



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 SOUŘADNICOVÉHO MĚŘICÍHO STROJE V NANOMETROLOGII

DETERMINATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY OF A COORDINATE MEASURING MACHINE IN
NANOMETROLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Potanko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Andrej Potanko
Studijní program:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Šrámek, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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 souřadnicového měřicího stroje v nanometrologii

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zavedení velmi přesných CMM vybavených dotykovým snímacím systémem umožňuje provádění vysoce přesných délkových měření, které v minulosti vyžadovalo specializované vybavení a postupy. Úkolem je vytvoření návodů pro rychlé stanovení nejistoty měření pro CMM Zeiss UPMC Carat a SIOS NMM-1 v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Návod bude sloužit pro operátory CMM v praxi akreditované kalibrační laboratoře ČMI Brno.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu v oblasti přesného měření pomocí CMM v nanometrologii (rešerše).
Charakteristika přístrojů používaných pro měření.
Provedení souboru experimentálních měření.
Identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje.
Stanovení nejistoty měření přístroje.
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 4/02:2013. Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2)). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 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.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práca rieši problematiku stanovenia neistoty merania na súradnicových meracích strojoch v oblasti nanometrológie. Jedná sa o stroje SIOS NMM-1 a Zeiss UPMC 850 Carat, ktoré sa využívajú na pracovisku ČMI v Brne. V teoretickej časti je práca venovaná základnej terminológii v oblasti merania a obecnej charakteristike súradnicových meracích strojov. Teoretickú časť uzatvára popis prístrojov použitých k meraniu. V praktickej časti sú realizované experimentálne merania na oboch prístrojoch s následným identifikovaním a kvantifikovaním jednotlivých zložiek neistôt ovplyvňujúcich výsledok merania. Posledná časť práce je venovaná celkovému vyhodnoteniu merania na prístrojoch Zeiss a SIOS a ich metrologickému porovnaniu.

Kľúčové slová

Súradnicové meracie stroje, experimentálne meranie, neistota merania, SIOS NMM-1, Zeiss UPMC 850 Carat

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the determination of measurement uncertainty on coordinate measuring machines in the field of nanometrology. These are SIOS NMM-1 and Zeiss UPMC 850 Carat machines, which are used at the CMI workplace in Brno. In the theoretical part, the work is devoted to basic terminology in the field of measurement and general characteristics of coordinate measuring machines. The theoretical part concludes with a description of the devices used for measurement. In the practical part, experimental measurements are performed on both devices with subsequent identification and quantification of individual components of uncertainties affecting the measurement. The last part of the thesis is devoted to the overall evaluation of measurements on Zeiss and SIOS devices and their metrological comparison.

Keywords

Coordinate measuring machines, experimental measurement, uncertainty of measurement, SIOS NMM-1, Zeiss UPMC 850 Carat

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

POTANKO, Andrej. *Stanovení nejistoty měření souřadnicového měřicího stroje v nanometrologii*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140257>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.

PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu na tému *Stanovení nejistoty měření souřadnicového měřicího stroje v nanometrologii* som vypracoval samostatne, pod vedením Ing. Jana Šrámka, Ph.D., s použitím literatúry a podkladov uvedených v zozname použitých zdrojov.

15.máj 2022

.....
Potanko Andrej

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som sa chcel poďakovať vedúcemu práce Ing. Janovi Šrámkovi, Ph.D. za ochotu, čas a odborné vedenie pri písaní tejto práce. Vďaka patrí aj Ing. Petrovi Grolichovi z ČMI, ktorý mi pomáhal pri meraní.

Rovnako by som sa chcel veľmi poďakovať svojim rodičom Jánovi Potankovi a Magdaléne Potankovej za oporu, ktorou mi boli počas celého štúdia, za ich pomoc, obetu a rodičovskú lásku, ktorú mi prejavovali.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 VYMEDZENIE PROBLEMATIKY A POJMOV	11
1.1 Metrológia	11
1.2 Základné pojmy v oblasti metrológie.....	12
1.2.1 Terminológia v oblasti merania	12
1.2.2 Chyby merania	14
1.2.3 Neistoty merania	15
1.3 Metrologická nadväznosť.....	18
1.3.1 Národný metrologický systém v ČR.....	19
1.3.2 Medzinárodné inštitúcie v oblasti metrológie.....	20
2 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI PRESNÉHO MERANIA POMOCOU CMM V NANOMETROLÓGII	21
2.1 Konštrukčné typy CMM.....	21
2.2 Prvky súradnicového meracieho stroja	23
2.3 Snímacie systémy CMM	24
2.3.1 Dotykové snímacie systémy	25
2.3.2 Bezdotykové snímacie systémy	27
2.4 Kalibrácia CMM	28
2.5 Presnosť merania a zdroje neistôt	30
2.6 Obecné postupy k stanoveniu neistoty merania CMM	32
2.6.1 Substitučná metóda	32
2.6.2 Multipozičná metóda	33
2.6.3 Metóda Monte Carlo	33
2.7 Legislatíva a normy	33
2.7.1 ČSN EN ISO 10 360.....	33
2.7.2 ČSN EN ISO 17025:2018.....	34
3 CHARAKTERISTIKA PRÍSTROJOV POUŽÍVANÝCH PRE MERANIE.....	35
3.1 Špecifikácia prístroja SIOS NMM-1.....	35
3.2 Špecifikácia prístroja Zeiss UPMC 850 Carat	38
4 PREVEDENIE SÚBORU EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ.....	40
4.1 Rozbor meranej súčasti	40
4.2 Experimentálne meranie na prístroji Zeiss.....	40
4.3 Experimentálne meranie na prístroji SIOS.....	44
4.4 Porovnanie meraní.....	49
5 IDENTIFIKÁCIA A KVANTIFIKÁCIA JEDNOTLIVÝCH ZLOŽIEK NEISTOTY MERANIA PRÍSTROJOV	50
5.1 Identifikácia zdrojov neistôt.....	50
5.1.1 Vplyv rozptylu nameraných hodnôt, neistota typu A (u_A)	50
5.1.2 Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1})	50
5.1.3 Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2}).....	51
5.1.4 Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3}).....	51
5.1.5 Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4}).....	51

5.1.6	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5})	51
5.1.7	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6})	52
5.2	Kvantifikácia zdrojov neistôt SIOS.....	52
5.2.1	Vplyv rozptylu nameraných hodnôt (u_A).....	52
5.2.2	Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1})	52
5.2.3	Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2})	53
5.2.4	Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3}).....	53
5.2.5	Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4}).....	53
5.2.6	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5})	53
5.2.7	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6})	53
5.3	Kvantifikácia zdrojov neistôt Zeiss.....	54
5.3.1	Vplyv rozptylu nameraných hodnôt (u_A).....	54
5.3.2	Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1})	54
5.3.3	Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2})	54
5.3.4	Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3}).....	54
5.3.5	Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4}).....	55
5.3.6	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5})	55
5.3.7	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6})	55
6	STANOVENIE NEISTOTY MERANIA PRÍSTROJOV	56
6.1	Stanovenie neistoty merania pre prístroj SIOS	56
6.2	Stanovenie neistoty merania pre prístroj Zeiss	57
7	VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV	59
7.1	Návod pre výpočet neistoty	62
	ZÁVER A DOPORUČENIE PRE PRAX	63

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

ZOZNAM OBRÁZKOV

ZOZNAM TABULIEK

ZOZNAM PRÍLOH

ÚVOD

Vo všetkých odvetviach priemyslu môžeme vidieť neustály trend sofistikácie výrobkov a z toho vyplývajúcich zvyšujúcich sa požiadaviek na ich kvalitu, spoľahlivosť a bezpečnosť. Len takýto prístup neustáleho inovovania umožňuje spoločnostiam obstať v tvrdom konkurenčnom prostredí, čo im vytvára priestor pre udržateľný rast.

Aby mohli byť zabezpečené tieto náročné požiadavky na výrobky, je potrebné mať možnosť overiť, či sú tieto výrobky v súlade s požadovanou špecifikáciou. Tu zohráva svoju nezastupiteľnú úlohu metrológia, ktorá vstupuje do každej oblasti nášho života, aj keď si to častokrát ani plne neuvedomujeme. So zvyšujúcimi sa požiadavkami na výrobky a so samotným zvyšovaním presnosti výroby idú ruka v ruku aj zvyšujúce sa požiadavky na meracie prístroje, ktoré musia byť schopné kontrolovať rôzne druhy výrobkov s rôznou veľkosťou, v kusovej alebo sériovej výrobe. Je to neustály proces zdokonaľovania výrobkov na strane jednej a na strane druhej zdokonaľovania samotných meracích zariadení. Týmto sa vytvára veľký rozvoj v oblasti meracích zariadení, ktoré následne nachádzajú svoje uplatnenie v nových odboroch a nových aplikáciách.

Okrem požiadaviek, či už na bezpečnosť, životnosť alebo spoľahlivosť, sú vo výrobe aj ekonomické požiadavky, ktoré vytvárajú tlak na zrýchľovanie výrobných procesov, a to pri nižších nákladoch a kratšom čase uvedenia výrobku na trh. Výsledkom takéhoto tlaku je dopyt po automatizovaní výrobných procesov a neustáleho modernizovania a zavádzania nových technológií vo výrobe. Súčasťou takého inovovania je aj meranie.

