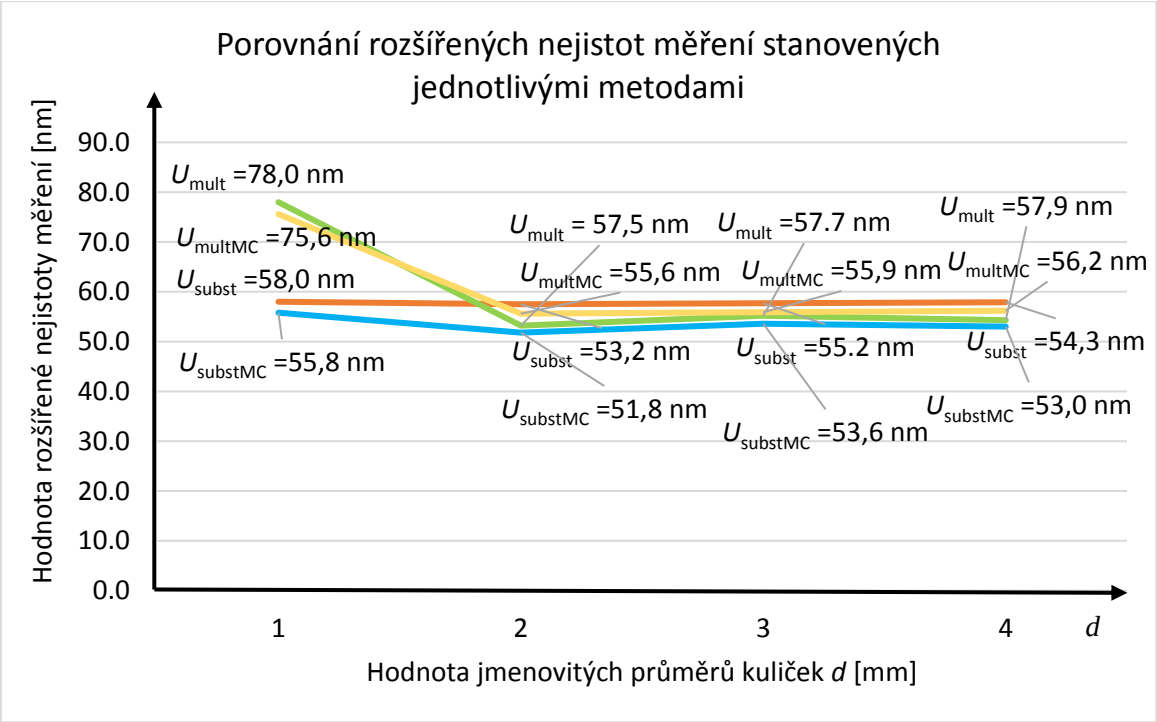
rozšířená nejistota měření (na poměry nano-CMM) příliš velká a se zmenšující se velikostí měřeného objektu roste. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit menší průměry dotykové sondy a řešením by mělo být pořízení nano-sondy o d_{saf} = 0,12 mm. U této velikosti dotykové sondy se zvyšuje význam kvality povrchu safírové kuličky pro přesnost měření.



Obr. 10.1 Sloupcový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených všemi metodami.

Z uvedené tabulky 10.1 a grafu na obrázku 10.1, které vyobrazují rozdíly hodnot rozšířené nejistoty měření nesimulativních metod a metody MC 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 a 4)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.

Na obrázku 10.2 je pro lepší znázornění uveden spojnicový graf rozšířených nejistot měření stanovený jednotlivými metodmi.



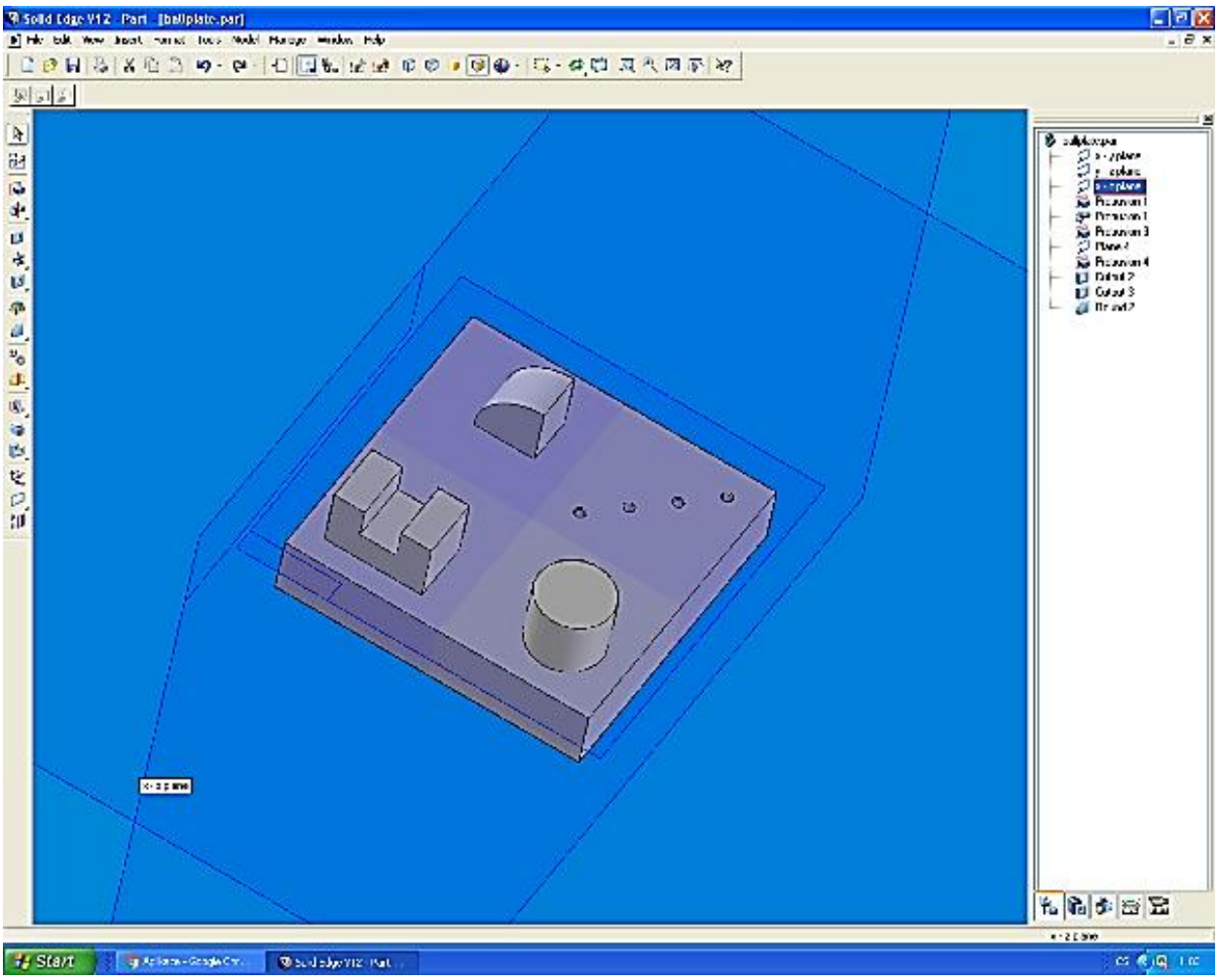
Obr. 10.2 Spojnicový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených všemi metodami.

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. Uvedená metoda je vhodnější pro použití 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.

Výpočtový modul pro potřeby ČMI je vytvořen v programovém prostředí MS Excel a obsahuje i grafické znázornění hlavních vlivů na výslednou nejistotu měření. To umožňuje jednodušší orientaci operátora přístroje a zrychlit vlastní vyhodnocení provedeného měření. Jednoduchý výpočtový modul v praxi slouží k pohotovému a snadnému stanovení nejistoty měření při využití této sondy na přístroji nano-CMM.

