



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 NEJISTOTY MĚŘENÍ PŘI KALIBRACI A VYHODNOCENÍ ZPŮSOBILOSTI CMM MICROVU

MEASUREMENT UNCERTAINTY DETERMINATION AND CAPABILITY EVALUATION DURING CALIBRATION
CMM MICROVU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Richard Vanek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Richard Vanek**
Studijní program: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jan Šrámek, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovení nejistoty měření při kalibraci a vyhodnocení způsobilosti CMM MicroVu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zavedení velmi přesných CMM vybavených optickým snímacím systémem umožňuje provádění vysoce přesných délkových měření, které v minulosti vyžadovalo specializované vybavení a postupy. Použití těchto přístrojů v praxi je podmíněno jejich periodickou kalibrací. Úkolem je vytvoření komplexní studie nejistoty měření při kalibraci CMM MicroVu Excel 4520 pro potřeby kalibrační laboratoře v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Včetně vyhodnocení parametrů způsobilosti kalibrovaného CMM.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu v oblasti kalibrací CMM (rešerše).
Charakteristika přístroje MicroVu Excel 4520.
Volba vhodných etalonů a metodiky kalibrace.
Provedení souboru experimentálních měření.
Identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje.
Stanovení nejistoty měření přístroje.
Vyhodnocení způsobilosti CMM.
Vyhodnocení dosažených výsledků.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

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

ČSN EN ISO 10360-2:2002. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů (ISO 10360-2:2001). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 35 s. Třídící znak 252011.

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 s. Třídící znak 015253.

EA 4/02 M:2022. Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci (Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration). Praha: Český institut pro akreditaci, 2022. 70 stran.

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 s. Třídící znak 83031.

ČSN EN ISO 14253-1. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Zkoušení obrobků a měřidel měřením - Část 1: Pravidla rozhodování pro prokázání shody nebo neshody se specifikacemi. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018, 36 s. Třídící znak 014100.

ČSN ISO 22514-7. Statistické metody v managementu procesu - Způsobilost a výkonnost - Část 7: Způsobilost procesů měření. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 48 s. Třídící znak 010277.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá stanovením neistoty merania pri kalibrácii súradnicového meracieho stroja (CMM) Micro-Vu Excel 4520. Rešeršná časť diplomovej práce je zameraná na základnú terminológiu používanú v oblasti kalibračného merania a na všeobecnú charakteristiku súradnicových meracích strojov. Rešeršná časť je zakončená charakteristikou a popisom princípu činnosti CMM Micro-Vu Excel 4520. V praktickej časti sa diplomová práca najskôr zameriava na výber vhodných etalónov pre kalibráciu uvedeného CMM. Ďalej popisuje prevedenie jednotlivých kalibračných meraní, ktoré boli vykonané v priestoroch kalibračného laboratória v budove Českého metrologického inštitútu v Brne. Následne sa zaoberá identifikovaním jednotlivých neistôt merania a ich vyhodnotením. V závere diplomovej práce je zahrnuté vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov, vyhodnotenie spôsobilosti CMM a spolu s nimi aj odporúčania pre prax.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the determination of measurement uncertainty in the calibration of the Micro-Vu Excel 4520 Coordinate Measuring Machine (CMM). The research part of the diploma thesis is focused on the basic terminology used in the field of calibration measurement and on the general characteristics of coordinate measuring machines. The review part is concluded with the characteristics and description of the principle of operation of the CMM Micro-Vu Excel 4520. In the practical part, the diploma thesis first focuses on the selection of suitable standards for the calibration of the aforementioned CMM. Then it describes the performance of individual calibration measurements, which were carried out in the calibration laboratory in the building of the Czech Metrology Institute in Brno. Subsequently, it deals with the identification of individual measurement uncertainties and their evaluation. The thesis concludes with an evaluation of the results obtained, evaluation of CMM capability and recommendations for practice.

KLÚČOVĚ SLOVÁ

súradnicový merací stroj, kalibrácia, neistota merania, sklenené pravítka, koncové mierky, laserový interferometer, nastavovacie krúžky

KEYWORDS

coordinate measuring machine, calibration, measurement uncertainty, glass rulers, gauge blocks, laser interferometer, adjustment rings

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VANEK, Richard. *Stanovení nejistoty měření při kalibraci a vyhodnocení způsobilosti CMM MicroVu*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158146>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som rád poďakoval môjmu vedúcemu diplomovej práce, pánovi Ing. Janovi Šrámkovi, PhD. za jeho priateľský a ochotný prístup, cenné rady a pripomienky pri spracovávaní tejto diplomovej práce. Taktiež by som rád vyjadril veľkú vďaku mojej rodine a priateľke, ktorí pri mne stáli počas celej doby štúdia a nekonečne ma podporovali.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Šrámka, PhD. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24.05.2024

.....

Richard Vanek

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	ROZBOR A CIELE PRÁCE	19
2.1	Problém	19
2.2	Formulácia cieľov a riešení	19
2.3	Navrhovaný postup riešenia	19
3	VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	21
3.1	Metrológia	21
3.1.1	Metrológický systém v Českej republike	21
3.1.2	Medzinárodné metrologické organizácie	23
3.2	Terminológia a definície	24
3.3	Chyby merania	28
3.3.1	Náhodné chyby	28
3.3.2	Systematické chyby	28
3.3.3	Hrubé chyby	29
3.4	Neistoty merania	29
3.4.1	Štandardná neistota typu A (u_A)	30
3.4.2	Štandardná neistota typu B (u_B)	31
3.4.3	Kombinovaná štandardná neistota (u_C)	32
3.4.4	Rozšírená neistota (U)	32
4	SÚČASNÝ STAV V OBLASTI MERANIA POMOCOU SÚRADNICOVÝCH MERACÍCH STROJOV	33
4.1	Terminológia súradnicových meraní	34
4.2	Popis a funkcie CMM	34
4.3	Jednotlivé prvky CMM	35
4.4	Rozdelenie CMM	36
4.5	Meracie systémy CMM	39
4.6	Snímacie systémy CMM	40
4.6.1	Dotykové	41
4.6.2	Bezdotykové	44
4.7	Kalibrácia CMM	44
4.7.1	Výsledok kalibrácie	47
4.8	Metódy stanovenia neistoty merania s CMM	47
4.8.1	Metóda Monte Carlo	47
4.8.2	Substitučná metóda	48
4.8.3	Multipozičná metóda	49
4.9	Vplyvy na presnosť merania a zdroje neistôt u CMM	49
4.9.1	Ovplyvňujúce veličiny v procese merania	49
4.9.2	Ovplyvňujúce veličiny v systéme merania	50
5	PRINCÍP ČINNOSTI A CHARAKTERISTIKA CMM	53
5.1	Charakteristika CMM Micro-Vu Excel 4520	53
5.2	Softvérové vybavenie	55
5.3	Snímacie vybavenie	55
5.3.1	Optický snímací systém CMM	56
5.3.2	Dotykový snímací systém	56
6	VÝBER A POPIS POUŽITÝCH ETALÓNOV	59

6.1	Laserový interferometer Renishaw XL-80.....	59
6.2	Sady koncových mierok.....	61
6.3	Sklenené pravítka.....	62
6.4	Nastavovacie krúžky.....	63
7	PREVEDENIE KALIBRAČNÝCH MERANÍ	65
7.1	Sklenené pravítka.....	65
7.2	Laserový interferometer.....	66
7.3	Koncové oceľové mierky.....	67
7.4	Nastavovacie oceľové krúžky.....	68
8	STANOVENIE NEISTÔT PRI KALIBRÁCII CMM MICRO-VU EXCEL 4520 69	
8.1.1	Identifikácia jednotlivých zdrojov neistôt.....	69
8.1.2	Stanovenie neistoty typu A (uA).....	69
8.1.3	Stanovenie neistoty použitého etalónu (uB1).....	69
8.1.4	Stanovenie vplyvu rozlišovacej schopnosti meracieho stroja (uB2).....	70
8.1.5	Stanovenie vplyvu rozdielu teploty pri meraní od 20 °C (uB3).....	70
8.1.6	Stanovenie vplyvu rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (uB4).....	70
8.1.7	Stanovenie neistoty kalibrácie dotyku (uB5).....	70
8.1.8	Stanovenie neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu (uB6).....	71
8.2	Kvantifikácia jednotlivých neistôt a modelové príklady ich výpočtu	71
8.2.1	Sklenené pravítka.....	72
8.2.2	Laserový interferometer.....	76
8.2.3	Koncové oceľové mierky.....	79
8.2.4	Nastavovací oceľový krúžok – kruhovitosť.....	83
9	ZÁVER A ZHODNOTENIE	87
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	90
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	94
	ZOZNAM OBRÁZKOV	96
	ZOZNAM TABULIEK	97

1 ÚVOD

„Ked' dokážete zmerať to, o čom hovoríte, a vyjadriť to v číslach, niečo o tom viete; ale keď to nedokážete zmerať, keď to nedokážete vyjadriť v číslach, vaše vedomosti sú skromné a neuspokojivé.“ Lord Kelvin [1]

V dnešnom modernom svete sa veľmi často stretávame so zvyšujúcimi požiadavkami na kvalitu, rýchlosť a presnosť výroby. Výrobné procesy si vyžadujú veľmi presné meracie zariadenia, vďaka ktorým je zabezpečená spoľahlivá prevádzka. Medzi veľmi často používané meracie zariadenia patria súradnicové meracie stroje. [2]

Aby bolo možné zaistiť kontinuálny chod týchto zariadení a v súlade so špecifikáciami, je nutné pravidelne vykonávať ich kontrolu, údržbu a kalibráciu, ktorou sa určia jeho odpovedajúce metrologické charakteristiky. Kalibrácie sa certifikujú na určitú dobu, počas ktorej je presnosť meracieho stroja garantovaná. Je preto dôležité, aby užívateľ meracieho stroja dodržiaval kalibračný harmonogram, na konci ktorého dôjde ku kalibrácii vybraného meracieho zariadenia, ktoré dokáza meriť vo viacerých osiach súčasne a tým zabezpečujú možnosť komplexnej kontroly jednotlivých sledovaných rozmerových parametrov. To z nich robí jednu z najlepších možností, čo sa týka veľmi presného merania na trhu. [2] [3]

V diplomovej práci je riešená problematika stanovenia neistoty merania pri kalibrácii súradnicového meracieho stroja a vyhodnotenie jeho spôsobilosti. Na kalibračné merania bol použitý súradnicový merací stroj Excel 4520 od amerického výrobcu Micro-Vu, ktorý je majetkom Českého metrologického inštitútu (ČMI) v Brne. Uvedený merací stroj sa nachádza v špecializovanom kalibračnom laboratóriu v budove pobočky ČMI v Brne.

Diplomová práca je rozdelená do dvoch na seba nadväzujúcich častí, rešeršnej a praktickej, ktoré na seba nadväzujú. Každá časť diplomovej práce pozostáva z niekoľkých samostatných kapitol.

V druhej kapitole je zhrnutý systémový rozbor problému a sú stanovené jednotlivé ciele diplomovej práce v súlade s jej zadaním.

Tretia kapitola je zameraná na vymedzenie riešenej problematiky. Obsahuje jednotlivé základné definície, súvisiace s metrologiou a meraním, a taktiež zoznamuje čitateľa so štruktúrou metrologického systému v Českej republike.

Štvrtá kapitola popisuje súčasný stav v oblasti merania pomocou súradnicových meracích strojov. Je v nej uvedené delenie súradnicových meracích strojov, popis ich funkcií a rozdelenie na základe snímacích systémov. Taktiež rozoberá proces kalibrácie súradnicového meracieho stroja a uvádza jednotlivé metódy, ktorými je možné stanoviť výsledné neistoty merania.

Nasledujúca piata kapitola popisuje CMM Micro-Vu Excel 4520, s ktorým sa vykonali jednotlivé kalibračné merania Táto kapitola je poslednou v rámci rešeršnej časti diplomovej práce.

V šiestej kapitole je uvedený výber a popis jednotlivých etalónov použitých počas kalibrácie súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 v kalibračnom laboratóriu.

Siedma kapitola v poradí je zameraná na popis a prevedenie jednotlivých kalibračných meraní so zvolenými etalónmi.

Cieľom ôsmej kapitoly je priblížiť čitateľovi postup, akým boli identifikované a stanovené jednotlivé zdroje neistôt kalibračného merania. Taktiež sú v tejto kapitole zahrnuté ukážkové výpočty a kvantifikácia neistôt pre každý zvolený etalón zvlášť.

Posledná záverečná kapitola obsahuje zhrnutie diplomovej práce a zhodnotenie jej výsledkov, doplnené s odporúčením pre prax.

2 ROZBOR A CIELE PRÁCE

V tejto kapitole diplomovej práce bude vykonaný a popísaný rozbor riešenej problematiky a určené jednotlivé čiastkové ciele, ktoré je nutné splniť k dosiahnutiu stanoveného hlavného cieľu diplomovej práce.

2.1 Problém

Akreditované kalibračné laboratórium je vybavené súradnicovým meracím strojom Micro-Vu Excel 4520, ktorému bude končiť lehota od poslednej platnej kalibrácie. Pre zabezpečenie riadneho chodu kalibračného laboratória, je nutné vykonať opätovnú kalibráciu, vyhodnotiť namerané dáta a vytvoriť kalibračný list.

2.2 Formulácia cieľov a riešení

Podľa pokynov vedúceho práce a spoločných konzultácií, boli v rámci cieľov obsiahnutých v zadaní stanovené tieto dielčie úlohy a ciele:

- Popis súčasného stavu v oblasti kalibrácií CMM (rešerše),
- charakteristika prístroja,
- voľba vhodných etalónov a metodiky kalibrácie,
- vykonanie súboru experimentálnych meraní,
- identifikácia a kvantifikácia jednotlivých zložiek neistoty merania prístroja,
- stanovenie neistoty merania prístroja,
- vyhodnotenie spôsobilosti CMM,
- vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov,
- záver a odporúčenie pre prax.

Hlavný cieľ diplomovej práce

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je vytvorenie komplexnej štúdie neistoty pri kalibrácii súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 v rámci akreditovaného kalibračného laboratória v súlade s normou ČSN EN ISO/IEC 17 025 a nadväzujúcich systémových noriem radu ČSN EN ISO 10 360.

2.3 Navrhovaný postup riešenia

Ako prvé bude v rešeršnej časti uvedenej diplomovej práce urobený komplexný popis súčasného stavu v oblasti kalibrácií súradnicového meracieho stroja, ktorý bude zahŕňať popis základnej terminológie, národného metrologického systému v ČR, ktorého súčasťou je aj kalibračné laboratórium, kde sa budú vykonávať jednotlivé merania, a taktiež celkovú charakteristiku použitého súradnicového meracieho stroja v súlade s normou ČSN EN ISO 10 360-1 s opisom jeho funkcií a meracích systémov.

V ďalšom kroku je dôležité, aby boli vhodné zvolené etalóny pre účel kalibrácie CMM. Následne sa prevedie séria kalibračných meraní na každom jednom zvolenom etalóne zvlášť a v plnom meracom rozsahu meracieho zariadenia. Meranie je nutné vykonať s dohodnutým

počtom opakovaní v každej osi, čo v tomto prípade predstavuje os X, os Y, os Z alebo kombinácia XY a YX.

Po vykonaní merania bude nutné namerané dáta ďalej spracovať. K tomu je potrebné si vytvoriť výpočtový program v Exceli. Ako prvé sa vytipujú možné zdroje neistôt, ktoré budú zahrnuté v ďalších výpočtoch. Pri určovaní možných vplyvov na neistotu a výsledok merania sa bude vychádzať z Ishikawovho diagramu, spracovaného v rámci rešerší (pozn. obr. 30). Výpočty a vyhodnotenie neistôt sa prevedie v súlade s dokumentom EA-4/02 M:2022. Následne sa všetky výsledky spracujú do prehľadných tabuliek a vykoná sa posúdenie spôsobilosti použitého meracieho stroja.

Ako posledné dôjde k vytvoreniu kalibračného listu pre CMM Micro-Vu Excel 4520, v ktorom budú zahrnuté všetky neistoty zistené z kalibračných meraní jednotlivých etalónov a bude jedným z výstupov tejto diplomovej práce. K ďalšiemu výstupu diplomovej práce sa radí celkové zhodnotenie a odporúčania pre prax, ktoré budú spracované v závere diplomovej práce.

Na základe vyššie popísaných odstavcov je možné konštatovať, že diplomovú prácu môžeme vypracovať v súlade s cyklom neustáleho zlepšovania PDCA (**P**-plan/plánuj, **D**-do/urob, **C**-check/kontroluj, **A**-act/konaj):

- **P** - Plánovanie je dané cieľmi diplomovej práce.
- **D** - Činnosť je reprezentovaná vypracovaním rešerší s popisom súčasného stavu v oblasti kalibrácií súradnicových meracích strojov a vykonaním série kalibračných meraní na príslušnom meracom stroji v priestoroch akreditovaného kalibračného laboratória.
- **C** – Kontrola sa vykoná formou vyhodnotenia nameraných dát, kvantifikovaných neistôt, vyhodnotením merania v súlade s normou ČSN EN ISO 14 253-1:2014 a rozhodnutím o spôsobilosti meracieho stroja.
- **A** – Vytvorenie kalibračného listu, ktorý bude slúžiť pre potreby Vykonanie nápravných opatrení a s písanie odporúčaní pre prax.

3 VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

3.1 Metrologia

V Medzinárodnom metrologickom slovníku VIM (Vocabulaire international de métrologie) je metrologia definovaná ako veda o meraní a jeho aplikácii. Zahrňuje všetky teoretické a praktické aspekty merania, akékoľvek neistoty merania a obory použitia. [4]

Medzi hlavné úlohy metrologie patrí [5]:

- Definovanie medzinárodne uznaných meracích jednotiek,
- realizovanie meracích jednotiek vedeckými metódami,
- vytvorenie reťazcov nadväznosti na určenie hodnoty a dokumentovanie presnosti merania vrátane rozširovania tejto vedomosti.

Metrologia predstavuje základný nástroj vedeckého výskumu. Vedecký výskum predstavuje základ rozvoja samotnej metrologie [5]. Zaoberá sa všetkými poznatkami a činnosťami, ktoré sa týkajú merania a je základom jednotného a presného merania vo všetkých oblastiach vedy, hospodárstva, štátnej správy, obrany a pod.

Metrologia sa delí na tri kategórie [5]:

- **Vedecká** – zaoberá sa organizáciou a vývojom etalónov a ich uchovávaním,
- **priemyselná** – jej povinnosťou je zabezpečovanie adekvátnej funkcie meradiel, ktoré sa používajú v priemysle, vo výrobe a pri skúšobných postupoch, čím sa zabezpečí kvalita života občanov a akademický výskum,
- **legálna** – zaoberá sa meraniami, ktoré ovplyvňujú transparentnosť ekonomických vzťahov, najmä ide o merania, kde existuje požiadavka na overenie meradla.

Existuje aj kategória metrologie nazývaná fundamentálna, avšak táto kategória nemá medzinárodnú definíciu. Vo všeobecnosti predstavuje najvyššiu triedu presnosti v rámci určitej oblasti. Preto sa dá opísať ako najvyššia úroveň vedeckej metrologie. [5]

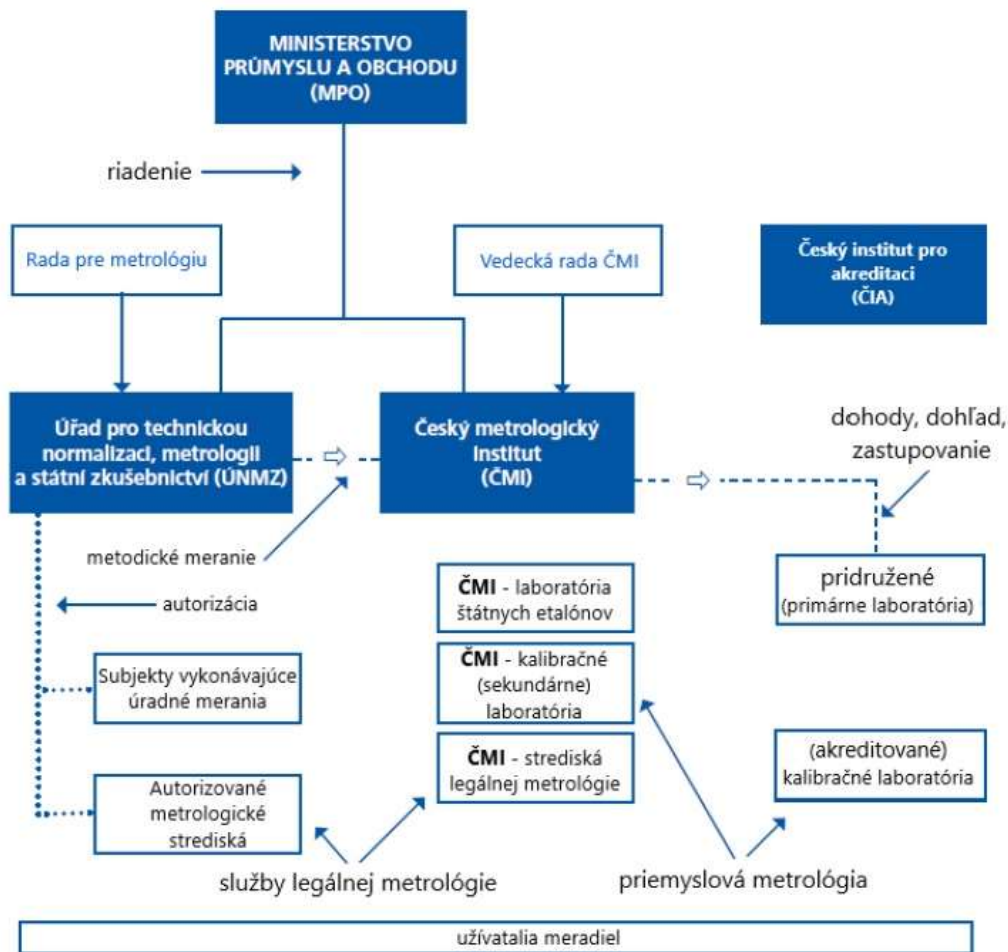
3.1.1 Metrologický systém v Českej republike

Pod názvom Národný metrologický systém (NMS) sa rozumie systém, ktorý slúži na zaistenie jednotnosti a správnosti meradiel a meraní v danom štáte, a to prostredníctvom sústavy technických prostriedkov a zariadení, ale taktiež aj technických predpisov, práv, povinností správnych orgánov a právnických alebo fyzických osôb. Základným prvkom NMS v Českej republike sú spotrebiteľia, verejnosť, podnikateľské subjekty a ďalšie prvky podieľajúce sa na jeho riadení. [6]

Základným legislatívnym dokumentom, na ktorom je založený Národný metrologický systém v Českej republike, je zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii v znení neskorších predpisov. Jeho účelom je úprava práv a povinností fyzických osôb, ktoré sú podnikateľmi a právnických osôb a orgánov štátnej správy, a to v rozsahu potrebnom k zaisteniu jednotnosti a správnosti meradiel a meraní. [7]

Jedným z kľúčových prvkov NMS je národný metrologický inštitút, ktorý v Českej republike predstavuje Český metrologický inštitút (ČMI). Ďalšími dôležitými subjektami, ktoré patria do NMS v Českej republike, sú Ministerstvo priemyslu a obchodu (MPO), Úrad pre

technickú normalizáciu, metrologiu a štátne skúšobníctvo (ÚNMZ), Český inštitút pre akreditáciu (ČIA) a autorizované metrologické strediská. [6] Jednotlivé zložky NMS v Českej republike sú zobrazené na nižšie uvedenom obr. 1:



Obr. 1: Národný metrologický systém v ČR [6] [8]

Ministerstvo priemyslu a obchodu (MPO) – je ústredným orgánom štátnej správy, ktorý má vo svojej kompetencii taktiež oblasť technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva. Vykonáva a zabezpečuje úlohy, ktoré sú stanovené zákonom č.20/1993 Sb., o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva, v znení neskorších predpisov. [6]

V oblasti metrologie MPO [6]:

- Riadi štátnu politiku v oblasti metrologie a navrhuje legislatívu,
- vypracováva návrhy koncepcie rozvoja národného metrologického systému v Českej republike,
- riadi Úrad pre technickú normalizáciu, metrologiu a štátne skúšobníctvo a Český metrologický inštitút,
- rozhoduje o opravných prostriedkoch proti rozhodnutiu Úradu pre technickú normalizáciu, metrologiu a štátne skúšobníctvo.

Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo (ÚNMZ) – bol zriadený ako orgán štátnej správy na základe zákona č.20/1993. Jeho hlavným poslaním je zabezpečovať predovšetkým úlohy vyplývajúce zo zákonov ČR, upravujúce technickú normalizáciu, metrológiu, a štátne skúšobníctvo a úlohy v oblasti technických predpisov a noriem v rámci členstva ČR v EÚ. ÚNMZ vytvára a vydáva české technické normy, zastupuje Českú republiku v medzinárodných orgánoch, autorizuje subjekty pre výkon v oblasti štátnej metrologickej kontroly meradiel, preveruje oprávnené subjekty k uchovávaniu štátnych etalónov a taktiež udeľuje súhlas s nadviazaním hlavných etalónov na etalóny zahraničných subjektov s potrebnou metrologickou úrovňou a pod. [6] [8]

Český metrologický inštitút (ČMI) – je národným metrologickým inštitútom v Českej republike. Plní funkcie, ktoré spadajú do pôsobnosti štátnej správy v oblasti metrológie na základe zákona č.505/1999. ČMI je taktiež notifikovanou osobou pre oblasť posudzovania zhody vybraných stanovených výrobkov. [6]

ČMI taktiež vykonáva [6]:

- Metrologický výskum a uchovávanie štátnych etalónov vrátane prenosu hodnôt meracích jednotiek na meradlá nižších presností,
- certifikáciu referenčných materiálov,
- výkon štátnej metrologickej kontroly meradiel,
- vydáva opatrenia obecnej povahy, ako napríklad regulačné predpisy pre oblasť metrológie,
- poskytuje odborné služby v oblasti metrológie.

Český inštitút pre akreditáciu, o.p.s (ČIA) – pôsobí v ČR ako národný akreditačný orgán, založený ako obecné prospešná spoločnosť v zmysle zákona č. 248/1995. Jedná sa súkromnoprávnou neziskovú organizáciu, ktorá poskytuje služby v oblasti akreditácie a dozoru nad trvalým plnením požiadavkou na subjekty posudzovania zhody, a to v súlade s platnými právnymi predpismi a medzinárodne uznávanými normami. [6]

3.1.2 Medzinárodné metrologické organizácie

Európska asociácia národných metrologických inštitútov (EURAMET) – jedná sa o združenie pre spoluprácu jednotlivých európskych národných metrologických inštitútov. Jedným z cieľov EURAMET je dosiahnutie vplyvu pomocou koordinovaného európskeho výskumu v metrológii. Spolupracuje s ostatnými regionálnymi organizáciami vo svete (obr. 2)



Obr. 2: Medzinárodné metrologické organizácie [5]

ako napríklad SIM v Severnej a Južnej Amerike, AFRIMETS v Afrike, COOMET v Eurázii a APMP v Ázii a Oceánii. [5] [8]

Európska spolupráca v legálnej metrologii (WELMEC) – v tejto medzinárodnej organizácii sa združujú autority jednotlivých štátov EÚ v oblasti legálnej metrologie. Cieľom WELMEC je predovšetkým rozvoj vzájomnej dôvery medzi orgánmi legálnej metrologie v Európe, harmonizácia aktivít legálnej metrologie a podpora a výmeny informácií medzi všetkými zainteresovanými stranami. [5] [8]

Medzinárodná organizácia pre legálnu metrologiu (OIML) – predstavuje medzivládnu organizáciu, ktorej účelom je podpora celosvetovej harmonizácie postupov legálnej metrologie. Vydáva medzinárodné odporúčania k uplatňovaniu národnej legislatívy, ktorá sa týka rôznych kategórií meradiel. [5] [8]

3.2 Terminológia a definície

Meranie – proces experimentálneho získavania jednej alebo viacerých hodnôt veličiny, ktoré môžu byť dôvodne priradené ku veličine. [4]

Meraná veličina – veličina, ktorá má byť meraná. [4]

Opakovateľnosť merania – je definovaná ako precíznosť merania za podmienok opakovateľnosti merania. To znamená, že meranie sa vykonáva s rovnakým meradlom, rovnakým operátorom, rovnakými podmienkami okolia, rovnakým postupom merania, rovnakým objektom a to počas krátkého časového úseku. [4] [9]

Reprodukovateľnosť merania – je definovaná ako precíznosť merania za podmienok reprodukovateľnosti meraní. Podmienky reprodukovateľnosti zahŕňujú použitie rôznych postupov merania, personálu, za rôznych podmienok pri opakovaných meraniach toho istého alebo podobného objektu. [4] [9]

Postup merania – podrobný popis merania podľa jedného alebo viacerých meracích princípov a danej metódy merania, založený na modeli merania a zahrnujúci akýkoľvek výpočet ku získaniu výsledku merania. [4]

Metóda merania – všeobecný súhrn praktických a teoretických operácií použitých pri meraní podľa daného princípu. [10]

Meradlo - zariadenie používané k meraniu buď samostatne alebo v spojení s jedným alebo viacerými prídavnými zariadeniami. Označenie merací systém sa používa pre meradlo, ktoré môže byť používané samostatne. [4]

Merací systém – zostava jedného alebo viacerých meradiel a často ďalších zariadení, vrátane činidiel a zdrojov, zostavená a prispôbená k poskytovaniu informácie používanej ku generovaniu nameraných hodnôt veličiny v špecifikovaných intervaloch pre veličiny špecifikovaných druhov. [4]

Justovanie meracieho systému – súbor činností vykonaných na meracom systéme tak, aby poskytoval predpísané indikácie odpovedajúce daným hodnotám veličiny, ktorá ma byť meraná. Pri justovaní nejde o kalibráciu. Tá sa vykonáva pred a následne po justovaní. [4]

Etalón – taktiež označovaný ako štandard, je podľa Medzinárodného metrologického slovníka definovaný ako realizácia definície danej veličiny, so stanovenou hodnotou veličiny a pridruženou neistotou merania, ktorá sa používa ako referencia [4]. Je určený na definovanie,

realizovanie, uchovávanie a reprodukovanie hodnôt meranej veličiny a jej prenos na nižšie rady etalónov a meradiel [10].