Jedným zo spôsobov ako zefektívniť a inovovať procesy merania je využívanie súradnicových meracích strojov. Sú to zariadenia, ktoré sa používajú ku komplexnej kontrole súčastí alebo výrobkov a poskytujú relatívne moderný, efektívny a presný spôsob merania v metrológii. Ide o inovatívny spôsob merania, ktorý sa stále rozvíja. Ich rozmach nastal hlavne s rozvojom výpočtovej techniky a prepojením kontroly s výrobou, hlavne v sériových výrobách, ako je napríklad automobilový, letecký alebo elektrotechnický priemysel. Následne došlo k jeho ďalšiemu rozšíreniu do ostatných priemyselných odvetví, u ktorých sa vyžaduje vysoká presnosť merania.

Súradnicové meracie stroje sa zvyknú označovať aj skratkou CMM (Coordinate Measuring Machines). Meranie na CMM vychádza zo zmerania skutočného tvaru súčasti, následného porovnania so zadanou špecifikáciou a vyhodnotenia parametrov. V porovnaní s inými metódami jeho výhodou je rýchlosť merania a vyhodnocovania výsledkov, ktoré je možné ďalej elektronicky spracovávať a uchovávať. Tieto meracie stroje patria k najvýznamnejším oblastiam merania v strojárstve s možnosťou automatizácie merania a vyhodnocovania.

1 VYMEDZENIE PROBLEMATIKY A POJMOV

V roku 1799 bola v Paríži vytvorená pomocou uloženia dvoch platinových etalónov metra a kilogramu metrická sústava, ktorá je predchodkyňou dnešnej Medzinárodnej sústavy jednotiek (sústava SI). Z metrológie sa stala prirodzená súčasť našich životov, pričom len v dnešnej Európe predstavujú náklady na váženie a meranie približne 6 % celkového hrubého národného produktu [1].

Legislatíva v oblasti metrológie patrí k najstarším na svete, pretože definovanie jednotiek, ich fyzikálna realizácia a povinné používanie boli základným predpokladom pre rozvoj obchodu a výroby. Platilo to v minulosti a o to viac to platí aj dnes, v globalizovanom svete [2].

Metrológia je vedecko-technická disciplína, ktorá nachádza svoje nezastupiteľné miesto v každom vedeckom, výskumnom a priemyselnom odvetví. Môže ísť o strojársky priemysel, výrobu áut, strojov, lietadiel, elektrotechnický priemysel, fyzikálny výskum a iné. Systematické meranie so známou neistotou je jedným zo základov riadenia kvality v priemysle a vo väčšine moderného priemyslu predstavujú náklady spojené s meraním približne 10 až 15 % výrobných nákladov. Správne meranie však zvyšuje hodnotu, kvalitu a efektívnosť produkcie [1].

Význam jednotného a presného merania je medzinárodný, pretože okrem iného vedie k vzájomnému uznávaniu si výsledkov meraní a skúšok. V praxi to napríklad umožňuje kompletizáciu komponentov od rôznych subdodávateľov z rôznych častí sveta v jeden funkčný celok. Tým sa vytvára priestor pre medzinárodný obchod [3].

Typickými znakmi dnešnej metrológie je rozvoj meracej techniky a využívania metrológie v ďalších odvetviach, uplatňovanie elektroniky a výpočtovej techniky v meracích zariadeniach a rastúce využívanie dátových komunikácií, alebo realizácia etalónu základných jednotiek na základe kvantových javov a univerzálnych fyzikálnych konštánt [3].

1.1 Metrológia

Podľa Medzinárodného slovníka pre metrológiu VIM (Vocabulaire international de métrologie) môžeme metrológiu charakterizovať ako vedu o meraní a jej aplikácii [4], ktorá v sebe zahŕňa všetky teoretické a praktické aspekty merania, akékoľvek neistoty merania a odbory použitia [5].

Metrológia je veda o meraní, ktorá plní úlohy ako [1]:

- Definovanie jednotiek, ktoré sú medzinárodne uznávané.
- Realizácia jednotiek merania pomocou vedeckých metód.
- Vytváranie reťazcov nadväznosti cestou stanovenia a dokumentovania hodnoty presnosti a prenosu týchto údajov.

Metrológia sa ďalej člení do troch kategórií, ktoré majú rôzne stupne zložitosti a požiadavky na presnosť [1]:

- Vedecká metrológia, ktorá sa zaoberá organizáciou a vývojom etalónov a ich udrzovaním. Má najvyššie požiadavky na presnosť.
- Priemyslová metrológia, ktorá zaisťuje náležité fungovanie meradiel používaných v priemysle a v skúšobných a výrobných procesoch pre zabezpečenie kvality života obyvateľov a pre akademický výskum.
- Legálna metrológia, ktorá sa venuje správnosti merania tam, kde takéto merania majú vplyv na transparentnosť ekonomických transakcií obzvlášť tam, kde je predpísané overovanie meradiel.

1.2 Základné pojmy v oblasti metrológie

Pre lepšie pochopenie rozoberanej problematiky je vhodné uviesť základné pojmy a definície, ktoré súvisia s témou práce.

1.2.1 Terminológia v oblasti merania

Meradlá – sú zariadenia, ktoré sú používané k meraniu buď samostatne, alebo v spojení s jedným, prípadne viacerými zariadeniami [5]. Podľa zákona o metrológii sa ďalej delia na etalóny, pracovné meradlá stanovené, pracovné meradlá nestanovené a certifikované referenčné materiály a ostatné referenčné materiály pokiaľ sú určené k funkcii etalónu, alebo stanoveného prípadne pracovného meradla [6].

Etalón – za etalón meracej jednotky alebo stupnice určitej veličiny sa považuje meradlo slúžiace k realizácii a uchovávaní tejto jednotky, alebo stupnice a k jej prenosu na meradlá s nižšou presnosťou [6].

Uchovávanie etalónu – sa rozumie vykonanie všetkých úkonov potrebných k zachovaniu metrologických charakteristík etalónu v stanovených medziach [6].

Štátny etalón – je charakterizovaný ako etalón uznaný národným orgánom k využitiu v štáte pre prevod hodnoty veličiny na iné etalóny pre daný druh veličiny [7].

Pracovné meradlá stanovené – sú meradlá, ktoré musia byť povinne overené s ohľadom na ich význam pre ochranu správnosti obchodného styku, ochranu zdravia, životného prostredia, bezpečnosti práce a iných verejných záujmov [6]. Stanovené meradlá sú v Českej republike určované vyhláškou Ministerstva priemyslu a obchodu [8].

Pracovné meradlá nestanovené – sú meradlá, ktoré nie sú etalónom a ani stanoveným meradlom [6]. Predpokladá sa, že ich jednotnosť a správnosť bude zabezpečovaná kalibráciou či už prvotnou, ktorú spravidla vykonáva výrobca, alebo periodickou, ktorá je robená behom prevádzky [9].

Certifikované referenčné materiály a ostatné referenčné materiály – sú materiály alebo látky s presne stanoveným zložením alebo vlastnosťami. Používajú sa pre overovanie alebo kalibráciu prístrojov, vyhodnocovanie meracích metód a kvantitatívne určovanie vlastností materiálu [6].

Meranie – je proces, pri ktorom sa experimentálne získava jedna alebo viacero hodnôt veličiny, ktoré môžu byť dôvodne priradené veličine [5].

Opakovateľnosť merania – je definovaná ako precíznosť merania za sebou opakovateľnosti merania [5]. Čiže, ak má byť opakované meranie relevantné, musí byť robené za rovnakých podmienok ako predošlé merania. Musia byť použité rovnaké meracie zariadenia, v rovnakom prostredí, s tým istým pracovníkom, pri rovnakom postupe merania, na rovnakom objekte a v krátkom časovom úseku [10].

Reprodukovateľnosť merania – je uvádzaná ako precíznosť merania za podmienok reprodukovateľnosti merania [5]. Tieto podmienky zahrňujú rozdielne postupy merania za rôznych podmienok pri opakovateľných meraniach jedného objektu [10].

Presnosť merania – je charakterizovaná ako tesnosť zhody medzi nameranou hodnotou veličiny a pravou hodnotou nameranej veličiny [5]. Ide o kvalitatívny pojem, ktorý nie je možné jednoducho kvantifikovať. Pre relevantné vyhodnotenie merania sú dôležité kvantifikovateľné charakteristiky. Môže to byť napríklad neistota merania. Pri vyhodnocovaní merania sa najčastejšie kvantifikujú dve charakteristiky a to odhad priemeru (strednej hodnoty a polohy), pričom sa hodnotí správnosť (pravdivosť) merania, a odhad variability (rozptylu a rozpätia), ktorý hodnotí precíznosť merania [10; 11].

Správnosť merania – má označenie aj ako pravdivosť merania [12]. Je definovaná ako tesnosť zhody medzi aritmetickým priemerom nekonečného počtu nameraných hodnôt veličiny a referenčných hodnôt veličiny [5]. Aj v tomto prípade ju nie je možné jednoducho kvantifikovať. Správnosť merania má priamy vplyv na systematickú chybu, ktorú je možné eliminovať pomocou korekcie [10; 11]. Zvykne sa kvantifikovať charakteristikami priemeru (strednej hodnoty a polohy) [13].