10.2 NÁVRH VHODNÉHO ETALONU - BALL PLATE

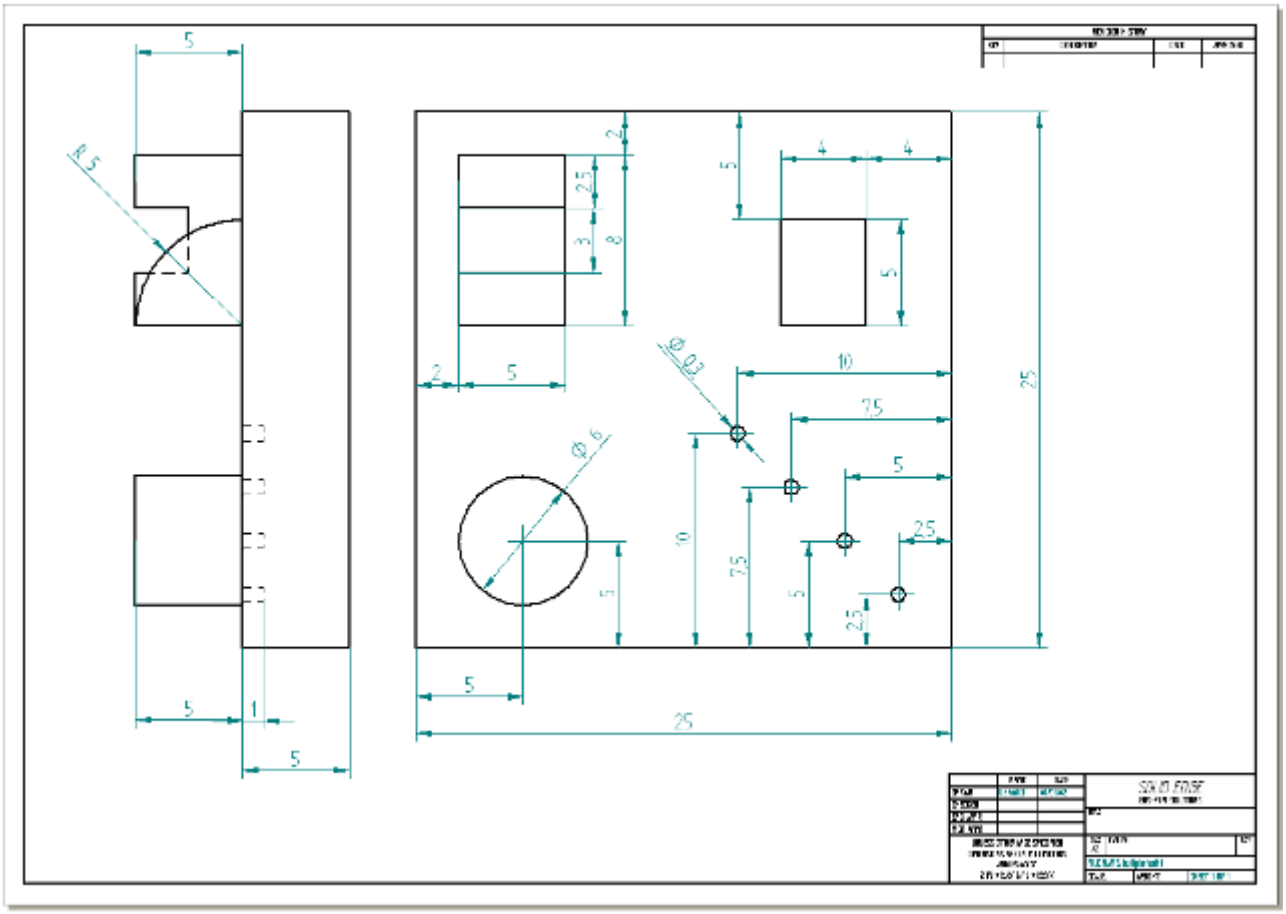
Dalším krokem nutným pro splnění požadavku na vhodný etalon délky byl jeho návrh, vytvoření 3D modelu, kontrola prostorové kompatability a zajištění metrologické návaznosti vlastního etalonu délky. Dalším z požadavků ČMI a CEITEC bylo použití navrhovaného etalonu k zajištění metrologické návaznosti pro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



Obr. 10.3 3D modelu navrhovaného etalonu délky – ball plate[autor].

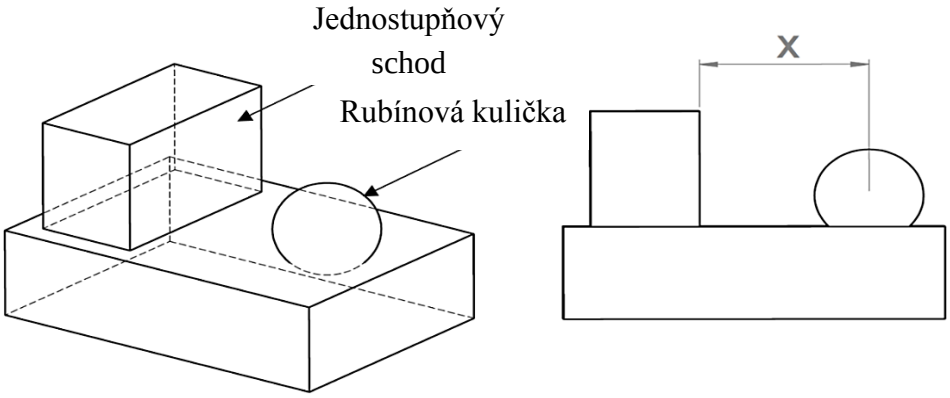
Na obrázku 10.3 je uvedena podoba 3D modelu navrhovaného etalonu délky – ball plate, který byl vytvořen v programovém prostředí Solid Edge při respektování normativních dokumentů reprezentovaných normami řady ČSN EN ISO 10 360. K tomuto modelu byla vytvořena v tomtéž programovém prostředí výkresová dokumentace, jejíž ukázka je uvedena na obrázku 10.4.

Technické řešení etalonu délky tzv. ball-plate je vhodné pro zajištění metrologické návaznosti zejména mezi jednotlivými CMM, které jsou vybyveny dostatečně přesným snímacím systémem. Jedná se zejména o metodu free-form popsanou v normě ČSN EN ISO 10 360-2[20]. 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.



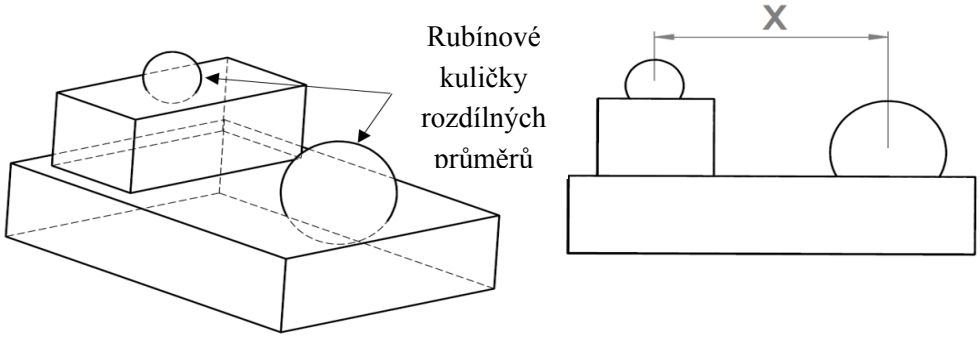
Obr. 10.4 Technický výkres navrhovaného etalonu délky – ball plate[autor].

První z návrhů je etalon vycházející z konceptu stupňové měrky, resp. jednostupňového schodu a části tvořeného rubínovou kuličkou. CT přístroj Rigaku nano3DX může dosahovat pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm velikosti voxelu až 2,16 µm a ke kalibraci je tak možné využít rubínové kuličky o větším průměru než v předchozích případech. Zvolený průměr rubínové kuličky pro tento rozměr artefaktu je 2 mm.



Obr. 10.5 Návrh etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX, kde X reprezentuje kalibrovanou zkušební délku [104].

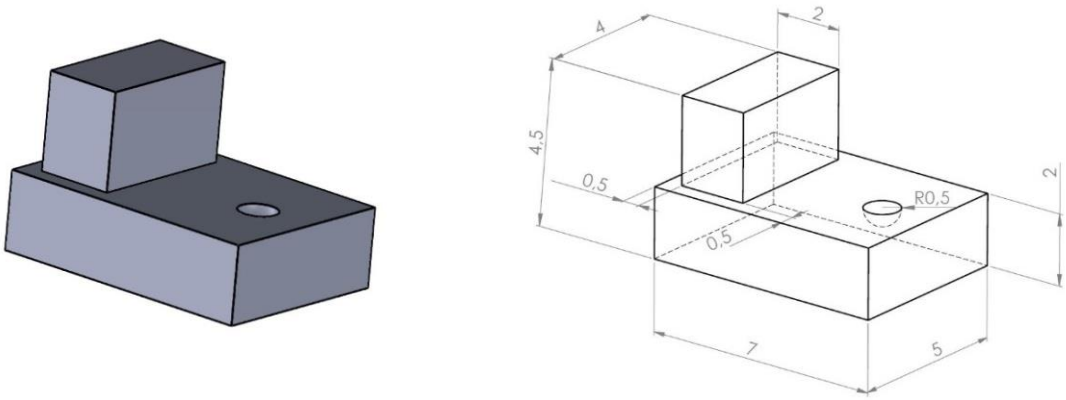
Návrh tohoto etalonu délky využívá skutečnosti, že kalibrovaná zkušební délka *X* toho etalonu je vzdálenost středu rubínové kuličky a stěny, resp. roviny jednostupňového schodu, tak jak je to uvedeno na obrázku 10.5. Druhý návrh etalonu délky pro toto zorné pole je podobný předchozímu, ale opětovně vychází z konceptu ball plate popsaného v normě ČSN EN ISO 10 360-5. 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. Kalibrovaná zkušební délka *X* by byla v tomto případě vzdálenost středů těchto dvou kuliček, tak jak je uvedeno na obrázku 10.6.



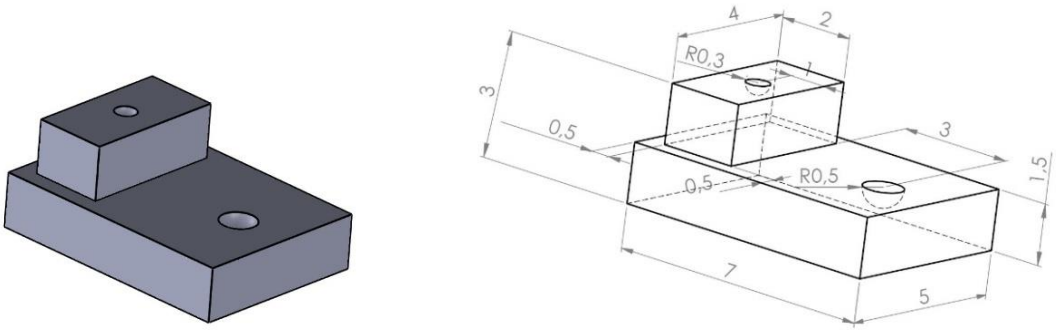
Obr. 10.6 Druhý návrh etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX, kde X reprezentuje kalibrovanou zkušební délku [104].