Referenčný materiál – materiál, ktorý je dostatočne homogénny a stabilný, s referenciou k špecifikovaným vlastnostiam, ktoré boli stanovené tak, že sa hodí pre ich zmysľané použitie pri meraniach alebo pri skúmaní menovitých vlastností. [4]

Certifikovaný referenčný materiál – referenčný materiál doplnený o dokument, ktorý bol vydaný spôsobilou osobou a poskytujúci jednu alebo viacej špecifikovaných hodnôt vlastnosti s pridruženými neistotami a nadväznosťami s použitím platných postupov. [4]

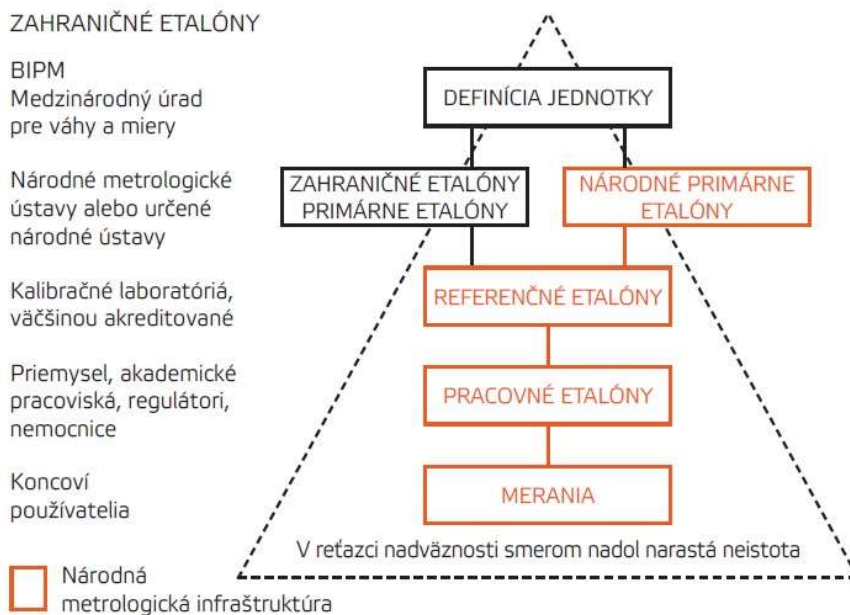
Overovanie – poskytnutie objektívneho dôkazu, že daná položka spĺňa špecifikované požiadavky. Položkou môže byť proces, postup merania, materiál, zlúčenina alebo aj merací systém [4]. Pri overení sa skúma zhoda metrologických charakteristík daných meradiel s úradne stanovenými požiadavkami, a to najmä s maximálnymi dovolenými chybami [11].

Kalibrácia – jedná sa o súbor operácií, ktoré pri definovaných podmienkach určujú vzťah medzi hodnotami indikovanými meradlom alebo meracím systémom, alebo hodnotami reprezentovanými materializovanou mierou, alebo referenčným materiálom a zodpovedajúcimi hodnotami veličín, ktoré sú realizované etalónmi [10].

Hierarchia kalibrácie – sled kalibrácií od referencie ku konečnému meradlu, kde záver každej kalibrácie závisí na závere predchádzajúcej kalibrácie. [4]

Metrologická nadväznosť - vlastnosť výsledku merania, pomocou ktorej sa výsledok môže vzťahovať k stanovenej referencii cez dokumentovaný neprerušovaný reťazec kalibrácií, z ktorej sa každá podieľa svojím príspevkom na stanovenej neistote merania [4].

V podstate sa jedná o zaradenie daných meradiel do neprerušovanej postupnosti prenosu hodnoty veličiny, ktorá sa začína etalónom najvyššej metrologickej kvality. Reťazcom nadväznosti (obr. 3) sa rozumie neprerušovaný reťazec porovnávaní, pre ktorý sú udané neistoty. Výsledok merania alebo hodnota etalónu sa vzťahujú k referenciám vyššej úrovne a nakoniec až ku etalónom. Konečný užívateľ tak získa nadväznosť na najvyššej možnej medzinárodnej



Obr. 3: Reťazec metrologickej nadväznosti [5]

úrovni. Metrologickú nadväznosť zabezpečuje národný metrologický inštitút alebo akreditované kalibračné laboratóriá. [12]

Štátny etalón – etalón, ktorý je uznaný národným orgánom k využitiu v danej krajine. [4]

Uchovávanie etalónu – býva taktiež označovaná ako údržba etalónu. Predstavuje súbor činností potrebných k zachovaniu metrologických vlastností etalónu v rozsahu stavených medzných hodnôt. [4]

Akreditácia – oficiálne uznanie, že orgán, osoba alebo skúšobné laboratórium sú spôsobilé vykonávať určité skúšky, špecifickú činnosť [10].

Výsledok merania – súbor hodnôt veličiny priradený meranej veličine spoločne s akoukoľvek ďalšou dostupnou relevantnou informáciou [4]. Pre úplné vyjadrenie výsledku musí výsledok merania obsahovať nielen vlastnú hodnotu meranej veličiny, ale aj neistotu merania patriacu ku tejto hodnote. [13]

Výsledok merania s príslušnou neistotou merania sa zapisuje v tvare [13]:

$$Y = y \pm U, \quad (3.1)$$

kde Y – meraná veličina,

y – odhad meranej veličiny,

U – rozšírená neistota meranej veličiny.

Nameraná hodnota veličiny – hodnota predstavujúca výsledok merania resp. odhad jedinečnej pravej hodnoty veličiny. [4]

Pravá hodnota veličiny (skutočná hodnota) – hodnota rovná alebo v zhode s definíciou veličiny, z princípu je jedinečná a v praxi nepoznateľná. [4]

Konvenčná hodnota veličiny – pre daný účel dohodou priradená hodnota k veličine, v niektorých prípadoch odhad pravej hodnoty veličiny. [4]

Referenčná hodnota veličiny – hodnota využívaná ako základ pre komparáciu s hodnotami veličín totožnej povahy. Môže predstavovať pravú hodnotu meranej veličiny, alebo konvenčnú hodnotu veličiny. [4]

Presnosť merania – tesnosť zhody medzi nameranou a pravou hodnotou meranej veličiny [4]. Presnosť nie je možné jednoduchým a objektívnym spôsobom kvantifikovať, pretože sa jedná o kvalitatívny pojem. Na vyjadrenie presnosti výsledku je potrebné použiť kvantitatívnu charakteristiku, akou je napríklad neistota merania. Pri vyhodnotení merania dochádza ku kvantifikácii dvoch základných charakteristík, a to odhadu priemeru, ktorým sa hodnotí správnosť merania a odhadu variability, ktorou sa hodnotí precíznosť merania. [9]

Správnosť merania - tesnosť zhody medzi aritmetickým priemerom nekonečného počtu opakovaných meraní veličiny a referenčnej hodnoty. Správnosť merania nie je možné číselne kvantifikovať [4]. Má priamy vplyv na systematickú chybu. V metrologickej praxi sa pre ňu používa názov strannosť. Eliminuje sa pomocou korekcie. [9]

Precíznosť merania – tesnosť zhody medzi jednotlivými indikáciami resp. nameranými hodnotami veličiny za špecifikovaných podmienok, ako opakovateľnosť alebo reprodukovateľnosť [4]. Najčastejšie sa kvantifikuje za pomoci charakteristík variability, medzi ktoré patria rozptyl alebo rozpätie. Pre tieto účely sa u štatistického vyhodnotenia používa rozpätie, ktoré je dané vzťahom [9]:

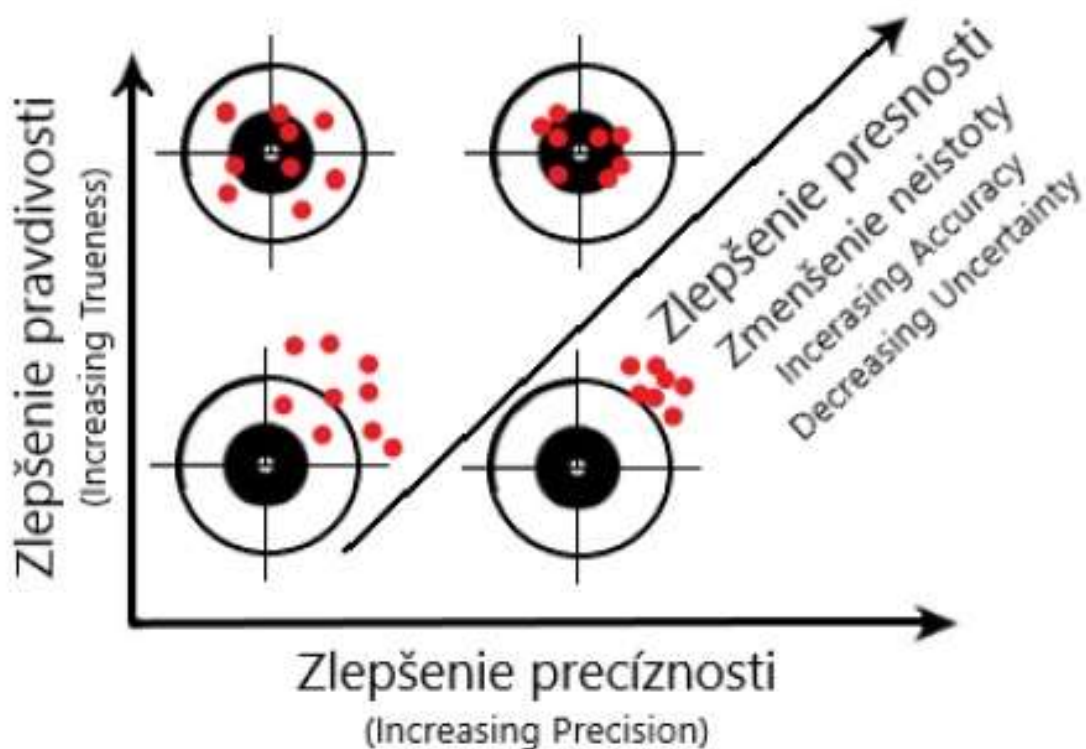
$$R = y_{max} - y_{min} \quad (3.2)$$

kde R – rozpätie,

y_{max} – maximálna nameraná hodnota meranej veličiny,

y_{min} – minimálna nameraná hodnota meranej veličiny.

Na nižšie uvedenom obr. 4 je znázornený princíp posudzovania presnosti a neistoty merania používaného meradla alebo meracieho stroja. Dosiachnutie čo najmenšej hodnoty neistoty merania pri dosiahnutí čo najväčšej miery presnosti možno označiť za dosiahnutie ideálneho stavu. Takýto stav predpokladá nízke hodnoty chyby merania a biasu (rozdielu medzi nameranou hodnotou získanou z opakovaných meraní rovnakej vzorky a referenčnou hodnotou) nameraných hodnôt. Požadovaným stavom je, ak pri narastajúcej presnosti merania, klesá hodnota neistoty merania. [9]

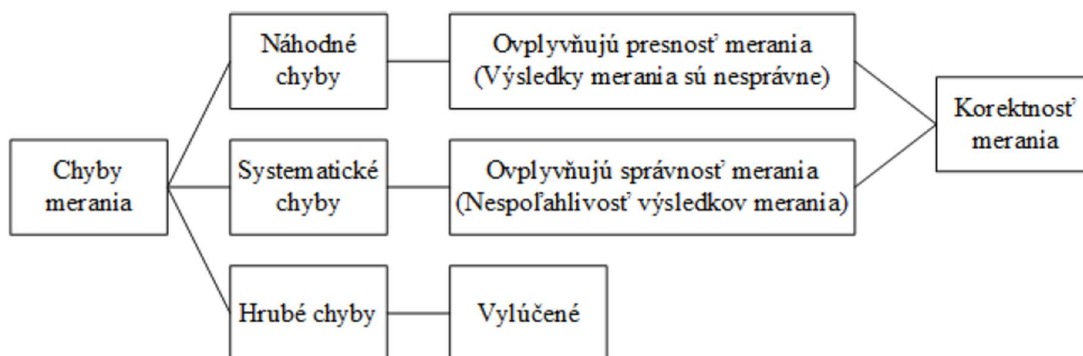


Obr. 4: Princíp presného merania [8]

Absolútne presná metóda merania ani meracie zariadenie v metrologickej praxi nejestvuje, čo znamená, že je rozdiel medzi nameranou a skutočnou hodnotou meranej veličiny. Tento rozdiel je daný rozličnými faktormi, poprípade ich kombináciou. Výsledok merania sa vždy nachádza v istom rozmedzí okolo skutočnej hodnoty, ktorá je nepoznateľná. V praxi sa preto stanovuje neistota merania, ktorá sa uvádza spolu s nameranou hodnotou a tým spolu vytvoria celkový výsledok merania. [9]

3.3 Chyby merania

Chyba merania je podľa Medzinárodného metrologického slovníka definovaná ako nameraná hodnota veličiny, od ktorej sa odčíta referenčná hodnota veličiny [4].



Obr. 5: Rozdelenie chýb merania [8]

Skutočnú hodnotu meranej veličiny nie je možné presne vyjadriť, nakoľko namerané hodnoty veličiny sú vždy ovplyvnené existenciou chyby merania. [9]

Ako je možné vidieť na vyššie uvedenom obr. 5, chyby merania sa delia podľa pôvodu do troch kategórií, a to na chyby náhodné, chyby systematické a na hrubé chyby. Náhodné chyby ovplyvňujú najmä presnosť merania, zatiaľ čo systematické chyby ovplyvňujú správnosť výsledku merania. U hrubých chýb nastáva ich vylúčenie z dôvodu ich veľmi odľahlých hodnôt. Celková chyba pozostáva z chyby systematickej a chyby náhodnej. [9] [8]

3.3.1 Náhodné chyby

Náhodná chyba merania je zložka chyby merania, ktorá sa v opakovaných meraniach mení nepredvídateľným spôsobom. [4]

Vyskytujú sa u každého merania a nie je možné ich ovplyvniť. Počas merania ich nie je možné kontrolovať ani definovať, nakoľko za ich vznikom stojí veľký počet náhodných vplyvov. Matematicky je možné náhodnú chybu vyjadriť ako výsledok merania, od ktorého sa odčíta stredná hodnota, ktorá by vznikla z nekonečného počtu meraní rovnakej meranej veličiny uskutočnenej za podmienok opakovateľnosti a reprodukovateľnosti. [9] [13]

Náhodná chyba sa nedá úplne odstrániť, avšak zvýšeným počtom meraní je možné dosiahnuť jej zníženie. Po opakovaných meraniach môže s vysokou pravdepodobnosťou náhodná chyba nadobúdať hodnotu maximálne ± 3 smerodajné odchýlky. Za podmienok opakovateľnosti je možné náhodnú chybu znížiť tak, že výsledok merania sa spočíta ako aritmetický priemer z nameraných hodnôt. [8]

3.3.2 Systematické chyby

Je definovaná podľa Medzinárodného metrologického slovníka ako zložka chyby merania, ktorá v opakovaných meraniach ostáva konštantná alebo sa mení predvídateľným spôsobom. [4]

Systematické chyby sú spôsobené napríklad použitím nevhodnej meracej metódy, nepresného meradla alebo nepresného meracieho stroja. Od náhodných chýb sa líšia tým, že ovplyvňujú správnosť každého merania. Nastáva tak skresľovanie numerického výsledku pravidelným spôsobom, a to tak, že sa výsledok merania pravidelne zväčšuje alebo znižuje

bez ohľadu na počet opakovaných meraní. Nakoľko poznáme príčiny vzniku systematických chýb, môžeme odhadnúť ich veľkosť aj znamienko, a tým dokážeme odstrániť výslednú chybu merania. [9] [13]

Systematická chyba merania sa dá matematicky zapísať nasledovným vzťahom [9]:

$$\Delta_s = \mu - Y_p, \quad (3.3)$$

kde Δ_s - systematická chyba,
 μ - stredná hodnota meranej veličiny,
 Y_p - konvenčná hodnota meranej veličiny.

3.3.3 Hrubé chyby

Patria sem chyby, ktoré sú viditeľné a ľahko odstrániteľné. Sú spôsobené výnimočnou príčinou, nesprávnym odčítaním alebo zapísaním údajov nameranej hodnoty, zlyhaním meracej aparatury, nesprávnym nastavením podmienok pokusu apod. Pri opakovanom meraní sa nameraná hodnota značne odlišuje od ostatných nameraných hodnôt. Takéto meranie je nutné zo spracovania vylúčiť, aby neskresľovalo celkový výsledok merania. [9] [13]

3.4 Neistoty merania

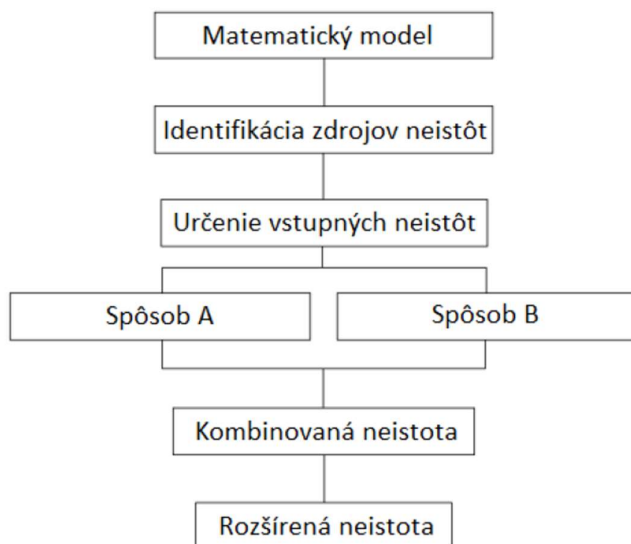
Neistota merania je definovaná podľa Medzinárodného metrologického slovníka definovaná ako nezáporný parameter charakterizujúci rozptýlenie hodnôt veličiny priradených k meranej veličine na základe použitej informácie. [4]

Je základným parametrom výsledku merania. Stanovuje sa na základe kvantifikácie príspevku všetkých chýb merania (náhodných aj systematických), ktoré môžu významne zaťažiť výsledok merania. Vymedzuje interval, o ktorom je s určitou pravdepodobnosťou možné predpokladať, že v ňom leží výsledok merania. Úplné vyjadrenie výsledku merania nastáva až vtedy, ak obsahuje vlastnú hodnotu meranej veličiny, ale aj neistotu merania, ktorá patrí ku tejto hodnote. [14]

K vyhodnoteniu merania je možné pristupovať dvomi prístupmi, a to prístupom chybovým alebo prístupom neistotovým. U chybového prístupu skutočná hodnota meranej veličiny považuje za jedinečnú a nepoznatelnú. Za to u neistotového prístupu sa pripúšťa, že následkom neúplného množstva podrobností v definícii veličiny, neexistuje jediná pravá hodnota veličiny, ale súbor pravých hodnôt veličín v zhode s definíciou. Avšak tento súbor hodnôt je v bežnej praxi nepoznatelný. Neistoty sa teda určujú na pravdepodobnostnom princípe. Predpokladá sa určité rozdelenie pravdepodobnosti, ktoré charakterizuje, ako sa nameraná veličina môže líšiť od jej skutočnej hodnoty. [4] [15]

Zdrojom neistoty merania možno označiť všetky javy, ktoré môžu nejakým spôsobom ovplyvniť neurčitost' jednoznačného stanovenia výsledku merania. Takto nastáva vzd'alo vanie nameraných hodnôt od skutočnej hodnoty. Neistoty merania môžu byť ovplyvnené zvoleným meracím strojom, postupom merania, obsluhou meracieho stroja, zaokrúhľovaním konštánt a prevzatých hodnôt ale aj etalónom. [13]

Na nasledujúcom obr. 6 je možné vidieť schematické znázornenie všeobecného metodického postupu pre stanovenie neistôt merania. [13]



Obr. 6: Metodický postup pre stanovenie neistoty [13]

3.4.1 Štandardná neistota typu A (u_A)

Podľa definície je štandardná neistota typu A (vyhodnotená spôsobom A) stanovená výpočtom z opakovane vykonaných meraní danej veličiny. To znamená, že pokiaľ sa vykoná opakovaný odpočet hodnoty meranej veličiny a existuje merací prístroj s dostatočným rozlíšením, tak vznikne určitý rozptyl nameraných hodnôt. [9]

Postup pre stanovenie neistoty typu A je založený na stanovení neistoty štatistickou analýzou série pozorovaní. V tomto prípade je štandardná neistota výberovou smerodajnou odchýlkou priemeru vychádzajúca z výpočtu alebo príslušnej regresnej analýzy. [16]

Štandardná neistota typu A sa stanoví z n opakovaných a nezávislých meraní rovnakej hodnoty a za rovnakých podmienok. Odhad \bar{y} hodnoty veličiny Y , na základe n štatisticky nezávislých pozorovaní ($n > 1$) je daný výberovým priemerom z nameraných hodnôt. Výberový aritmetický priemer sa stanoví vzťahom [13] [9] [16] [17]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.4)$$

kde \bar{y} – výberový aritmetický priemer,

n – celkový počet meraní veličiny,

i – číslo merania,

y_i – i -tá hodnota meranej veličiny Y .

Štandardná neistota typu A sa ďalej určí výpočtom výberovej smerodajnej odchýlky aritmetického priemeru podľa nasledujúceho vzťahu [13]:

$$u_A = s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.5)$$

kde u_A – neistota typu A,
 $s_{\bar{y}}$ – aritmetický priemer výberovej smerodajnej odchýlky.

Na základe dokumentu EA-4/02 M:2022 je potrebné vypočítanú neistotu typu A, ďalej rozšíriť koeficientom rozšírenia k_s pre rôzny počet efektívnych stupňov voľnosti. Výsledná neistota typu A sa vypočíta nasledujúcim vzťahom [16]:

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{y}}, \quad (3.6)$$

kde k_s – koeficient rozšírenia.

Koeficient rozšírenia k_s pre rôzny počet efektívnych stupňov voľnosti V_{eff} v závislosti na počte meraní n , musí byť neistota typu A (u_A) násobená koeficientom rozšírenia k_s , ktorý je daný nasledujúcou tabuľkou (kde $V_i = n-1$) [16]:

Tab. 3.1: Koeficienty rozšírenia k pre rôzny počet efektívnych stupňov voľnosti V_{eff} pre približne 95% pokrytie (95,45 %)

V_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k_s	13,9	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32

3.4.2 Štandardná neistota typu B (u_B)

Vyhodnotenie štandardnej neistoty spôsobom B je založené na stanovení neistoty iným, než štatistickým vyhodnotením série meraní, a preto nie sú závislé na počte meraní. Zložky neistoty typu B sú stanovené z hustoty pravdepodobnosti priradenej k meranej veličine na základe skúsenosti a dostupných informácií. Taktiež neistoty spadajúce do tejto kategórie môžu byť odvodené na základe údajov z predchádzajúcich meraní, údajov výrobcu, údajov z kalibračných listov, poprípade neistôt referenčných údajov prevzatých z príručiek. Použitie všetkých relevantných informácií pre vyhodnotenie neistoty spôsobom B vyžaduje značné pochopenie riešenej problematiky, ktoré vychádza zo skúseností a obecných znalostí dosiahnutých praxou. [14] [9] [16]

Pri výpočte neistoty typu B je ako prvé potrebné určiť predpokladané zdroje neistôt Z_j (za predpokladu, že nie sú korelované). Ďalej sa pre každý jeden zdroj odhadne rozsah odchýlok $\pm \Delta z_{maxj}$ tak, aby jeho prekročenie bolo nepravdepodobné. Následne sa odhadne rozdelenie pravdepodobnosti, ktorému odpovedajú odchýlky ΔZ v intervale $\pm \Delta z_{maxj}$. Neistota $u_B(z_j)$ sa následne určí podľa vzťahu [18]:

$$u_B(z_j) = c_j \frac{\Delta z_{maxj}}{\chi}, \quad (3.7)$$

kde $u_B(z_j)$ – neistota jednotlivých zdrojov,
 c_j – koeficient citlivosti,
 Δz_{maxj} – rozsah odchýlok,
 χ – koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti.

Hodnota koeficientu χ pre normálne (Gaussové) rozdelenie pravdepodobnosti nadobúda hodnotu $\chi = 2$, pre rovnomerné rozdelenie nadobúda hodnotu $\chi = \sqrt{3}$ (má konštantnú

pravdepodobnostnú hustotu) a pre trojuholníkové (Simpsonove) nadobúda hodnotu $\chi = \sqrt{6}$. Celková štandardná neistota u_B vyhodnotená spôsobom B sa nakoniec určí zo vzťahu [18] [8]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_B(z_j)^2}, \quad (3.8)$$

kde u_B – štandardná neistota typu B,

m – počet príspevkov (zdrojov) k neistote vyhodnotenej spôsobom B.

3.4.3 Kombinovaná štandardná neistota (u_C)

V bežnej praxi si len výnimočne vystačíme s jedným druhom neistoty merania (ak nejde vyhodnotiť neistotu typu A štatisticky). Vo väčšine prípadov dochádza ku stanoveniu kombinovanej neistoty merania, ktorá je najčastejšie výsledkom kombinácie štandardných neistôt typu A a štandardných neistôt typu B. [9]

Výsledný vzťah pre výpočet kombinovanej štandardnej neistoty (u_C) je [13]:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (3.9)$$

kde u_C – kombinovaná štandardná neistota.

3.4.4 Rozšírená neistota (U)

Rozšírená neistota merania (U) je zvyčajne prezentovaná ako miera možnej odchýlky skutočnej hodnoty od nameranej hodnoty. Vymedzuje interval okolo výsledku merania, v ktorom sa s istou pravdepodobnosťou nachádza výsledok merania. Spolu s nameranou hodnotou tvorí úplný výsledok merania (obr. 8). [8] [19]

Rozšírená neistota merania sa vypočíta z kombinovanej neistoty merania vynásobenej koeficientom rozšírenia (k) [19]:

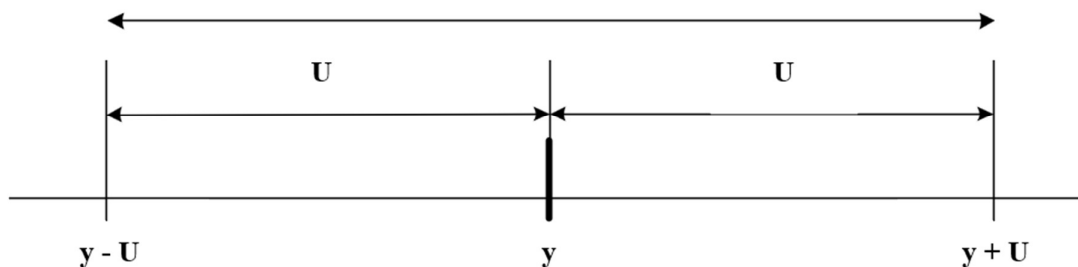
$$U = k \cdot u_C, \quad (3.10)$$

kde k – koeficient rozšírenia.