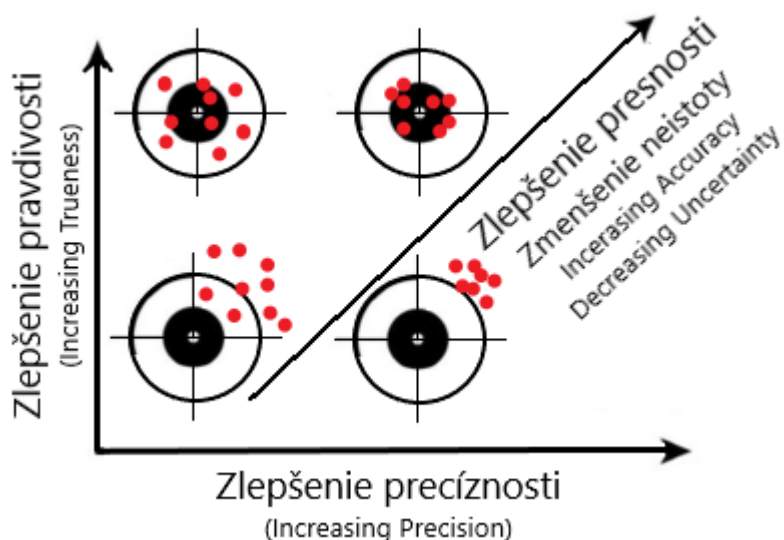
Precíznosť merania – je označovaná aj ako zhodnosť [12]. Charakterizujeme ju ako tesnosť zhody medzi indikáciami alebo nameranými hodnotami veličiny, ktoré sú získané opakovaným meraním na rovnakom objekte, prípadne podobnom objekte za špecifikovaných podmienok [5]. Precíznosť je najčastejšie kvantifikovaná pomocou charakteristík variability (rozptylu alebo rozpätia). Pre tieto účely sa v štatistickom vyhodnocovaní používa rozpätie [10; 11]:

$$R = y_{max} - y_{min}, \quad (1.1)$$

kde R – rozpätie,
 y_{max} – maximálna nameraná hodnota meranej veličiny,
 y_{min} – minimálna hodnota meranej veličiny.

Na obr. 1.1 je možné vidieť princíp posudzovania presnosti a neistoty merania použitého meracieho zariadenia. Z obrázku je možné pozorovať, že ideálny stav nastáva, keď je dosiahnutá čo najvyššia presnosť merania s čo najnižšou hodnotou neistoty merania. Tento stav predpokladá nízke chyby merania a biasu (rozdiel medzi nameranou hodnotou získanou z opakovaných meraní rovnakej vzorky a referenčnou hodnotou) [10]. Pri meraní s vysokou správnosťou ale nízkou precíznosťou bude síce interval s nameranými hodnotami obsahovať skutočnú hodnotu, ale bude príliš široký. Ale zase pri meraní s nízkou správnosťou a vysokou precíznosťou budú mať namerané hodnoty úzky interval. To znamená, že dôjde k vychýleniu a skutočná hodnota sa nebude nachádzať v tomto intervale [13].

V praxi neexistuje metóda merania, ktorá by bola absolútne presná čo znamená, že vždy jestvuje rozdiel medzi nameranou hodnotou a skutočnou hodnotou sledovanej veličiny. Výsledok merania je vždy v istom rozmedzí okolo skutočnej hodnoty, ktorú prakticky nikdy nepoznáme. Preto sa v praxi stanovuje aj neistota merania, ktorá sa uvádza spolu s výsledkom merania [10].



Obr. 1.1 Princíp presného merania [14]

Pravá hodnota – je skutočná presná hodnota, ktorá sa v praxi nedá zistiť, pretože neexistuje absolútne presné meradlo [5; 10].

Nameraná hodnota – je hodnota, ktorá sa blíži tej skutočnej hodnote veličiny a reprezentuje výsledok merania [5; 10].

Konvenčná hodnota – vyjadruje hodnotu veličiny, ktorá je priradená k veličine dohodou, konvenciou. Niekedy ide o odhad pravej hodnoty veličiny a môže byť prijímaná s primerane malou neistotou merania [5; 10].

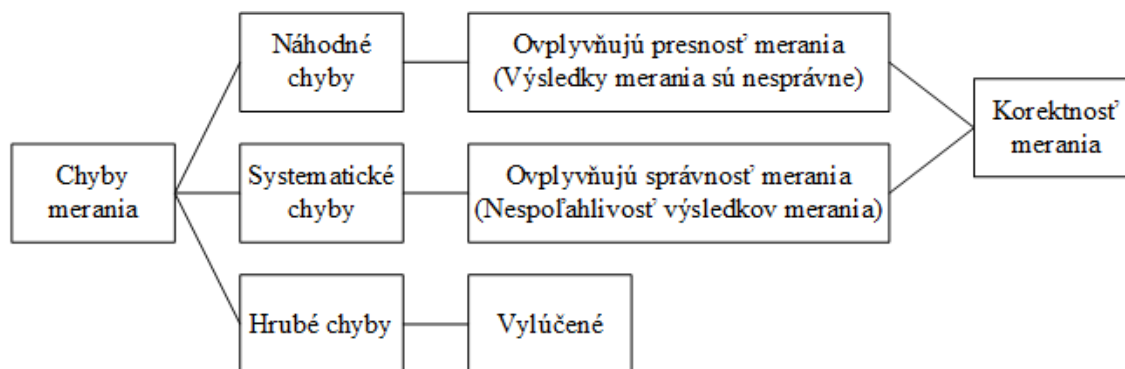
Úplný výsledok merania – pretože nikdy nie je možné určiť skutočne presnú hodnotu merania, je potrebné stanoviť rozmedzie v ktorom sa táto hodnota nachádza [13]. Úplný výsledok merania je zložený z nameranej hodnoty meranej veličiny (jej hodnota sa blíži skutočnej hodnote) a neistoty merania patriacej k tejto hodnote (udáva informácie o jej presnosti) [3; 10]. Výsledok merania sa zapisuje v tvare [3]:

$$Y = (y \pm U), \quad (1.2)$$

kde Y – hodnota meranej veličiny,
 y – odhad meranej veličiny,
 U – rozšírená neistota meranej veličiny.

1.2.2 Chyby merania

Skutočnú hodnotu meranej veličiny nie sme schopní nikdy presne určiť, pretože každé meranie je zaťažené chybou merania a tu nie je možné úplne nikdy odstrániť. Ide napríklad o nedokonalosť metódy merania, ľudskú nedokonalosť, obmedzenú presnosť meracích prístrojov a ďalšie [2]. Chyba merania je definovaná ako rozdiel medzi nameranou hodnotou veličiny a referenčnej hodnoty veličiny [5]. Podľa pôvodu sú chyby merania rozdeľované do troch skupín a to na chyby náhodné, chyby systematické a hrubé chyby. Náhodné chyby majú vplyv na presnosť merania a systematické chyby ovplyvňujú správnosť výsledku. Hrubé chyby sa zo spracovávaných údajov vylučujú, pretože majú veľmi odľahlé alebo vybočujúce hodnoty. Celková chyba merania je teda zložená z náhodnej a systematickej chyby [13]. Toto rozdelenie je možné vidieť na schematickom obr. 1.2.



Obr. 1.2 Rozdelenie chýb merania [15]

Náhodná chyba – vyjadruje sa ako zložka chyby merania, ktorá sa v opakovaných meraniach mení nepravidelným spôsobom [5]. Náhodné chyby nie je možné nijakým spôsobom ovplyvniť a ani kontrolovať, pretože na ich vznik vplýva veľa náhodných faktorov. Každý proces merania je ovplyvnený touto chybou. Náhodná chyba je náhodná veličina, ktorá sa riadi zákonmi pravdepodobnosti a je ju možné popísať použitím štatistických metód [10].

Náhodnú chybu nie je možné odstrániť, môže byť znížená zvýšeným počtom meraní. Pri opakovanom meraní môže s vysokou pravdepodobnosťou náhodná chyba naberať hodnotu

maximálne ± 3 smerodajné odchýlky ($3s$). Za podmienok opakovateľnosti je ju možné znížiť tak, že výsledok merania sa vypočíta ako aritmetický priemer z nameraných hodnôt [11].