Stejně jako u již dříve řešeného etalonu délky pro zorné pole 0,7 × 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 běžným přípravkem při CT měření. Vzhledem k malým rozměrům etalonu délky, je možné tělo artefaktu (bez rubínové kuličky) vytisknout pomocí 3D tiskárny.

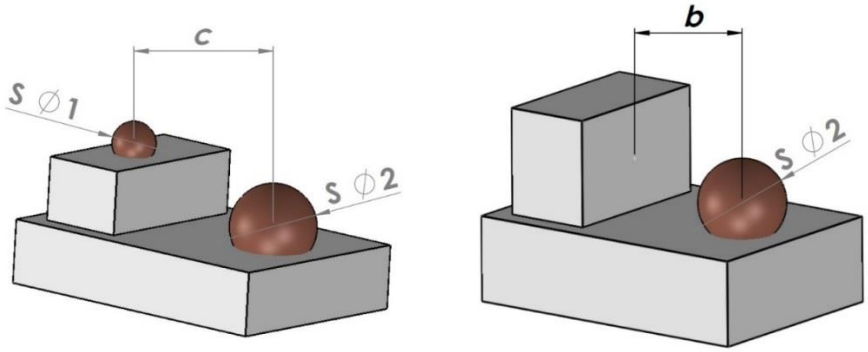
Na dále uvedených obrázcích 10.7, 10.8 a 10.9 jsou ukázky 3D modelů dvou návrhů etaonů délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX včetně přiložených okótovaných verzích. Tyto 3D modely slouží k následnému 3D tisku prototypů etalonu délky a k ověření jejich rozměrové kompatibility s přístroji nano-CMM NMM-1 a Rigaku nano3DX .



Obr. 10.7 3D model prvního návrhu etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX (vlevo) a jeho rozměry (vpravo) [104].

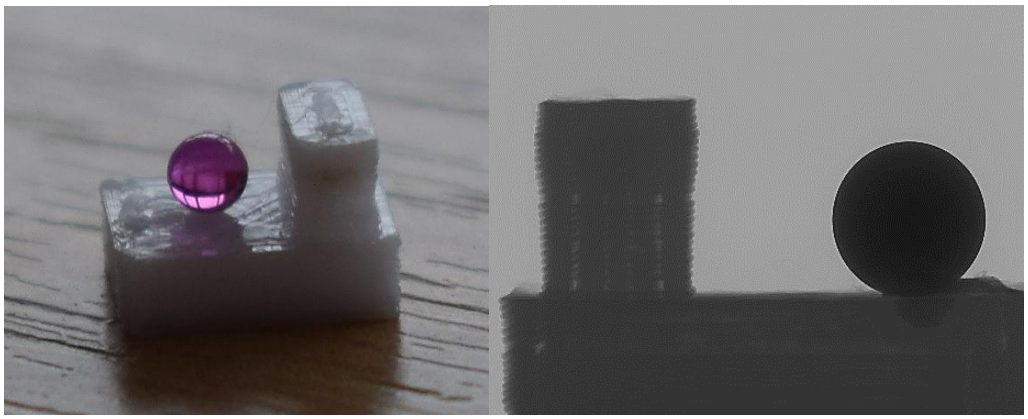


Obr. 10.8 3D model druhého návrhu etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX (vlevo) a jeho rozměry (vpravo) [104].



Obr. 10.9 3D modely obou návrhů etalonů délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX – provedení s dvěma rubínovými kuličkami (vlevo) a s jednou rubínovou kuličkou (vpravo) [104].

Po provedení 3D tisku a aplikaci rubínových kuliček na obě provedení bylo přistoupeno k provedení ověřovacího měření na CT přístroji Rigaku nano 3DX jak je uvedeno na obrázku 10.10. 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.



Obr. 10.10 Vytištěný model návrhu etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm (vlevo), zobrazení modelu etalonu délky při měření na přístroji Rigaku nano3DX –(vpravo) [autor].

10.3 MODUL PRO RYCHLÝ VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ

Dalším z dílčích cílů disertační práce bylo vytvoření *sw* modulu pro rychlý výpočet nejistoty měření na přístroji nano-CMM NMM-1. V metrologické praxi se běžně stává, že není dostatečný časový prostor pro podrobnou identifikaci a kvantifikaci všech možných zdrojů nejistoty měření, které do měřicího řetězce mohou vstoupit. V modulu, který je vytvořen pro obě nesimulativní výpočtové metody stanovení nejistoty měření jsou zahrnuty všechny její hlavní složky v souladu s uplatněnými postupy prezentovanými v této disertační práci. Od modulů vypracovaných v autorových předchozích pracích se liší zejména tím, že se jedná především o zahrnutí vyššího počtu vlivů na nejistotu měření při měřeních prováděných v nanometrologii. Ukázka jeho možného provedení je uvedena na obrázku 10.11.

Stanovení rozšířené nejistoty měření U_{subst}

Jmenovitý rozměr

L = **0.001** m

Směrodatná odchylka z opakovaných měření

s = **0.12** µm

Počet opakovaných měření

n = **5**

Rozšířená nejistota etalonu pro koeficient rozšíření k = 2

U_E = **0.05** + **0.5** L µm

Vliv kalibrovaného CMM (čtení-rozlišovací schopnost, měřicí síla, povrch)

KM = **0.001** µm

Koeficient teplotní roztažnosti

α = **4.5** µm/m °C

Rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti

±α = **2** µm/m °C

Rozdíl teplot etalonového a kalibrovaného měřítka

± t = **0.2** °C

Odchylka teploty od 20 °C

± t_{20} = **0.3** °C

Vliv snímacího systému Gannen XP

U_{prob} = **0.2** µm

Vliv nečistoty měřeného objektu

Δp = **0.2** µm

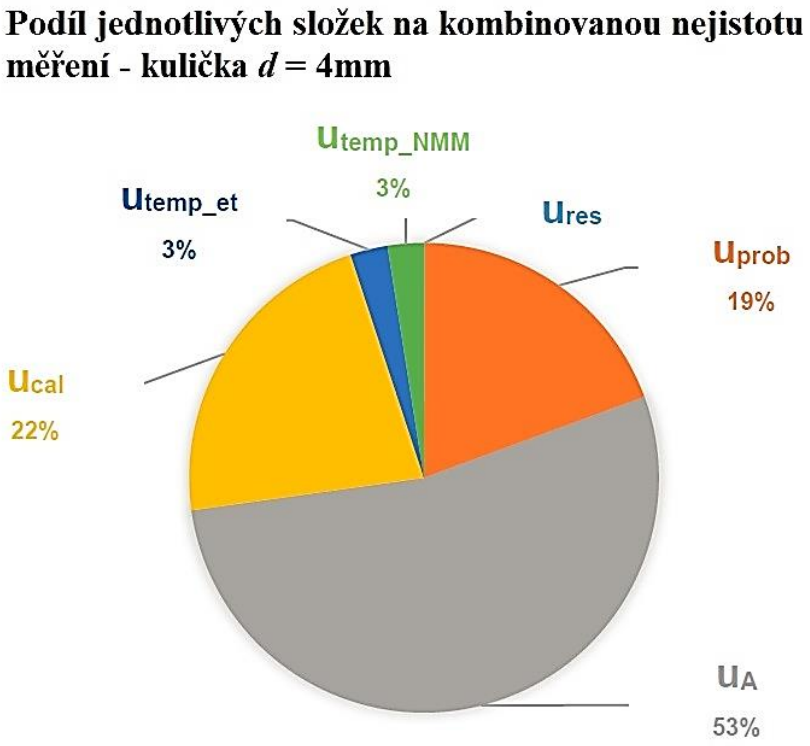
Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek k nejistotě
1*		0.0541 µm	norm.	1	0.0541 µm
2*		0.02525 µm	norm.	1	0.02525 µm
3*	0	0.00058 µm	rovn.	1	0.00058 µm
4*	0	0.11547 °C	rovn.	0.0045 µm/°C	0.00052 µm
5*	0	0.2 µm/m	rovn.	0.001 m	0.0002 µm
6*	0	0.1 µm	rovn.	1	0.1 µm
7*	0	0.11547 µm	rovn.	1	0.11547 µm
8*					0.0597 µm

Výsledná rozšířená nejistota : U_{subst} = **0.12 µm**

1*... nejistota typu A
2*...vliv etalonu
3*...vliv kalibrovaného měřidla
4*...vliv rozdílu teplot etalonu a měřidla
5*...vliv odchylky teploty od 20 °C
6*…vliv snímacího systému Gannen XP
7*…vliv nečistoty měřeného objektu
8*...výsledná nejistota

Obr. 10.11 Ukázka listu aplikace MS Excel - výpočtový modul pro stanovení nejistoty délkového měření na přístroji nano-CMM NMM-1 [autor].