Základné koeficienty k sú:

- $k = 1$ (pravdepodobnosť pokrytia približne 68,27 %),
- $k = 2$ (pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45 %),
- $k = 2,58$ (pravdepodobnosť pokrytia približne 99,01 %),
- $k = 3$ (pravdepodobnosť pokrytia približne 99,73 %).

$$Y = y \pm U$$



Obr. 7: Úplný výsledok merania [19]

4 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI MERANIA POMOCOU SÚRADNICOVÝCH MERACÍCH STROJOV

Dejiny prvého súradnicového meracieho stroja sa začali písať v roku 1959, a to počas Medzinárodnej výstavy obrábacích strojov v Paríži, kde škótska firma Ferranti predstavila ako prvá na svete, svoj prototyp súradnicového meracieho stroja (obr. 8). Je zaujímavé podotknúť, že firma Ferranti predtým nikdy nepodnikala v oblasti meracích zariadení. Dovtedy bola známa pre výrobu výpočtovej techniky a ako prvá firma na svete, v roku 1951, dodala prvý komerčne využiteľný univerzálny počítač. [3] [20]



Obr. 8: Prototyp CMM od firmy Ferranti [20]

Ferranti vyvinulo svoj prvý CMM ako reakciu na potrebu rýchleho a flexibilného merania, keďže sa výroba čím ďalej, tým viac automatizovala a potrebovali uľahčiť a zrýchliť kontrolu svojich obrobkov. Táto skutočnosť v podstate zmenila celý ekonomický aspekt kontroly konvenčných metód, a to zníženým časom potrebným na kontrolu a potrebnej zručnosti pre kontrolu. Následne v 60. rokoch 20. storočia sa výroba CMM rozšírila vo všetkých vyspelých krajinách tej doby a používanie CMM na kontrolu v podnikoch sa stalo ich neoddeliteľnou súčasťou. [3] [20] [21]

Podľa technickej normy ČSN EN ISO 10 360-1: 2001 je súradnicový merací stroj CMM definovaný ako merací systém s prostriedkami pre pohyb snímacieho systému a schopnosťou určovať priestorové súradnice na povrchu meranej súčiastky. [22]

Súradnicové meracie stroje predstavujú jednu z najvýznamnejších inovácií v oblasti merania. Ich konštrukcia bola vynútená z dôvodu potreby merania rôzne zložitých súčiastok, a to predovšetkým v automobilovom a leteckom priemysle. Pomocou CMM sa dajú realizovať merania v rovine alebo v priestore s možnosťou automatizácie merania a jeho vyhodnotenia. [23]

Súradnicový merací stroj pracuje s dvoma súradnicovými systémami: súradnicový systém stroja a súradnicový systém meraného predmetu. Princíp merania na súradnicových meracích

strojoch spočíva v tom, že sa vhodne stanoví základný bod v priestore a polohy ostatných bodov na meranej súčiastke sa určujú vo forme súradníc týchto bodov v osiach súradného systému X, Y, Z. CMM ponúkajú možnosť voľby základného bodu v pracovnom priestore, čo je ich značnou výhodou oproti konvenčným metódam merania. [3] [23]

Z pohľadu metrológie sú CMM odvodené od meracích mikroskopov a z konštrukčného pohľadu od NC frézok. Využívanie prvých CMM bolo zamerané len pre využitie v metrologických laboratóriách. Následne sa pomerne rýchlo začali využívať v dielenskom prostredí. [24]

4.1 Terminológia súradnicových meraní

Transformácia súradníc – spôsob prevodu súradníc jedného systému (súradnice meranej súčiastky) do iného súradného systému (systému CMM). [23]

Súradnicový systém súradnicového meracieho stroja - spôsob priradenia reálnych čísiel k polohe bodu v rovine (v priestore), vzťahnutý na začiatok súradného systému, zhmotnený v súradnicovom meracom stroji. [23] Súradnicový systém vzťahnutý na skutočné alebo vypočítané osi CMM. [22]

Súradnicový systém meraného obrobku – súradnicový systém, ktorý sa vzťahuje na meranú súčiastku. [22]

Súradnicová meracia technika – súbor poznatkov o meradlách a metódach, ktoré sú založené na princípe určitého súradnicového systému. [23]

Súradnicové meranie – meranie priestorových súradníc vykonávané pomocou CMM. [22]

Meraný objem – meraná oblasť CMM stanovená súčasnými medzami všetkých priestorových súradníc meraných na CMM. [22]

Indikovaný bod merania – určený bod snímacieho systému, pre ktorý sa indikujú súradnice v okamžiku snímania. [22]

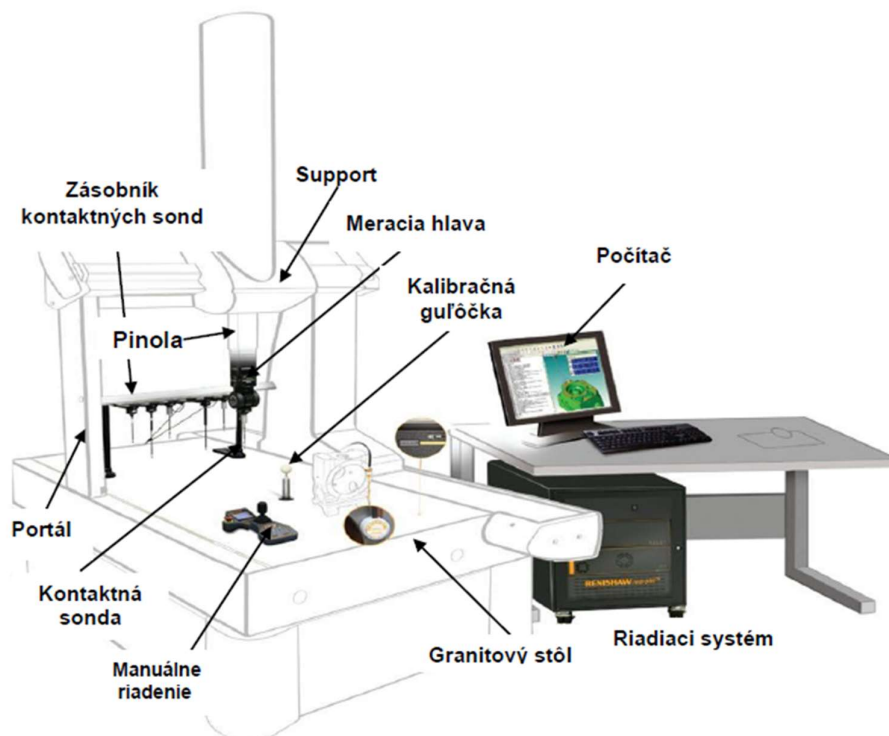
Snímanie – zvláštny spôsob snímania k postupnému získavaniu bodov merania pre charakterizovanie čiar na kontrolovanom povrchu. [22]

Snímací systém – súbor mechanických a optoelektronických prvkov, ktoré slúžia na fixáciu polohy meraného bodu na objekte. [23]

4.2 Popis a funkcie CMM

Každý CMM sa skladá z niekoľkých čiastkových a navzájom prepojených subsystémov, ako je možné vidieť na obr. 9. Vo všeobecnosti sa medzi tieto systémy radia [3]:

- Pohonný systém,
- odmeriavací systém,
- snímací systém spolu so systémom na výmenu snímačov,
- riadiaci systém,
- počítač,
- softvér.



Obr. 9: Popis základných častí CMM [31]

Z hľadiska funkcií sú CMM predurčené hlavne na [3]:

- Absolútne a inkrementálne meranie (meranie rozmeru po jednotlivých krokoch),
- meranie rozmeru v smere osí x, y a z,
- meranie vzdialenosti medzi definovanými bodmi,
- určenie obrysovej krivky z nameraných bodov,
- generovanie kriviek chýb,
- určenie geometrických odchýlok tvaru a polohy,
- automatické porovnanie požadovanej a skutočnej hodnoty,
- kontrola združených súčiastok,
- výpočet priesečníkov osí,
- výpočet stredov a priemerov otvorov,
- zistenie stredu oblúkov,
- automatické nastavovanie nameraných objektov,
- automatická korekcia na dotyk,
- transformácia súradníc (karteziánske - nepolárne).

4.3 Jednotlivé prvky CMM

Konštrukcia každého CMM sa skladá zo šiestich hlavných mechanických prvkov. Medzi tieto hlavné prvky patrí rám, stôl, stojan, portál, most (podľa typu CMM) a pinola. [23]

Rám – jedná sa o zvarnú konštrukciu, na ktorú je kladený vysoký nárok na tuhosť, a to z dôvodu, že nesie ostatné časti mechanického systému. U veľkých CMM sa rám nevyužíva a býva nahradený vlastnou základovou doskou, ktorá sa inštaluje do podlahy. [23] [14]

Stôl – je prvkom CMM, ktorý tvorí základňu pre osadenie a upnutie meranej súčiastky (priamo alebo prostredníctvom príslušného upínacieho prípravku). Najčastejšie sa používa stôl vyrábaný z prírodného kameňa (žula), alebo z umelého kameňa (granit). Alternatívou taktiež môže byť stôl vyrobený z liatinového odliatku. Pracovná doska je položená na štyroch základných podperách. Jej horná plocha sa upravuje brúsením, pretože sú pri výrobe kladené vysoké požiadavky na rovinnosť funkčných plôch. V pracovnej ploche sa nachádzajú otvory so závitmi, pomocou ktorých sa upevňuje meraná súčiastka k pracovnej ploche. Na koncoch dosky je upevnené nastaviteľné vedenie, po ktorom sa pohybuje most. [23] [14]

Stĺpy, mostné konštrukcie a portály – u jednotlivých typov CMM sú konštruované ako zvarence, na ktoré je kladený vysoký dôraz na tuhosť, rozmerovú a tvarovú stálosť. Konštrukcia portálu CMM je navrhnutá na minimálny priehyb pri posune pinoly v priečnom smere. U niektorých typoch CMM býva konštrukcia portálu zhotovená zo žuly alebo granitu. [23] [14]

Pinola – je tyč kruhového profilu H (liatinová, duralová, z prírodného kameňa alebo keramická) alebo štvorcového prierezu. Môže byť uložená vo vertikálnej alebo horizontálnej polohe. V prípade horizontálnej pinoly je potreba dbať na správne dimenzovanie, keďže by inak mohol nastať priehyb pri vyložení od vlastnej hmotnosti a hmotnosti snímačej hlavy. Na kompenzáciu prípadných priehybov je potrebné použiť vyvažovacie zariadenia v podobe súmerných závaží. [23] [14]

Vedenie – konštrukcia pohyblivých častí CMM je navrhnutá tak, aby sa jednotlivé pohyblivé časti mohli pohybovať s maximálnou presnosťou a bez trhavých pohybov aj pri minimálnych rýchlostiach, ktoré sa vyskytujú v koncových polohách. Dôležité je, aby vedenie, na ktoré sa ukladajú pohyblivé časti, malo čo najmenšie trenie, minimálne opotrebovanie a poskytovalo maximálnu tuhosť celého zariadenia. Z toho dôvodu sa už v dnešnej dobe sa na CMM nepoužíva klzné vedenie, ktorého hlavnou nevýhodou bola väčšia zložitosť prevedenia, čím sa predražovala konštrukcia stroja. Taktiež je u tohto typu vedenia pomerne častý výskyt problémov so zvodom oleja, jeho tesnením a odvodom tepla. [25]

V súčasnosti častejšie využívané je uloženie na vedení aerostatickom s plynulým trením. Jeho hlavnou výhodou je, že nemá problém s odvodom oleja a poskytuje nízke trenie aj pri vysokých rýchlostiach a pri zachovaní si vysokej tuhosti. Nevýhodou je poškodenie vedenia pri prerušení vrstvy vzduchu a znížená odolnosť voči korózii. [25]

Valivé vedenia, ktoré bývajú na guľôčkach alebo valčekoch, patria medzi najvhodnejšie vedenia, a preto nachádzajú najčastejšie využitie pre CMM. Nespornou výhodou je ich malé trenie, vysoká rovnomernosť pohybov, ktorá je dôležitá pre dosiahnutie čo najpresnejšieho merania a vysoká tuhosť pri dobrom zakrytovaní. Prítomnosť mazania na valivých vedeniach neovplyvňuje presnosť pohybov a jeho základným účelom je protikorózna ochrana. Nevýhodou valivého vedenia je predovšetkým zložitosť ich presného zhotovenia. [25]

4.4 Rozdelenie CMM

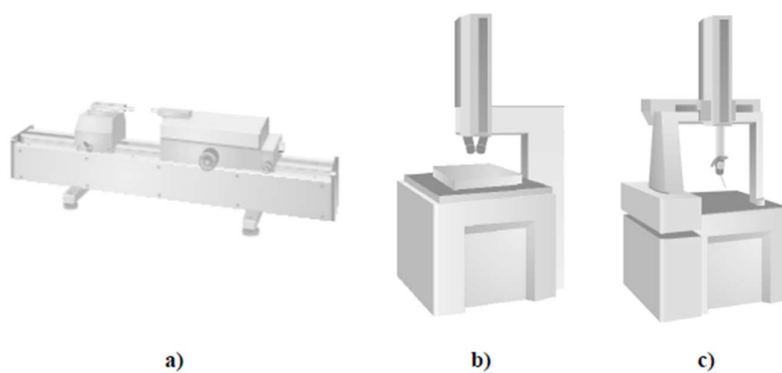
V súčasnej dobe ponúkajú výrobcovia CMM na trhu celý rad rôznych typov súradnicových meracích strojov, ktoré sa od seba odlišujú svojou veľkosťou, presnosťou merania, schopnosťou merania v jednotlivých osiach, meraným objemom, ale aj podľa ich geometrického usporiadania. Taktiež existuje veľké množstvo CMM, ktoré sa od seba odlišujú stupňom ich automatizácie. Väčšina CMM strojov taktiež využíva konštrukčné riešenie s využitím polohovanie v karteziánskej súradnicovej sústave. [14]

Podľa schopnosti merania v jednotlivých osiach je možné CMM rozdeliť do troch základných skupín, a to na CMM jednoosé, dvojosé a trojosé. [14]

Jednoosé (jednosúradnicové) meracie stroje (obr. 10a) - umožňujú merať rozmer súčiastky len v jednej osi. Vyznačujú sa veľkou presnosťou s malou neistotou merania, a to aj pri meraní súčiastok veľkých rozmerov. [14]

Dvojosé (dvojsúradnicové) meracie stroje (Obr. 10b) - umožňujú merať rozmery súčiastky vo dvoch navzájom kolmých osiach v jednej rovine. Medzi dvojosé meracie stroje sa radia hlavne mikroskopy, laserové interferometre alebo skenery. [14]

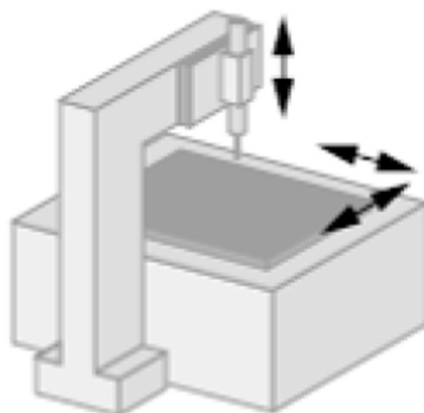
Trojosé (trojsúradnicové) meracie stroje (Obr. 10c) – umožňujú merať rozmery súčiastok v troch navzájom kolmých osiach. Predstavujú vrchol techniky merania geometrických veličín. Na jedno upnutie umožňujú zložité rozmerové merania v troch navzájom kolmých súradniciach. [14]



Obr. 10: Typy CMM podľa schopnosti merania v jednotlivých osiach a)jednosúradnicový b)dvojsúradnicový c)trojsúradnicový [14]

Podľa normy ČSN EN ISO 10 360 – 1:2001 sa CMM rozdeľujú na štyri základné typy podľa ich geometrického usporiadania, a to na stojanový (stĺpový) typ, výložníkový typ, portálový typ a mostový typ [22].

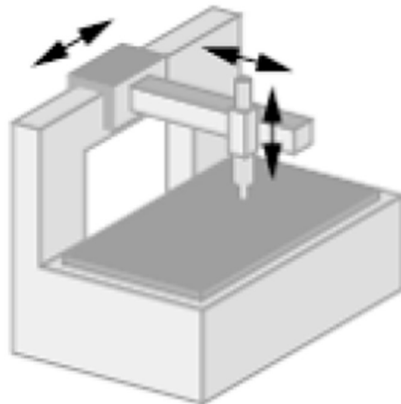
Stojanový (stĺpový) typ – u tohto typu CMM je meraný predmet upnutý na pracovný stôl, ktorý sa pohybuje v smere osi x a y a meracia pinola sa pohybuje v smere osi z. Stĺpové CMM vynikajú svojou veľmi veľkou presnosťou v dôsledku ich tuhej konštrukcie, a preto sú vhodné



Obr. 11: Stojanový (stĺpový) typ CMM [14]

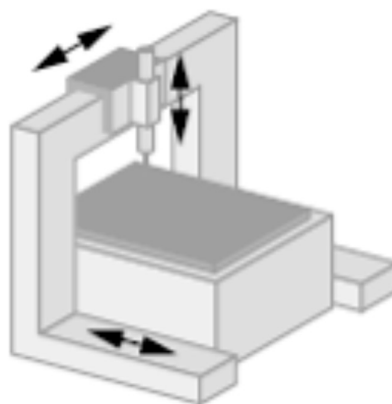
pre malé rozsahy merania a menšie predmety. Charakteristickým znakom stĺpových CMM je ich tuhá uhlová konštrukcia a veľmi dobrý prístup k meranému predmetu. [14] [25]

Výložníkový typ – pri CMM s výložníkovou konštrukciou je meraný predmet pevne upnutý na pracovný stôl, ktorý sa nepohybuje. Meracia pinola vykonáva pohyb v smere osi y a kolmo v ose x. V smere osi y sa mení vyloženie pinoly od vodiacej plochy, a preto je nutné vyvažovanie. Vyznačujú sa dobrým prístupom k meranému predmetu, vďaka čomu je tento typ CMM vhodný na meranie dlhých úzkych súčiastok. [14]



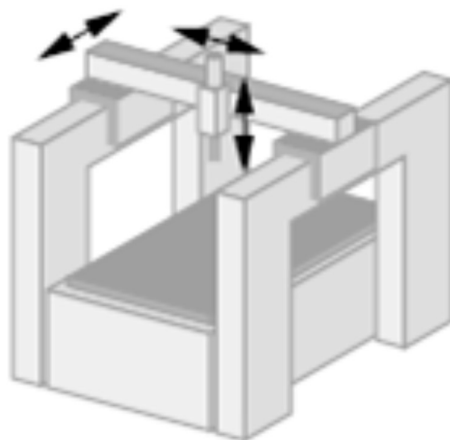
Obr. 12: Výložníkový typ CMM [14]

Portálový typ - jedná sa o najrozšírenejší typ CMM pre stredné a veľké rozsahy meraní. Tento typ CMM sa vyznačuje veľkou tuhosťou, vďaka čomu poskytuje vysokú presnosť merania. Existujú dva typy prevedení portálových CMM, a to prevedenie s pohyblivým portálom (obr. 13) pohybujúcim sa nad pevným stolom (konštrukcia stroja obmedzuje prístup do meracieho priestoru) a prevedenie s pevným portálom a pohyblivým stolom, ktorý sa pohybuje v smere osi x. [14]



Obr. 13: Portálový typ CMM [14]

Mostový typ – tento typ CMM je charakteristický svojou veľkosťou, tuhosťou a veľkou kapacitou meracieho priestoru. Zo všetkých typov CMM je svojou konštrukciou najväčší.

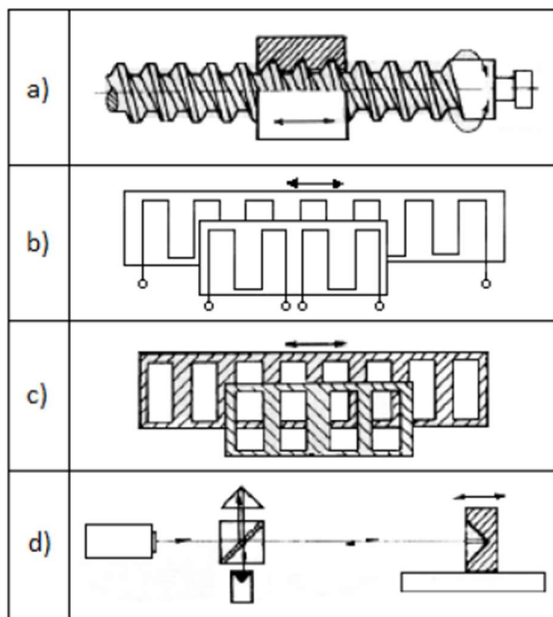


Obr. 14: Mostový typ CMM [14]

Poskytuje najväčšie rozsahy merania, a preto je vhodný pre meranie rôznych nadrozmerných súčiastok či už v automobilovom, lodnom alebo leteckom priemysle. [14] [25]

4.5 Meracie systémy CMM

Meracie systémy CMM umožňujú získať súradnice snímaných bodov v karteziánskych (polárnych) súradniciach v analógovom alebo v číslicovom tvare. Medzi najčastejšie používané meracie systémy u CMM patria závitový hriadeľ s uhlovým prevodníkom, lineárny induktosyn, inkrementálna dĺžková stupnica a laserinterferometer. [23]



Obr. 15: Meracie systémy CMM: a) závitový hriadeľ b) induktosyn
 c) inkrementálna dĺžková stupnica d) laserinterferometer [23]

Závitový hriadeľ s uhlovým prevodníkom – vyrábajú sa do dĺžky 1,2 m a majú malé stúpanie. Ukladajú sa do olejového kúpeľa z dôvodu zaistenia tepelnej stability. Obvykle majú lichobežníkový tvar závitů. Ich nevýhodou je chyba reverzibility, ktorá je spôsobená vymedzením mŕtveho chodu medzi šraubom a maticou (pri posuve v opačných smeroch). [23]

Lineárny induktosyn – základná mierka je tvorená vodičom v tvare meandra napájaného striedavým prúdom. Meander v tvare tlačeneho spoja je nalepený na izolačnej vrstve na kovovom základe. Dĺžka jednej vlny meandra je 2 mm. Po tomto základe sa pohybuje jazdec s dvomi slučkami obdobného meandra, ktorého vzájomná vzdialenosť má diferenciu 0,5 mm. Na slučkách sú indukované napätia, ktoré sú fázovo posunuté o 90°. Pri pohybe jazdca vznikne približne sínusový priebeh napätia, ktorého interpoláciou vychádza odmeriavací krok 1 µm. Lineárny induktosyn je značne odolný a nevyžaduje zvláštnu údržbu. [23]

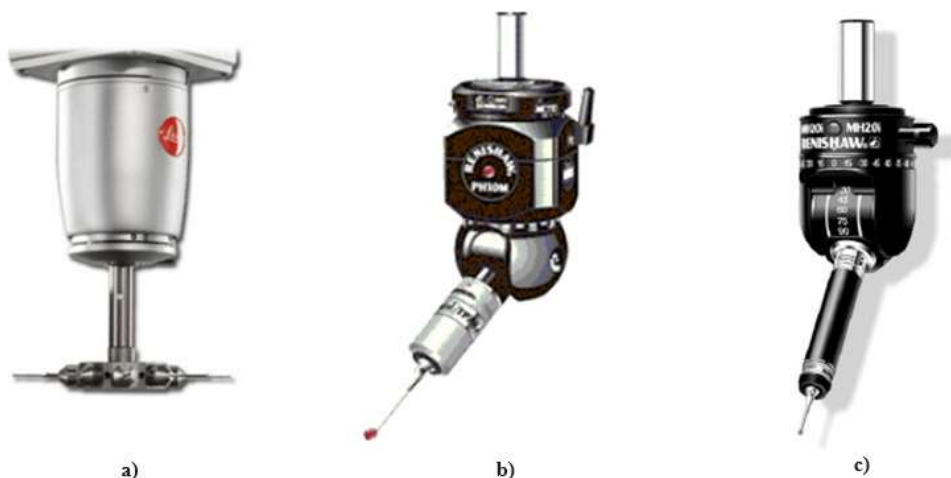
Inkrementálna dĺžková stupnica – jedná sa o najrozšírenejší odmeriavací systém používaný u CMM. Na sklenenom (kovovom) podklade je nanosená základná stupnica tak, že sa striedajú polia prepúšťajúce (odrážajúce) a polia neprepúšťajúce (neodrážajúce) svetlo. Jazdec má štyri polia, ktoré prepúšťajú svetlo, z čoho dve polia sú posunuté o štvrtinu rozostupu. Rozlíšiteľnosť, ktorej je možné docieľiť, je 1 µm. Vzdialenosť rysiek je 0,01/0,04 mm. Výhodou použitia inkrementálnej dĺžkovej stupnice je jej pomerne ľahká kalibrácia, ktorá sa docieľi náklonom jazdca. [23]

Laserinterferometer - tento typ meracieho systému sa u CMM používa len zriedkavo. Jedná sa o pomerne drahé zariadenie, ktoré je citlivé na dodržanie okolitých podmienok. Dosahuje sa s ním rozlíšiteľnosti 0,01 µm. [23]

4.6 Snímacie systémy CMM

Jednou z najdôležitejších častí CMM je jeho snímací systém. Ten slúži na snímanie jednotlivých meraných bodov. Následne sú tieto namerané body spracovávané a vyhodnocované pomocou meracieho softvéru v PC, ktorý poskytuje numerické informácie o meranej veličine. Snímací systém CMM je spojený s pinolou a pozostáva zo snímačej hlavy, predĺženia snímačej hlavy, systému na výmenu snímačej hlavy, snímacieho dotyku, systému výmeny snímacieho dotyku a predĺženia snímacieho dotyku. Existujú dva druhy snímacích systémov CMM, a to snímacie systémy dotykové a snímacie systémy bezdotykové. [14]

Snímacie hlavy – sa delia na dva typy, a to na pevné a indexovateľné (polohovateľné). Pevné snímacie hlavy nie je možné v priestore natáčať, avšak oproti polohovateľným snímacím hlavám dosahujú vyššej presnosti. [14]



Obr. 16: Typy snímacích hláv: a) pevná b) indexovateľná c) manuálna [14]

Indexovateľné snímacie hlavy umožňujú presné polohovanie snímacích sond v pracovnom priestore CMM a ich zaistenie v požadovanej polohe. Indexovateľné hlavy sa ďalej delia na motorické a manuálne. [14]

Motorické snímacie hlavy sú určené k polohovaniu snímačej sondy, vďaka čomu je možné snímať v mnohých uhloch. Výhodou použitia motorickej snímačej hlavy je jej opakovateľnosť, vďaka čomu dokáže ušetriť čas obsluhu a zabezpečiť polohu sondy vždy v najlepšom uhle k meranému povrchu súčiastok, vďaka čomu je možné dosiahnuť čo najpresnejší výsledok merania. V praxi sa často využívajú motorické snímacie hlavy so servopohonom. [14]

Manuálne snímacie hlavy sú ručne nastaviteľné a umožňujú flexibilné meranie aj zložitých tvarov na povrchu kontrolovaných súčiastok. [14]

4.6.1 Dotykové

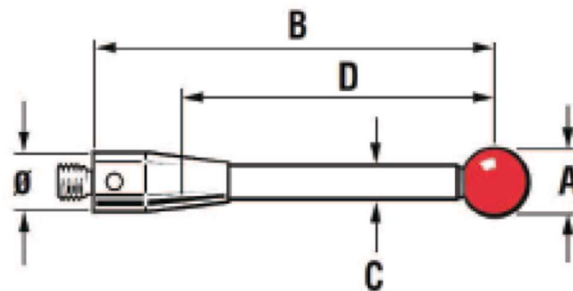
Dotykové snímacie systémy aktuálne patria medzi najvyužívanejšie pri meraní s CMM. Tieto snímacie systémy na získanie informácie o tvare a rozmere meranej súčiastky potrebujú fyzický kontakt s danou meranou súčiastkou. Dotykové spínacie systémy sa rozdeľujú na systémy spínacieho typu a systémy snímacieho typu. [14]

Systémy spínacieho typu - funkcia spínacej sondy funguje tak, že v momente, keď sa dotyk dotkne meranej súčiastky, spínacia sonda vyšle signál a nastane okamžité zastavenie pohybu. Následne príde k odčítaniu aktuálnych súradníc z odmeriavacieho systému stroja. [14]

Systémy snímacieho typu - dotyková sonda je v neustálom kontakte s meranou súčiastkou. Tieto systémy sú konštrukčne zložitejšie ako systémy spínacieho typu. Počas procesu merania riadiaci systém v okamžiku, keď zaznamená kontakt hrotu sondy s meranou súčiastkou, vypne prítlak a zapnú sa pohony pre príslušné osi. Takýmto spôsobom sa zabezpečuje trvalý kontakt hrotu sondy s meranou súčiastkou. [23] [14]

Snímací dotyk – je definovaný podľa normy ČSN EN ISO 10 360 – 1:2001 ako mechanické zariadenie pozostávajúci z hrotu snímacieho dotyku a drieku. [22]

Snímací dotyk je súčasťou meracieho systému CMM a sprostredkováva kontakt medzi meranou súčiastkou a sondou, u ktorej spôsobuje zopnutie. Vygenerovaný signál ďalej umožňuje zaznamenať súradnice nasnímaného bodu. [14]

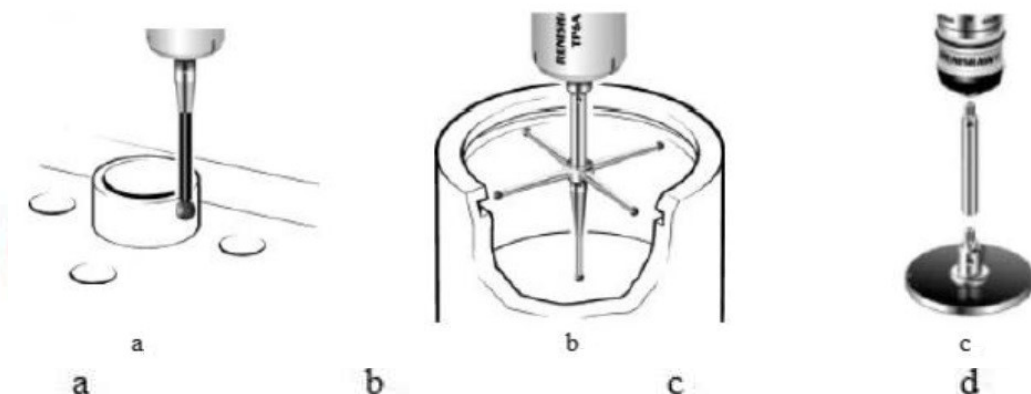


Obr. 17: Rozmery snímacieho dotyku: A) priemer guľôčky B) celková dĺžka
 C) priemer drieku D) efektívna činná dĺžka (EWL) [14]

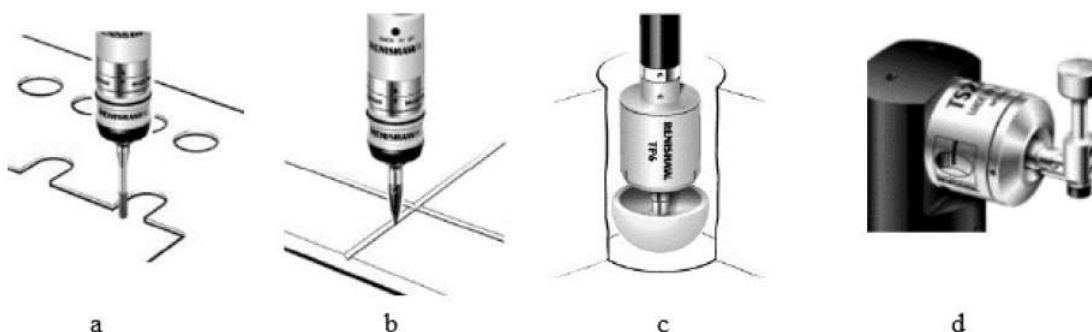
Pre dosiahnutie čo najvyššej presnosti merania, je potrebné dodržiavať pravidlá pre výber toho správneho snímacieho dotyku. Dôležité je, aby mal snímací dotyk dostatočnú tuhosť a meracia guľôčka na konci snímacieho dotyku mala dokonalý tvar. Taktiež je dôležité, voliť čo najkratší dotyk, vyhnúť sa alebo obmedziť použitie predlžovacích nástavcov a zvoliť čo najväčší priemer guľôčky. [14]

Typy dotykov – dotyky snímacieho systému sa delia podľa ich konštrukcie na [14]:

- **Priame dotyky** (obr. 18a) – tento typ dotykov má najjednoduchší tvar, ktorý sa skladá len z presnej guľôčky a drieku,
- **Hviezdicové dotyky** (obr. 18b) – umožňujú snímanie konštrukčne zložitých prvkov alebo otvorov. Pozostávajú z drieku so štyrmi popripade piatimi guľôčkami, ktoré sú pevne pripevnené k strednému dielu,
- **Diskové dotyky** (obr. 18c) – využívajú sa pri snímaní zápichov a drážok, u ktorých nie je možné využiť hviezdicový typ dotyku,
- **Dotyky pre špeciálne účely** (obr. 19) – medzi tieto typy dotykov sa radí dotyk valcový (obr. 19a), špička (obr. 19b), keramická polguľa (obr. 19c) a dotyk na ustavovanie nástrojov (obr. 19d).