Systematická chyba – je charakterizovaná ako zložka chyby merania, ktorá ostáva v opakovaných meraniach konštantná, alebo sa mení predvídateľným spôsobom [5]. Tieto chyby môžu byť spôsobené nesprávnym postupom merania, použitím nevhodnej metódy merania, nesprávnym meracím zariadením, prípadne osobou, ktorá vykonáva meranie. Ich rozdiel oproti náhodným chybám je v tom, že systematické chyby ovplyvňujú správnosť každého merania. Výsledok merania je skreslený systematickým spôsobom pri ľubovoľnom počte opakovaných meraní. Príčiny ich vzniku je možné odhaliť a tak odhadnúť aj ich veľkosť. Systematickú chybu je možné čiastočne odstrániť pomocou korekcie, ktorá sa pričíta ku nekorigovanému výsledku. Korekcia má hodnotu systematickej chyby, ale s opačným znamienkom. Pretože nepoznáme presnú strednú hodnotu a ani skutočnú hodnotu veličiny je korekcia iba čiastočná [10]. Matematicky je možné systematickú chybu vyjadriť ako [11]:

$$\Delta_s = \mu - Y_p, \quad (1.3)$$

kde Δ_s – systematická chyba,
 μ – stredná hodnota meranej veličiny,
 Y_p – konvenčná (referenčná) hodnota meranej veličiny.

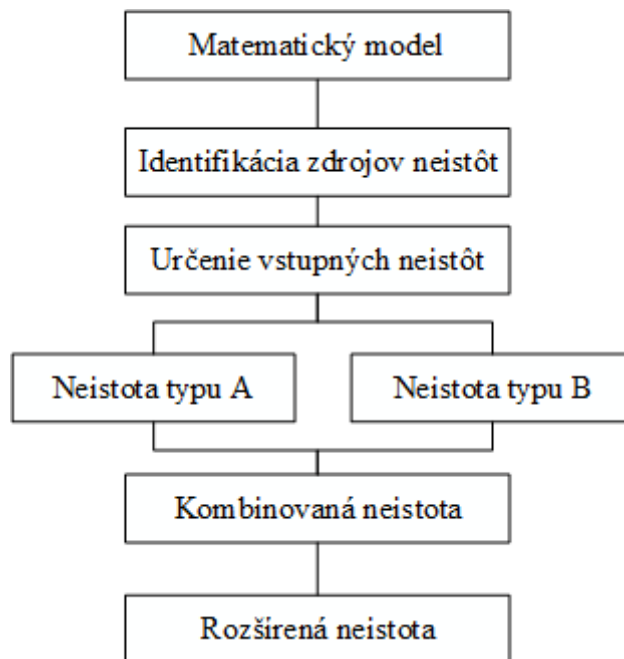
Hrubá chyba – ide o chyby, ktoré sú nápadné a často sa líšia od ostatných nameraných hodnôt a tým sú vo väčšine prípadov jednoducho odhaliteľné. Tieto chyby sú často spôsobené nefunkčným, nesprávne nastaveným, poškodeným, nekalibrovaným alebo inak nevhodným meradlom, chybou operátora, prípadne nevhodnými podmienkami merania. Hrubé chyby nie sú zahrňované do výsledného hodnotenia chyby merania, inak by mohlo dôjsť k skresleniu výsledkov merania [12].

1.2.3 Neistoty merania

Vyjadrujú nezáporný parameter charakterizujúci rozptýlenie hodnôt veličiny priradených k meranej veličine na základe použitej informácie [5]. Neistoty merania sú základným parametrom výsledku všetkých meraní. Sú stanovené na základe kvantifikácie všetkých systematických a náhodných chýb merania, ktoré môžu do významnej miery zaťažiť výsledok merania. Vymedzujú interval, pri ktorom sa predpokladá, že do neho spadá výsledok merania. Neistota merania naberá na význame, keď sa výsledok merania blíži k medznej hodnote [3].

Rozdiel medzi hodnotením chýb a neistôt spočíva v tom, že pri chybách je pri popise merania považovaná hodnota meranej veličiny za jedinečnú a v praxi nepoznateľnú. Pri neistotách sa zase pripúšťa, že neexistuje jedna pravá hodnota meranej veličiny, ale skôr súbor pravých hodnôt v súlade s definíciou. Súbor týchto hodnôt je principiálne a prakticky nepoznateľný [12].

Za zdroj neistôt je možné označiť všetky javy, ktoré môžu nejakým spôsobom ovplyvniť neurčitost' jednoznačného stanovenia výsledku merania. Tým dochádza k vzdal'ovaniu nameraných hodnôt od skutočnej hodnoty. Výrazným zdrojom neistôt sú rušivé vplyvy prostredia, nevhodný výber meracieho zariadenia, nesprávny postup merania, vplyv obsluhy, zaokrúhľovanie konštant, nepresnosť etalónu, nedodržanie rovnakých podmienok pri opakovanom meraní a ďalšie. Stanovenie neistôt vychádza z obecného metodického postupu a ten je možné vidieť na obr. 1.3. Tento postup môže byť upravený v závislosti na riešení konkrétnych úloh [3].



Obr. 1.3 Schéma určenia neistoty merania [3]

Štandardná neistota typu A – zložky neistoty typu A sú stanovené na základe štatistického spracovania opakovaných meraní. Hodnota tejto neistoty klesá s počtom meraní [12]. Zložky tejto neistoty sú charakterizované odhady rozptylov a smerodajných odchýlok určených z opakovaných meraní [3]. Pri nezávislých nameraných hodnotách sa štandardná neistota viaže na výberový priemer [12]. Výberový priemer pre určenie neistoty typu A sa stanoví na základe vzťahu [3]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (1.4)$$

kde \bar{y} – výberový priemer,
 n – celkový počet meraní veličiny,
 i – číslo merania,
 y_i – i -tá hodnota meranej veličiny Y .

Z nameraných hodnôt sa neistota typu A určí výpočtom výberovej smerodajnej odchýlky aritmetického priemeru podľa vzťahu (za predpokladu, že $n \geq 10$) [11]:

$$u_A = s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1.5)$$

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

Neistota typu A je spôsobená kolísaním nameraných údajov. Ak je počet meraní menší než desať, určená hodnota podľa tohto vzťahu (1.5) nie je veľmi spoľahlivá. V takom prípade je potrebné urobiť korekciu, ktorá zohľadní malý počet meraní [12]:

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{y}}, \quad (1.6)$$

kde k_s – koeficient rozšírenia podľa Studentovho rozdelenia pravdepodobnosti.

Koeficient rozšírenia má Studentovo rozdelenie pravdepodobnosti a je nezávislé na počte meraní vid' tab. 1.1 [12; 13].

Tab. 1.1 Hodnoty koeficientu k_s v závislosti na počte meraní [12]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k_s	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0	1,0

Štandardná neistota typu B – zložky neistoty typu B nie sú stanovované štatistickým spracovaním opakovaných meraní a preto nie sú závislé na počte meraní [10]. Stanovenie tejto neistoty vychádza z možných zdrojov neistôt určených na základe neistoty uvedenej vo výsledkoch z predchádzajúceho merania, špecifikácie metrologických vlastností meradiel od výrobcu, skúsenostiach a znalostiach pracovníka, neistôt uvedených v overovacích listoch etalónov, stanovených meradiel, kalibračných listoch, alebo certifikátoch [12].

Pre výpočet neistoty typu B je najskôr potrebné určiť možné zdroje neistôt (pričom sa predpokladá, že nie sú korelované). Sú nimi napríklad nedokonale meracie zariadenia, použité meracie etalóny, spôsob vyhodnocovania a iné. Pre každý zdroj sa odhadne rozsah odchýlok $\pm \Delta z_{maxj}$ od menovitej hodnoty tak, aby ich prekročenie bolo nepravdepodobné. Ďalej sa odhadne, akému rozdeleniu pravdepodobnosti odpovedajú odchýlky ΔZ v intervale $\pm \Delta z_{maxj}$ [12]. Následne dôjde k určeniu neistoty $u_B(z_j)$ podľa vzťahu [12]:

$$u_B(z_j) = c_j \frac{\Delta z_{maxj}}{\chi}, \quad (1.7)$$

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

Hodnota χ je pre normálne (Gaussové) rozdelenie $\chi = 2$, pre trojuholníkové (Simpsonové) rozdelenie $\chi = \sqrt{6}$, pre rovnomerné (pravouhlé) rozdelenie $\chi = \sqrt{3}$, atď. Celková štandardná neistota typu B sa vypočíta zo vzťahu [12]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_B(z_j)^2}, \quad (1.8)$$

kde u_B – štandardná neistota typu B,
 m – počet príspevkov neistoty typu B.

Kombinovaná štandardná neistota – je štandardná neistota výsledku merania, keď je výsledok získaný z hodnôt charakteristík niekoľkých ďalších uvažovaných veličín. Získava sa kombináciou výsledných hodnôt štandardnej neistoty typu A a štandardnej neistoty typu B. Kombinovaná neistota sa vypočíta ako [12]:

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}, \quad (1.9)$$

kde u_C – kombinovaná štandardná neistota.