Výpočtový modul vytvořený v aplikaci MS Excel je součástí přílohy na datovém nosiči DVD, který je součástí této disertační práce. Jeho součástí je taktéž grafické znázornění velikosti podílu jednotlivých složek výsledné nejistoty měření, které je uvedeno na obrázku 10.12.



Obr. 10.12 Podíl jednotlivých složek na kombinovanou nejistotu měření kuličky o d = 4 mm [autor].

Toto grafické znázornění umožňuje metrologovi lepší orientaci při hodnocení jednotlivých vlivů na kombinovanou respektive rozšířenou nejistotu měření přístroje mamo-CMM NMM-1. Zároveň také, při jeho snaze o snížení hodnoty výsledné nejistoty měření, umožňuje určení složek nejistoty měření s největším vlivem na její výslednou hodnotu. Pak je možno se soustředit na eliminaci tohoto vlivu. Z obrázku 10.11 je jasně patrný hlavní vliv nejistoty typu A, z čehož by šlo provést doporučení ke zlepšení týkající se zejména oblasti podmínek opakovatelnosti měření. Například stálost podmínek měření, zejména teploty, dodržování stejného postupu měření, použití stejných měřicích přípravků a stejného postupu při vyhodnocení výsledků měření.

11 ZÁVĚR A POKRAČOVÁNÍ VĚDECKÉ PRÁCE

Disertační práce je příspěvkem k 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. 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 kalibrační postup [105] obsahuje podrobný popis při práci s nano-CMM NNM1 včetně uvedení jeho CMC – standardní měřicí schopnosti dosahované při kalibraci měřidel a etalonů, včetně stanovení nejistoty měření přístroje nano-CMM NNM1. Tento postup je duševním majetkem ČMI Brno a není proto součástí vlastní disertační práce.

Metody řešení tématu disertační práce jsou zvoleny v souladu s platnou legislativou, normativními dokumenty a vědeckými publikacemi. V disertační práci je kladen důraz na splnění požadavků vyplývajících z pravidel pro akreditovanou kalibrační laboratoř, kde je vyžadováno použití validovaných metod pro stanovení přesnosti měření. Z tohoto důvodu je v disertační práci uplatněna především snaha o použití standardizovaných postupů pro stanovení přesnosti měření a jejich následnou úpravu a hledání nových řešení vhodných pro oblast měření v nanometrologii v podmínkách ČMI Brno.

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.

V úvodu disertační práce jsou uvedeny základní definice z oblasti metrologie, související s nejistotou měření a chybami měření. Je také popsán vzájemný vztah mezi uvedenými pojmy. Dále je uveden obecný přístup k vyhodnocení nejistoty měření, používající se v běžné praxi. Dále bylo postupováno v souladu se zvoleným postupem pro tvorbu disertačí práce, který je popsán v kapitole 5.4.

Z dostupné literatury plyne, že metody měření na běžně dostupných CMM vybavených standardním dotykovým snímacím systémem jsou obecně rozšířeny, ale v naprosté většině naráží na omezenou přesnost měření v oblasti rozměrů a povrchu měřených objektů. Přitom v současné době se běžně provádí měření pomocí komerčně dostupných CMM různých výrobců, které jsou vybaveny různými typy snímacích systémů. Problémem je vysoká cena přístrojů nano-CMM s laserinterferometrickým odměřováním a nízká dostupnost specifických měřicích systémů, které zajistí měření komplexního tvaru a povrchu měřeného objektu.

Přesnost měření byla vyjádřena formou nejistoty měření stanovené pomocí dvou nesimulačních metod a jedné simulační metody. V podmíkách 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 nm (pro rozsah měření 1 – 4 mm) stanovené substituční metodou (kapitola 8 a 10.1).

Na základě zadání bylo rovněž splněno všech deset dílčích cílů disertační práce:

1. **Výběr metodiky jednotlivých měření**

V disertační práci se jedná o porovnání výstupů ze tří na sobě nezávislých měřicích metod, které umožňují měření daných parametrů s vysokou přesností a zároveň garantují splnění podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti měření. Tato měření se stala základem pro vytvoření co nejpřesnějšího modelu systému měření na přístroji SIOS nano-CMM NMM-1 vybaveného dotykovou nano-sondou Gannen XP. Zvolené metody měření jsou podrobně popsány v kapitolách 5.5 a 5.6.

2. **Volba etalonu, návrh způsobu uchycení rubínových kuliček, odzkoušení a výroba přípravku pro uchycení kuliček**

V disertační práci jsou zvoleny jako nejvhodnější etalony délky rubínové kuličky o různém jmenovitém průměru. K uchycení jednotlivých kuliček je navržen, rozměrově vyzkoušen a zhotoven přípravek pro měřené kuličky. Tento přípravek umožňuje pevné uchycení kuličky pro měření oběma nesimulativními metodami měření. Zvolené etalony a navržené přípravky jsou podrobně popsány v kapitolách 5.2 a 5.3.

3. **Volba vhodných metodik měření kuliček včetně stanovení nejistoty měření**

Ke kvantifikaci přesnosti měření je v disertační práci použita rozšířená nejistota měření stanovená za použití dvou nesimulativních metod. Vytvořený matematický model také posloužil ke stanovení rozšířené nejistoty měření na tomto přístroji metodou MC. Aparát pro stanovení výsledné nejistoty měření poslouží jako základ pro kvantifikaci přesnosti dotykového měření, které bude sloužit pro nejpřesnější měření a navazování etalonů v metrologii.

Po jejich analýze byly vybrány dvě metody pro aplikaci na nano-CMM NMM-1. Konkrétně byly zvoleny metody substituční a multipoziční (kapitola 6.1 a 6.2). Pro ověření správnosti zvoleného postupu a zvýšení počtu měření bylo přistoupeno k simulaci metodou MC (kapitola 6.3). Pro nutnou úpravu vybraných metod jsou vzhledem ke specifikaci přístroje nano-CMM NMM-1 popsány základní konstrukční rozdíly mezi standardními CMM a tímto přístrojem. Je kladen důraz na faktory, které mohly měření nepříznivě ovlivnit, zvláště pak v případě měření malých rozměrů v oblasti nanometrologie.

V disertační práci jsou jednotlivé vlivy na celkovou nejistotu měření podrobně studovány a stanoveny. Nově vyvinutá metodika pro stanovení přesnosti měření nano-CMM NMM-1, respektive její kvantifikace pomocí nejistoty měření vychází ze standardizovaných dokumentů [3, 8, 11, 14, 16, 18, 20, 27, 31, 38, 40] i nově doplňuje již publikované vědecké práce [6, 7, 9, 12, 19, 24, 25, 39, 41, 44 - 51], které jsou v běžné strojírenském prostředí aplikovány na standardních CMM. Nově tak zpracovává oblast nano-CMM pro potřeby akreditované kalibrační a zkušební laboratoře.

4. **Realizace měření na přístroji nano-CMM NMM-1 využívající systém dotykové nano-sondy za dodržení podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti**

Na základě zmíněných poznatků a znalostí získaných během měření na uvedeném přístroji jsou v disertační práci obě metody stanovení nejistoty měření 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 jsou provedeny výpočty nejistoty pomocí obou nesimulativních metod i metody MC. Všechny metody jsou v disertační práci vzájemně porovnány a následně je vyhodnocena rozšířená nejistota měření přístroje nano-CMM NMM-1 při použití dotykové sondy Gannen XP. Tato rozšířená nejistota měření je použita ke kvantifikaci přesnosti měření tohoto přístroje.

Samotné měření na přístroji však doprovázely určité komplikace. Prvním problémem bylo nastavení vhodných podmínek měření tak, aby nedocházelo k příliš velkým změnám teploty okolního prostředí (včetně měřicího boxu přístroje) během měření. Přístroj totiž nedisponuje žádným aktivním systémem chlazení, který by sám aktivně udržoval teplotu v požadovaném rozmezí 20°C ± 0,3°C. Bylo tedy nutné ve spolupráci s externí firmou, která servisuje systém klimatizace v podzemních laboratoří ČMI Brno, zajistit úpravu parametrů klimatizace, tak aby nedocházelo k větším výkyvům teploty v laboratoři a také nežádoucímu proudění vzduchu.

Druhým problémem byla nestabilita funkce samotného přístroje nano-CMM NMM-1, která se projevovala opakovaným přerušováním procesu měření. Během měření s dotykovou nano-sondou docházelo často k výpadku signálů některého z laserových interferometrů. Tento jev vždy vedl k zastavení měření, resetování systému a nutnosti opakování měření. Zmíněné problémy byly konzultovány s výrobcem přístroje SIOS a na základě poskytnutých údajů byla zjištěno provedení servisní prohlídky. Ta se podařila zrealizovat až začátkem měsíce června roku 2018. Během servisní prohlídky byla zjištěna nefunkčnost jedné z měřicích karet počítače, která zajišťovala zpracování dat jednoho z interferometrů. To mělo za následek výše popsanou nestabilitu a taktéž zvýšenou hodnotu systematické chyby měřicího systému nano-CMM NMM-1, což vedlo k nutnosti opakování celé řady měření rozměru rubínových kuliček. Také bylo navrženo doplnění upgradovaného software 3D Firmware o některé funkce, které se týkají záznamu teplot v měřicím boxu.

Měření rubínových kuliček na přístroji nano-CMM NMM-1 je podrobně popsáno v kapitole 5.5.3 a výsledky měření kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm jsou popsány v kapitolách 7 a 8.