Obr. 18: Typy meracích dotykov: a) priamy b) hviezdicový c) diskový [14]



Obr. 19: Dotyky pre špeciálne účely: a) valcový dotyk b) špička c) keramická polguľa d) dotyk na ustavovanie nástrojov [14]

Materiál guľôčky snímacieho dotyku – meracie guľôčky sa vyrábajú z rôznych materiálov a každý z nich je vhodný pre iný typ merania. Medzi štyri základné materiály, ktoré sa používajú u meracích guľôčok, patrí rubín, nitrid kremíka, oxid zirkoničitý a diamant. [14]



Obr. 20: Materiál guľôčky dotyku: a) rubín b) nitrid kremíka c) oxid zirkoničitý d) diamant [14]

Rubín – tento materiál sa používa u takmer všetkých meracích operácií s CMM a jedná sa o najpoužívanejší materiál, z ktorého sú meracie guľôčky vyrobené. Výhodou rubínových guľôčok je relatívne nízka cena a dobrá odolnosť voči opotrebovaniu. Guľôčky vyrobené z rubínového materiálu majú nízky koeficient trenia a nachádzajú využitie pri nepretržitom kontaktnom meraní. Nemajú však svoje uplatnenie pri meraní hliníkových materiálov, a to z dôvodu adhézneho oteru, pri ktorom sa na povrchu guľôčky usadzuje hliník. Rubínové guľôčky taktiež nie sú vhodné pri meraní liatinových povrchov z dôvodu vysokého opotrebovania oterom. [14] [26]

Nitrid kremíka – jedná sa o veľmi tvrdý materiál s dostatočnou odolnosťou voči opotrebovaniu. Jedná sa o vhodný materiál pri meraní hliníkových súčiastok. Vykazuje však značnú mieru opotrebovania oterom pri kontakte s oceľovými povrchmi a liatinami. Aj napriek tomu, že vo väčšine prípadov použitia guľôčky z nitridu kremíka prekonávajú svojimi vlastnosťami guľôčky rubínové, tak ich nevýhodou je ich vyššia cena. [14] [26]

Oxid zirkoničitý – veľmi pevný keramický materiál, ktorý je svojou tvrdosťou a opotrebovaním podobný rubínu. Používa sa pri meraní súčiastok vyrobených z liatiny. [14]

Diamant – vyznačuje sa extrémnou tvrdosťou a veľmi nízkym opotrebovaním. Prekonáva konvenčné materiály po všetkých stránkach a je vďaka nemu možné robiť najpresnejšie a najekonomickejšie merania. Guľôčky z diamantu sú vhodné pre všetky druhy meraní, vrátane veľkého zaťaženia pri meraní súčiastok vyrobených z hliníka. Nevýhodou guľôčok z diamantu je ich vysoká cena v porovnaní s guľôčkami z rubína alebo nitridu kremíka. [14] [26]

Materiál drieku dotyku – na výrobu drieku snímacích dotykov sa využívajú rôzne materiály. Medzi najčastejšie používané patria oceľ, karbid volfrámu, keramika a uhlíkové vlákna. [14]



Obr. 21: Materiály drieku dotyku: a) oceľ b) karbid volfrámu c) keramika d) uhlíkové vlákna [14]

Oceľ – drieky dotyku vyrobené z nemagnetickej a korózii-odolnej ocele sú využívané pre snímacie dotyky s guľôčkou alebo hrotom s priemerom 2 mm alebo väčším a dĺžkou do 30 mm. Ich výhodou je pomerne nenáročná výroba, avšak sú náchylné na deformáciu. [14] [26]

Karbid volfrámu - je najčastejšie využívaným materiálom na výrobu driekov snímacieho dotyku. Je pomerne ľahko obrábateľný a je možnosť ho zbrúsiť na veľmi malé priemery. Taktiež vyniká pre svoju tuhosť. Využíva sa pre guľôčky o priemere menšom ako 1 mm a dĺžky do 50 mm. [14] [26]

Keramika – je ľahký, tuhý ale krehký materiál. Krehkosť keramiky je však výhodou, lebo v prípade kolízie sa roztriešti a ochráni tak celú sondu pred poškodením. V prípade použitia s guľôčkou o priemere nad 3 mm a dĺžke 30 mm poskytujú keramické drieky tuhosť porovnateľnú s oceľovými driekmi. [14] [26]

Uhlíkové vlákna – drieky z uhlíkových vlákien sú veľmi ľahké a tuhé. Používajú sa u vysoko presných sond, ktoré sú založené na tenzometrickom princípe. Drieky vyrobené z uhlíkových vlákien majú vynikajúce vlastnosti pri tlmení vibrácií a majú zanedbateľný koeficient tepelnej rozťažnosti. [14] [26]

4.6.2 Bezdotykové

Bezdotykové snímacie systémy nachádzajú menšie využitie pri meraní s CMM ako snímacie systémy dotykové. Princíp fungovania bezdotykových snímacích systémov je taký, že nenastáva dotyk medzi snímanou súčiastkou a sondou. Typickým predstaviteľom bezdotykových snímacích systémov sú laserové a optické systémy. Pre klasické CMM boli vyvinuté a používané snímanie vo forme laserovej meracej hlavy, riadkovej kamery a špeciálnych pneumatických snímačov. [14] [23]

Laserové systémy – tieto snímacie systémy využívajú dva rôznobežné laserové lúče, ktoré sa pretínajú v presne definovanej vzdialenosti. V momente, keď nastane na meranej súčiastke prienik týchto lúčov, tak vyhodnocovacia jednotka CMM zaregistruje dotyk. Skenovanie s využitím laseru je možné v jednej alebo v troch rovinách. [14]



Obr. 22: Laserový snímací systém od firmy Hexagon [45]

Kamerové (optické) systémy – u týchto snímacích systémov dochádza prostredníctvom optickej kamery k prenosu optického signálu na digitálny obraz, ktorý sa následne použije k výpočtu meraných bodov vo vyhodnocovacom PC programe. [14]

4.7 Kalibrácia CMM

Kalibrácia je súbor operácií, ktoré pri definovaných podmienkach určujú vzťah medzi hodnotami indikovanými meradlom, alebo meracím systémom, alebo hodnotami reprezentovanými materializovanou mierou, alebo referenčným materiálom a zodpovedajúcimi hodnotami veličín, ktoré sú realizované prostredníctvom etalónov. [10]

Je to činnosť, ktorá za špecifikovaných podmienok v prvom kroku stanoví vzťah medzi hodnotami veličiny s neistotami merania poskytnutými etalónmi a odpovedajúcimi indikáciami s prídruženými neistotami merania. Následne v druhom kroku použije tieto informácie ku stanoveniu vzťahu pre získanie výsledku merania z indikácie. [4]

Kalibrácia môže byť vyjadrená pomocou údaju, kalibračnej funkcie, kalibračným diagramom, kalibračnou krivkou alebo kalibračnou tabuľkou. V niektorých prípadoch sa smie skladať zo súčtových alebo násobných korekcií indikácie s prídruženou neistotou merania. Kalibrácia by sa nemala zamieňať s justovaním meracieho systému, ktorý býva často označovaný ako „samo-kalibrácia“ ani s overením kalibrácie. [4]

Súradnicový merací stroj (CMM) je merací stroj a súčasne spĺňa aj klasifikáciu meracieho systému, pretože je v ňom zakomponovaných tri a viac dĺžkových meradiel s vlastnými indikáciami, spravidla aj meradlá teploty a ďalšie pomocné meradlá na základe konštrukcie

CMM. V spracovaní problematiky kalibrácie CMM sa obmedzíme len na meranie dĺžky, pretože tá predstavuje hlavnú funkciu a činnosť CMM. [27]

Kalibráciou CMM sa v prvom kroku zisťujú chyby vedenia snímacieho systému v smere troj-súradných osí v závislosti na polohe vnútri rozsahu každej súradnice. Tieto chyby súvisia s tým, že mechanizmus má obecné šesť stupňov voľnosti v jednom smere pohybu. Jedná sa teda celkovo o šesť nelineárnych funkcií, ktoré sa získavajú experimentálnym spôsobom za použitia unikátnych meracích prístrojov. Napríklad v ose X sa jedná o tri funkcie rotačných chýb R_{xx} , R_{xy} a R_{xz} , dve funkcie translačných chýb T_{xy} a T_{yz} a konečnej funkcie nelinearity mierky L_{xx} . Podľa rozsahu v príslušnej ose sa tieto merania prevedú spoločne s krokom 10, 20, 50, 100 alebo 200 mm. Spravidla sa už väčší krok nepoužíva. Pre CMM s rozsahom 6 000 mm v najdlhšej osi, ktoré sa používajú na meranie celých karosérií áut. Pri zistení chybových funkcií v smere všetkých troch súradných osí je potrebné taktiež zaistiť chyby pravouhlosti vedenia φ_{xy} , φ_{yz} a φ_{zx} , pretože výpočtový softvér vykonáva matematické výpočty v pravouhlom euklidovskom priestore, ktoré sú oproti výpočtu v obecnom nepravouhlom priestore značne jednoduchšie. [27]



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	6.8	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	93.8

Square	Squareness			OK
-56.8	XY	YZ	ZX	
	38.3	61.4	56.6	

Obr. 23: Náhľad mapy korekcií portálového CMM pre osu Z vrátane konštant ku korekcií chýb pravouhlosti v rovinách xy a yz a zx [27]

Na vyššie uvedenom obr. 23 je zobrazený príklad tabuľky pre šesť funkcií v závislosti na zvolenom kroku portálového CMM s údajmi ku korekcií v osi Z vrátane tabuľky údajov korekcie chýb pravouhlosti všetkých troch súradných osí. [27]

Pri meraní v praxi s CMM keď dôjde ku sňatiu bodu snímacím systémom na meranej súčiastke, tak softvér zaznamená podľa jednotlivých indikácií polohu v mape korekcií, prihliadne k ôsmim najbližším diskkrétne korigovaným bodom a zobrazí výsledok merania. Účasť snímacieho systému nemožno pri meraní poprieť a s jeho vylúčením nie je možné vykonávať meranie ani kalibráciu. Vykonaná kalibrácia CMM vo dvoch krokoch ešte nezaručuje, že výsledky merania spĺňajú požiadavky metrologickej nadväznosti, CMM je metrologicky spôsobilé a je v zhode so špecifikáciou. [27]

Nakoľko je proces kalibrácie CMM rozsiahly proces, je preň potrebné zaistiť potrebný počet etalónov a vhodných postupov, vďaka ktorým je možné vykonať a vyhodnotiť kalibráciu v potrebnom rozsahu a s primeranou hodnotou neistoty merania. Ku kalibrácii CMM sa najčastejšie využívajú hmotné dĺžkové etalóny, najčastejšie v podobe oceľových koncových

mierok. Oceľové koncové mierky sa najčastejšie využívajú pri kalibrácii CMM, ktoré disponuje dotykovým snímacím systémom, ako je možné vidieť na obr. 24. [9]



Obr. 24: Kalibrácia portálového CMM pomocou koncových mierok [27]

V prípade kalibrácie CMM s rozsahom hodnôt väčších ako 1 m, je vhodné na kalibráciu použiť ako etalón priemyslový laserinterferometer alebo iný na to vhodný prístroj, akým je napríklad trakčný laser. U CMM, ktoré sú vybavené optickým snímaním sa na kalibráciu využívajú sklenené čiarové meradlá, sklenené mriežky, poprípade je možné použiť ich kombináciu spolu s priemyslovým laserinterferometrom, ktorý sa nachádza na obr. 25. [9]



Obr. 25: Kalibrácia CMM pomocou laserového interferometra [46]

4.7.1 Výsledok kalibrácie

Výstupom z kalibrácie je kalibračný list s doložením nadväznosti na medzinárodný etalón dĺžky. Vo vyhodnotení kalibrácie je uvedená výsledná neistota merania kalibrovaného CMM pre celý merací priestor vo forme rovnice priamky alebo konštanty. Súčasťou kalibračného listu je protokol o meraní spolu s detailnými výsledkami merania, ako napríklad číselné aj grafické výsledky odchýlok od kolmosti ôs X, Y, Z, matematické aj grafické spracovanie neistoty merania v závislosti na dĺžke jednotlivých ôs i celého priestoru. [25]

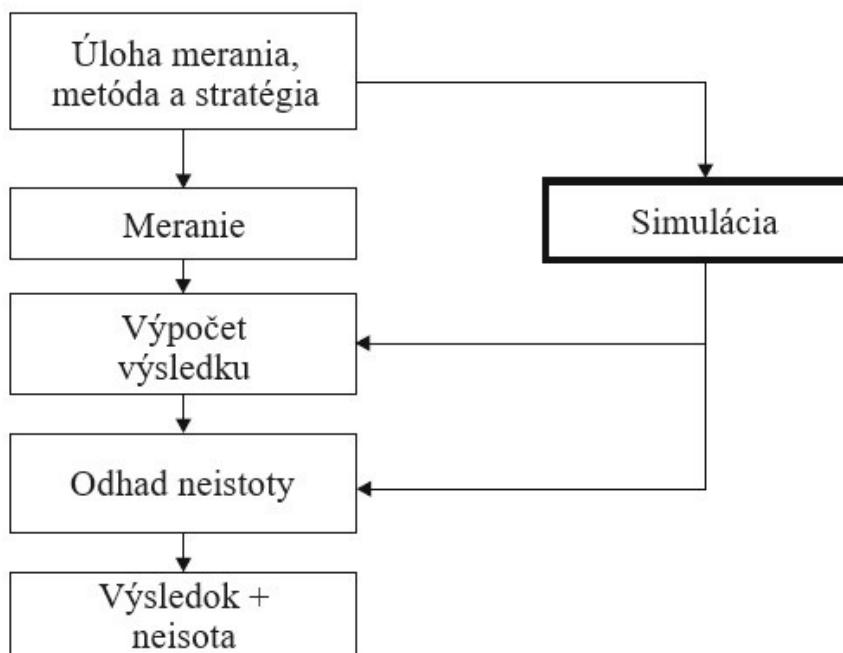
4.8 Metódy stanovenia neistoty merania s CMM

Existuje niekoľko metód, ktoré slúžia ku stanoveniu neistoty merania s CMM. Medzi najčastejšie využívané metódy v bežnej praxi patrí metóda Monte Carlo, substitučná metóda a multipozičná metóda.

4.8.1 Metóda Monte Carlo

Základnou myšlienkou metódy Monte Carlo je určenie strednej hodnoty veličiny, ktorá je výsledkom náhodného deja. Pri použití tejto metódy sa použije počítačový model sledovaného deja a po uplynutí dostatočného množstva simulácií je možné namerané dáta ďalej spracovať pomocou štatistických metód. [9] [28]

Výhodou metódy Monte Carlo je, že nie je potrebné poznať vnútorné vzťahy medzi výsledkami jednotlivých experimentov, nakoľko je postačujúce len objasniť súbor podmienok, pri ktorých má miesto vonkajšia súvislosť. [9]

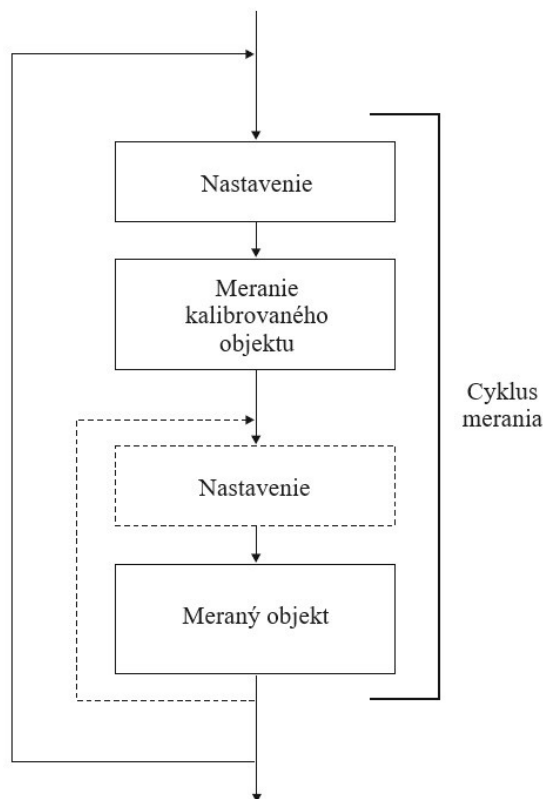


Obr. 26: Schéma metódy Monte Carlo [29]

Pri stanovení neistoty merania pomocou metódy Monte Carlo je potrebné vytvoriť presný matematický model meraného deja. Následne je nutné stanoviť hustotu pravdepodobnosti vstupných veličín, po ktorej sa urobí dostatočný počet simulácií. Ďalej sa vypočítané hodnoty spracujú pomocou stochastických metód. Na konci nastane určenie najpravdepodobnejšej hodnoty a neistoty. [9]

4.8.2 Substitučná metóda

Postup merania sa vykonáva v nasledujúcom poradí. Na začiatku sa vykoná meranie etalónu. Takto získaný výsledok sa interpretuje ako chyba CMM pre túto úlohu merania. Potom sa vykoná meranie objektu a k získanému výsledku sa pripočíta hodnota chyby. Takto získaná veličina sa považuje za skutočnú hodnotu meraného geometrického prvku. [29]



Obr. 27: Schéma substitučnej metódy [47]

Táto metóda je založená na porovnaní výsledkov merania daných geometrických prvkov s hodnotami zodpovedajúcich geometrických prvkov štandardu. Neidentifikuje jednoznačne príčiny chýb, ale vykonáva hodnotenie ich dôsledkov vo forme určenia odchýlok od referenčného rozmeru. Na vykonanie merania je potrebné použiť materiálový etalón (napr. vo forme meracieho kvádra alebo etalónového prstenca v závislosti od úlohy merania), ktorý má rozmerovú podobnosť s meraným rozmerom. [29]

Najväčšou výhodou tejto metódy je jednoduchosť jej implementácie. Nie je tu potrebná znalosť chýb komponentov CMM, ale musia byť dodržané rovnaké podmienky realizácie merania. Taktiež stroj nemusí mať (teoreticky) veľmi vysokú presnosť, ale mal by mať dobrú dočasnú opakovateľnosť, ktorá sa dosahuje ľahšie ako vysoká (dlhodobá) presnosť. V praxi si však táto metóda vyžaduje veľmi sofistikovaný systém na zabezpečenie stabilných podmienok realizácie merania a použitie stroja s vysokou presnosťou, pretože použitie CMM, ktoré by sa mali často prekalibrovat', nie je nákladovo efektívne. Preto sa substitučná metóda používa v kalibračných laboratóriách a okrem toho najmä pri kontrole hmotnosti skúšok vykonávaných v špeciálnych meracích strediskách. [29]

4.8.3 Multipozičná metóda

Základným princípom tejto metódy je opakovane vykonať niekoľko meraní danej charakteristiky objektu so zmenou rozloženia meracích polôh a orientácií objektu v objeme CMM. Analýza výsledkov sa vykonáva na základe analýzy smerodajnej odchýlky meraných charakteristík, pričom sa rozlišujú dve zložky neistôt. Tou prvou je vplyv opakovateľnosti merania CMM spoločne s rozložením meracích bodov a odchýlkami tvaru, vlnitosťou a drsnosťou povrchu meraného objektu. A druhou je vplyv geometrických chýb CMM spolu s vplyvom meracieho dotyku. [29]

4.9 Vplyvy na presnosť merania a zdroje neistôt u CMM

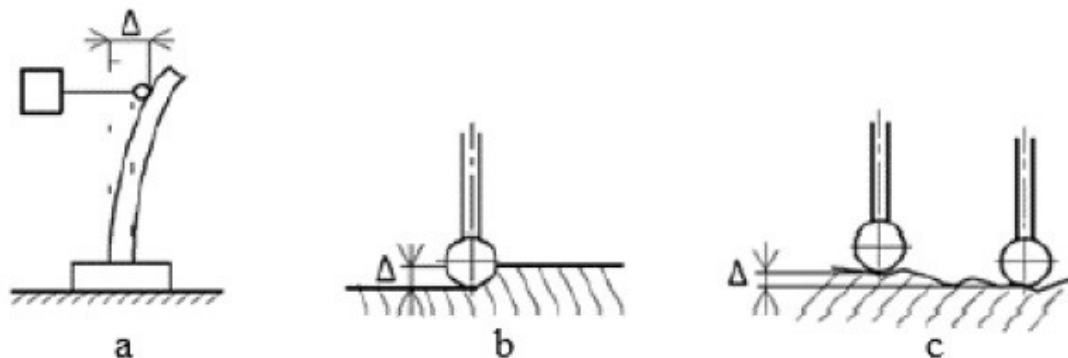
Presnosť merania u CMM je vlastnosť, ktorá vyjadruje schopnosť stroja poskytovať údaje, ktoré sú zhodné so skutočnou hodnotou meranej veličiny. Celková presnosť merania na CMM je ovplyvnená mnohými čiastkovými faktormi. Jednotlivé CMM je treba chápať ako zložitý systém, skladajúci sa z veľkého množstva komponentov, ktoré môžu byť zdrojom čiastkových neistôt merania a vplývať tak na výsledok merania. Za najvýznamnejší faktor ovplyvňujúci výsledok merania sa radí rozťažnosť materiálu meranej súčiastky ale aj okolité atmosférické podmienky. [14]

4.9.1 Ovpływujúce veličiny v procese merania

Človek (metrológ, skúšobný technik, operátor) – výsledná neistota merania je ovplyvnená rozdielnymi schopnosťami, vedomosťami, kvalifikáciou, skúsenosťami alebo fyzickou a psychickou kondíciou operátorov pri meraní. [19] [30]

Objekt merania (obrobok) – výsledok merania je ovplyvnený tvarovými odchýlkami, drsnosťou povrchu, hmotnosťou a veľkosťou, vlastnosťami materiálu ale aj čistotou a teplotou meraného objektu. [19] [30]

Charakter objektu merania môže mať za následok ovplyvnenie presnosti dotykovej meracej sondy. Pri meraní môže byť dotykovou sondou spôsobené, že dôjde ku deformácii poddajných súčiastok (obr. 28a) a ich poddajných povrchov (obr. 28b) alebo môže taktiež dôjsť ku tvarovej odchýlke kontrolovaného objektu (obr. 28c). [14]



Obr. 28: Chyby vznikajúce pri meraní: a) deformácia poddajných súčiastok b) deformácia poddajných povrchov c) tvarová odchýlka kontrolovaného objektu [14]

Metóda hodnotenia – pri použití matematicko-štatistických metód môže byť výsledok ovplyvnený napríklad priemerovaním, stanovením maximálnych a minimálnych hodnôt, zaokrúhľovaním a pod. [19]

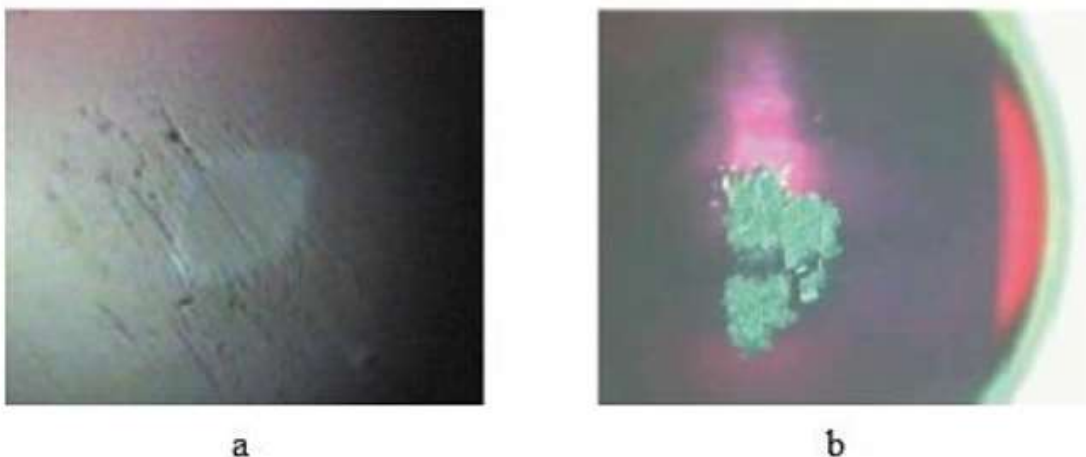
Prostredie – medzi dôležité faktory, ktoré ovplyvňujú proces merania, napríklad patrí teplota, osvetlenie, vibrácie, nečistoty, vlhkosť, zemská príťažlivosť a tlak. Vo väčšine prípadov je kolísanie teploty hlavnou zložkou neistoty prostredia merania. Pri meraní dĺžky to môže viesť ku rôznym výsledkom merania pri rôznych teplotách. [19] [30]

4.9.2 Ovpłyňujúce veličiny v systéme merania

Metóda merania – na výsledok merania má vplyv spôsob, akým sa meranie vykonáva, poprípade ho ovplyvňuje stratégia merania. Meranie sa môže vykonávať buď bezkontaktným alebo kontaktným (dotykovým) spôsobom, jeho výsledok môže byť ovplyvnený počtom a usporiadaním meracích bodov. Na výsledok majú vplyv aj matematické metódy, ako napríklad výpočet vyrovnávacích zložiek alebo výber filtra. [19]

Meracie zariadenie – každé meracie zariadenie má svoje vlastné vnútorné nedokonalosti, ktoré je nutné brať do úvahy. Tieto nedokonalosti sú spôsobené napríklad nepresnosťou výroby jednotlivých komponentov meracieho stroja, nepresnosťou montáže prevodových systémov a mechanizmov ale aj deformáciou. [31]

Častým zdrojom neistôt býva použitie opotrebovaných hrotov dotyku u snímacích sond. V prípade, že nastane styk medzi snímacou guľôčkou meranou súčiastkou v mieste opotrebovania, môže nastať vznik systematických chýb merania. Takéto opotrebovanie býva spôsobené oterom hrotu snímacieho dotyku alebo usádzaním materiálu z meranej súčiastky na jeho povrchu, ako je možné vidieť na nižšie uvedených obr. 29a a 29b. [14]

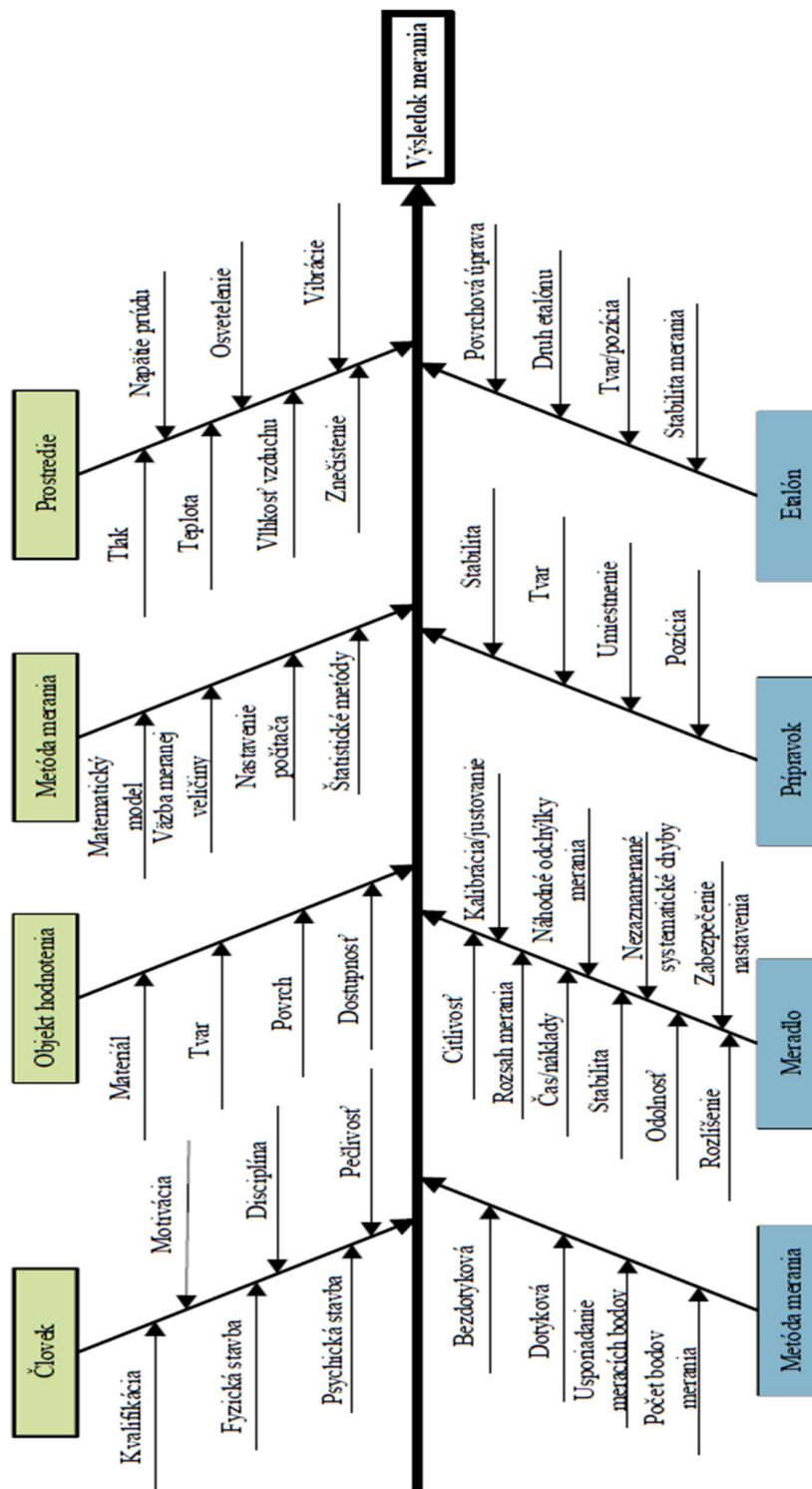


Obr. 29: Opotrebovanie guľôčky dotyku [14]

Prípravok – v prípade použitia upínacích prípravkov pri meraní, môže byť výsledok tohto merania ovplyvnený ich vlastnosťami, ako napríklad stabilita, materiál, tvar, umiestnenie a pozícia. Pokiaľ by z upínacieho prípravku nemohli vychádzať žiadne systematické odchýlky, je možné ich zohľadniť len v procese merania. [19]

Etalón – jedná sa o idealizované stelesnenie miery, ktoré sa používajú ku kalibrácii meracích systémov. V závislosti na kvalite referencie môžu výrazne prispieť k neistote výsledku merania a kalibrácie. U používaných etalónov je dôležité dbať na ich povrchovú úpravu, o aký druh etalónu sa jedná a či je vhodný k použitiu na dané meranie. Neistota etalónov býva spravidla uvedená v kalibračnom liste. [19]

Vplyvy na neistotu merania spôsobené systémom merania, ľudmi (obsluhou), meranými objektami, prostredím a pod. ovplyvňujú celkový výsledok merania (obr. 30) sú považované za náhodné odchýlky. Vplyvy, ktoré sú označené v modrých rámečkoch, predstavujú systém merania a spolu s vplyvmi v zelených rámečkoch vedú k procesu merania. [19]



Obr. 30: Ishikawov diagram - vplyvy na neistotu a výsledok merania [19]

5 PRINCÍP ČINNOSTI A CHARAKTERISTIKA CMM

Diplomová práce sa zaoberá stanovením neistoty merania pri kalibrácii a vyhodnotením spôsobilosti. Pre tento účel bol zvolený súradnicový merací stroj Micro-Vu Excel 4520 (id. č. EC 4520 1016), ktorý sa nachádza v špecializovanom laboratóriu ČMI v Brne.