Rozšírená neistota – vymedzuje interval okolo výsledku merania, v ktorom sa s istou pravdepodobnosťou nachádza výsledok merania [13]. Ak by došlo k použitiu iba kombinovanej neistoty, až jedna tretina výsledných hodnôt by sa mohla ocitnúť mimo stanovené pásmo

neistôt. Z metrologického hľadiska ide o neprípustnú situáciu, preto sa kombinovaná štandardná neistota násobí koeficientom rozšírenia, ktorý umožňuje získanie pokrytia hodnôt s vyššou pravdepodobnosťou [10]. Pre výpočet rozšírenej neistoty sa používa vzťah [12]:

$$U = k \cdot u_C, \quad (1.10)$$

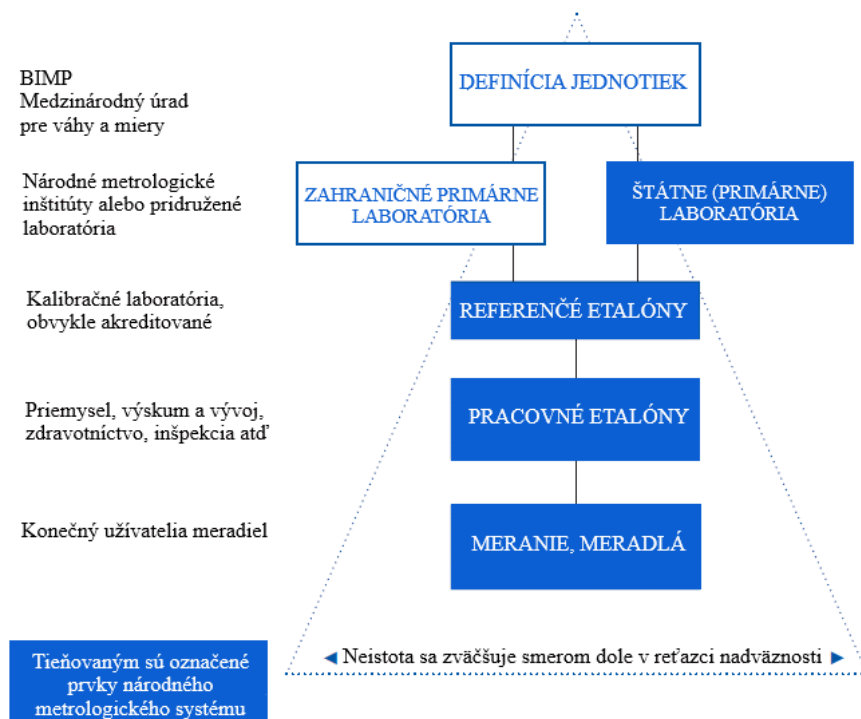
kde k – koeficient rozšírenia.

Základné koeficienty: $k = 1$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 68,27 %,
 $k = 2$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45 %,
 $k = 2,58$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 99,01 %,
 $k = 3$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 99,73 %.

1.3 Metrologická nadväznosť

Metrologická nadväznosť je definovaná ako vlastnosť výsledku merania alebo hodnoty etalónu, ktorou môže byť určený vzťah k štátnym alebo medzinárodným etalónom, cez neprerušovaný reťazec porovnávaní s uvedením príslušných neistôt [3]. Ide teda o zaradenie určeného meradla do neprerušovanej postupnosti prenosu hodnoty veličiny začínajúcou etalónom najvyššej metrologickej kvality. Formou metrologickej nadväznosti je kalibrácia alebo overovanie [9]. Reťazec metrologickej nadväznosti je možné vidieť na obr. 1.4.

Pre priemyselné odvetvia v Európskej únii je nadväznosť zaisťovaná na najvyššej medzinárodnej úrovni, predovšetkým v akreditovaných európskych laboratóriách a národných metrologických inštitútoch [3].



Obr. 1.4 Reťazec metrologickej nadväznosti [1]

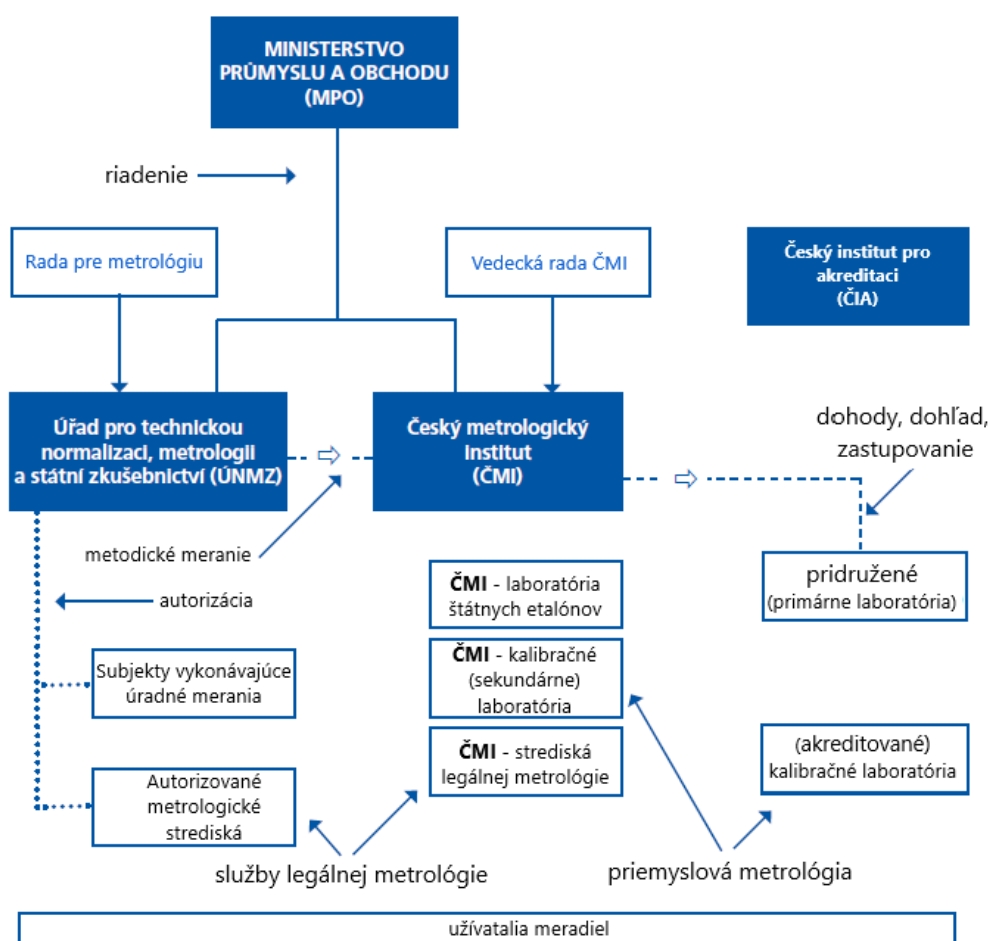
Kalibrácia nižších stupňov etalónov a meradiel je základným prostriedkom pre zaisťovanie nadväznosti merania. Zahrňuje určenie metrologických charakteristík kalibrovaného prístroja. Kalibrácia zabezpečuje konzistentnosť údajov prístroja s iným meraním, správnosť údajov uvádzaných prístrojom s možnosťou určenia neistoty a umožňuje určiť ďalšie metrologické vlastnosti [3]. Kalibrácia teda určuje metrologické charakteristiky prístroja, systému, alebo referenčného materiálu. Výsledkom kalibrácie je vystavenie kalibračného listu. Kalibráciu

etalónov vykonáva Český metrologický institut, akreditované kalibračné laboratórium alebo zahraničný subjekt, ktorý má porovnateľnú metrologickú úroveň. Kalibráciu pracovných meradiel môže zase vykonávať akýkoľvek subjekt, ktorý disponuje vhodnými etalónmi v súlade so zákonom o metrologii [9].

Overovanie je poskytovanie objektívneho dôkazu, že daná položka spĺňa špecifikované požiadavky [5]. Postup pri overovaní stanovených meradiel stanoví Ministerstvo průmyslu a obchodu vyhláškou. Overovanie meradiel vykonáva Český metrologický institut alebo iné autorizované metrologické pracovisko [6; 9].

1.3.1 Národný metrologický systém v ČR

Národným metrologickým systémom (NMS) sa chápe systém, ktorý slúži k zabezpečeniu jednotnosti, správnosti meradiel a merania v danom štáte, pri využití technických prostriedkov a zariadení, technického personálu, právnych a technických predpisov, ktoré vymedzujú väzby medzi subjektami štátnej správy, právnických osôb a podnikajúcich fyzických osôb [3]. Národný metrologický systém v Českej republike je tvorený zo spotrebiteľov a obecnej verejnosti, podnikateľských subjektov a ďalších prvkov, ktoré sa podieľajú na jeho riadení, zabezpečovaní služieb, rozvoji metrologie a medzinárodnej spolupráce [1]. Jednotlivé časti NMS je možné vidieť na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Národný metrologický systém v ČR [1]

Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO) – je ústredný orgán štátnej správy, v ktorého kompetencii je oblasť technickej normalizácie, metrologie a skúšobníctva. Zabezpečuje úlohy stanovené v zákone č. 20/1993 Sb. o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej

normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva v znení neskorších predpisov. MPO mimo iného riadi štátnu politiku v oblasti metrologie a navrhuje odpovedajúce legislatívne návrhy, vypracováva koncept rozvoja metrologického systému, riadi a kontroluje Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví a Český metrologický institut [1].