5. Vytvoření matematického modelu měření na přístroji nano-CMM NMM-1 a realizace simulace systému metodou Monte Carlo

Popis vhodného způsobu použití metody MC je popsán v kapitole 4.4. 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 (4.3) uvedený v kapitole 4.1.2 pro vyjádření chyby měření Δ sledovaného systému. Rozšířené vztahy popisující matematický model pro obě metody jsou popsány v kapitolách 6.3.1 a 6.3.2. Ke konečné podobě těchto vztahů vedla delší cesta, během níž bylo využito spolupráce s kolegy z ČMI Brno, zejména odd. Primární etalonáže tlaku. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 9.

6. **Realizace jednotlivých měření na vhodných přístrojích za dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti**

V disertační práci je prezentován rozsáhlý soubor měření sledovaných parametrů rubínových kuliček získaný za pomocí různých měřicích metod a různých měřicích přístrojů. Tyto metody a přístroje jsou v disertační práci popsány jednak teoreticky, ale jsou i doplněny o popis praktických experimentů. Jsou zde prezentovány výsledky měření kuličky o jmenovitém průměru d = 1mm pro obě nesimulativní metody, tak i pro metodu MC. Výsledky měření pro ostatní použité průměry kuliček jsou součástí příloh disertační práce.

Soubor provedených měření splnil nároky na dodržení podmínek reprodukovatelnosti a opakovatelnosti měření, což je doloženo statistickým vyhodnocením v kapitolách 5.7.1 a 5.7.2.

7. **Popis hlavních vlivů na dosahovanou přesnost měření a stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1**

V disertační práci je nově prezentována metodika pro stanovení přesnosti měření nano-CMM, která v sobě zahrnuje obecně platná pravidla v oblasti standardních průmyslových CMM. Tyto pravidla a standardy nově aplikuje a upravuje právě pro oblast nanometrologie, kde má své uplatnění nano-CMM. Podrobný popis hlavních vlivů na přesnost měření tohoto přístroje je uveden v kapitole 6 disertační práce.

8. **Porovnání a analýza naměřených hodnot parametrů kuliček**

V disertační práci je provedena podrobná analýza a porovnání naměřených dat pro všechny použité metody vyhodnocení nejistoty měření. Její výsledky potvrzují správnost volby použitých postupů a zvolených metod měření. Výsledky jsou podrobně prezentovány v kapitolách 7, 8 a 9 disertační práce.

9. **Vytvoření *sw* modulu MS Excel pro rychlé stanovení nejistoty měření**

V disertační práci je prezentován nově vytvořený modul pro stanovení nejistoty měření pro obě nesimulativní metody. Používá *sw* prostředí MS Excel, které je hojně rozšířeno mezi běžnými uživateli. V praxi umožňuje rychlé stanovení hodnoty rozšířené nejistoty měření prováděné na nano-CMM NMM-1. Modul je vhodný pro použití v metrologické laboratoři, tak i pro výuku studentů FSI. Jeho podrobný popis je uveden v kapitole 10.3 disertační práce.

10. **Návrh vhodného hmotného etalonu délky pro kalibraci přístroje nano-CMM NMM-1**

V disertační práci jsou prezentovány nově vytvořené návrhy, rozměrové modely a funkční prototypy etalonů délky – ball plate. Tyto etalony slouží pro zajištění metrologické návaznosti v rámci akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno, tak i akreditované zkušební laboratoře CEITEC. Návrh a podoba etalonů je uvedena v kapitole 10.2 disertační práce.

Shrnutí

Využití získaných poznatků a výsledků disertační práce bude mít praktické uplatnění, neboť budou zapracovány 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 zajištění metrologické návaznosti etalonů v oblasti nanometrologie, zejména ve spolupráci s CEITEC Brno.

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

Oblast přístrojů nano-CMM je teprve na počátku svého masovějšího rozšíření, které ale bude pravděpodobně probíhat vysokým tempem. Postupem času se budou tyto přístroje stále více uplatňovat nejen v laboratorních podmínkách nebo při kalibraci etalonů, ale i v přesné průmyslové výrobě, vyžadující velice přesné měření délky. Oblast jejich využití je v případě přístroje SIOS nano-CMM NMM-1 navíc rozšířena o možnost použití několika typů snímacích systémů dodávaných buď přímo výrobcem, nebo speciálně vyrobených snímacích systémů od jiných dodavatelů.

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, které jsou uvedeny v kapitole 3.4, pracují na zcela odlišných principech a opravdu o nich můžeme diskutovat s přívlastkem „nano“ sondy. Stanovení přesnosti měření přístroje nano-CMM NMM-1 za použití jiných snímacích systémů bude předmětem další vědecké činnosti autora. 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:

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

12 POUŽITÁ LITERATURA

[1] Oficiální firemní stránky SIOS Meßtechnik, GmbH, Dostupné z: http://www.sios.de .

[2] Oficiální firemní stránky Renishaw, s.r.o., Dostupné z: http://www.renishaw.cz .

[3] 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.

[4] Oficiální stránky nakladatelství VUTIUM Brno, Dostupné z: http://www.vutium.vutbr.cz/rs.php?key=proautorycz .

[5] Zákon č. 505/1990 Sb. *Zákon o metrologii*. Praha: Federální shromáždění České a Slovenské Federativní Republiky, 1990.

[6] SŁADEK, Jerzy A. *Coordinate Metrology, Springer Tracts in Mechanical Engineering*. Berlín: Springer-Verlag , Německo, 2016, ISBN 978-3-662-48463-10.

[7] 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 ,

[8] 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.

[9] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav POSPÍŠIL. Stanovení přesnosti měření v inženýrské praxi. *Metrologie*, 2015, č. 4, s. 12-18. ISSN 1210- 3543.

[10] Oficiální výukové stránky University Tartu, Estonsko, Dostupné z: https://sisu.ut.ee/measurement/7-precision-trueness-accuracy

[11] 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.

[12] 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.

[13] Oficiální stránky Wikipedie, Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_Monte_Carlo .

[14] 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.

[15] 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 .

[16] ČSN EN ISO 3650. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Etalony délek – Koncové měrky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000. 24 s. Třídící znak 253308.

[17] Oficiální firemní stránky Prima Bilavčík s.r.o., obchodní zástupce firmy Etalon, Dostupné z: http://www.merici-pristroje.cz/lasertracer/ .

[18] 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.

[19] 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.

[20] ČSN EN ISO10360-2. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací 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.

[21] ŠRÁMEK, Jan. Zařízení pro kalibraci čítačů částic na ČM Brno. *Metrologie*, 2016, č. 1, s. 8-9. ISSN: 1210-3543.

[22] ISO 14644-1:2015. *Čisté prostory a příslušné řízené prostředí - Část 1: Klasifikace čistoty vzduchu dle koncentrací částic*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 28 s. Třídící znak 125301.

[23] Oficiální výukové stránky NDT Resource center, Dostupné z: https://www.nde-ed.org/GeneralResources/ErrorAnalysis/UncertaintyTerms.htm .

[24] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV Statistika a pravděpodobnost.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.

[25] KLVAŇA, Jiří. *Principy a aplikace metody Monte Carlo*. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03587-5.

[26] Oficiální firemní stránky Renishaw s.r.o., Dostupné z: http://www.renishaw.cz/cs/materialy--6423

[27] DIN 5401:2002. *Balls for rolling bearings and general industrial use.* Německo: Deutsches Institut für Normung e. V., 54 s. 2002.

[28] Oficiální firemní stránky Renishaw s.r.o., Dostupné z: http://www.renishaw.cz/cs/dokumenty-ke-stazeni--18682 .

[29] Oficiální firemní stránky Renishaw s.r.o., Dostupné z: http://www.renishaw.cz/cs/velmi-presne-doteky-stupne-presnosti-grad-3--6823 .

[30] Oficiální stránky softwarové aplikace Gwyddion, Dostupné z: http://gwyddion.net .

[31] 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.

[32] Oficiální firemní stránky Imeco - TH s.r.o, Dostupné z: http://www.imeco-th.cz/img/files/CCI_Roundness_(CZ).pdf .

[33] BRLICA, Pavel. *Stanovení nejistoty měření nano-CMM*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Šrámek

[34] Oficiální stránky institutu CEITEC, Dostupné z: https://www.ceitec.cz/x-ray-micro-ct-and-nano-ct-research-lab/t9851 .

[35] TAYLOR HOBSON. *Handbook*. Velká Británie: AMETEK.Inc., 2013.

[36] ŠRÁMEK, Jan. *Nejistoty měření přesných délkových měření II*, Brno 2011, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 77 s, Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, PhD.

[37] Oficiální firemní stránky Edmund Optics Inc., Dostupné z: www.edmundoptics.com .

[38] 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.

[39] 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.

[40] 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.

[41] 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

[42] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 8021433388.

[43] ŠÍRA, Martin. *Jak na nejistoty metodou Monte Carlo jednoduše a bez drahých programů*. Elektrorevue. 2014, 16(2), 85-97. ISSN 1213-1539.

[44] SŁADEK, Jerzy A. Modeling and accuracy assessment of coordinate machines and measurements. No. 87. Cracow University of Technology Scientific Books - *Mechanika*, Cracow, 2001.

[45] 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.

[46] 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.

[47] Balsamo, A., Pedone, P., Ricci, E., Verdi, M. *Low-cost interferometric compensation of geometrical errors*. CIRP Ann. Manuf. Technol. 58(1), 459–462, 2009.