V kapitole 3.1 je uvedená všeobecná charakteristika súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 a jeho technické údaje, ktoré boli spracované do jednotlivých tabuliek. V kapitole 3.2 bolo opísané softvérové vybavenie meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 a v kapitole 3.3 je podrobne opísané použité snímacie vybavenie súradnicového meracieho stroja.

5.1 Charakteristika CMM Micro-Vu Excel 4520

CMM Excel 4520 od amerického výrobcu Micro-Vu, ktorý je uvedený na obr. 31 patrí medzi špičku vo svojej kategórii. Je vybavený kamerou s vysokým rozlíšením, vďaka čomu je schopný vykonávať veľmi rýchle, presné a spoľahlivé merania najrôznejších dielov o dĺžke až 600 mm a hmotnosti do 100 kg. Taktiež je možné ho vybaviť meracími sondami alebo senzormi na meranie dĺžky. [32]



Obr. 31: CMM Micro-Vu Excel 4520 [autor]

Z hľadiska konštrukcie podľa normy ČSN EN ISO 10360-1:2001 sa jedná o portálový typ súradnicového meracieho stroja. Jeho základom je žulová doska. Uvedený CMM je schopný merania v osách X, Y a Z, čo ho z funkčného hľadiska zaraďuje medzi trojosé súradnicové meracie stroje. [22] [32]

V dolu uvedených tabuľkách (5.1, 5.2, 5.3, 5.4) sú uvedené vybrané technické parametre súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 [32]:

5.1 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - os X Y

X Y	Rozsah merania	<i>mm</i>	600x600
	Rozlíšenie snímačov	μm	0,5
	Presnosť E2xy	μm	1,5+7L
	Rýchlosť pojazdov	<i>mm/s</i>	500
	Zrýchlenie	<i>mm/s²</i>	1000
	Vedenie	-	jednokolajový samoustavovací typ

5.2 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - os Z

Z	Rozsah merania	<i>mm</i>	300
	Presnosť E1z	μm	1,7+5L (optické snímanie)
			1+5L (dotykové snímanie)
	Rýchlosť pojazdov	<i>mm/s</i>	150
	Zrýchlenie	<i>mm/s²</i>	500
Vedenie	-	lineárne	

5.3 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - vybavenie

Motor			jednosmerný servomotor s rotačným snímačom
Napájanie		<i>V</i>	110-120
		<i>Hz</i>	50-60
Video	CCD, vysoké rozlíšenie		čiernobiele
	Zoom		12:1 so zväčšením 0,6x až 7x (1,2x až 14x so šošovkou 2x)
Osvetlenie	spodné		100% kolimované
	osové		objektívom pomocou LED diódy
	prstencové		prstenec 2 kruhy/8 výsekov/16 buniek
	voliteľné		prstenec 5 kruhov/8 výsekov/40 buniek

5.4 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - prevádzkové parametre

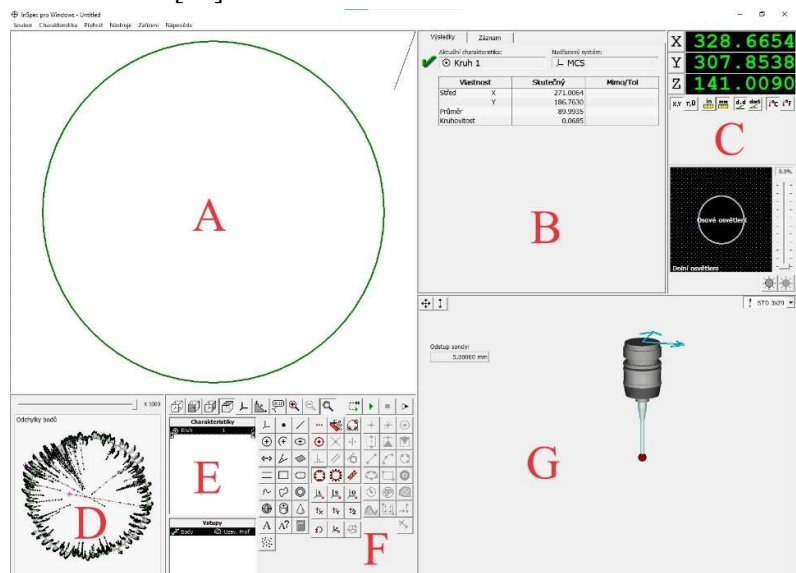
Prevádzková teplota	$^{\circ}C$	18-27; < 1 zmena počas hodiny, < 2 zmena počas dňa
Teplota uskladnenia	$^{\circ}C$	0-50
Relatívna vlhkosť	%	30-80
Hlučnosť	<i>dB</i>	< 70
Maximálna nadmorská výška	<i>m</i>	4000

5.2 Softvérové vybavenie

Súčasťou súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 je aj výrobcom vyvinutý a dodávaný softvérový program s názvom InSpec Vision. Tento program pracuje na báze spracovania digitálneho obrazu. [33]

Obsluha a meranie na súradnicovom meracom stroji s pomocou programu InSpec Vision je pomerne jednoduchá a intuitívna. Výrobca udáva, že na úkony ako meranie, programovanie či ovládanie pohybu, postačí užívateľovi obyčajná počítačová myš alebo joystick. [34]

InSpec Vision poskytuje možnosti automatickej tlačie, ukladania a exportu údajov. Taktiež automaticky zaznamenáva merania, umožňuje ukladať funkcie a videozáznamy. Integruje všetky užitočné funkcie v jednom softvéri a možno ho tak označiť za metrologický softvér najvyššej úrovne v odvetví. [34]



Obr. 32: Uživatelské prostredie PC programu InSpec Vision [autor]

Na vyššie uvedenom obr. 32 je zobrazené pracovné užívateľské prostredie programu InSpec Vision. Popis jednotlivých pracovných okien v programe InSpec Vision je nasledovný [35]:

- A. Grafické okno slúžiace na zobrazenie rozsahu a charakteru merania danej súčiastky,
- B. okno jednotlivých charakteristík merania,
- C. okno parametrov a súradnice polohy v jednotlivých osách X, Y a Z,
- D. okno zobrazujúce odchýlky bodov jednotlivých prvkov merania,
- E. okno zobrazujúce prípravu a postup programu merania,
- F. okno konštrukčných ikon a ikon optických nástrojov,
- G. kamerová časť programu, zobrazuje meranú súčiastku, poprípade používanú dotykovú sondu.

5.3 Snímacie vybavenie

Na meranie súradnicovým meracím strojom Micro-Vu Excel 4520 je možné využiť dvojicu snímacích systémov, a to konkrétne bezdotykový optický snímací systém alebo dotykový snímací systém v podobe dotykovej sondy TP 20 od britského výrobcu Renishaw.

5.3.1 Optický snímací systém CMM

Súradnicový merací stroj Micro-Vu Excel je vybavený bezdotykovým optickým meracím systémom v podobe kamery s vysokým rozlíšením. Tento systém je priamo dodávaný výrobcom Micro-Vu a je priamo zakomponovaný v konštrukcii súradnicového meracieho stroja, a to konkrétne v pinole.

Dodávaná optická kamera sníma dotyčné predmety čiernobielo, pričom na osvetlenie využíva červené svetlo. Jej hlavnou výhodou je vyššie rozlíšenie v porovnaní s farebnými kamerami. [32]

Prstencové osvetlenie – je súčasťou optického snímacieho systému stroja. Výrobca dodáva dva typy prstencových osvetlení. Tieto sa líšia svojou veľkosťou a zároveň usporiadaním LED diód, ako je možné vidieť na obr. 33. [32]



Obr. 33: Prstencové osvetlenie pre CMM Micro-Vu Excel 4520 [autor]

Menšie prstencové svetlo, výrobcom označované ako štandardné, pozostáva z dvoch prstencov, ktoré sú rozdelené do ôsmich sekcií, čím vytvárajú šestnásť segmentov osvetlenia, ktoré je možné ďalej programovať. Toto svetlo je postačujúce na osvetlenie pri bežnom meraní bez špeciálnych potrieb. [32]

Väčšie prstencové svetlo, označované ako makro, oproti menšiemu pozostáva z viacerých častí, a to konkrétne až z piatich prstencov rozdelených do ôsmich sekcií, čím sa vytvára až štyridsať segmentov programovateľného osvetlenia. Je možné ho využiť pri snímaní súčiastok s komplexnou geometriou, kde poskytuje vylepšený kontrast. [32]

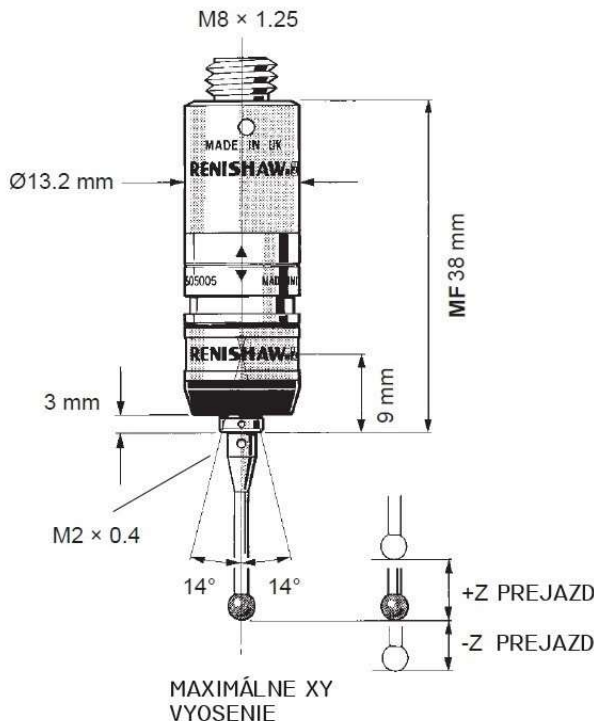
5.3.2 Dotykový snímací systém

Súradnicový merací stroj Micro-Vu Excel 4520, ako bolo spomenuté, umožňuje meranie aj pomocou dotykového snímacieho systému. Ten pozostáva z pevnej hlavy pre dotykové sondy s označením Renishaw PH6 a ku nej pripojenej dotykovej sondy s označením Renishaw TP20, na ktorú je podľa potreby možné pripojiť vymeniteľné spínacie moduly, ktoré sú uložené v zásobníku pre výmenu modulov.

Renishaw PH6 - je kompaktná, vertikálne orientovaná a pevná hlava dotykovej sondy s hmotnosťou 48 g a priemerom 19 mm. Je možné ku nej pripojiť maximálne jednu dotykovú sondu. Hlava je kompatibilná s dotykovými sondami, ktoré sú opatrené závitom M8.

Samotná dotyková hlava je spojená so strojom za pomoci stopky. Prenos signálu od hlavy dotykovej sondy do stroja je zabezpečovaný integrovaným káblom. Na indikáciu stavu hlavy dotykovej sondy slúži červená LED dióda. [36]

Renishaw TP20 – je spínacia dotyková sonda skladajúca sa z dvoch častí, a to z tela dotykovvej sondy a oddeliteľného spínacieho modulu, ktorý v sebe obsahuje kinematický spínací mechanizmus. Ako je možné vidieť na uvedenom obr. 34, na spojenie s hlavou sondy je spínacia dotyková sonda opatrená taktiež závitom M8, čo jej umožňuje univerzálne spojenie s rôznymi typmi hláv sond. [37]



Obr. 34: Spínacia dotyková sonda Renishaw TP20 [37]

Vnútri jej tela sa nachádza magnetický inhibítor, slúžiaci pri výmene jednotlivých spínacích modulov. Na spojenie tela sondy so spínacími modulmi sa využíva vysoko opakovateľne magnetické spojenie, vďaka ktorému je možná výmena spínacích modulov bez potreby rekvalifikácie snímacieho dotyku, čo prináša časovú úsporu. Kinematické spojenie medzi telom sondy a spínacím modulom taktiež poskytuje určitú ochranu v prípade kolízie v smere osi X a osi Y. [37]

Na dotykovú sondu je možné pripojiť až sedem rôznych spínacích modulov od výrobcu Renishaw. Tieto spínacie moduly sa od seba odlišujú svojou spínacou silou. Vďaka tomu je možné sondu presne nastaviť podľa požiadaviek danej meracej úlohy. Vizuálne ich je možné rozoznať podľa sfarbenia. Ako je zrejmé z obr. 34, upevnenie spínacích dotykov so spínacím modulom dotykovvej sondy je realizované pomocou závitú M2. [37]

Uvedená dotyková sonda Renishaw TP 20 je skonštruovaná tak, aby ňou bolo možné vykonávať čo najpresnejšie meranie daného objektu. Dotyková sonda je statická a jej translačný pohyb je vykonávaný pohyblivými časťami súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel v smere ôs X, Y a Z.

Pre potreby vypracovania diplomovej práce bol využitý šedý spínací modul s označením MF, t. j. spínací modul so strednou spínacou silou, ktorý je schopný dostatočne odolávať silným vibráciám aj pri použití dlhších spínacích dotykov. Spínací modul je vybavený rubínovou guličkou o 3 mm.

Niektoré ďalšie špecifikácie dotykovej sondy udávané výrobcom [38]:

- Meranie je možné v troch osách: X, Y, Z,
- odchýlka je $\pm 0,80 \mu\text{m}$,
- opakovateľnosť je $\pm 0,50 \mu\text{m}$,
- opakovateľnosť pri zmene snímacieho modulu je pri použití zásobníka $\pm 0,50 \mu\text{m}$,
- váha spínacieho modulu, označeného šedou farbou a písmenami MF činí 22 g.

Veľkosť síl udávaných výrobcom (platí pre dĺžku spínacieho dotyku 25 mm) [38]:

- Spínacia sila v smere ôs X a Y je 0,10 N,
- spínacia sila v smere osi Z je 1,9 N,
- sila preťaženia v smere ôs X a Y je v rozmedzí 0,20 N až 0,40 N,
- sila preťaženia je v kladnom smere osi Z 7 N.

V prípade, že by došlo k neočakávanému nadmernému zaťaženiu spínacieho modulu, došlo by k jeho uvoľneniu z dotykovej sondy. Hraničné medze v jednotlivých osách udávané výrobcom [38]:

- V smere ôs X a Y je vychýlenie spínacieho dotyku o veľkosti $\pm 14^\circ$,
- a v kladnom smere osi Z nadobúda hodnoty 3,70 mm.

Zásobník pre výmenu spínacích modulov (MCR20) - je súčasťou dotykového snímacieho systému a má kapacitu až na štyri spínacie moduly dotykovej sondy, ktoré sú umiestnené v smere osi Z nad meracou základňou. Zásobník slúži na ich bezpečné uloženie a automatickú výmenu, ktorú si stroj Micro-Vu Excel 4520 riadi sám. Poskytuje dostatočnú ochranu pred ich poškodením a znečistením v podobe prachových častíc. [37]

Zásobník je pevne uložený na ocelevej konzole, ktorá je priskrutkovaná k meracej základni stroja Micro-Vu Excel. Na druhom konci ocelevej konzoly sa nachádza dvojica etalónov v podobe guľôčky, ktorá sa používa na automatickú samo kalibráciu dotykového snímania a valček, ktorý slúži na automatickú samo kalibráciu optického snímania súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520.



Obr. 35: Zásobník pre výmenu spínacích modulov MCR20 [autor]

6 VÝBER A POPIS POUŽITÝCH ETALÓNŮV

Pre účel kalibrácie súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520 bolo vybraných niekoľko vhodných etalónov. Tie boli vyberané tak, aby boli čo najviac vhodné pre meranie, nakoľko CMM Micro-Vu Excel 4520 disponuje dvomi rôznymi snímacími systémami (dotykovým a optickým). Nasledujúce podkapitoly popisujú technické parametre a druhy jednotlivých použitých etalónov.

6.1 Laserový interferometer Renishaw XL-80

Ako jeden zo zvolených etalónov pri kalibrácii CMM Micro-Vu Excel 4520 bol použitý interferenčný systém Renishaw (obr. 36). Systém sa skladá zo základu, ktorý je tvorený kompaktnou laserovou hlavicou XL-80, ktorá je podľa normy ČSN EN 60 825-1:1997 klasifikovaná ako laser 2. triedy a samotným kompenzátorom prostredia XC-80. Súčasťou sú aj meracie čipy na teplotu materiálu a teploty, tlaku a vlhkosti okolitého vzduchu. Všetky prvky sú následne pripojené k počítaču. [39] [40]



Obr. 36: Systém laserového interferometra Renishaw XL-80 [39]

Laser XL-80 – vytvára mimoriadne stabilný zväzok laserového žiarenia s vlnovou dĺžkou odpovedajúcou národným i medzinárodným normám. Stabilita frekvencie vyžarovanej vlnovej dĺžky $\pm 0,05$ ppm za 1 rok a $\pm 0,02$ ppm za 1 hodinu. Presnosť lineárneho merania je $\pm 0,05$ μm v celom rozsahu podmienok prostredia (pri teplote 0°C - 40°C a tlaku 650 mbar - 1150 mbar). Systém Renishaw využíva princíp interferometrie ako lineárnom meraní, tak aj pri všetkých ostatných druhoch merania. [39]

Kompenzátor XC-80 a snímače – kompenzátor je kľúčovým prvkom pre zaručenie presnosti merania so systémom Renishaw XL. Vďaka pomoci svojich inteligentných snímačov, ktoré dokážu spracovať nameranú hodnotu, dokáže veľmi presne odmerať teplotu vzduchu, tlak vzduchu a relatívnu vlhkosť okolia. Na základe zistených údajov následne upravuje vlnovú dĺžku laseru tak, aby do výpočtu stále vstupovala jej správna hodnota, čím sa prakticky



Obr. 37: Kompenzátor XC-80 a snímače [39]

eliminuje akákoľvek chyba merania vyplývajúca zo zmien podmienok okolitého prostredia. Kompenzácia sa automaticky vykonáva každých sedem sekúnd. Ku kompenzátoru XC-80 je možné pripojiť až tri snímače teploty materiálu, aby bolo možné urobiť normalizáciu lineárneho merania na štandardnú teplotu materiálu 20 °C. Vďaka tomu, že každý snímač sa medzi jednotlivými odpočtami odpojí, tak nedochádza k tepelnému vyžarovaniu, ktoré je tak obmedzené na minimum. [39]

6.1 Technické parametre kompenzátoru Renishaw XL-80 [39]

Parametre systému	Renishaw XL 80
Identifikačné číslo	56H160
Číslo KL	8014-KL-L0025-20
Rozsah lineárneho merania	0 - 80 m
Presnosť lineárneho merania	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Presnosť merania s kompenzátorom	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Presnosť frekvencie laseru	$\pm 0,05 \mu\text{m}$
Rozlíšenie	1 nm
Maximálna rýchlosť snímaného pohybu	4 m/s
Frekvencia snímaných dát	10 Hz - 50 kHz
Doba stabilizácie	< 6 min
Pracovná teplota	(0 - 40) °C
Parametre snímačov	Renishaw XC 80
Teplota materiálu	(0-55) °C, presnosť: $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Teplota vzduchu	(0 - 40) °C, presnosť: $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Tlak vzduchu	65 kPa - 115 kPa, presnosť: $\pm 0,1 \text{ kPa}$
Relatívna vlhkosť	(0-95) %, presnosť: $\pm 6 \%$

6.2 Sady koncových mierok

Koncové mierky, často označované ako Johanssonové mierky alebo základné mierky, sú presné oceľové doštičky alebo hranoly s presnosťou až 0,001 mm. Koncové mierky sú vyrobené zo špeciálnej legovanej ocele, predávajú sa v sadoch o rôznych dĺžkach a rôznych stupňoch presnosti, podľa normy ČSN EN ISO 3650:2000. Najpresnejšia trieda presnosti sa označuje písmenom K a koncové mierky s takýmto označením nachádzajú najčastejšie uplatnenie ako laboratórne etalóny. Ďalšie stupne presnosti sú označené ako 0, 1 a 2. Mierky so stupňom presnosti 0 sa využívajú na kalibráciu. So stupňom presnosti jeden sa používajú na kontrolu a kalibráciu mierok so stupňom presnosti 2 alebo na nastavenie komparátorov. Koncové mierky so stupňom presnosti 2 nachádzajú svoje využitie ako pracovné mierky. [41] [35] [42]

Pre kalibráciu boli zvolené ako vhodný etalón sady koncových mierok od rôznych výrobcov (Koba, Tesa, Frank). Rozsah koncových mierok pre kalibráciu bol zvolený od 10 mm až po mierku dĺžky 600 mm.



Obr. 38: Sada oceľových koncových mierok Frank (125÷500) mm [autor]

6.2 Technické parametre koncových mierok [KL – prílohy R, S, T]

Názov a rozsah koncových mierok	Koba, Mitutoyo (0,5 ÷ 100) mm	Frank (125 ÷ 500) mm	Tesa, Mitutoyo (600 ÷ 1000) mm
Identifikačné číslo	060756 B	1286	103434; 120007
Číslo KL	4011-KL-D0526-21	6014-KL-M0047-22	8014-KL-L0021-22
Rozsah merania	0,5 ÷ 100 mm	125 ÷ 500 mm	600 ÷ 1000 mm
Neistota merania	(0,05+0,5L) μm	(0,05+0,5L) μm	0,096 μm (600 mm)
Koeficient tep. rozťažnosti	11,7 x 10 ⁻⁶ /K	11,7 x 10 ⁻⁶ /K	11,7 x 10 ⁻⁶ /K
Materiál	Oceľ	Oceľ	Oceľ

6.3 Sklenené pravítka

Sklenené pravítka patria medzi veľmi presné dĺžkové pravítka, ktoré sú vhodné na kontrolu presnosti zväčšenia meracích projektorov, mikroskopov a taktiež ku kontrole presnosti posuvu stola meracích prístrojov. Najčastejším materiálom na ich výrobu je sodné sklo. Líšia sa od seba presnosťou, meracím rozsahom, materiálom skla a pod. [35] [43]

Pre účel kalibrácie CMM Micro-Vu Excel 4520 boli použité sklenené pravítka od japonského výrobcu Mitutoyo, a to konkrétne v dĺžkach 500 mm a 750 mm.

6.3 Technické parametre skleneného pravítka Mitutoyo 500 [KL – príloha N]

Názov	Mitutoyo 500
Identifikačné číslo	103604
Číslo KL	6014-KL-F0201
Rozsah merania	500 mm
Stupňovanie	0,5 mm
Hrúbka čiarok stupnice	50 μm
Hmotnosť	0.57 kg
Neistota merania	(0,6+1,5L) μm
Koeficient teplotnej rozťažnosti	8,5 x 10 ⁻⁶ /K
Materiál	Sodné sklo

6.4 Technické parametre skleneného pravítka Mitutoyo 750 [KL – príloha O]

Názov	Mitutoyo 750
Identifikačné číslo	104131
Číslo KL	6014-KL-F0202-23
Rozsah merania	750 mm
Stupňovanie	1 mm
Hrúbka čiarok stupnice	100 μm
Hmotnosť	1,22 kg
Neistota merania	(0,8+1,5L) μm
Koeficient teplotnej rozťažnosti	8,5 x 10 ⁻⁶ /K
Materiál	Sodné sklo



Obr. 39: Sklenené pravítko Mitutoyo 750 [autor]

6.4 Nastavovacie krúžky

Ako posledný zvolený etalón pre kalibráciu CMM Micro-Vu Excel 4520 bola zvolená dvojica nastavovacích kalibračných krúžkov SIP a Tesa. Ich technické parametre je možné vidieť v nasledujúcej tabuľke 6.5:

6.5 Technické parametre nastavovacích krúžkov [KL – prílohy U, V]

Názov	SIP $\varnothing 40\text{ mm}$	Tesa $\varnothing 175\text{ mm}$
Identifikačné číslo	42324	GF327
Číslo KL	6014-KL-H0545-20	6014-KL-F0054-19
Rozsah merania	$\varnothing 40\text{ mm}$	$\varnothing 175\text{ mm}$
Neistota merania (priemer)	$0,3\ \mu\text{m}$	$1\ \mu\text{m}$
Neistota merania (kruhovitosť)	-	$0,1108\ \mu\text{m}$
Koeficient tep. rozťažnosti	$11,7 \times 10^{-6}/K$	$11,7 \times 10^{-6}/K$
Materiál	Oceľ	Oceľ



Obr. 40: Nastavovacie krúžky SIP a Tesa [autor]

7 PREVEDENIE KALIBRAČNÝCH MERANÍ

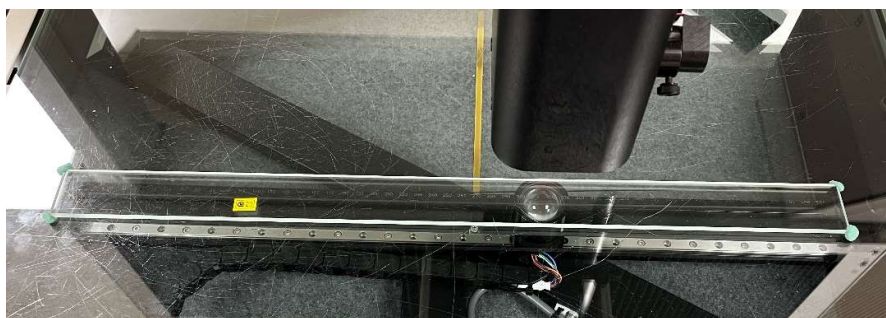
Samotné kalibračné meranie sa vykonalo v akreditovanom kalibračnom laboratóriu č.21 v budove pobočky Českého metrologického inštitútu v Brne. Meranie sa uskutočnilo podľa interného kalibračného postupu č. 815-MP-C501 a bolo vykonané pomocou súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520. Na meranie jednotlivých etalónov sa využilo optické aj dotykové snímanie uvedeného meracieho stroja. Kalibračné laboratórium je vybavené klimatizačnou vzduchotechnikou tak, aby bolo možné počas kalibrácie udržiavať optimálnu teplotu pre meranie. Na kontrolu teploty a vlhkosti sa počas priebehu meraní využíval teplomer od výrobcu Comet, ktorý je možné vidieť na nižšie uvedenom obr. 41.



Obr. 41: Teplomer Comet [autor]

7.1 Sklenené pravítka

Meranie bolo postupne prevedené pomocou optického snímania CMM Micro-Vu Excel 4520 v osiach X, Y, XY a YX. Každé meranie sa vykonalo s desiatimi opakovaniami. Pred samotným začatím merania bolo dôležité sklenené pravítka zbaviť nečistôt. Ako preventívne opatrenie bolo vykonané čistenie alkoholovým prípravkom, aby sa predišlo nepresným meraniam v dôsledku znečistenia. Po dôkladnom vyčistení nastalo umiestnenie sklenených pravítok na meraciu plochu, kde následne boli uchytené pomocou kotviacej plastelíny (obr. 42).



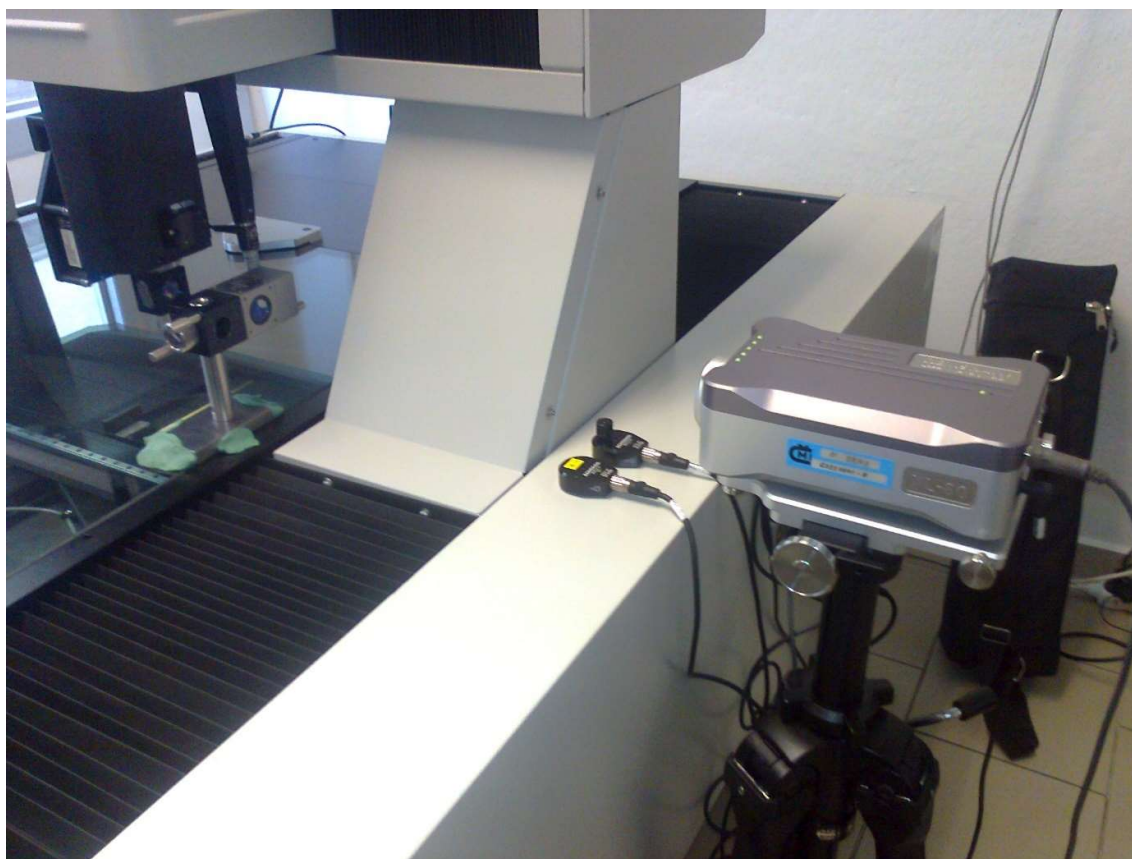
Obr. 42: Meranie skleneného pravítka [autor]

Následne došlo k spusteniu meracieho programu InSpec Vision a k nastaveniu optického snímacieho systému CMM na prvú meraciu hranu. Snímanie rysiek sklenených pravítok bolo prevedené na ich ľavú hranu. Po nastavení snímacieho systému prebiehalo meranie jednotlivých vzdialeností na sklenených pravítkach, a to po 60 mm posuvoch pre osi X, Y (od 60 mm po 600 mm) a po 75 mm posuvoch pre uhlopriečky XY a YX (od 75 mm po 750 mm).