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) – ako orgán štátnej správy bol zriadený zákonom České národní rady č. 20/1993 Sb. o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva pre predmetné činnosti. Poslaním ÚNMZ je zabezpečovať úlohy vyplývajúce zo zákonov Českej republiky upravujúcich technickú normalizáciu, metrologiu, štátne skúšobníctvo a úlohy v oblasti technických predpisov a noriem uplatňovaných v rámci členstva ČR v Európskej únii. Ide napríklad o tvorbu a vydávanie českých technických noriem, zastúpenie ČR v medzinárodných orgánoch, zaisťuje funkciu Informačného strediska Svetovej obchodnej organizácie (WTO), autorizuje subjekty pre výkon v oblasti štátnej metrologickej kontroly meradiel, preveruje oprávnené subjekty k uchovávaniu štátnych etalónov, udeľuje súhlas s nadviazaním hlavných etalónov na etalóny zahraničných subjektov s potrebnou metrologickou úrovňou a ďalšie [1].

Český metrologický institut (ČMI) – je základným výkonným orgánom českého národného metrologického systému [2]. Jeho úlohou je zabezpečiť jednotnosť a presnosť meradiel a merania vo všetkých odboroch vedeckej, technickej a hospodárskej činnosti [9].

Vykonáva činnosti, ako napríklad metrologický výskum a uchovávanie štátnych etalónov vrátane prenosu hodnôt na meradlá nižšej presnosti, vydáva regulačné predpisy pre oblasť metrologie, vykonáva štátny metrologický dozor pri autorizovaných metrologických strediskách a subjektoch, ktoré vyrábajú, opravujú alebo montujú stanovené meradlá, vykonávanie certifikácie referenčných materiálov a poskytovanie ďalších odborných služieb z oblasti metrologie [1].

Český institut pro akreditaci (ČIA) – ide o súkromnoprávnú neziskovú organizáciu, ktorá pôsobí ako akreditačný orgán. Poskytuje služby v oblasti akreditácie a dozoru nad trvalým plnením požiadaviek na subjekty posudzovania zhody. Vykonáva úkony spojené so skúšaním a akreditáciou pre oblasti ako sú zdravotnícke laboratória, skúšobné a kalibračné laboratória, certifikačné orgány vykonávajúce certifikáciu výrobkov a systémov, inšpekčné orgány alebo organizátorov programov skúšania spôsobilosti [1].

Autorizované metrologické strediská – ide o autorizované subjekty ÚNMZ k overovaniu stanovených meradiel alebo k certifikácii referenčných materiálov [3].

1.3.2 Medzinárodné inštitúcie v oblasti metrologie

Medzinárodná organizácia legálnej metrologie (OIML) – je medzivládna organizácia, ktorej účelom je podpora celosvetovej harmonizácie postupov legálnej metrologie. Vydáva medzinárodné odporúčania k uplatňovaniu národnej legislatívy, týkajúcej sa rôznych kategórií meradiel [1]. V roku 2022 má OIML 62 členských štátov a 63 korešpondenčných členských štátov, ktoré sú pridružené k OIML ako pozorovatelia [16].

Európska asociácia národných metrologických inštitútov (EURAMET) – ide o združenie pre spoluprácu európskych národných metrologických inštitútov. Základ spolupráce tvoria spoločné projekty zaoberajúce sa výskumom, medzilaboratórnym porovnávaním, vzájomnou konzultáciou a zmluvami o nadväznosti [9].

Európska spolupráca v legálnej metrologii (WELMEC) – je organizácia, ktorá združuje authority členských štátov EÚ v oblasti legálnej metrologie. Základnými cieľmi je vytváranie dôvery medzi orgánmi legálnej metrologie, príprava harmonizovaných návodov k implementácii európskej legislatívy, alebo harmonizácia činností a výmena informácií [17].

2 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI PRESNÉHO MERANIA POMOCOU CMM V NANOMETROLÓGII

Počiatky súradnicovej metrologie je možné nájsť v prácach francúzskych matematikov, akými boli Pierre de Fermat (1601 - 1665), alebo René Descartes (1596 - 1650), ktorí položili myšlienku používania súradnicového systému pre opis vzťahu hmotného objektu a referenčného systému [18].

História súradnicového meracieho stroja sa začala písať v roku 1959, ktorý bol predstavený v Paríži na Medzinárodnej výstave obrábacích strojov spoločnosťou Ferranti. Tento stroj vytvoril impulz pre vývoj CMM a viedol k vstupu nových výrobcov na trh [19; 20]. Avšak až rozvoj výpočtovej techniky a informatiky, ku ktorému došlo koncom 60. rokov, umožnil skutočné priemyselné využitie týchto strojov. Spoločnosť ZEISS v roku 1973 uviedla na trh prvý komerčný súradnicový merací stroj UMM 500 [18; 21]. Prvé stroje sa najskôr uplatňovali v metrologických laboratóriách, ale pomerne rýchlo sa presadili aj v prostredí dielne, hlavne pre svoje prednosti oproti konvenčným meradlám. Výrobcovia však museli s nástupom CMM v dielňach vyriešiť aj nové problémy súvisiace s prostredím, v ktorom boli stroje používané (nečistoty, teplotné výkyvy, otrasy) [22].

Súradnicové meracie stroje sú charakterizované ako meracie systémy s prostriedkami pre pohyb snímacieho systému a schopnosťou určovať priestorové súradnice na povrchu meranej súčasti [23].

Základný princíp merania na súradnicových strojoch vychádza z nasnímania jednotlivých bodov v priestore. Z takto získaných bodov sú následne vyhodnocované rozmerové a uhlové charakteristiky, alebo ich tolerancie vzhľadom k predpísaným hodnotám [24]. Dôležité je vhodné stanovenie základného bodu v priestore, ostatné body na meranej súčasti sa určujú vo forme súradníc týchto bodov v osách súradnicového systému x , y a z . Možnosť voľby základného bodu v pracovnom priestore stroja je značnou výhodou oproti konvenčným metódam merania [25].

Súradnicové meracie stroje momentálne predstavujú jeden z najvýznamnejších spôsobov merania súčastí, ktorý prináša univerzálnosť, veľmi presné meranie tvarovo zložitých výrobkov, skrátenie času potrebného na meranie, alebo automatizovanie meracieho procesu [26].

Z metrologického hľadiska sú CMM odvodené od meracích mikroskopov a z pohľadu konštrukcie vychádzajú z NC frézovačiek. Vývoj nastal aj v oblasti snímania meraných objektov. Pri prvých strojoch sa výhradne využívalo dotykové meranie, pri novších sa stále častejšie využíva optické snímanie [22].

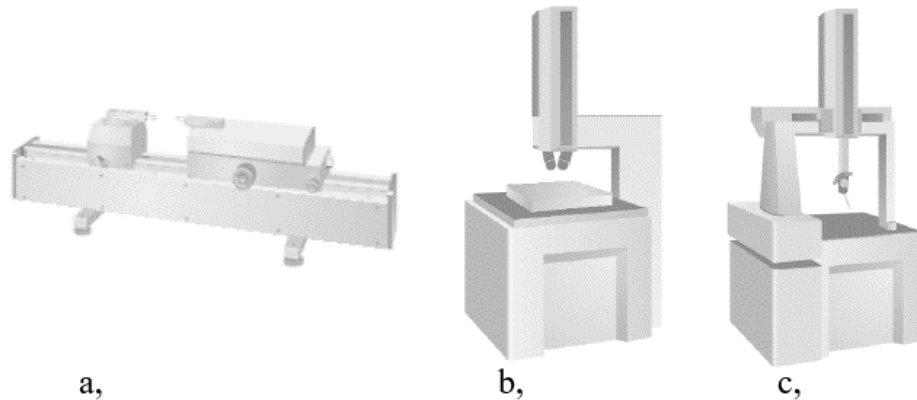
2.1 Konštrukčné typy CMM

V súčasnosti existuje celá rada konštrukčných prevedení strojov s rôznymi konfiguráciami a veľkosťami v závislosti od ich použitia. Môže ísť o stroje schopné merať veľké priemyslové výrobky, ako napríklad krídla lietadiel, časti karosérie automobilu, priemyslové turbíny, alebo na strane druhej veľmi malé objekty, napríklad v elektrotechnickom priemysle.

Podľa schopnosti merania (funkčného hľadiska) je možné CMM rozlíšiť na [2]:

- Jednoosé (jednosúradnicové) meracie stroje (obr. 2.1 a,) – umožňujú meranie rozmerov iba v jednej ose. Ich výhodou je vysoká presnosť merania s malou neistotou v celom rozsahu a to aj pri meraní veľkých rozmerov.
- Dvojosé (dvojsúradnicové) meracie stroje (obr. 2.1 b,) – je nimi možné merať v dvoch navzájom kolmých osách v jednej rovine. Ide hlavne o mikroskopy, laserové interferometre, alebo skenery.

- Trojosé (trojsúradnicové) meracie stroje (obr. 2.1 c,) – poskytujú meranie v troch navzájom kolmých osiach, čiže v priestore. Ide o najvyššiu technickú úroveň merania geometrických veličín. Na jedno upnutie je možné urobiť meranie vo všetkých troch navzájom kolmých súradniciach.