[48] Beaman, J., Morse, E. *Experimental evaluation of software estimates of task specific measurement uncertainty for CMMs*. Precis. Eng. 34(1), 28–33, 2010.

[49] Hocken Robert, J., Pereira Paulo, H. *Coordinate Measuring Machines and Systems*, 2nd edn. CRC Press, Cleveland, 2011.

[50] Weckenmann, A. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für Funktion und fertigungsgerechtes Prüfen*, Carl Hanser Verlag München, Wien 2012

[51] Weckenmann, A. *Ubersicht uber Abnahme und Uberwachungsverfahren für Mehrkoordinaten-Messgerate*. VDI-B 378, pp. 1–10, 1980.

[52] Nawara, L., Kowalski, M. *Analysis of errors in spatial measurements*. Cracow University of Technology Scientific Books – *Mechanika*, 12/80, 674–679.

[53] Sładek, J.: *Assessment of the accuracy of contact probe heads used in coordinate measuring machines*. Ph.D. theses, Cracow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering (1990).

[54] Sładek, J. *Modeling and accuracy assessment of coordinate machines and measurements*. Cracow University of Technology Scientific Books, Mechanika no. 87, Cracow (2001).

[55] Sładek, J. *Conception of description of coordinate measurement accuracy - on the basis of determination 3D - point uncertainty error*. J. Mech. Eng. 53(6) (2002).

[56] Geise, G., Hartmann, M. *Geometrische Aspekte bei Ausgleichproblemen in der Koordinatenmesstechnik*. Konferenz INFERT 82, Dresden 1–2 Sept 1982

[57] Hart, H., Lotze, W., Woschni, E. G. *Messgenauigkeit*. Verlag Technik, Berlin (1987).

[58] Hartmann, W. W., Geise, G. *Displaydarstellungen als Entscheidungshilfe fur Messauswertungsstrategien in der Koordinatenmesstechnik*. Feingeratetechnik 1984/1

[59] Lotze, W. *Prufkorper fur Koordinatenmessgeraten*. Feingeratetechnik 30 (1981), und VDI-Z123, pp. 154–155 (1981).

[60] Lotze, W.: *Rechnergestutzte Koordinatenmesstechnik*. Werkstatt und Betrieb 113 1980/6, pp. 391–395.

[61] Lotze, W., Teichmann, U. *Einfluss von Gestalt - und Lageabweichungen auf die Unsicherheit der Rechnergestutzehn Koordinatenmessung*. Feingeratetechnik 8, 139–343 (1976).

[62] Lotze, W., Teichmann, U. *Genauigkeit und Prufung von Koordinatenmessgeraten*. Feingeratetechnik 35/86, 339–342.

[63] Teichmann U. *Metrologische Probleme bei der Pruefung von koordinatenmessgeraeten*. Feingeraetentechnik 3 (1978).

[64] Sładek, J. *Modeling of coordinate measuring machines - matrix method for errors identification*. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna pt. Metrologia w technikach wytwarzania maszyn, pp. 437–444. Szczecin University of Technology, Szczecin (1999).

[65] Sładek, J. *Errors identification and measurement accuracy assessment of coordinate measuring machines (CMM)*. Advances in Technology of Machines and Equipment, vol. 23(4), pp. 113–136. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, kwartalnik PAN (1999).

[66] Sładek, J. *CMM virtual model with the application to accuracy assessment of measurements realized in equations of quasi- real time*. In: IVth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, pp. 193–208. Lodz University of Technology Scientific Books, branch in Bielsko-Biała, no. 53, Bielsko-Biała (2000).

[67] Sładek, J., Rakoczy, R.: *The use of the concept of artificial neural networks for modeling the coordinate measuring machine (CMM) with the use of spatial standard.* Works of Institute of Machine Technology and Production Automation, Polish Academy of Sciences, The Committee on Machine Building, Technology Bases Section, Scientific Book no. 63, pp. 193–206. Cracow University of Technology (1999).

[68] Sładek, J., Kowalski, M., Ryniewicz, A., Juras, B., Muzyka-Zmudzki, M. *The method of the identification of the Orientation of control standard plater for the assessment of large coordinate measuring machine's (LCMM's) accuracy*. In: Measurement 2005, 5th International Conference, Smolice Slovakia (2005).

[69] Sładek, J., Kowalski, M., et al. *Identification method of the CMM measurement subspace localization based on location errors*. In: VII International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biala, vol. 22(7), pp. 291–301 (2006).

[70] Sładek, J.: Conception of description of coordinate measurement accuracy - on the basis of determination 3D - point uncertainty error. J. Mech. Eng. 53(6) (2002).

[71] Sładek, J.: Strategy of applying coordinate metrology in quality assurances systems with regards to a measuring accuracy. In: Ford, D. G., Postlethwaite, S. R. (eds.) Laser Metrology and Machine Performance, III, pp. 497–508. Computational Mechanic Publications, Southampton - Boston (1997).

[72] Sładek, J., Rakoczy, R.: CMM virtual modelling applied for measuring accuracy assessment. In: Proceedings of 1st International Workshop on CMM Calibration, 1–2 June 1999. Published by The Czech Metrological Institute, Prague Czech Republic.

[73] Sładek, J., Rakoczy, R., Szwajkowski, A.: Application of neural networks for modelling coordinate measuring machines. In: Kunzmann, H., Waeldele, F., Wilkening, G., Corbet, J., MacKeow, P., Weck, M., Huemmler, J.: Progress in Precision Engineering and Nanotechnology, vol. 1, pp. 323–326, PTB-Braunschweig u. Berlin P. u. Oe-Verlag (1997).

[74] Gąska, A.: Modeling of accuracy of coordinate measurement with use of Monte Carlo Method. Ph.D. theses, Cracow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2011 (Advisor - Prof. J. A. Sladek).

[75] Gąska, A.: Different uses of Monte Carlo Method in coordinate metrology. In: Xth International Scientific Conference Automation in Production Planning and Manufacturing, Zilina, Maj 2009.

[76] Sładek, J., Gąska, A.: Modelling of CMM probe head errors. In: Proceedings of 10th ISMQC - TC14 IMEKO, 5–9 Sept 2010, Osaka Japan.

[77] Sładek, J., Juras, B., Krawczyk, M., Gąska, A.: Modelling of the probing system errors by use of Monte Carlo Method. In: Sładek, J., Jakubiec, W. (eds.) Advances in Coordinate Metrology, Monograph. University of Bielsko-Biała (2010).

[78] Murphy, Douglas, B. *Fundamentals of ligt microscopy and electronics imaging*. Wiley – Liss Inc., USA, 2001. ISBN 0-471-25391-X.

[79] Ohlídal 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 .

[80] Semyon G. Rabinovich. *Evaluating measurement accuracy - practical approach.* New York: Springer-Verlag , USA, 2. vydání, 2013. ISBN 978-1-4614-6716-8. DOI 10.1007/978-1-4614-6717-5.

[81] 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.

[82] SALICONE Simona. *Measurement Uncertainty - an approach via the mathematical theory of evidence*. New York: Springer-Verlag , USA, 2007. ISBN-10: 0-387-3065502.

[83] 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.

[84] Sładek, J., Rakoczy, R., Majdosz, R. Realisation and testing of the CAD CMM CAD IT couplings, considering the aspect of possibilities of measurement accuracy prognostication. IVth International Scientific Conference - Coordinate Measuring Technique, Scientific Books, vol. 53, pp. 209–221. Lodz University of Technology, Bielsko-Biała, 2000.

[85] Sładek. J., Kupiec, R., Gąska, A., Kmita, A. Temperature factors affecting the measurement uncertainty modeling with the use of Monte Carlo method), *Measurement Automation and Monitoring*. 01/2010.

[86] Sommer, K.D., Kuhn, O., Weckenmann, A. *Use of MCM for uncertainty of non-linear and multivariate dimensional measurment task*. 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Erlangen, Německo, 3/2007.

[87] 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.

[88] Salsbury, J. G. *A simplified methodology for the uncertainty analysis of CMM measurements*. Technical Paper, Conference on Precision Metrology/Applying Imaging and Sensoring, Society of Manufacturing Engineers, Indianapolis, IN, IQ 95–155:1–22, 1995.

[89] Sładek, J. Modeling and accuracy assessment of coordinate machines and measurements. Scientific Books, vol. 87. Cracow University of Technology, Cracow (2001).

[90] Sładek, J. *The relationship between measuring machines performance specifications and their real capability to solve given measurement tasks*. Metromeet 2005 International Conference on Industrial Dimensional Metrology Bilbao (Spain), April 7–8, 2005 Euskalduna Jauregia Invited Lecture.

[91] Sładek, J., Krawczyk, M. Methods for coordinate measurements accuracy assessment. *Measurement Automation and Monitoring*, no. 9, vol. 53, pp. 478–481 (2007).

[92] Sładek, J., Sitnik, R., Kupiec, M., Błaszczyk, P. *The hybrid coordinate measurement systém as a response to industrial requirements*. Metrology Measurement Systems. XVII (1), 109–118 (2010).