7.2 Laserový interferometer

S laserovým interferometrom, ako použitým etalónom, sa vykonali merania v osiach X, Y a Z. Pred začatím merania bolo nutné laserový lúč z interferometra dobre a presne nastaviť, nakoľko je dôležité, aby bol laser schopný rozoznať polohu pohyblivého zrkadla. Po samotnom nastavení došlo k spusteniu meracieho programu.

Pre toto meranie bol využitý počítačový program Laser™. Týmto programom sa v začiatkovej polohe vynulovala a nastavila polarita merania. Ďalej sa nastavil prvý a posledný meraný bod, príslušný počet krokov, počet opakovaní a interval merania.



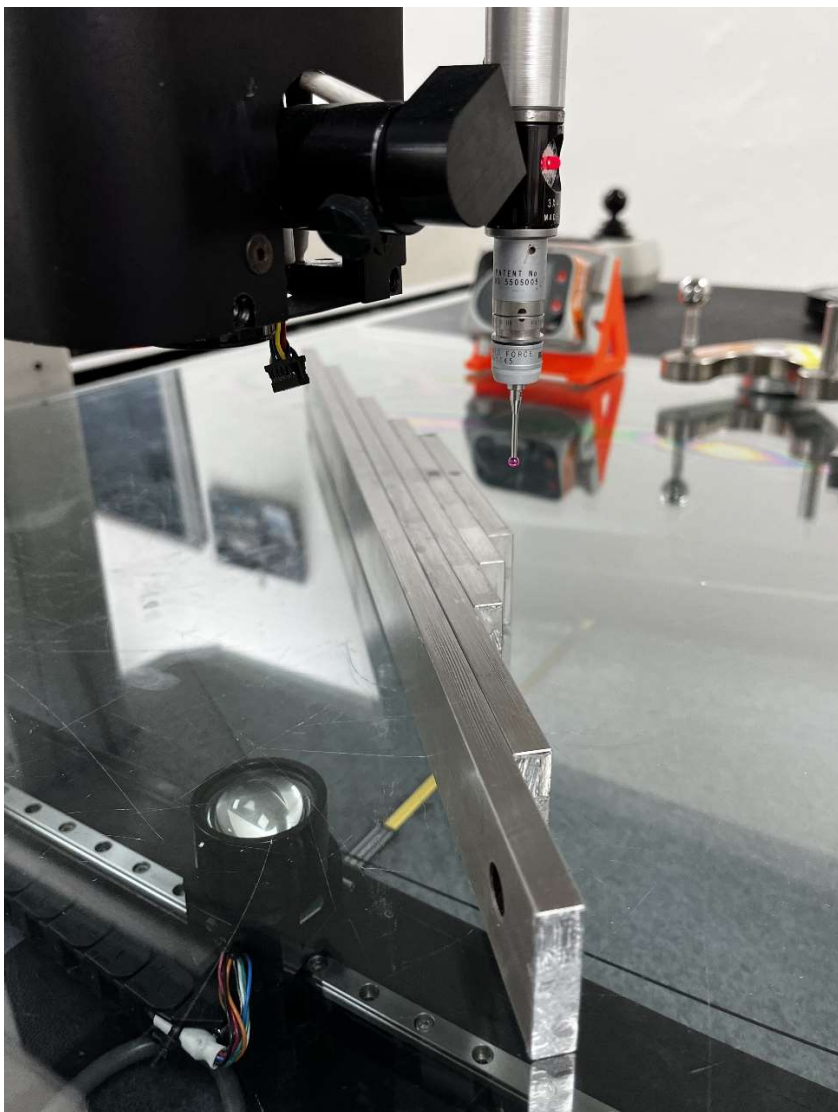
Obr. 43: Meranie s laserovým interferometrom [archív vedúceho diplomovej práce]

Meranie sa vykonalo v intervaloch a pozostávalo z prejdienia meracieho rozsahu 3 razy v riadnom (+) smere a 3 razy v opačnom (-) smere. Vzdialenosť medzi jednotlivými meranými bodmi bol nastavený na 60 mm. Do meraní bola zahrnutá aj hodnota 0 mm.

Následne boli zaznamenané dáta z merania prevedené z meracieho programu InSpec Vision do programu Laser™, kde sa následne vyhodnotili niektoré parametre merania, ako napríklad odchýlka.

7.3 Koncové ocelové mierky

Pre účel kalibrácie CMM Micro-Vu Excel 4520 boli ako ďalší etalón zvolené ocelové koncové mierky v rozmedzí od 10 po 600 mm. Jednotlivé mierky boli rovnako ako sklenené pravítka očistené alkoholovým prípravkom od nečistôt. Kalibračné meranie prebehlo pomocou dotykového snímania CMM, kde na konci dotykového spínacieho modulu bola rubínová guľôčka. Ovládanie merania sa vykonalo pomocou počítačového programu InSpec Vision.



Obr. 44: Meranie koncových mierok [autor]

Jednotlivé merania ocelových koncových mierok boli prevedené v osiach X, Y a Z a v uhlopriečkach XY a YX. Snímanie dĺžky bolo prevedené na ich stred funkčnej plochy. Z dôvodu pracovného vytťaženia kalibračného laboratória bolo s vedúcim diplomovej práce dohodnuté, že budú vykonané len tri opakovania pre každú koncovú mierku. Následne sa tento menší počet meraní vykompenzoval koeficientom rozšírenia.

7.4 Nastavovacie oceľové krúžky

Ako posledné prebehlo kalibračné meranie, kde bola ako etalóny použitá dvojica oceľových nastavovacích krúžkov, menší SIP s priemerom 40 mm a väčší Tesa s priemerom 175 mm.

Pre ich kalibračné meranie bolo použité dotykové snímanie CMM, tak ako v prípade oceľových koncových mierok. Obidva oceľové nastavovacie krúžky taktiež pred samotným meraním podstúpili vyčistenie alkoholovým prípravkom. Ovládanie merania, tak ako u predchádzajúcich meraní, bolo vykonané pomocou počítačového programu InSpec Vision. U oceľových nastavovacích krúžkov bol meraný rozmer v podobe priemeru a ich kruhovitosť. Meranie každého krúžku sa zopakovalo trikrát a bolo prevedené v ich strednej rovine.



Obr. 45: Meranie nastavovacieho krúžku SIP [autor]

8 STANOVENIE NEISTÔT PRI KALIBRÁCII CMM MICRO-VU EXCEL 4520

Po prevedení jednotlivých kalibračných meraní so zvolenými etalónmi môžeme ďalej pristúpiť ku stanoveniu a kvantifikovaniu jednotlivých zložiek neistôt merania, ktoré sú súčasťou každého jedného merania.

8.1.1 Identifikácia jednotlivých zdrojov neistôt

Ako vhodný postup ku stanoveniu neistoty merania bola zvolená substitučná metóda. Na základe znalostí a konzultácie s vedúcim diplomovej práce došlo ku stanoveniu niekoľkých zdrojov neistôt, ktoré boli následne vyhodnotené v súlade s dokumentom EA-4/02 M:2022. Jedná sa predovšetkým o:

- Vplyv rozptylu nameraných hodnôt – neistota typu A (u_A),
- vplyv použitého etalónu (u_{B1}),
- vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2}),
- vplyv rozdielu teploty pri meraní od 20 °C (u_{B3}),
- vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4}),
- vplyv kalibrácie dotyku (U_{B5}),
- vplyv neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu (U_{B6}).

8.1.2 Stanovenie neistoty typu A (u_A)

Na stanovenie štandardnej neistoty typu A sa použije postup, ktorý bol podrobne opísaný v kapitole 3.4.2. Jej výsledok sa získa využitím štatistických prostriedkov z nameraných dát. Ako prvé je nutné namerané dáta podrobiť testu odľahlých hodnôt. Na to sa využije program Minitab, v ktorom sa spraví Grubbsov test, čím sa predíde novej náhodnej chybe. V prípade zistenia odľahlých hodnôt je nutné tieto hodnoty zo súboru odstrániť. Takto vyfiltrovaný súbor je možné ďalej spracovať. Ako prvý sa spočíta aritmetický priemer, ďalej sa vypočíta výberová smerodajná odchýlka a nakoniec nastane výpočet výslednej neistoty typu A.

8.1.3 Stanovenie neistoty použitého etalónu (u_{B1})

Jedná sa o jednu z viacerých zložiek neistoty typu B. Zahŕňa vplyv kalibrácie použitého etalónu. Jej hodnota sa udáva v jednotlivých kalibračných listoch etalónov. Neistota použitého etalónu sa vyjadrí vzťahom:

$$U_E = a + bL \quad (8.1)$$

kde a a b sú experimentálne určené koeficienty, dané výrobcom etalónu a L predstavuje hodnotu meranej dĺžky etalónu.

Následne sa príspevok k celkovej neistote vplyvom neistoty použitého etalónu spočíta vzťahom:

$$u_{B1} = c_j \frac{U_E}{k}, \quad (8.2)$$

kde c_j – koeficient citlivosti (predpoklad $c_j=1$),

k – štandardný koeficient rozšírenia ($k = 2$ pre pravdepodobnosť 95,45 %).

8.1.4 Stanovenie vplyvu rozlišovacej schopnosti meracieho stroja (u_{B2})

Neistota je založená na najmenej možnej rozlišovacej schopnosti súradnicového meracieho stroja. Pri jej výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$), a vyjadri sa podľa vzťahu:

$$u_{B2} = c_j \frac{R_{CMM}}{\chi}, \quad (8.3)$$

kde R_{CMM} – najmenšia rozlíšiteľnosť CMM,
 χ – koeficient vyplývajúci z rovnomerného rozdelenia.

8.1.5 Stanovenie vplyvu rozdielu teploty pri meraní od 20 °C (u_{B3})

Jedná sa o neistotu merania, ktorá určuje vplyv odchýlky teploty od 20 °C počas priebehu kalibračného merania. Je však nutné podotknúť, že teplota by sa počas merania mala udržiavať na hodnote 20 °C s čo najmenším rozptylom. To však nie vždy je možné dodržať, a preto je nutné brať pri výpočtoch celkovej neistoty aj vplyv rozdielu teploty od 20 °C. Vyhodnotenie tejto neistoty predpokladá rovnomerné rozdelenie a neistota je daná vzťahom:

$$u_{B3} = \frac{\Delta\alpha}{\chi} \cdot \frac{\Delta t_{20}}{\chi} \cdot L, \quad (8.4)$$

kde $\Delta\alpha$ – rozdiel koeficientov tepelnej rozťažnosti,
 Δt_{20} – odchýlka teploty vzduchu od 20 °C.

8.1.6 Stanovenie vplyvu rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4})

Pri ideálnom meraní by mala mať teplota súradnicového meracieho stroja a teplota meraného objektu, v našom prípade etalónu, rovnakú hodnotu. Etalóny sa preto nechávajú v kalibračnom laboratóriu spolu s meracím strojom, aby nadobudli približne rovnakú teplotu. Tento stav však nie je možné dokonale dosiahnuť. Preto sa výslednom musí počítať s príspevkom neistoty z rozdielu teplôt CMM a meraného objektu, ktorý je daný vzťahom:

$$u_{B4} = \frac{\Delta t}{\chi} \cdot \alpha_A \cdot L, \quad (8.5)$$

kde Δt – rozdiel teplôt CMM stroja a meraného objektu,
 α_A – koeficient tepelnej rozťažnosti materiálu meraného objektu.

Hodnota koeficientu tepelnej rozťažnosti CMM sa zanedbáva, a to najmä z dôvodu, že CMM je skonštruované z materiálov s minimálnou tepelnou rozťažnosťou.

8.1.7 Stanovenie neistoty kalibrácie dotyku (u_{B5})

Výsledok sa stanoví z hodnoty uvedenej v kalibračnom liste kalibračnej gule alebo valčeka (používa sa pre optické snímanie). Vypočíta sa na základe vzťahu:

$$u_{B5} = u_K = c_j \frac{U_G}{k}, \quad (8.6)$$

kde U_G – neistota kalibračnej gule.

8.1.8 Stanovenie neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu (u_{B6})

Ako už bolo vyššie spomenuté, pri kalibračnom meraní sa vyžaduje, aby sa teplota v kalibračnom laboratóriu udržiavala na hodnote 20 °C. Tento údaj má na starosti teplomer vzduchu, avšak aj ten je zdrojom neistoty. Táto neistota sa spočíta zo vzťahu:

$$u_{B6} = U_{Tc} = \frac{U_T}{k} L, \quad (8.7)$$

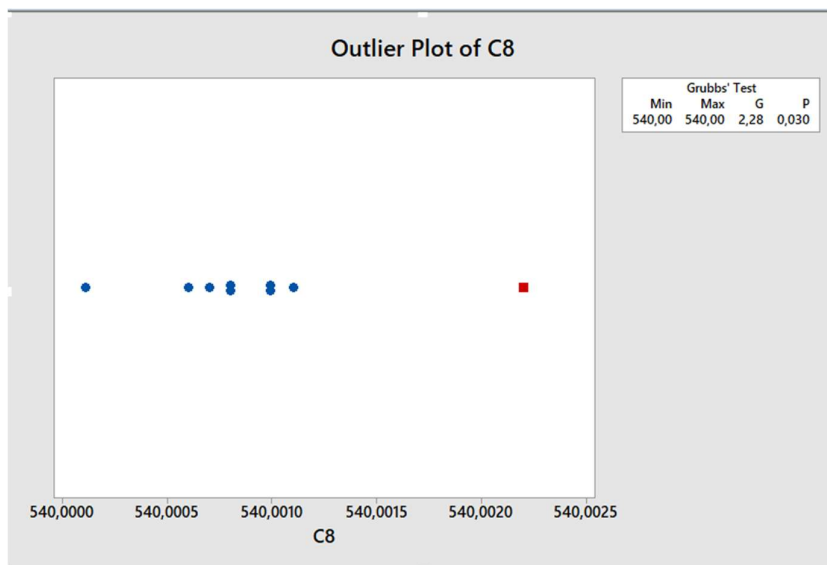
kde U_T – rozšírená neistota uvedená v kalibračnom liste teplomeru.

8.2 Kvantifikácia jednotlivých neistôt a modelové príklady ich výpočtu

Namerané údaje z kalibrácie CMM Micro-Vu Excel 4520 boli následne spracované a podľa vzťahov uvedených v predchádzajúcej kapitole 8.1 bola vykonaná kvantifikácia jednotlivých zdrojov neistôt.

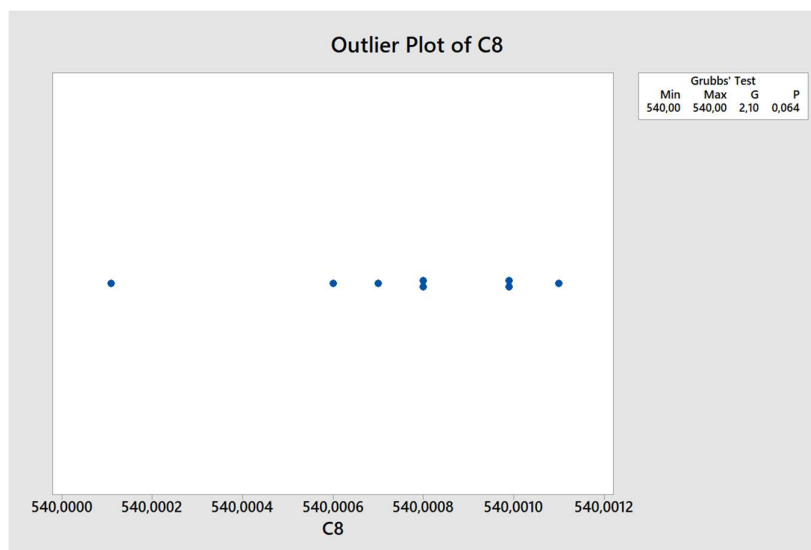
Pre modelový výpočet neistôt v diplomovej práci sme zvolili 4 príklady pre rôzne použité etalóny. A to konkrétne výpočet neistôt pre sklenené pravítka, laserový interferometer, oceľové koncové mierky a oceľové nastavovacie krúžky. Počas výpočtov sa do vzorcov dosadzovali nezaokrúhlené hodnoty, aby nenastalo nežiaduce skreslenie výsledkov. Zaokrúhlenie nastalo až po výpočte výslednej rozšírenej neistoty U , a to konkrétne na štyri desatinné miesta. Pre sprehľadnenie výsledných tabuliek (príloha A-L), boli všetky hodnoty zaokrúhlené na štyri desatinné miesta. Kompletne výsledky boli následne spracované do tabuliek, ktoré sú uvedené v prílohe diplomovej práce.

Pred samotným vyhodnotením neistôt pre jednotlivé použité etalóny, bol podľa normy ČSN ISO 5725-2:2022 vykonaný Grubbsov test, taktiež nazývaný test odľahlých hodnôt [44]. Pre tento test bol využitý počítačový program Minitab. Test sa previedol na hladine významnosti $\alpha=0,05$. Nasledujúci príklad Grubbsovho testu je pre sklenené pravítka s dĺžkou 540 mm merané optickým snímaním CMM. Ako je možné vidieť na nasledujúcom obrázku (obr. 46), bola identifikovaná jedna odľahlá hodnota, ktorá je na obrázku označená červenou farbou.



Obr. 46: Grubbsov test v programe Minitab [autor]

Následne došlo k odstráneniu nežiaducej hodnoty a ku vykonaniu opätovného testu. Výsledok tohto testu je možné vidieť na nasledujúcom obrázku (obr. 47):



Obr. 47: Opakovaný Grubbsov test [autor]

Z výsledku opakovaného Grubbsovho testu je zrejmé, že nežiaduca odľahlá hodnota sa už v súbore nenachádza. Tento súbor môžeme prehlásiť na hladine významnosti $\alpha=0,05$ za zbavený odľahlých hodnôt.

8.2.1 Sklenené pravítka

Pre ukážku v tejto diplomovej práci sme boli zvolené dáta z kalibrácie skleneného pravítka, a to pre dĺžku 600 mm v ose X. Každé meranie prebiehalo 10 krát. Jednotlivé výpočty boli spočítané pomocou počítačového programu Microsoft Excel.

8.1 Namerané hodnoty - sklenené pravítka - 600m - os X

<i>n</i>	Namerané hodnoty [mm]
1	600,00077
2	600,000456
3	600,000123
4	599,9995
5	600,0011
6	600,002
7	600,00003
8	600,000357
9	600,0003
10	600,000258

Vplyv rozptylu nameraných hodnôt – neistota typu A (u_A)

Pri výpočte neistoty typu A (u_A) bol ako prvý vypočítaný aritmetický priemer podľa vzťahu (3.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (600,00077 + \dots + 600,000258),$$

$$\bar{y} = 600,00489 \text{ mm.}$$

Výsledná neistota typu A sa vyráta podľa vzťahu (3.6), v ktorom je zahrnutý aj vzťah (3.5). Koeficient rozšírenia pre desať meraní nadobúda hodnotu $k_s = 2,32$.

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{y}},$$

$$u_A = k_s \cdot s(\bar{y}) = 2,32 \cdot \sqrt{\frac{(600,00077 - 600,00489)^2 + \dots + (600,000258 - 600,00489)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00049913 \mu m.$$

Vplyv použitého etalónu (u_{B1})

Neistotu kalibrácie etalónu (skleneného pravítka) je možné nájsť v jeho kalibračnom liste (príloha O). Hodnota tejto neistoty pre dĺžku 600 mm je $U_E = 1,70 \mu m$. Následne sa táto hodnota dosadí do vzorca pre výpočet neistoty použitého etalónu (8.2), kde uvažujeme koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{1,70}{2} = 0,850 \mu m.$$

Vplyv rozlišovacej schopnosti meracieho stroja (u_{B2})

Z technických údajov udávaných výrobcom Micro-Vu sme použili uvedenú rozlišovaciu schopnosť meracieho stroja, a to konkrétne $0,5 \mu m$. Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie, ktoré nadobúda hodnotu $\chi = \sqrt{3}$ a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Výsledná neistota sa stanoví podľa vzťahu (8.3) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,288675135 \mu m.$$

Vplyv rozdielu teploty pri meraní od 20 °C (u_{B3})

Teplota v kalibračnom laboratóriu bola počas merania bola približne $20,5 \text{ °C}$, čo predstavuje $0,5 \text{ °C}$ rozdiel (Δt_{20}) oproti požadovanej hodnote teploty 20 °C . Koeficient teplotnej rozťažnosti CMM má hodnotu $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,5 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) a koeficient teplotnej rozťažnosti skleneného pravítka má udávanú hodnotu $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $8,5 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$). Z toho vyplýva výsledný rozdiel $\Delta\alpha$ predstavuje $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $3 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$). Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie ($\chi = \sqrt{3}$) a pre meranú dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$ je výsledná neistota daná vzťahom (8.4) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B3} = \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,600 = 0,3 \mu m.$$

Vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4})

Nakoľko CMM a meraný objekt (sklenené pravítko) boli spoločne v kalibračnom laboratóriu a u etalónov prebehlo temperovanie teploty, predpokladáme veľmi malý teplotný rozdiel. Rozdiel teplôt medzi CMM a meraným objektom má hodnotu $\Delta t = 0,2 \text{ °C}$. Teplotný koeficient skleneného pravítka má udávanú hodnotu $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $8,5 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$). Pri výpočte predpokladáme rovnomerné rozdelenie ($\chi = \sqrt{3}$), a pre dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$ sa výsledná neistota určí vzťahom (8.5), kde nadobúda hodnotu:

$$u_{B4} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot 8,5 \cdot 0,600 = 0,588897275 \mu m.$$

Vplyv neistoty kalibrácie dotyku (u_{B5})

Nakoľko meranie prebiehalo pomocou optického snímania CMM, tak sa táto zložka neistoty do výpočtu nezahrnula.

Vplyv neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu (u_{B6})

Pre výpočet tejto neistoty sa použije vzťah (8.7). Hodnota neistoty teplomeru sa dosadí z jeho kalibračného listu a má hodnotu $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre teplotu okolia $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koeficient rozšírenia uvažujeme $k = 2$ a meranú dĺžku $L = 0,600\text{ m}$. Výsledná neistota nadobúda hodnotu:

$$u_{B6} = \frac{0,3}{2} \cdot 0,600 = 0,09\text{ }\mu\text{m}.$$

Neistota typu B (u_B)

Výsledná neistota typu B sa spočíta dosadením do vzťahu (3.7):

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B6}^2},$$
$$u_B = \sqrt{0,850^2 + 0,288675135^2 + 0,3^2 + 0,588897275^2 + 0,09^2} = 1,118361897\text{ }\mu\text{m}.$$

Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota (u_C) sa vypočíta pomocou vzťahu (3.9). Jej zložkami sú neistota typu A (u_A) a neistota typu B (u_B).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2},$$
$$u_C = \sqrt{0,00049913^2 + 1,118361897^2} = 1,118362009\text{ }\mu\text{m}.$$

Ďalším a zároveň posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty (U). Pri výpočte sa uvažuje koeficient rozšírenia $k = 2$, čím sa definuje interval okolo výsledku merania v ktorom sa predpokladá výsledok merania so spoľahlivosťou $95,45\%$. S využitím vzťahu (3.10) a dosadením do neho sa získa výsledná rozšírená neistota merania, ktorá má hodnotu (zaokrúhlenú na štyri desatinné miesta):

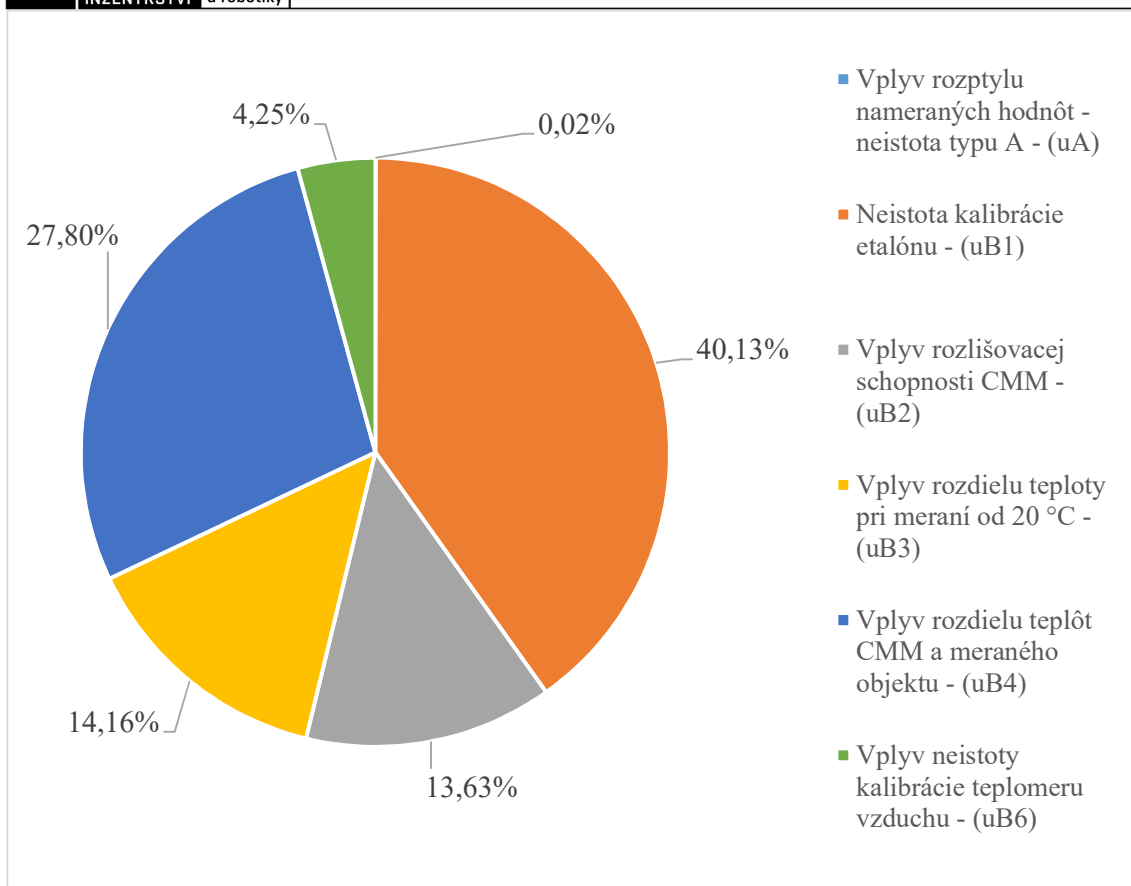
$$U = k \cdot u_C,$$
$$U = 2 \cdot 1,118362009 = 2,236724017 \doteq 2,2367\text{ }\mu\text{m}.$$

Výsledná neistota pri meraní dĺžky ($L = 600\text{ mm}$) skleneného pravítka pomocou CMM Micro-Vu Excel 4520 má hodnotu $2,2367\text{ }\mu\text{m}$.

Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_C

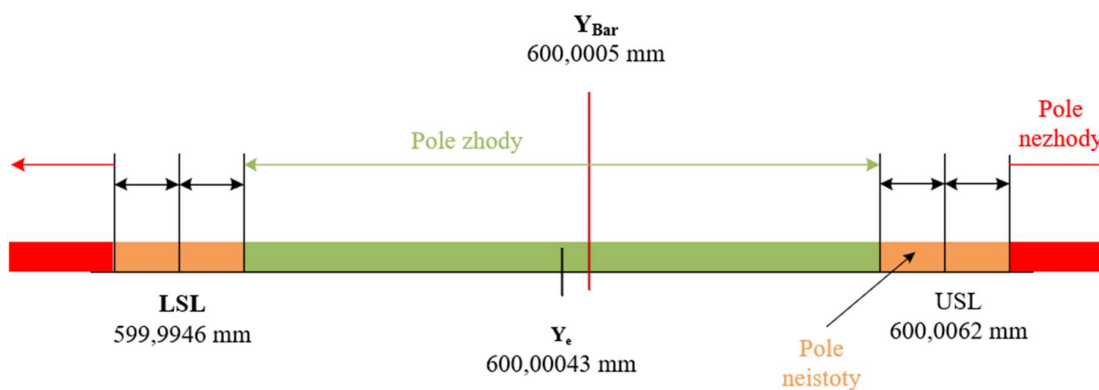
Pre lepšie znázornenie, bol vytvorený koláčový graf v programe Microsoft Excel, ktorý zobrazuje vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov ku kombinovanej neistote merania (u_C).