Obr. 2.1 Typy CMM podľa schopnosti merania: a, jednoosé; b, dvojosé; c, trojosé [2]

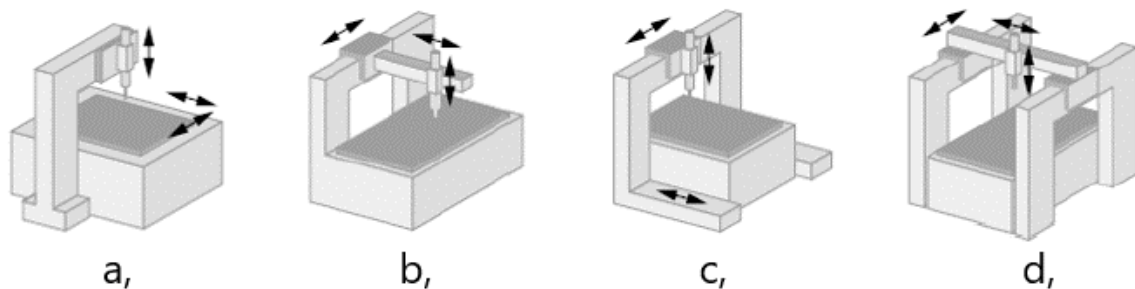
Z hľadiska konštrukcie je možné podľa normy ČSN EN ISO 10360-1 súradnicové meracie stroje rozdeliť na štyri základné typy a to: stojanový, výložníkový, portálový a mostový [23].

Stojanový (stĺpový) typ (obr. 2.2 a,) – základným znakom konštrukcie je nosný stojan, na ktorom je horizontálne pripevnené rameno, na konci ktorého je pripevnená snímacia hlava, ktorá sa pohybuje v smere osi z. Výrobok je pripevnený na pracovnom stole a pohybuje sa v smere osi x a y, kolmo k osi z. Stroje s takouto konštrukciou patria medzi najpresnejšie. Sú vhodné pre malé rozsahy merania a menšie objekty. Ich typickým rysom je tuhá uhlová konštrukcia a dobrý prístup k meranému objektu. Často sú využívané v laboratórnych podmienkach [2].

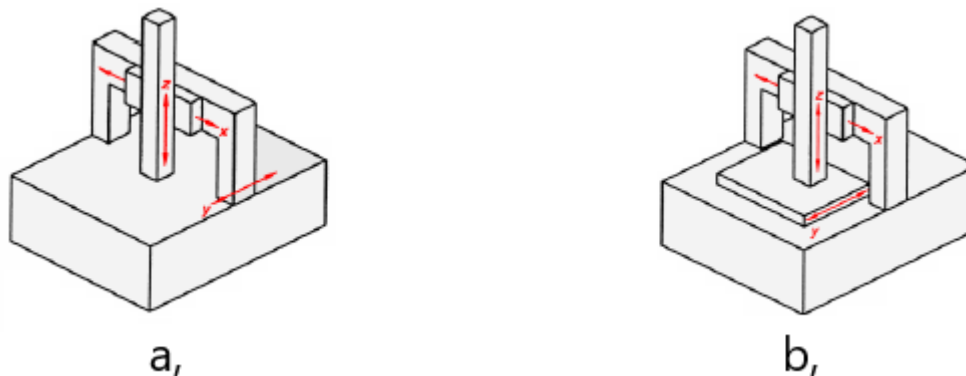
Výložníkový typ (obr. 2.2 b,) – pri tomto type je meraný objekt pevne upnutý na pracovný stôl, ktorý sa nepohybuje. Konštrukcia je tvorená pohyblivým konzolovým ramenom, na ktorom je pripevnená meracia pinola, ktorá vykonáva pohyby vo všetkých osiach x, y a z. Poskytujú rovnako dobrý prístup k meranému objektu [2].

Portálový typ (obr. 2.2 c,) – patrí k najrozšírenejším CMM v oblasti merania stredného a veľkého rozsahu. Jeho výhodou je veľká tuhosť, ktorá umožňuje vysokú presnosť merania. Môže mať dva typy prevedenia. Prvý typ má pohyblivý portál nad pevným pracovným stolom. V tomto prípade je prístup do priestoru merania obmedzený konštrukciou stroja (obr. 2.3 a,). V druhom prípade je prevedenie s pevným portálom a pohyblivým stolom (obr. 2.3 b,) [2].

Mostový typ (obr. 2.2 d,) – je charakteristický svojou veľkosťou a poskytuje najväčšie rozsahy merania. Je vhodný pre meranie veľkých a nadrozmerných objektov, najčastejšie jeho použitie je v leteckom, lodnom, energetickom alebo automobilovom priemysle [2].



Obr. 2.2 Konštrukčné prevedenia CMM: a, stojanový typ, b, výložníkový typ, c, portálový typ, d, mostový typ [2]



Obr. 2.3 Konštrukčné prevedenie portálového CMM: a, pohyblivý portál s pevným stolom, b, pevný portál s pohyblivým stolom [2]

2.2 Prvky súradnicového meracieho stroja

Konštrukcia súradnicového meracieho stroja je tvorená prvkami ako rám stroja, pracovný stôl, most, stojan (stĺp), pinola a vedenie [2].

Rám súradnicového stroja – môže byť vyrobený ako odliatok alebo zvarenc, ktorý nesie ostatné prvky CMM. Je potrebné, aby mal čo najväčšiu tuhosť aj pri dynamickom zaťažení. Pri mostových typoch môže byť rám nahradený pracovnou doskou umiestnenou v podlahe [2; 25].

Pracovný stôl – tvorí základ pre osadenie a upnutie meranej súčasti buď priamo, alebo použitím upínacích prípravkov. Pracovný stôl je najčastejšie vyrobený z prírodného kameňa (žuly) alebo umelého kameňa (granitu), prípadne z liatinového odliatku. V pracovnom stole môžu byť urobené T-drážky alebo otvory so závitmi, pomocou ktorých sa upína meraný objekt k pracovnému stolu. Pri výrobe sú kladené vysoké požiadavky na rovinnosť funkčných plôch. Od pracovného stola sa vyžaduje vysoká životnosť, stálosť objemu, odolnosť voči korózii, minimálna teplotná rozťažnosť, alebo nenáročnosť na opravu pri prípadnej poruche [2; 25].

Mostové konštrukcie, portály a stĺpy – vyrábajú sa väčšinou ako zvarenc. Je pri nich kladený veľký dôraz na dostatočnú tuhosť, rozmerovú a tvarovú stálosť [2]. Portál CMM musí byť konštruovaný tak, aby pri pohybe pinoly v priečnom smere dochádzalo k minimálnemu prehybu [25]. V niektorých prípadoch môže byť konštrukcia portálu vyrobená zo žuly alebo granitu [13].

Pinola – môže mať vertikálne alebo horizontálne konštrukčné riešenie s kruhovým alebo štvorcovými prierezom. V prípade horizontálnej pinoly je potrebné brať v úvahu aj prípadné prehyby od vlastnej hmotnosti a hmotnosti snímačej hlavy. Preto by mala byť pinola vyvažovaná a k tomu sa používajú vyvažovacie zariadenia, ktoré minimalizujú chyby spôsobené rozdielnou dĺžkou vysunutia pinoly. Pinola sa zvykne vyrábať z liatiny, duralu, prírodného kameňa alebo keramiky [2; 25].

Vedenie – je dôležitou súčasťou každého súradnicového meracieho stroja. Konštrukcia musí byť urobená tak, aby sa všetky pohyblivé časti mohli ľahko posúvať s maximálnou presnosťou a plynulým pohybom aj pri nízkej rýchlosti, ktorá sa vyskytuje v koncových polohách. Vedenie musí mať čo najmenšie trenie s minimálnym opotrebením pri čo najväčšej tuhosti celého zariadenia [27]. V súčasnosti sa zvykne používať aerostatické vedenie, valivé vedenie a menej často klzné vedenie. Nevýhodou klzného vedenia je veľký odpor, zložitosť prevedenia a z toho vyplývajúca vyššia cena, distribúcia oleja a jeho tesnením a odvodom tepla. Jeho výhodou je vyššia tuhosť. Pri používaní dochádza k zlepšovaniu akosti povrchu a tým aj presnosti [25; 27].