[93] Sładek, J., Błaszczyk, P. M., Kupiec, M., Sitnik, R.: The hybrid contact – optical coordinate measuring system - Elservier. Measurement 44, 503–510 (2011)

[94] Trapet, E., Wäldele, F.: Substitution method to make traceable measurements with CMMs. Working paper ISO/TC3/WG10 (1996)

[95] 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. *Tracebility of Coordinate Measurements According to Method of Virtual Measuring Machine*. PTB F-35, Braunschweig (1999)

[96] 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)

[97] 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).

[98] 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. Manufacturion Technology. 53(1), 433–438 (2004).

[99] Liebrich, Thomas; Bringmann, Bernhard; Knapp, W. *Calibration of a 3D-ball plate*, ETH Library Curych, Švýcarsko, 2010

[100] Anke Guenther, Dirk Stobener, Gert Goch. *Self-Calibration Method for a Ball Plate Artefact on a CMM*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016) 503–506

[101] ChiFai Cheung, MingJun Ren, LingBao Kong, David Whitehouse. *Modelling and analysis of uncertainty in the form characterization of ultra-precision freeform surfaces on coordinate measuring machines*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 63 (2014).

[102] O Kruger, F Walt and P Greef. *Ball and Hole plate development for evaluation of µCMM*. Konference MacroScale 2011 – 4th to 6th October 201.

[103] 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.

[104] 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.

[105] 6014-MP-C0xxx-19. *Akreditovaný kalibrační postup pro měření na nano-CMM*. Brno: Český metrologický institut, 2019. 18 s.

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN

3D	trojdimenzionální,
°C	stupeň Celsia,
°K	stupeň Kelvina,
α_{mo}	koeficient délkové roztažnosti materiálu kuliček,
α_{cmm}	koeficient délkové roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,
α_{W}	koeficient délkové roztažnosti materiálu měřeného objektu,
α_{wW}, α_{wN}	koeficienty délkové roztažnosti materiálu kuliček a těla nano-CMM NMM-1,
θ_{wW}, θ_{wN}	odchylka teploty kuliček a těla nano-CMM NMM-1při měření od 20°C,
CEITEC	Central European Institute of Technology – Středoevropský technologický institut,
CMM	souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine),
ČSN	Česká technická norma,
ČMI	Český metrologický institut,
D	hodnota rozlišení měřicího systému nano-CMM NMM-1,
d	jmenovitý průměr rubínové kuličky,
D_{meas}	výsledek měření vnitřního rozměru etalonu délky,
D_{cal}	kalibrační hodnota vnitřního rozměru etalonu délky,
d_{saf}	průměr safírové kuličky nano-doteku Gannen XP,
DSP	matematický model popisující měřicí systém přístroje,
Δt	je odchylka teploty měřeného objektu od 20°C,
E_D	korekce pro měření rozměru rubínové kuličky,
E_L	průměrná chyba měření délky pomocí laserinterferometru XL80,
EN	Evropská norma,
He – Ne	Helium – Neon,
ISO	International Organization for Standardization – mezinárodní organizace pro normalizaci,
k	koeficient rozšíření,
L	měřená délka,
$L_{measstd}$	výsledek měření etalonu délky,
L_{calstd}	kalibrační hodnota etalonu délky,
LI	průmyslový laserinterferometr,
M	počet opakování iterací metody MC,

m	metr,
MC	metoda Monte Carlo,
mm	milimetr,
μm	mikrometr,
n	počet měření (obecně),
n_1	počet měření průměru kuličky laserinterferometrem XL80,
n_2	počet měření kuličky při použití multipoziční metody,
n_3	celkový počet orientací kuličky při použití multipoziční metody,
n_4	počet měření kuličky při použití substituční metody
n_5	počet měření etalonu délky laserinterferometrem XL80,
nano-CMM	souřadnicový měřicí stroj schopný realizovat přesná měření v rozsahu potřebném pro nanometrologii,
nm	nanometr,
NMM-1	Nano positioning and Nanomeasuring Machine – 1,
NPL	National Physical Laboratory – Velká Británie,
PC	personal computer – osobní počítač,
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt– Německo,
r	koeficient korelace,
$s_{(x)}$	výběrová směrodatná odchylka z naměřených hodnot systému č. 1,
$s_{(y)}$	výběrová směrodatná odchylka z naměřených hodnot systému č. 2,
sw	software,
T_{mo}	průměrná teplota kuliček během měření,
T_{cmm}	průměrná teplota těla nano-CMM NMM-1 během měření,
u_{rep}	standardní nejistota měření způsobená opakovatelností nano-CMM,
u_{geo}	standardní nejistota měření způsobená geometrickou chybou nano-CMM,
u_{corrL}	standardní nejistota měření průměru rubínové kuličky laserinterferometrem 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 měření stanovení korekce pro měření nekalibrovaného objektu,

$u_{\alpha mo}$	standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu kuliček,
$u_{\alpha cmm}$	standardní nejistota určení koeficientu teplotní roztažnosti materiálu těla nano-CMM NMM-1,
u_{t}	standardní nejistota měření použitého teploměru při měření,
u_{cal}	standardní nejistota kalibrace použitého teploměru,
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,
$u_{\alpha\mathrm{mo}}$	standardní nejistota neznalosti teplotní roztažnosti měřeného objektu,
$u_{\alpha\mathrm{cmm}}$	standardní nejistota neznalosti teplotní roztažnosti konstrukce nano-CMM NMM-1,
u_{kt}	standardní nejistota měření kalibrace použitého teploměru,
u_{tcmm}	standardní nejistota měření skutečné teploty v pracovním prostoru nano-CMM NMM-1,
u_{cl}	standardní nejistota měření způsobená vlivem nečistoty měřeného objektu,
u_{u}	standardní nejistota měření způsobená upnutím použitého etalonu,
u_{nt}	standardní nejistota měření způsobená nestabilitou teploty použitého etalonu,
u_{pe}	standardní nejistota měření způsobená vlivem textury povrchu použitého etalonu,
$\bar{x}$	aritmetický průměr z naměřených hodnot systému č. 1,
x_{i}	naměřená hodnota systému č. 1,
x_{cw}	hodnota etalonu uvedená v kalibračním protokolu.
y_{i}	naměřená hodnota systému č. 2,
y	průměrná hodnota ze všech měření dané charakteristiky objektu,
$\bar{y}$	průměrná hodnota ze všech měření dané charakteristiky objektu,
$\bar{y}_1$	aritmetický průměr z naměřených hodnot systému č. 2,
y_{corr}	korigovaná hodnota (průměr) měřeného objektu,
y_{ij}	výsledek měření průměru kuličky v *j*-té orientace a při *i*-tém počtu opakování měření v různých bodech,
$\bar{y}_{\mathrm{j}}$	aritmetický průměr výsledků měření v *j* orientacích měřeného objektu.

y_{cors}	korigovaný výsledek měření pro substituční metodu,
y_w	průměrná hodnota ze všech měření etalonu (pomocí nano-CMM),

14 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Souřadnicový měřicí stroj SIOS nano-CMM NMM-1 11

Obr. 1.2 Struktura disertační práce vpravo a celkový pohled na přístroj nano-CMM NMM-1 v laboratoři ČMI OI Brno vlevo 12

Obr. 2.1 Oblast použití souřadnicového měřicího stroje NMM-1…… ……16

Obr. 2.2 Měření dotykovou sondou vyrobenou v laboratoři NPL 17

Obr. 3.1 Přístroj nano-CMM NMM-1 v laboratoři ČMI Brno 19

Obr. 3.2 Schéma principu přístroje nano-CMM NMM-1 20

Obr. 3.3 Pohled na elektronickou jednotku DSP a pracoviště obsluhy přístroje 21

Obr. 3.4 Detail dotykové nano-sondy Gannen XP 22

Obr. 3.5 Snímací systémy použitelné na nano-CMM NMM-1 24

Obr. 4.1 Princip přesného měření 24

Obr 4.2 Výsledek měření 25

Obr. 4.3 Grafické vyjádření systematické chyby měření 27

Obr. 4.4 Vztah mezi přesností měření a nejistotou měření 29

Obr. 4.5 Náhled mapy korekcí portálového CMM pro osu z včetně konstant ke korekci chyb pravoúhlosti v rovinách *xy*, *yz* a *zx* 38

Obr. 4.6 Ukázka kalibrace portálového CMM pomocí koncových měrek vlevo a kalibrace portálového CMM pomocí přístroje lasertracer Etalon vpravo 39

Obr. 4.7 Ukázka kalibrace CMM s optickým snímáním pomocí laserinterferometru Renishaw XL80 40

Obr. 4.8 Ukázka pracovního prostoru nano-CMM NMM-1 41

Obr. 4.9 Schéma postupu při použití MCM 45

Obr. 5.1 Schéma dotykové sondy Renishaw s rubínovou kuličkou 48

Obr. 5.2 Výřez z tabulky vlastností materiálu rubínových kuliček 48

Obr. 5.3 Parametry rubínových kuliček dle normy DIN 5401:2002 49

Obr. 5.4 Schéma rozmístění měřicích bodů na přípravku 49

Obr. 5.5 Částečný 3D model přípravku pro uchycení vzorků vytvořený v Solid Edge 50