Z uvedeného koláčového grafu (obr. 48) je zrejmé, že najväčší percentuálny príspevok ku kombinovanej neistote (u_C) má neistota kalibrácie etalónu (u_{B1}), ktorá predstavuje $40,13\%$ z celkovej hodnoty neistoty u_C . Najmenší, takmer zanedbateľný príspevok predstavuje vplyv rozptylu nameraných hodnôt, čiže neistota typu A (u_A), ktorá má hodnotu $0,02\%$, čo značí, že kalibračné meranie bolo veľmi presné.



Obr. 48: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]

Vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14 253-1:2014



Obr. 49: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]

Na základe uvedeného grafického zobrazenia (obr. 49), je možné rozhodnúť, že pre meranú dĺžku skleneného pravítka ($L=600$ mm) v osi X je nameraná hodnota Y_{Bar} v zhode so špecifikáciou, ktorá je daná hodnotou najväčšej dovolenej chyby (MPE) udávanou výrobcom meracieho stroja. Na základe tejto zhody je možné prehlásiť, že súradnicový merací stroj, ktorým bolo vykonané kalibračné meranie, je ku tomuto meraniu spôsobilý.

8.2.2 Laserový interferometer

Ako ďalšiu si určíme neistotu merania s využitím laserového interferometra ako etalónu pre kalibráciu s využitím optického snímania CMM Micro-Vu Excel 4520. Ako príklad výpočtu neistoty je uvedený výpočet pre meranie v ose X a vo vzdialenosti 600 mm. Každé meranie v prípade laserového interferometra prebiehalo 6 krát a namerané hodnoty sú v tab. 8.2. Výpočty prebiehali podobným spôsobom ako pre sklenené pravítka (kap. 8.2.1).

8.2 Namerané hodnoty – laserový interferometer – 600 mm – os X

<i>n</i>	Namerané hodnoty [mm]
1	600,0001
2	599,9999
3	599,9999
4	600,0001
5	600,0003
6	600,0001

Vplyv rozptylu nameraných hodnôt – neistota typu A (u_A)

Pri výpočte neistoty typu A (u_A) bol ako prvý vypočítaný aritmetický priemer podľa vzťahu (3.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{6} \cdot (600,0001 + \dots + 600,0001) = 600,000067 \text{ mm.}$$

Výsledná neistota typu A sa vyráta podľa vzťahu (3.6), v ktorom je zahrnutý aj vzťah (3.5). Koeficient rozšírenia pre šesť meraní nadobúda hodnotu $k_s = 2,65$.

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{y}},$$

$$u_A = k \cdot s(\bar{y}) = 2,65 \cdot \sqrt{\frac{(600,0001 - 600,000067)^2 + \dots + (600,0001 - 600,000067)^2}{6 \cdot (6 - 1)}},$$

$$u_A = 0,000162879 \text{ } \mu\text{m.}$$

Vplyv použitého etalónu (u_{B1})

Neistotu kalibrácie etalónu (laserového interferometra) je možné nájsť v jeho kalibračnom liste (príloha P). Hodnota tejto neistoty pre dĺžku 600 mm je $U_E = 0,072 \text{ } \mu\text{m}$. Následne sa táto hodnota dosadí do vzorca pre výpočet neistoty použitého etalónu (8.2), kde uvažujeme koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,072}{2} = 0,036 \text{ } \mu\text{m.}$$

Vplyv rozlišovacej schopnosti meracieho stroja (u_{B2})

Z technických údajov udávaných výrobcom Micro-Vu sme použili uvedenú rozlišovaciu schopnosť meracieho stroja, a to konkrétne $0,5 \text{ } \mu\text{m}$. Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie, ktoré nadobúda hodnotu $\chi = \sqrt{3}$ a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Výsledná neistota sa stanoví podľa vzťahu (8.3) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,288675135 \text{ } \mu\text{m.}$$

Vplyv rozdielu teploty pri meraní od 20 °C (u_{B3})

Teplota v kalibračnom laboratóriu bola počas merania bola približne 20,5 °C, čo predstavuje 0,5 °C rozdiel (Δt_{20}) oproti požadovanej hodnote teploty 20 °C. Koeficient teplotnej rozťažnosti CMM má hodnotu $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,7 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) a koeficient teplotnej rozťažnosti laserového interferometra má udávanú hodnotu $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,7 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). Z toho vyplýva výsledný rozdiel $\Delta\alpha$ predstavuje $0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $0 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie ($\chi = \sqrt{3}$) a pre meranú dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$ je výsledná neistota daná vzťahom (8.4) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B3} = \frac{0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,600 = 0 \mu\text{m}.$$

Ako je zrejmé z uvedeného výsledku neistoty u_{B3} , nakoľko rozdiel koeficientov teplotnej rozťažnosti CMM a použitého interferometra je rovný $0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, tak výsledný vplyv rozdielu teploty pri meraní od 20 °C je rovný $0 \mu\text{m}$ a zanedbávame ho.

Vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4})

Nakoľko CMM a meraný objekt (laserový interferometer) boli spoločne v kalibračnom laboratóriu a u interferometer disponuje kompenzátorom s teplotnými snímačmi, predpokladáme veľmi malý teplotný rozdiel. Rozdiel teplôt medzi CMM a meraným objektom má hodnotu $\Delta t = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotný koeficient laserového interferometra má udávanú hodnotu $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,7 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

Pri výpočte predpokladáme rovnomerné rozdelenie ($\chi = \sqrt{3}$), a pre dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$ sa výsledná neistota určí vzťahom (8.5), kde nadobúda hodnotu:

$$u_{B4} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot 11,7 \cdot 0,600 = 0,810599778 \mu\text{m}.$$

Vplyv neistoty kalibrácie dotyku (u_{B5})

Nakoľko meranie prebiehalo pomocou optického snímania CMM, tak sa táto zložka neistoty do výpočtu nezahrnula.

Vplyv neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu (u_{B6})

Pre výpočet tejto neistoty sa použije vzťah (8.7). Hodnota neistoty teplomeru sa dosadí z jeho kalibračného listu a má hodnotu $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ pre teplotu okolia 20 °C. Koeficient rozšírenia uvažujeme $k = 2$ a meranú dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$. Výsledná neistota nadobúda hodnotu:

$$u_{B6} = \frac{0,3}{2} \cdot 0,600 = 0,09 \mu\text{m}.$$

Neistota typu B (u_B)

Výsledná neistota typu B sa spočíta dosadením do vzťahu (3.7):

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B4}^2 + u_{B6}^2},$$

$$u_B = \sqrt{0,036^2 + 0,288675135^2 + 0,810599778^2 + 0,09^2} = 0,865910696 \mu\text{m}.$$

Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota (u_C) sa vypočíta pomocou vzťahu (3.9). Jej zložkami sú neistota typu A (u_A) a neistota typu B (u_B).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2},$$

$$u_c = \sqrt{0,000162879^2 + 0,865910696^2} = 0,865910711 \mu m,$$

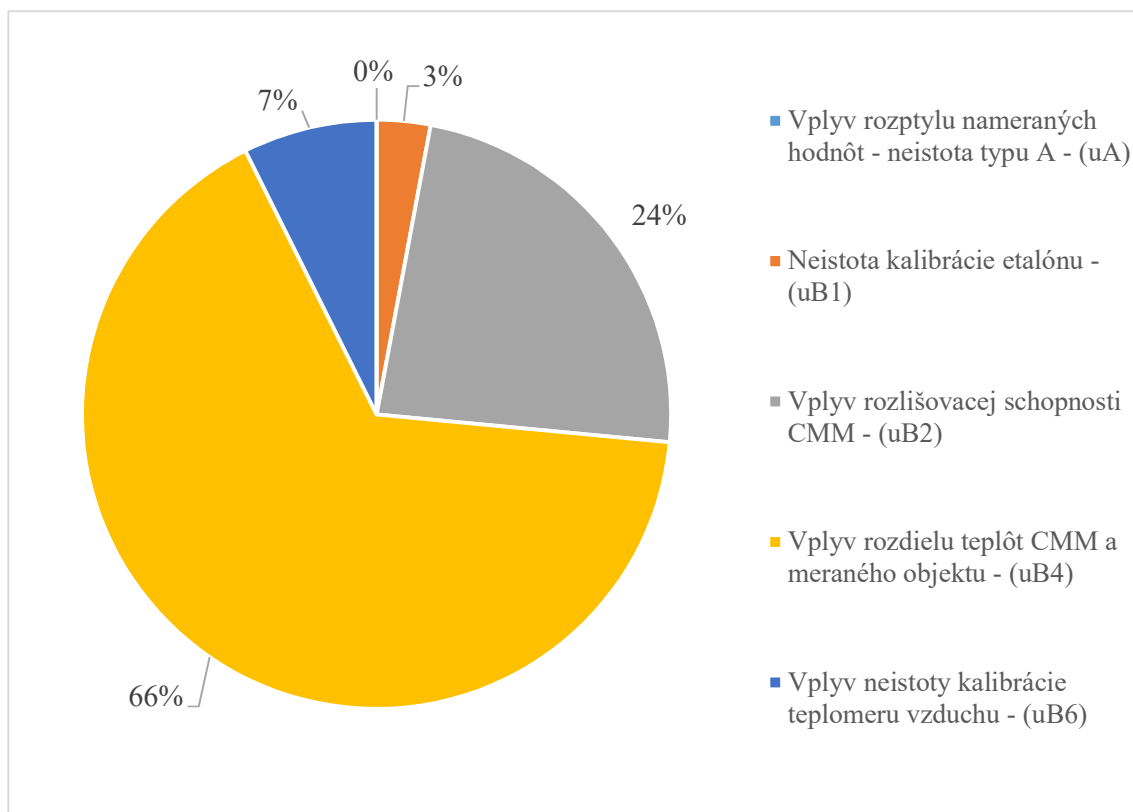
Ďalším a zároveň posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty (U). Pri výpočte sa uvažuje koeficient rozšírenia $k = 2$. S využitím vzťahu (3.10) a dosadením do neho sa získa výsledná rozšírená neistota merania, ktorá má hodnotu (zaokrúhlenú na štyri desatinné miesta):

$$U = k \cdot u_c,$$

$$U = 2 \cdot 0,865910711 = 1,731821423 \doteq 1,7318 \mu m.$$

Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c

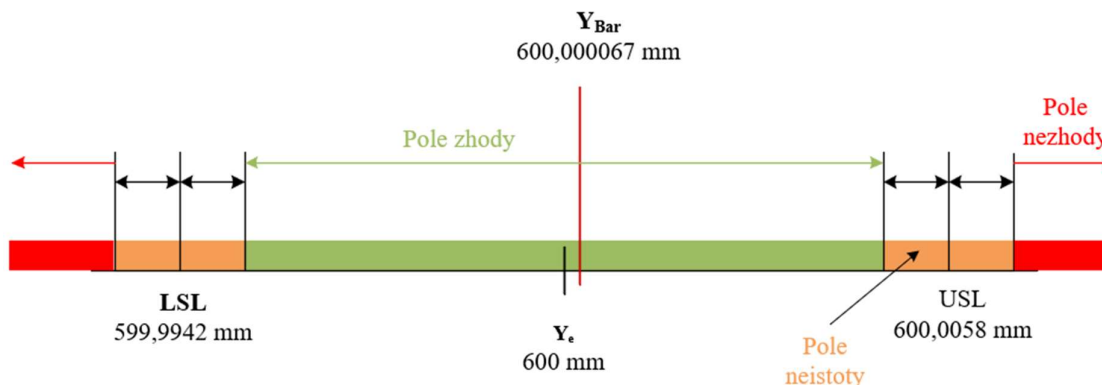
Je zjavné, že najväčší percentuálny príspevok ku kombinovanej neistote (u_c) má vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4}), a to až 66 % z celkovej hodnoty neistoty u_c . Najmenší, takmer zanedbateľný príspevok predstavuje vplyv rozptylu nameraných hodnôt, čiže neistota typu A (u_A), ktorej príspevok je možné zanedbať, nakoľko ho aj počítačový program Microsoft Excel vyhodnotil ako 0% (pozn. desatinná hodnota je tak malá, že ju celkom zanedbáva, avšak vo výslednom diagrame zobrazí v podobe hodnoty 0%). Je to spôsobené najmä tým, že sa meranie vykonávalo v špecializovanom kalibračnom laboratóriu a pod vedením skúseného metrológa, čím nedošlo k veľkému rozptylu nameraných hodnôt.



Obr. 50: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]

Vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14 253-1:2014

Na základe uvedeného grafického zobrazenia (obr. 51), je možné rozhodnúť, že pre meranú dĺžku laserového interferometra ($L=600$ mm) v osi X je nameraná hodnota Y_{Bar} v zhode so špecifikáciou, ktorá je daná hodnotou najväčšej dovolenej chyby (MPE) udávanou výrobcom meracieho stroja. Na základe tejto zhody je možné prehlásiť, že súradnicový merací stroj, ktorým bolo vykonané meranie, je ku tomuto meraniu spôsobilý.



Obr. 51: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]

8.2.3 Koncové oceľové mierky

V tejto podkapitole si pre porovnanie určíme neistotu merania koncových mierok. Toto kalibračné meranie sa od predchádzajúcich líši tým, že meranie prebehlo za použitia dotykového snímania meracieho stroja Micro-Vu. Pre ukážku výpočtu neistoty bola zvolená najdlhšia koncová mierka ($L=600$ mm), meranie prebehlo v ose X a bolo zopakované trikrát.

8.3 Namerané hodnoty - koncové oceľové mierky - 600 mm - os X

n	Namerané hodnoty [mm]
1	600,0001
2	599,9994
3	599,9995

Vplyv rozptylu nameraných hodnôt – neistota typu A (u_A)

Pri výpočte neistoty typu A (u_A) bol ako prvý vypočítaný aritmetický priemer podľa vzťahu (3.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{3} \cdot (600,0001 + 599,9994 + 599,9995),$$

$$\bar{y} = 599,999667 \text{ mm.}$$

Výsledná neistota typu A sa vyráta podľa vzťahu (3.6), v ktorom je zahrnutý aj vzťah (3.5). Koeficient rozšírenia pre šesť meraní nadobúda hodnotu $k_s = 4,53$.

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{y}},$$

$$u_A = k_s \cdot s(\bar{y}) = 4,53 \cdot \sqrt{\frac{(600,0001 - 599,999667)^2 + \dots + (599,9995 - 599,999667)^2}{3 \cdot (3 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,000990173 \mu\text{m.}$$

Vplyv použitého etalónu (u_{B1})

Neistotu kalibrácie etalónu (koncovej mierky) je možné nájsť v jeho kalibračnom liste (príloha T). Hodnota tejto neistoty pre dĺžku 600 mm je $U_E = 0,096 \mu\text{m}$. Následne sa táto

hodnota dosadí do vzorca pre výpočet neistoty použitého etalónu (8.2), kde uvažujeme koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,096}{2} = 0,048 \mu m.$$

Vplyv rozlišovacej schopnosti meracieho stroja (u_{B2})

Z technických údajov udávaných výrobcom Micro-Vu sme použili uvedenú rozlišovaciu schopnosť meracieho stroja, a to konkrétne $0,5 \mu m$. Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie, ktoré nadobúda hodnotu $\chi = \sqrt{3}$ a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Výsledná neistota sa stanoví podľa vzťahu (8.3) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,288675135 \mu m.$$

Vplyv rozdielu teploty pri meraní od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (u_{B3})

Teplota v kalibračnom laboratóriu bola počas merania bola približne $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$, čo predstavuje $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ rozdiel (Δt_{20}) oproti požadovanej hodnote teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Koeficient teplotnej rozťažnosti CMM má hodnotu $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $12 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) a koeficient teplotnej rozťažnosti ocelevej koncovej mierky má udávanú hodnotu $11,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,4 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Z toho vyplýva výsledný rozdiel $\Delta \alpha$ predstavuje $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $0,3 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie ($\chi = \sqrt{3}$) a pre meranú dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$ je výsledná neistota daná vzťahom (8.4) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B3} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,600 = 0,03 \mu m.$$

Vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4})

Nakoľko CMM a meraný objekt (koncová mierka) boli spoločne v kalibračnom laboratóriu a u etalónov prebehlo temperovanie teploty, predpokladáme veľmi malý teplotný rozdiel. Rozdiel teplôt medzi CMM a meraným objektom má hodnotu $\Delta t = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotný koeficient ocelevej koncovej mierky má udávanú hodnotu $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,7 \mu m \cdot m^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Pri výpočte predpokladáme rovnomerné rozdelenie ($\chi = \sqrt{3}$), a pre dĺžku $L = 0,600 \text{ m}$ sa výsledná neistota určí vzťahom (8.5), kde nadobúda hodnotu:

$$u_{B4} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot 11,7 \cdot 0,600 = 0,810599778 \mu m.$$

Vplyv neistoty kalibrácie dotyku (u_{B5})

Pred začatím merania pomocou dotykového snímania, prebehne na CMM tzv. automatická samo kalibrácia dotykového snímania, a to pomocou ocelevej gule o priemere 20 mm . Preto je nutné neistotu kalibrácie dotyku zahrnúť v celkovom výpočte. Do vzorca z jej kalibračného listu dosadíme priemer gule prevedený na metre a získame hodnotu jej neistoty (U_G). Hodnota neistoty je $U_G = 0,6 \mu m$. Pri výpočte uvažujeme koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Výsledná neistota sa spočíta po dosadení do vzťahu (8.6) a má hodnotu:

$$u_{B5} = 1 \cdot \frac{0,6}{2} = 0,3 \mu m.$$

Vplyv neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu (u_{B6})

Pre výpočet tejto neistoty sa použije vzťah (8.7). Hodnota neistoty teplomeru sa dosadí z jeho kalibračného listu a má hodnotu $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre teplotu okolia $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koeficient rozšírenia uvažujeme $k = 2$ a meranú dĺžku $L = 0,600\text{ m}$. Výsledná neistota nadobúda hodnotu:

$$u_{B6} = \frac{0,3}{2} \cdot 0,600 = 0,09\text{ }\mu\text{m}.$$

Neistota typu B (u_B)

Výsledná neistota typu B sa spočíta dosadením do vzťahu (3.7):

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2},$$

$$u_B = \sqrt{0,048^2 + 0,288675135^2 + 0,03^2 + 0,810599778^2 + 0,3^2 + 0,09^2},$$

$$u_B = 0,917447183\text{ }\mu\text{m}.$$

Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota (u_C) sa vypočíta pomocou vzťahu (3.9). Jej zložkami sú neistota typu A (u_A) a neistota typu B (u_B).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,000990173^2 + 0,917447183^2} = 0,917447717\text{ }\mu\text{m}.$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty (U). Pri výpočte sa uvažuje koeficient rozšírenia $k = 2$, čím sa definuje interval okolo výsledku merania v ktorom sa predpokladá výsledok merania so spoľahlivosťou $95,45\%$. S využitím vzťahu (3.10) a dosadením do neho sa získa výsledná rozšírená neistota merania, ktorá má hodnotu (zaokrúhlenú na štyri desatinné miesta):

$$U = k \cdot u_C,$$

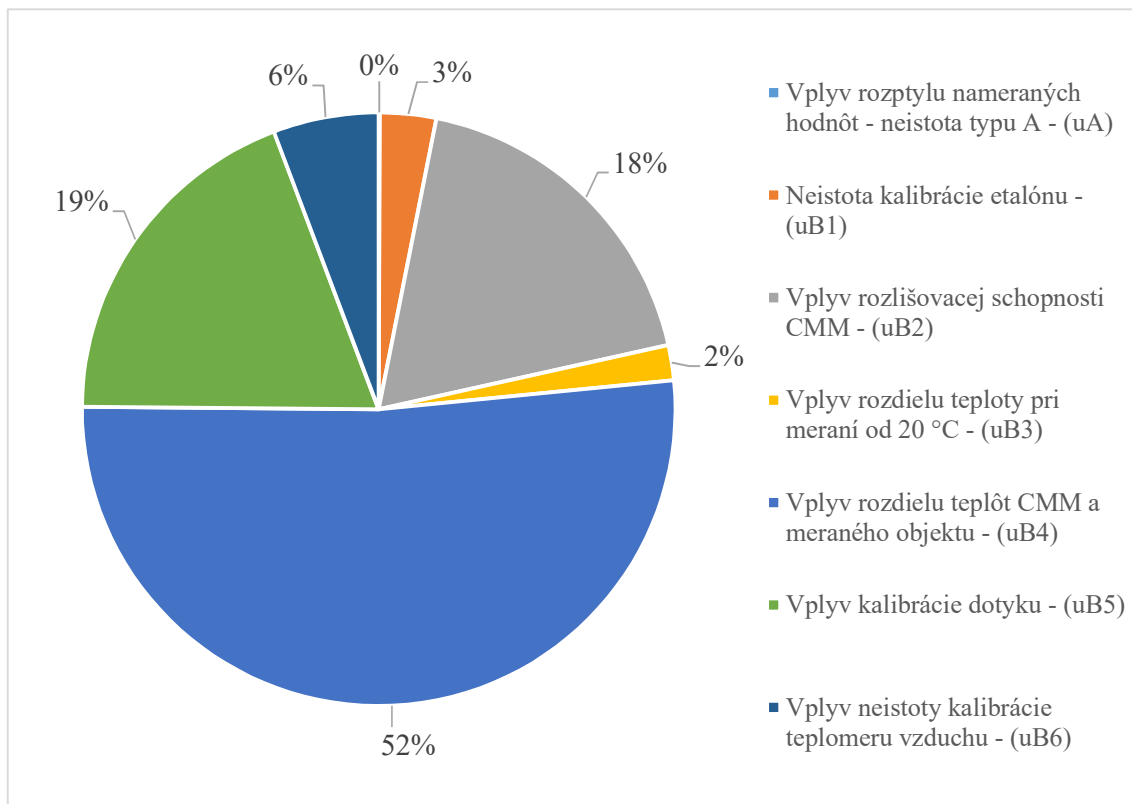
$$U = 2 \cdot 0,917447717 = 1,834895434 \doteq 1,8349\text{ }\mu\text{m}.$$

Výsledná neistota pri meraní dĺžky ($L = 600\text{ mm}$) oceľovej koncovkej mierky v smere osi X pomocou CMM Micro-Vu Excel 4520 má hodnotu $1,8349\text{ }\mu\text{m}$.

Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_C

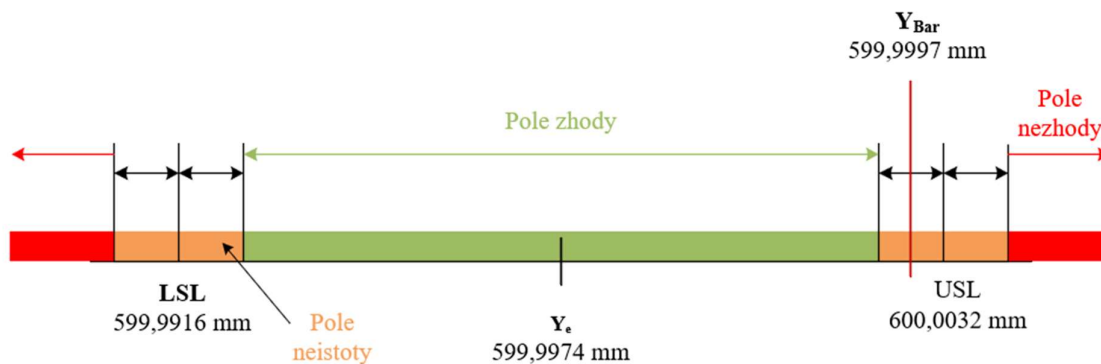
Ako pri predchádzajúcich príkladoch výpočtu neistoty merania, tak aj v tomto bolo pre lepšie znázornenie vytvorený koláčový graf (obr. 52) v programe Microsoft Excel, ktorý zobrazuje vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov ku kombinovanej neistote merania (u_C).

Najväčší vplyv na výslednú neistotu má vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu (u_{B4}), a to až 52% . Naopak najmenší vplyv predstavuje neistota typu A, ktorej percentuálny príspevok, rovnako ako u výpočtu neistoty laserového interferometra pre dĺžku $L = 600\text{ mm}$, je možné zanedbať, nakoľko ju aj počítačový program Microsoft Excel vyhodnotil ako 0% .



Obr. 52: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]

Vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14 253-1:2014



Obr. 53: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]

Tak ako u predchádzajúcich príkladov, tak aj u merania koncových oceľových mierok sa spravilo vyhodnotenie podľa normy ČSN EN ISO 14 253-1:2014. Na základe uvedeného grafického zobrazenia (obr. 53), je možné rozhodnúť, že pre prípade meranej dĺžky oceľovej koncovkej mierky ($L=600$ mm) v osi X sa nameraná hodnota Y_{Bar} sa nachádza v poli neistoty. Tým môžeme konštatovať, že nameraný rozmer ($L=600$ mm) nie je v zhode so špecifikáciou a budú musieť byť vytvorené nápravné opatrenia na súradnicovom meracom stroji (viď záver a zhodnotenie).

8.2.4 Nastavovací ocelový krúžok – kruhovitosť

Ako posledný bol pre kalibráciu zvolený nastavovací krúžok Tesa o priemere 175 mm. V nasledovnej podkapitole je uvedená ukážka pre výpočet neistoty z nameraných hodnôt kruhovitosti. Meranie bolo zopakované trikrát.

8.4 Namerané hodnoty - nastavovací ocelový krúžok Tesa - RonT

<i>n</i>	Namerané hodnoty RonT [mm]
1	0,0025
2	0,0020
3	0,0015

Vplyv rozptylu nameraných hodnôt – neistota typu A (u_A)

Pri výpočte neistoty typu A (u_A) bol ako prvý vypočítaný aritmetický priemer podľa vzťahu (3.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{3} \cdot (0,0025 + 0,0020 + 0,0015),$$

$$\bar{y} = 0,002667 \text{ mm.}$$

Výsledná neistota typu A sa vyráta podľa vzťahu (3.6), v ktorom je zahrnutý aj vzťah (3.5). Koeficient rozšírenia pre šesť meraní nadobúda hodnotu $k_s = 4,53$.

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{y}},$$

$$u_A = k_s \cdot s(\bar{y}) = 4,53 \cdot \sqrt{\frac{(0,0025 - 0,002667)^2 + \dots + (0,0015 - 0,002667)^2}{3 \cdot (3 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,000755 \mu\text{m.}$$

Vplyv použitého etalónu (u_{B1})

Neistotu kalibrácie etalónu (nastavovacieho krúžku Tesa) je možné nájsť v jeho kalibračnom liste (príloha V). Hodnota tejto neistoty pre krúžok o priemere 175 mm je $U_E = 0,1108 \mu\text{m}$. Následne sa táto hodnota dosadí do vzorca pre výpočet neistoty použitého etalónu (8.2), kde uvažujeme koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,1108}{2} = 0,0554 \mu\text{m.}$$

Vplyv rozlišovacej schopnosti meracieho stroja (u_{B2})

Z technických údajov udávaných výrobcou Micro-Vu sme použili uvedenú rozlišovaciu schopnosť meracieho stroja, a to konkrétne $0,5 \mu\text{m}$. Pri výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie, ktoré nadobúda hodnotu $\chi = \sqrt{3}$ a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Výsledná neistota sa stanoví podľa vzťahu (8.3) a nadobúda hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,288675135 \mu\text{m.}$$

Vplyv neistoty kalibrácie dotyku (u_{B5})

Pred začatím merania pomocou dotykového snímania, prebehne na stroji tzv. automatická samo kalibrácia dotykového snímania, a to pomocou ocelevej gule o priemere 20 mm.

Do vzorca, získaného z jej kalibračného listu, dosadíme a získame hodnotu jej neistoty (U_G) pre výpočet vplyvu neistoty kalibrácie dotyku. Pri výpočte uvažujeme koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Výsledná neistota sa spočíta po dosadení do vzťahu (8.6) a má hodnotu:

$$u_{B5} = 1 \cdot \frac{0,1017}{2} = 0,05085 \mu m.$$

Vplyv neistôt u_{B3} , u_{B4} a u_{B6}

Pri výpočte neistoty pri meraní kruhovitosti sme neuvažovali vplyv rozdielu teploty od 20 °C, vplyv rozdielu teplôt CMM a meraného objektu a vplyv kalibrácie teplomeru vzduchu, a to z dôvodu, že pri meraní kruhovitosti nemá teplota na ňu vplyv.

Neistota typu B (u_B)

Výsledná neistota typu B sa spočíta dosadením do vzťahu (3.7):

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B5}^2},$$

$$u_B = \sqrt{0,0554^2 + 0,288675135^2 + 0,05085^2},$$

$$u_B = 0,298308927 \mu m.$$

Stanovenie kombinovanej a rozšírenej neistoty merania

Kombinovaná neistota (u_C) sa vypočíta pomocou vzťahu (3.9). Jej zložkami sú neistota typu A (u_A) a neistota typu B (u_B).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,000755^2 + 0,298308927^2} = 0,298309882 \mu m.$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty (U). Pri výpočte sa uvažuje koeficient rozšírenia $k = 2$, čím sa definuje interval okolo výsledku merania v ktorom sa predpokladá výsledok merania so spoľahlivosťou 95,45 %. S využitím vzťahu (3.10) a dosadením do neho sa získa výsledná rozšírená neistota merania, ktorá má hodnotu (zaokrúhlenú na štyri desatinné miesta):

$$U = k \cdot u_C,$$

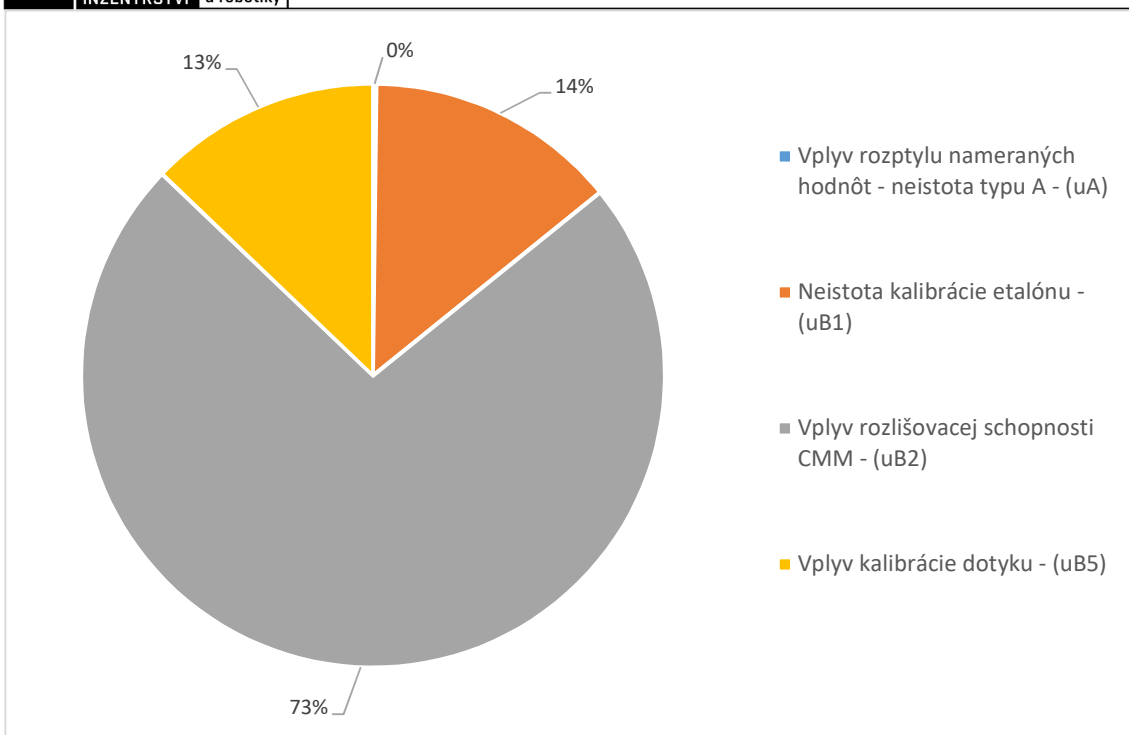
$$U = 2 \cdot 0,298309882 = 0,596619765 \doteq 0,5966 \mu m.$$

Výsledná neistota pri meraní kruhovitosti oceľového nastavovacieho krúžku pomocou dotykového snímania CMM Micro-Vu Excel 4520 má hodnotu 0,5966 μm .

Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_C

Ako u predchádzajúcich príkladoch výpočtu neistoty merania, tak aj v tomto bolo pre lepšie znázornenie vytvorený koláčový graf (obr. 54) v programe Microsoft Excel, ktorý zobrazuje vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov ku kombinovanej neistote merania (u_C).

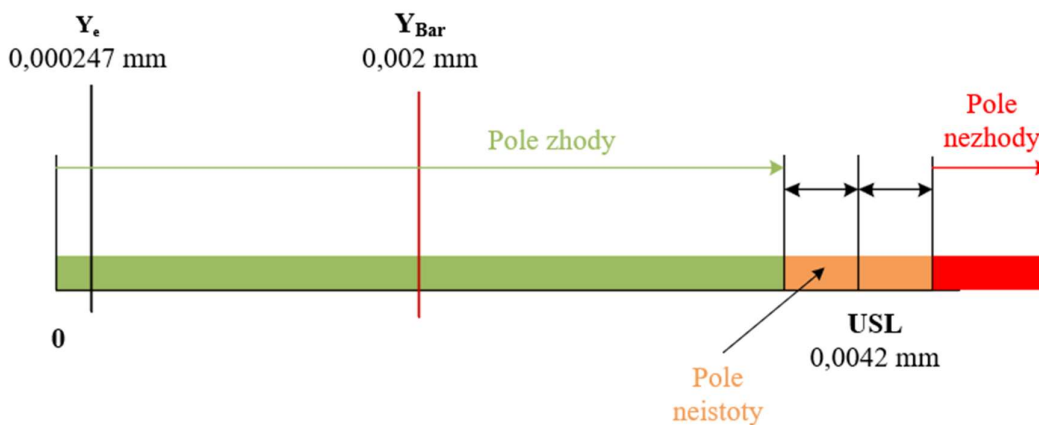
Najväčší percentuálny príspevok k neistote u_C má vplyv rozlišovacej schopnosti CMM (u_{B3}), a to až 73 %. Naopak najmenší vplyv predstavuje neistota typu A, ktorej percentuálny príspevok, rovnako ako u výpočtu neistoty laserového interferometra alebo oceľových koncových mierok, je možné pre meranie kruhovitosti nastavovacieho krúžku TESA zanedbať, nakoľko ju aj počítačový program Microsoft Excel vyhodnotil ako 0%.



Obr. 54: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]

Vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14 253-1:2014

Na základe uvedeného grafického zobrazenia (obr. 55), je možné rozhodnúť, že pre meranú kruhovitosť ocelového nastavovacieho krúžku TESA je nameraná hodnota Y_{Bar} v zhode so špecifikáciou, ktorá je daná hodnotou najväčšej dovolenej chyby (MPE) udávanou výrobcom meracieho stroja. Na základe tejto zhody je možné prehlásiť, že súradnicový merací stroj, ktorým bolo vykonané meranie, je ku tomuto meraniu spôsobilý.



Obr. 55: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]

9 ZÁVER A ZHODNOTENIE

Táto diplomová práca sa zaoberala stanovením neistoty merania pri kalibrácii s vyhodnotením spôsobilosti súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel 4520, ktorý je majetkom pobočky Českého metrologického inštitútu v Brne.

Prvým cieľom tejto diplomovej práce bol popis súčasného stavu v oblasti kalibrácií súradnicových meracích strojov (CMM). Tento cieľ bol splnený v rámci tretej a štvrtej kapitoly. V tretej kapitole bola postupne vymedzená riešená problematika, popísané základné definície a terminológia súvisiaca s metrologiou a meraním. Taktiež v nej boli definované a popísané vzťahy na výpočet neistôt merania. Spolu s nimi táto kapitola prináša poznatky o štruktúre metrologického systému v Českej republike.

Štvrtá kapitola bola zameraná na popis súčasného stavu v oblasti merania pomocou súradnicových meracích strojov. Venuje sa základnej terminológii, tykajúcej sa súradnicových meraní. Približuje základný popis, prvky a funkcie súradnicových meracích strojov. Taktiež popisuje ich rozdelenie podľa normy ČSN EN ISO 10 360-1:2001 na štyri základné typy. Následne popisuje a zoznamuje čitateľa s procesom kalibrácie CMM. Koniec tejto kapitoly sa venuje jednotlivým metódam na stanovenie neistôt merania a jednotlivým vplyvom, ktoré majú vplyv na výsledné stanovenie neistôt. V podkapitole 4.9.2 bol spracovaný Ishikawov diagram, zaoberajúci sa jednotlivými vplyvmi na neistotu a výsledok merania.

Druhým cieľom diplomovej práce bola charakteristika použitého súradnicového meracieho stroja Excel 4520 od amerického výrobcu Micro-Vu. Tento cieľ bol spracovaný v piatej kapitole tejto diplomovej práce. Táto kapitola sa zaoberá charakteristikou používaného súradnicového meracieho stroja, popisuje jeho technické parametre v uvedených tabuľkách (5.1-5.4). Z hľadiska konštrukcie ho norma ČSN EN ISO 10 360-1:2001 zaradila medzi portálový merací stroj. V kapitole bol taktiež popísaný snímací systém, ktorý je reprezentovaný bezdotykovou optickou kamerou a dotykovou sondou od výrobcu Renishaw. Taktiež bolo popísané doplnkové vybavenie v podobe osvetlenia pre optickú kameru a stojana na vymeniteľné spínacie moduly dotykovej sondy. Pre účel kalibračných meraní bol použitý optický aj dotykový snímací systém súradnicového meracieho stroja. Následne boli výsledky spracované pomocou softvérového vybavenia, ktoré bolo zastúpené počítačovým softvérom InSpec.

Ďalším cieľom diplomovej práce bola voľba vhodných etalónov pre účel kalibrácie zvoleného CMM Micro-Vu Excel 4520, zvolenie vhodnej metodiky merania a vykonanie súboru experimentálnych meraní. Tieto ciele sú spracované v šiestej a siedmej kapitole. Ako vhodné etalóny pre kalibráciu bolo po vzájomnej konzultácii s vedúcim diplomovej práce zvolených niekoľko rôznych druhov etalónov. Pre kalibračné meranie s využitím optického snímacieho systému boli použité sklenené pravítka Mitutoyo a laserový interferometer Renishaw. Pre meranie etalónov ako oceľové koncové mierky a nastavovacie krúžky sa použilo dotykové snímacie vybavenie súradnicového meracieho stroja. Meranie sa vykonalo v osiach X, Y, Z a taktiež v uhlopriečkach XY, YX. Rozmer jednotlivých etalónov určených pre kalibráciu bol zvolený tak, aby bol počas meraní využitý maximálny merací rozsah CMM.

Proces kalibrácie prebehol v akreditovanom kalibračnom laboratóriu (akred. podľa normy ČSN EN ISO/IEC 17 025:2018) v budove ČMI v Brne podľa interného kalibračného postupu 815-MP-C501. Počet opakovaní merania sa líšil podľa druhu použitého etalónu. K nižšiemu počtu opakovaní merania sa pristúpilo po dohode s vedúcim diplomovej práce, a to najmä z dôvodu pracovno-časového vyťaženia laboratória.

Piaty cieľ diplomovej práce sa týkal identifikácie a kvantifikácie jednotlivých zložiek neistoty merania. Ako vhodný postup ku stanoveniu neistoty merania bola zvolená substitučná metóda. Celkovo sa identifikovalo šesť zdrojov neistôt, ktoré boli následne kvantifikované a vyhodnotené v súlade s dokumentom EA-4/02 M:2022. Pre účel ukážky výpočtov a postupu pri zisťovaní výslednej rozšírenej neistoty merania, boli pre každý použitý etalón zhotovené ukážkové výpočty neistoty merania pre najdlhšiu meranú vzdialenosť, spolu grafickou ukážkou (koláčové diagramy) vzájomného pomeru jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c a posúdením zhody so špecifikáciou a rozhodnutím o spôsobilosti CMM. Toto posúdenie bolo vykonané v súlade s normou ČSN EN ISO 14 253-1:2014, pričom pri rozhodovaní sa pristúpilo k započítaniu rozšírenej neistoty merania U .

Pri posúdení zhody so špecifikáciou a následným vyhodnotením spôsobilosti CMM, bolo s vedúcim diplomovej práce dohodnuté, že sa bude postupovať v súlade s normou ČSN EN ISO 14 253-1:2014 namiesto normy ČSN EN ISO 22 514-7:2014, keďže v prípade druhej spomínanej normy by sa počítalo s hodnotou MPE ako neistotou, čo by nemuselo viesť ku korektným záverom (hodnota MPE býva často samotnými výrobcami/predajcami upravovaná, respektíve zámerne vylepšovaná).

Zvyšné ciele diplomovej práce boli spracované v závere alebo boli zaradené ako súčasť príloh. Pre lepší prehľad nameraných hodnôt a vypočítaných neistôt, boli dáta spracované do tabuliek (viď príloha A-L). Každá tabuľka je určená pre jeden druh etalónu a meranie v jednej osi. Z vyhodnotených dát je možné konštatovať, že takmer všetky hodnoty namerané počas kalibrácie sa po vyhodnutí podľa ČSN EN ISO 14 253-1:2014 nachádzajú v poli zhody, z čoho je možné vyvodit' záver, že uvedené CMM Micro-Vu Excel 4520, s ktorým boli vykonané kalibračné merania, je spôsobilé. Len v dvoch prípadoch sa namerané hodnoty dostali do poľa neistoty, a to v prípade merania koncových mierok v osiach X a Z (príloha H a J) dotykovou snímacou sondou. Je nutné však podotknúť, že v obidvoch prípadoch sa jedná o maximálny možný rozmer, ktorý je príslušné CMM Micro-Vu Excel 4520 schopné odmerať. Ako prvé vhodné opatrenie je vhodné zamerať sa na zníženie najväčšieho vplyvu na výslednú neistotu, čo v týchto prípadoch, predstavuje vplyv rozdielu teplôt a meraného objektu (oceľovej koncovej mierky), a to viac ako 50 %. To je možné docieľiť, dlhším temperovaním etalónu na teplotu kalibračného laboratória a znížením času nevyhnutného na manipuláciu s etalónom. Taktiež možným riešením je postupovať podľa normy ČSN EN ISO 14 253-1:2018, čím by mohlo dôjsť ku zníženiu rozšírenej neistoty merania, čo by malo za následok zväčšenie, respektíve rozšírenie poľa zhody z dôvodu použitej inej hodnoty koeficientu rozšírenia k . V prípade, že by aj napriek problém pretrvával, bolo by vhodné pristúpiť k objednaníu autorizovaného servisu meracieho stroja, vďaka ktorému by bolo možné zaviesť korekcie do mapy softvéru a vykonať jej aktualizáciu.

Hlavným prínosom diplomovej práce je vytvorenie komplexnej štúdie neistoty merania pri kalibrácii súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Excel pre potreby kalibračného laboratória. Vďaka kalibračným meraniam širokého spektra rôznych etalónov a následným vyhodnotením nameraných dát je možné konštatovať, že daný súradnicový merací stroj je spôsobilý na meranie v rozsahu udávaným výrobcem.

Ako výstup tejto diplomovej práce bol vytvorený spoločný kalibračný list pre všetky etalóny (príloha M), ktorého súčasťou je tabuľka s uvedenou priemernou odchýlkou a neistotou merania pre konkrétnu menovitú hodnotu použitého etalónu a taktiež graf vyobrazujúci krivku priemernú odchýlku, krivky poľa neistoty a krivky maximálnej dovolenej chyby meracieho stroja (MPE).

Na záver je možné konštatovať, že došlo ku splneniu všetkých stanovených cieľov tejto diplomovej práce.

10 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] In praise of Lord Kelvin. online. *Physics world*. 2007, s. 1. Dostupné z: <https://physicsworld.com/a/in-praise-of-lord-kelvin/>. [cit. 2024-01-19].
- [2] MAS ROMAN, Jorge. Kalibrace: 6 věcí, které byste měli vědět. online. In: TRADEMEDIA INTERNATIONAL. Vše o průmyslu. 2022. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/udrzba-a-diagnostika/stroje-zarizeni-a-mechanika/kalibrace-6-veci-ktere-byste-meli-vedet.html>. [cit. 2024-05-21].
- [3] KENDER, Štefan. SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE. online. *Transfer inovácií*. 2013, roč. 2013, č. 26, s. 3. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/26-2013/pdf/233-235.pdf>. [cit. 2024-03-20].
- [4] TNI 01 0115. Mezinárodní metrologický slovník - *Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny* (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] Metrologia v skratke. 3. vydanie. Bratislava: Slovenská legálna metrologia n. o., 2014. ISBN 978-80-85342-35-2.
- [6] Metrologie v kostce. online. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem (ČMI), 2009. Dostupné z: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf. [cit. 2024-04-21].
- [7] Zákon č. 505/1990 Sb.: Zákon o metrologii. In: . 1990. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505?citace=1#Top>.
- [8] POTANKO, Andrej. Stanovení nejistoty měření souřadnicového měřicího stroje v nanometrologii. Diplomová práce, vedoucí Jan Šrámek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/140257>.
- [9] ŠRÁMEK, Jan. STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ V NANOMETROLOGII. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019.
- [10] BOROVIČKA, Milan. Metrologia - meranie, poznanie a pochopenie. Prvé. Bratislava: Mediatex s. r. o., 2014. ISBN 978-80-971236-5-9.
- [11] ČMI. Jaký je rozdíl mezi kalibrací a ověřením?. online. In: ČMI. Český metrologický institut. 2024. Dostupné z: <https://cmi.cz/node/11>. [cit. 2024-04-19].
- [12] ČMI. Základní pojmy. online. In: ČMI. Český metrologický institut. 2024. Dostupné z: <https://cmi.cz/node/537>. [cit. 2024-04-19].
- [13] PETŘKOVSKÁ, Lenka a ČEPOVÁ, Lenka. Strojírenská metrologie: studijní opora "Strojírenská metrologie". První. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0.

- [14] ČEPOVÁ, Lenka a PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. První. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [15] ŠALIGA, Ján. Chyby a neistoty merania. online. In: Technická univerzita v Košiciach. 2024. *Dostupné z:* https://data.kemt.feit.tuke.sk/Meranie_BC/_materialy/Prednasky/Chyby%20a%20neistoty%20merania.pdf. [cit. 2024-04-14].
- [16] EA-4/02 M:2022. Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci. První. Praha: Český institut pro akreditaci, o.p.s., 2022.
- [17] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV. 4., přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM*, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [18] JANKOVÝCH, Robert. *Statistické nástroje v metrologii. 1.vydání. Vysoké učení technické v Brně*, 2024.
- [19] *Procesy měření a zkoušení: vhodnost, plánování a management*. 3., přepracované vydání. *Management kvality v automobilovém průmyslu*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2021. ISBN 978-80-02-02983-0.
- [20] HOCKEN, Robert a PEREIRA, Paulo (ed.). *Coordinate Measuring Machines and Systems. Second Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press*, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [21] A BRIEF HISTORY OF CMM TECHNOLOGY. online. In: STATUS. 2024. *Dostupné z:* <https://status-cmm.co.uk/new-used-cmms/a-brief-history-of-cmm-technology/>. [cit. 2024-03-20].
- [22] ČSN EN ISO 10 360-1. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): *Část 1: Slovník*. 1.vydání. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [23] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie. 1.vydání*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [24] NENÁHLO, Čeněk. Souřadnicová měřicí technika: Výroba a *technologie*. online. In: MM Průmyslové spektrum. 2011. *Dostupné z:* <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika>. [cit. 2024-03-20].
- [25] SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE. online. In: Katedra výrobních systémů a automatizace. 2024. *Dostupné z:* <https://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>. [cit. 2024-03-20].
- [26] OSTERSTOCK, Mark. Stylus Materials Get Lighter, Stiffer, and Harder: As measuring and probing systems have *evolved*, so have their stylus requirements. online. In: Quality magazine. 2015. *Dostupné z:* <https://www.qualitymag.com/articles/92645-stylus-materials-get-lighter-stiffer-and-harder>. [cit. 2024-03-29].
- [27] SKOPAL, Miroslav a FIALA, Alois. Kalibrace a přesnost měření. online. In: MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Průmyslové spektrum. 2011. *Dostupné z:* <https://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni>. [cit. 2024-04-05].

- [28] FABIAN, František a KLUIBER, Zdeněk. Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění. 1.vydání. Praha: Prospektrum, 1998. ISBN 80-717-5058-1.
- [29] ŚLADEK, Jerzy A. Coordinate metrology: accuracy of systems and measurements. Heidelberg: Springer, 2016. ISBN 978-3-662-48463-0.
- [30] ČSN EN ISO 14 253-2. Geometrické specifikace produktu (*GPS*) - Kontrola obrobků a měřicího vybavení měřením: Část 2: Návod pro odhad nejistoty měření v GPS, při kalibraci měřicího vybavení a při ověřování výrobku. 1.vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [31] DRBÚL, Mário; ŠAJGALÍK, Michal; ŠEMCER, Ján; CZÁNOVÁ, Tatiana; PETŘKOVSKÁ, Lenka et al. Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania. Prvé. Žilina: ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky, 2014. ISBN 978-0-8311-3465-5.
- [32] EXCEL AUTOMATED PRECISION MEASUREMENT SYSTEMS. online. In: Micro-Vu. 2024. Dostupné z: <https://www.microvu.com/machines/excel/models>. [cit. 2024-02-27].
- [33] LYSÝ, Zdeňek. Management kalibrace souřadnicového měřicího *stroje*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Petr Koška, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [34] VERTEX TECHNOLOGY CO. InSpec Metrology Software. online. In: V-Tech. 2024. Dostupné z: <https://www.v-tech.net/en-micro-vu-inspec/144.html>. [cit. 2024-02-28].
- [35] FULOVÁ, Silvia. STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ OPTICKÉHO MĚŘICÍ STROJE POMOCÍ LASERINTERFEROMETRU. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021.
- [36] RENISHAW PLC. PH6. online. In: RENISHAW PLC. Renishaw. 2024. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/ph6--7393>. [cit. 2024-03-07].
- [37] RENISHAW PLC. TP20. online. In: RENISHAW PLC. Renishaw. 2024. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/tp20--6670>. [cit. 2024-03-08].
- [38] Renishaw TP20 Probe Kit 1. online. In: RFM. 2024. Dostupné z: <https://renishawprobe.com/p/CMM/touch-probe-heads/TP20K1/A-1371-0290>. [cit. 2024-03-08].
- [39] RENISHAW. Brožura: Laserový systém XL-80 (pdf). online. In: . Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/brozuralaserovy-system-xl-80--15088?lang=cs>. [cit. 2024-04-22].
- [40] ČSN EN 60 825-1. Bezpečnost laserových zařízení - Část 1: Klasifikace zařízení, požadavky a pokyny pro používání. 1.vydání. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [41] Koncové mierky. online. In: Strojní svěráky. 2024. Dostupné z: <https://www.shop.strojniveraky.cz/sk/produkty/koncove-mierky>. [cit. 2024-04-24].
- [42] ČSN EN ISO 3650. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Etalony délek - Koncové měřky: Etalony délek - Koncové měřky. První. Praha: Český institut pro akreditaci, o.p.s., 2000.

- [43] MITUTOYO. Katalog měřících přístrojů 2011. online. In: Měřidla a nástroje. 2012. Dostupné z: <https://www.meridla-nastroje.cz/files/katalogy/Katalog-CZ16001.pdf>. [cit. 2024-04-23].
- [44] ČSN ISO 5725-2. Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 2: Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření. 1.vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [45] Coordinate measuring machine (CMM): An introduction, types, considerations and applications. online. In: WAHYUDIN, Syam. Wasy Research. 2022. Dostupné z: <https://www.wasyresearch.com/coordinate-measuring-machine-cmm-an-introduction-types-considerations-and-applications/>. [cit. 2024-03-18].
- [46] ŠRÁMEK, Jan. Fotogalerie: Laserinterferometr XL80 v akci. 1.vydání. 2011. Dostupné také z: <https://sramekmetrolog.webnode.cz/fotogalerie/#fotografie0018-jpg><https://sramekmetrolog.webnode.cz/fotogalerie/#fotografie0018-jpg>.
- [47] ČSN EN ISO 15 530-3. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Souřadnicové měřicí stroje (CMM): Metody určování nejistoty měření - část 3: Použití kalibrovaných *obrobků nebo etalonů*. 1.vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka	Význam
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CCD	Charged-coupled device
CMM	Coordinate Measuring Machine
ČIA	Český inštitút pre akreditáciu
ČMI	Český metrologický inštitút
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
EN	Európska norma
EÚ	Európska únia
EURAMET	Európska asociácia národných metrologických inštitútov
ISO	International Organization for Standardization
LSL	Lower Specification Limit
MPE	Maximum Permissible Error
MPO	Ministerstvo priemyslu a obchodu
NMS	Národný metrologický systém
OIML	Medzinárodná organizácia pre legálnu metrológiu
RONt	Roundness Total
SI	Système international d'unités
USL	Upper Specification Limit
ÚNMZ	Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo
VIM	Vocabulaire international de métrologie
WELMEC	Európska spolupráca v legálnej metrológii

Symbol	Význam
\varnothing	Priemer
α	Koeficient tepelnej rozťažnosti
α_A	Koeficient tepelnej rozťažnosti materiálu meraného objektu
μ	Stredná hodnota meranej veličiny
$\Delta\alpha$	Rozdiel koeficientu teplotnej rozťažnosti etalónu a CMM
Δ_s	Systematická chyba
Δt	Rozdiel teplôt medzi meraným objektom a strojom
Δt_{20}	Odchýlka teploty od 20 °C
χ	Koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti
a, b	Experimentálne určené koeficienty

c_j	Koeficient citlivosti
$^{\circ}C$	Stupeň Celzia
k	Koeficient rozšírenia
k_s	Koeficient rozšírenia podľa Studentovho rozdelenia pravdepodobnosti
L	Meraná dĺžka v metroch
m	Počet príspevkov neistoty vyhodnotenej spôsobom B
n	Celkový počet meraní veličiny
obr.	Obrázok
R	Rozpätie
R_{CMM}	Hodnota rozlíšiteľnosti daného CMM
$s(\bar{y})$	Výberová smerodajná odchýlka aritmetického priemeru
u_A	Štandardná neistota vyhodnotená spôsobom A
u_B	Štandardná neistota vyhodnotená spôsobom B
u_{B1}	Vplyv neistoty použitého etalónu
u_{B2}	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja
u_{B3}	Vplyv rozdielu teploty pri meraní od 20 °C
u_{B4}	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu
u_{B5}	Vplyv kalibrácie dotyku
u_{B6}	Vplyv neistoty kalibrácie teplomeru vzduchu
$u_{B(Z_j)}$	Neistota jednotlivých zdrojov
u_C	Kombinovaná štandardná neistota
U	Rozšírená neistota meranej veličiny
U_E	Neistota kalibrácie etalónu
V_{eff}	počet efektívnych stupňov voľnosti
V_i	počet stupňov voľnosti
\bar{y}	Odhad hodnoty vstupnej veličiny (aritmetický priemer)
y_i	i-tá hodnota meranej veličiny Y
y_{max}	Maximálna nameraná hodnota meranej veličiny
y_{min}	Minimálna nameraná hodnota meranej veličiny
Y	Hodnota vstupnej veličiny
Y_p	Konvenčná hodnota meranej veličiny

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1: Národný metrologický systém v ČR [6] [8].....	22
Obr. 2: Medzinárodné metrologické organizácie [5]	23
Obr. 3:Reťazec metrologickej nadväznosti [5]	25
Obr. 4: Princíp presného merania [8]	27
Obr. 5: Rozdelenie chýb merania [8]	28
Obr. 6: Metodický postup pre stanovenie neistoty [13]	30
Obr. 7: Úplný výsledok merania [19].....	32
Obr. 8: Prototyp CMM od firmy Ferranti [20].....	33
Obr. 9: Popis základných častí CMM [31]	35
Obr. 10: Typy CMM podľa schopnosti merania v jednotlivých osiach [14].....	37
Obr. 11: Stojanový (stĺpový) typ CMM [14]	37
Obr. 12: Výložníkový typ CMM [14]	38
Obr. 13: Portálový typ CMM [14].....	38
Obr. 14: Mostový typ CMM [14].....	39
Obr. 15: Meracie systémy CMM: a) [23].....	39
Obr. 16: Typy snímacích hláv [14]	40
Obr. 17: Rozmery snímacieho dotyku [14].....	41
Obr. 18: Typy meracích dotykov [14]	42
Obr. 19: Dotyky pre špeciálne účely [14].....	42
Obr. 20: Materiál guľôčky dotyku [14]	42
Obr. 21: Materiály drieku dotyku[14]	43
Obr. 22: Laserový snímací systém od firmy Hexagon [43].....	44
Obr. 23: Náhľad mapy korekcií portálového CMM [27]	45
Obr. 24: Kalibrácia portálového CMM pomocou koncových mierok [27]	46
Obr. 25: Kalibrácia CMM pomocou laserového interferometra [44].....	46
Obr. 26: Schéma metódy Monte Carlo [29].....	47
Obr. 27: Schéma substitučnej metódy [45].....	48
Obr. 28: Chyby vznikajúce pri meraní [14]	49
Obr. 29: Opotrebovanie guľôčky dotyku [14]	50
Obr. 30: Ishikawov diagram - vplyvy na neistotu a výsledok merania [19].....	51
Obr. 31: CMM Micro-Vu Excel 4520 [autor].....	53
Obr. 32: Uživatelské prostredie PC programu InSpec Vision [autor]	55
Obr. 33: Prstencové osvetlenie pre CMM Micro-Vu Excel 4520 [autor]	56
Obr. 34: Spínacia dotyková sonda Renishaw TP20 [37].....	57
Obr. 35: Zásobník pre výmenu spínacích modulov MCR20 [autor].....	58
Obr. 36: Systém laserového interferometra Renishaw XL-80 [39]	59
Obr. 37: Kompenzátor XC-80 a snímače [39]	60
Obr. 38: Sada ocelových koncových mierok Frank (125÷500) mm [autor]	61
Obr. 39: Sklenené pravítko Mitutoyo 750 [autor].....	62
Obr. 40: Nastavovacie krúžky SIP a Tesa [autor].....	63
Obr. 41: Teplomer Comet [autor].....	65
Obr. 42: Meranie skleneného pravítka [autor]	65
Obr. 43: Meranie s laserovým interferometrom [archív vedúceho diplomovej práce]	66
Obr. 44: Meranie koncových mierok [autor]	67
Obr. 45: Meranie nastavovacieho krúžku SIP [autor]	68

Obr. 46: Grubbsov test v programe Minitab [autor]	71
Obr. 47: Opakovaný Grubbsov test [autor]	72
Obr. 48: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]	75
Obr. 49: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]	75
Obr. 50: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]	78
Obr. 51: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]	79
Obr. 52: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]	82
Obr. 53: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]	82
Obr. 54: Vzájomný pomer jednotlivých hodnôt príspevkov k neistote u_c [autor]	85
Obr. 55: Grafické zobrazenie výsledku kalibrácie [autor]	85

ZOZNAM TABULIEK

3.1 Koeficienty rozšírenia k pre rôzny počet efektívnych stupňov voľnosti V_{eff}	31
5.1 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - os X Y	54
5.2 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - os Z	54
5.3 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - vybavenie	54
5.4 Technické parametre CMM Micro-Vu Excel 4520 - prevádzkové parametre	54
6.1 Technické parametre kompenzátora Renishaw XL-80 [39]	60
6.2 Technické parametre koncových mierok [KL – prílohy R, S, T]	61
6.3 Technické parametre skleneného pravítka Mitutoyo 500 [KL – príloha N]	62
6.4 Technické parametre skleneného pravítka Mitutoyo 750 [KL – príloha O]	62
6.5 Technické parametre nastavovacích krúžkov [KL – prílohy U, V]	63
8.1 Namerané hodnoty - sklenené pravítka - 600m - os X	72
8.2 Namerané hodnoty – laserový interferometer – 600 mm – os X	76
8.3 Namerané hodnoty - koncové oceľové mierky - 600 mm - os X	79
8.4 Namerané hodnoty - nastavovací oceľový krúžok Tesa - RonT	83