Obr. 5.6 Prototyp přípravku pro uchycení vzorků vytištěný na 3D tiskárně 50

Obr. 5.7 Univerzální přípravek pro uchycení vzorků pro měření 51

Obr. 5.8 Určené polohy pro uchycení měřených kuliček. 51

Obr. 5.9 Přesný kruhoměr Taylor Hobson Talyrond TR595S 52

Obr. 5.10 Měření kuličky dotykovou sondou – detail 53

Obr. 5.11 Měření kuličky dotykovou sondou – detail 54

Obr. 5.12 Rozmístění měřených bodů na kuličce; a) pohled ze shora, b) pohled z boku 54
Obr. 5.13 Měření na délkoměru SIP doplněném o LI HP 55
Obr. 5.14 Znázornění měřicích rovin při měření na délkoměru SIP a XL80 56
Obr. 5.15 Měření průměru rubínových kuliček 56
Obr. 5.16 Pracovní prostor tomografu GE [34]vlevo a ukázka měření kuličky o d = 1mm na tomografu GE 57
Obr. 5.17 Celkový pohled na tomograf Rigaku nano3DX vlevo[34] a měřicí prostor přístroje s umístěnou kuličkou *d* = 1 mm vpravo 58
Obr. 5.18 Ukázka naměřených dat z tomografu Rigaku nano3DX vlevo a vyhodnocení naměřených dat kuličky o *d* = 1 mm vpravo 58
Obr. 5.19 Pracovní prostor přístroje Talyrond TR595S vlevo a ukázka naměřených dat analyzovaných v sw Ultra 300 vpravo 59
Obr. 5.20 Upnutí rubínové kuličky v přesném sklíčidle vlevo, snímač v kontaktu s kuličkou vpravo 60
Obr. 5.21 Celkový pohled na přístroj Accurex II.L vlevo, detailní pohled na uchycení rubínové kuličky pomocí kleštiny vpravo 61
Obr. 5.22 Detailní pohled na hrot PPP_CONTR vlevo, ukázka prezentace naměřených dat textury povrchu v *sw* Gwyddion vpravo 61
Obr. 5.23 Grubbsův test odlehlosti naměřených hodnot před vyloučením odlehlé hodnoty 62
Obr. 5.24 Grubbsův test odlehlosti naměřených hodnot po vyloučení odlehlé hodnoty 63
Obr. 6.1 Schéma nesubstituční metody stanovení přesnosti měření CMM 69
Obr. 6.2 Schéma substituční metody stanovení přesnosti měření CMM 70
Obr. 6.3 Měřená data vzduchu v laboratoři, sedm samostatných měření 80
Obr. 7.1 Graf výsledků měření hodnot průměru rubínové kuličky jmenovitém průměru *d* = 1 mm 89
Obr. 7.2 Graf příspěvků způsobených opakovatelností nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 94
Obr. 7.3 Graf příspěvků způsobených geometrickými chybami nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 94
Obr. 7.4 Graf příspěvků způsobených měřením průměru rubínových kuliček pomocí laserinterferometru XL80 ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 95
Obr. 7.5 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 95
Obr. 7.6 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM NMM-1 ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 96

Obr. 7.7 Graf všech jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 97

Obr. 7.8 Graf rozšířených nejistot měření všech průměrů kuliček stanovených multipoziční metodou 98

Obr. 8.1 Detail měření průměru kuličky o jmenovitém průměru d = 4 mm 99

Obr. 8.2 Graf výsledků měření hodnot průměru rubínové kuličky o jmenovitém průměru d = 1 mm 101

Obr. 8.3 Graf příspěvků způsobených nejistotou měření typu A ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou 105

Obr. 8.4 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou 106

Obr. 8.5 Graf příspěvků způsobených teplotními vlivy na nano-CMM ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou 106

Obr. 8.6 Graf všech jednotlivých příspěvků ke kombinované nejistotě měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou 107

Obr. 8.7 Graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených substituční metodou 108

Obr. 9.1 Histogram spočtených dat modelu z vygenerovaných hodnot pro kuličku o d = 1mm při použití multipoziční metody 112

Obr. 9.2 Histogram spočtených dat modelu z vygenerovaných hodnot pro kuličku o d = 1mm při použití substituční metody 113

Obr. 9.3 Sloupcový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených metodou MC 115

Obr. 10.1 Sloupcový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených všemi metodami 120

Obr. 10.2 Spojnicový graf rozšířených nejistot měření průměrů kuliček stanovených všemi metodami 121

Obr. 10.3 3D modelu navrhovaného etalonu délky – ball plate 122

Obr. 10.4 Technický výkres navrhovaného etalonu délky – ball plate 123

Obr. 10.5 Návrh etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX, kde X reprezentuje kalibrovanou zkušební délku 123

Obr. 10.6 Druhý návrh etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX, kde X reprezentuje kalibrovanou zkušební délku 124

Obr. 10.7 3D model prvního návrhu etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje 124

Obr. 10.8 3D model druhého návrhu etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX (vlevo) a jeho rozměry (vpravo) 125

Obr. 10.9 3D modely obou návrhů etalonů délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm přístroje Rigaku nano3DX – provedení s dvěma rubínovými kuličkami (vlevo) a s jednou rubínovou kuličkou (vpravo) 125

Obr. 10.10 Vytištěný model návrhu etalonu délky pro zorné pole 5,6 × 7,2 mm (vlevo), zobrazení modelu etalonu délky při měření na přístroji Rigaku nano3DX (vpravo) 125

Obr. 10.11 Ukázka listu aplikace MS Excel - výpočtový modul pro stanovení nejistoty délkového měření na přístroji nano-CMM NMM-1 126

Obr. 10.12 Podíl jednotlivých složek na kombinovanou nejistotu měření kuličky o d = 4 mm 127

15 SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1	Vzdálenosti řezů měření kruhovitosti od rovníku kuličky	60
Tab. 5.2	Vyhodnocená data z měření průměru kuličky o *d*= 1mm na přístrojích nano-CMM NMM-1 a SIP 1002M / XL 80	64
Tab. 5.3	Vyhodnocená data průměru kuliček na přístrojích nano-CMM NMM-1 a CT Rigaku	64
Tab. 5.4	Vyhodnocená data textury povrchu kuličky o *d* = 1mm z přístrojů AFM Accurex a TR 595S	65
Tab. 6.1	Záznam měření teploty v pracovním prostoru přístroje v laboratoři (°C)	75
Tab. 6.2	Rozdělení velikostí částic prachu dle snímacích kanálů etalonového čítače částic	80
Tab. 6.3	Zdroje nejistoty při měření na přístroji nano-CMM NMM-1	82
Tab. 7.1	Tabulka naměřených hodnot y_{ij} pro kuličku o průměru 1 mm	88
Tab. 7.2	Tabulka výpočtu hodnoty u_{geo1}	89
Tab. 7.3	Tabulka výpočtu hodnoty u_{corrL1}	90
Tab. 7.4	Tabulka výpočtu hodnoty u_{temp1}	90
Tab. 7.5	Tabulka výpočtu hodnoty u_{prob1}	91
Tab. 7.6	Tabulka výpočtu hodnoty u_{L1}	91
Tab. 7.7	Bilanční tabulka výpočtu rozšířené nejistoty U_{mult1}	92
Tab. 7.8	Porovnání jednotlivých příspěvků nejistoty měření stanovené multipozičnímetodou (nm)	93
Tab. 8.1	Tabulka výpočtu hodnoty u_{r1}	100
Tab. 8.2	Tabulka výpočtu hodnoty u_{prob1}	101
Tab. 8.3	Tabulka naměřených hodnot průměru kuličky a statistické zpracování naměřených dat	101
Tab. 8.4	Tabulka výpočtu hodnoty u_{e1}	102
Tab. 8.5	Tabulka výpočtu hodnoty u_{temp1}	103
Tab. 8.6	Tabulka výpočtu hodnoty u_{cl}	103
Tab. 8.7	Bilanční tabulka výpočtu rozšířené nejistoty U_{subs}	104
Tab. 8.8	Porovnání jednotlivých příspěvků celkové nejistoty měření stanovené substituční metodou	104
Tab. 9.1	Vypočtené hodnoty metodou MC pro multipoziční metodu.	111
Tab. 9.2	Vypočtené hodnoty metodou MC pro substituční metodu	113
Tab. 9.3	Vypočtené hodnoty metodou MC a podle ISO 15530-2 pro multipoziční metodu	114
Tab. 9.4	Vypočtené hodnoty metodou MC a podle ISO 15530-2 pro substituční metodu	114
Tab. 10.1	Parametry rozdělení pravděpodobnosti zdrojů nejistoty měření	118
Tab. 10.2	Hodnoty rozšířené nejistoty měření pro všechny metody	119

16 SEZNAM PŘÍLOH

DVD disk.

Příloha A: Statistické vyhodnocení výsledků měření rozměru kuliček.

Příloha B: Statistické vyhodnocení výsledků měření textury povrchu kuliček.

Příloha C: Výpočet nejistoty měření rozměru kuliček o d = 2,3,4mm multipoziční metodou.

Příloha D: Výpočet nejistoty měření rozměru kuliček o d = 2,3,4mm substituční metodou.

Příloha E: Simulace nejistoty měření metodou Monte Carlo měření rozměru kuliček o d = 2,3,4 mm multipoziční metodou.

Příloha F: Simulace nejistoty měření metodou Monte Carlo měření rozměru kuliček o d = 2,3,4 mm multipoziční metodou.

17 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

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, Lísek u Bystřice n. Pernštejnem, 2011.

10 ŠRÁMEK, Jan. Vyjadřování nejistoty měření při kalibraci závitových kalibrů. *III. seminář ČKS Skalský dvůr*, Lísek 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.