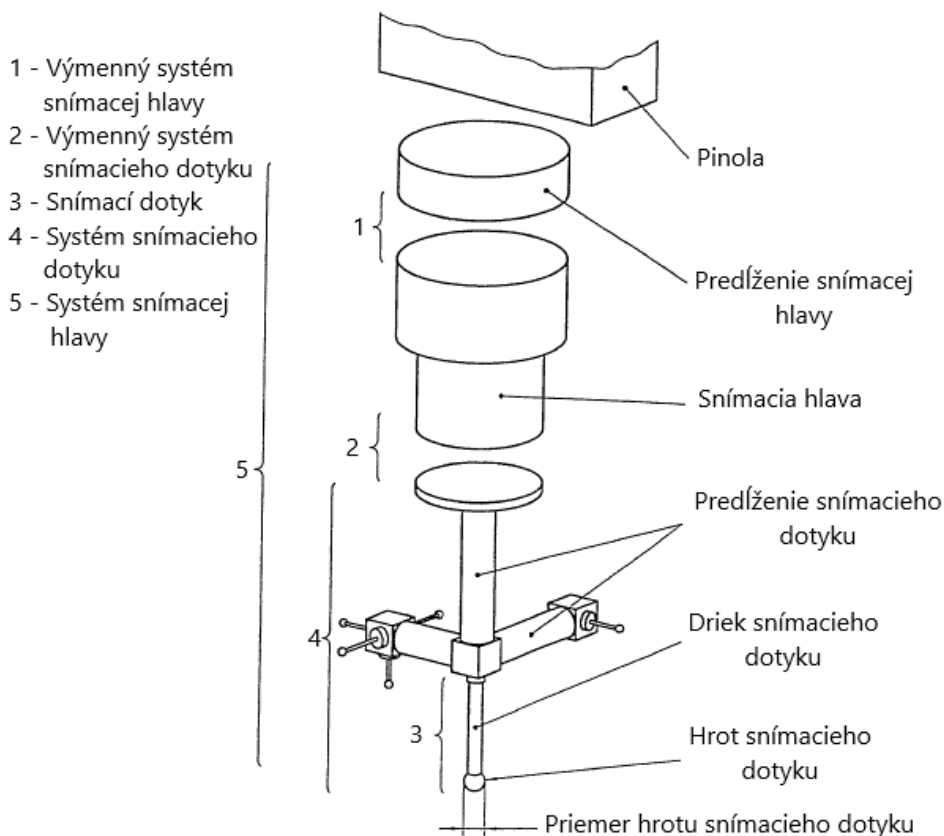
Aerostatické vedenie s plynným trením poskytuje nízke trenie aj pri vyšších rýchlostiach, nevzniká trhavý pohyb a odpadajú pri ňom problémy s odvádzaním oleja. Medzi nevýhody

patrí možnosť poškodenia vedenia pri porušení vrstvy vzduchu, znížená odolnosť proti korózii a problémy súvisiace s čistením vzduchu [25; 27].

Najvhodnejšie je valivé vedenie, ktoré je na guľôčkových alebo valčekových ložiskách. Ich výhodou je veľmi malé trenie, vysoká rovnomernosť pohybu, ktorá je jednou z podmienok pre presné meranie na súradnicových strojoch, vysoká tuhosť a značná odolnosť voči opotrebeniu. Mazanie na valivých vedeniach prakticky nemá vplyv na presnosť pohybov a jeho základnou úlohou je ochrana pred koróziou [25; 27].

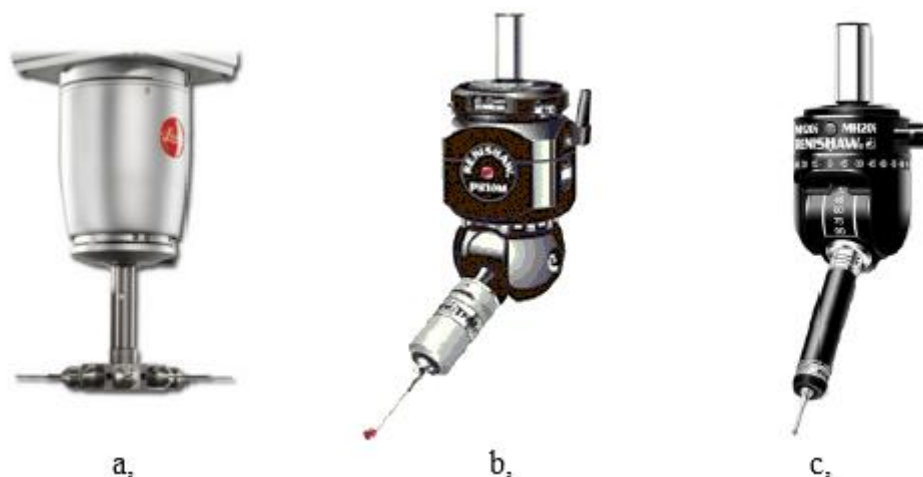
2.3 Snímacie systémy CMM

Veľmi dôležitou časťou CMM je aj snímací systém, ktorý slúži k nasnímaniu meraných bodov. Nasnímané body sú následne vyhodnocované pomocou meracieho programu, z ktorého sa získa číselná informácia o meranej veličine. Snímací systém je spojený s pinolou a skladá sa zo snímačej hlavy, predĺženia snímačej hlavy, systému výmeny snímačej hlavy, snímacieho dotyku, predĺženia snímacieho dotyku a systému výmeny snímacieho dotyku. Snímacie systémy je možné ďalej rozdeliť na dotykové (využívajú dotykové sondy) a bezdotykové (využívajú optické senzory) [2]. Jednotlivé časti dotykového snímacieho systému je možné vidieť na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Dotykový snímací systém CMM [23]

Snímacie hlavy – sa rozlišujú na dva typy, pevné a indexovateľné (polohovateľné). Pevné hlavy (obr. 2.5 a,) sa nedajú v priestore natáčať, ale dosahujú vyššej presnosti než polohovateľné hlavy. Indexovateľné hlavy (obr. 2.5 b,) slúžia k presnému natáčaniu snímacích sond v pracovnom priestore stroja. Je nimi možné polohovať sondu v jednotlivých osiach a zaistiť ju v požadovanej polohe. Polohovateľné hlavy sa ďalej delia na motorické hlavy, umožňujú polohovanie sondy a snímanie v ľubovoľnom uhle a manuálne hlavy, tie sú ručne nastaviteľné, poskytujú flexibilné meranie zložitých tvarov súčiastok, vid' obr. 2.5 c, [2].

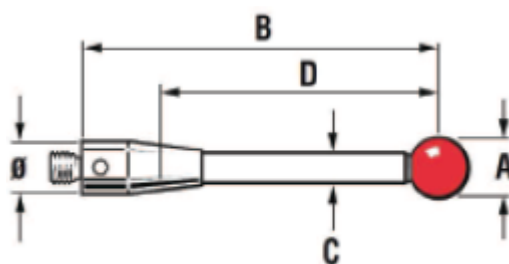


Obr. 2.5 Snímacie hlavy: a, pevná snímacia hlava, b, polohovateľná hlava, c, manuálna hlava [2]

2.3.1 Dotykové snímacie systémy

Ide o systémy merania, ktoré sú dnes najviac využívané v praxi. Charakteristickým znakom všetkých dotykových systémov je, že na získanie informácie o tvare a rozmeroch meranej súčasti je potrebný fyzický kontakt so súčasťou. Dotykové systémy sa ďalej delia na systémy spínacieho typu a systémy snímacieho typu. Systém spínacieho typu funguje tak, že v okamžiku, kedy dotyk príde do kontaktu s meranou súčasťou, spínacia sonda vydá signál a dôjde k zastaveniu pohybu, pričom sa odčíta aktuálna poloha súradníc. Systémy snímacieho typu sú v permanentnom styku s meraným objektom. V okamžiku, kedy dôjde ku kontaktu s meraným objektom, je vypnutý prítlak a zapnú sa pohony pre príslušné osi. Týmto spôsobom je zabezpečený trvalý kontakt s meraným predmetom [2].

Snímacie dotyky – sú mechanické zariadenia pozostávajúce z hrotu snímacieho dotyku a drieku [23]. Ide o súčasť meracieho systému, ktorý zaisťuje kontakt medzi meraným objektom a sondou. Voľba typu a rozmeru dotyku závisí od meranej súčasti. Dôležitými vlastnosťami sú tuhosť dotyku a dokonalý tvar meracej guľičky. Posudzované rozmery dotyku je možné vidieť na obr. 2.6.



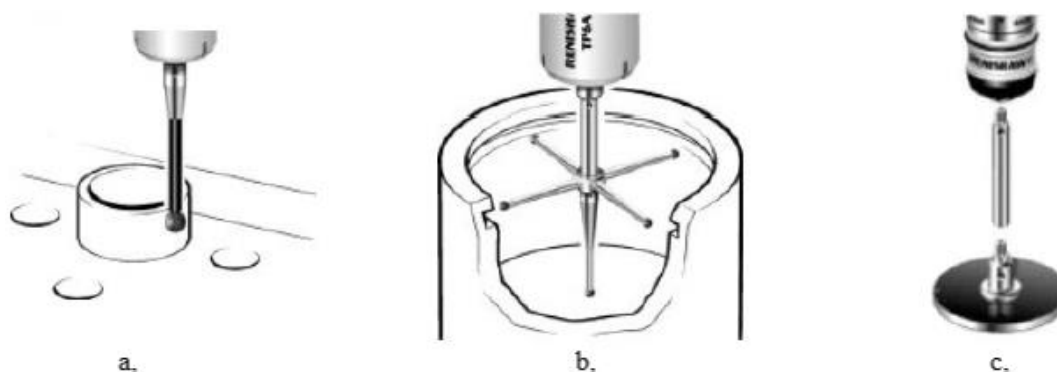
Obr. 2.6 Posudzované rozmery snímacieho dotyku, kde: A – priemer guľičky, B – dĺžka dotyku, C – priemer drieku, D – efektívna činná dĺžka dotyku [2]

Pre dosiahnutie čo najväčšej presnosti merania je potrebné sa riadiť určitými pravidlami pre výber dotyku [2]:

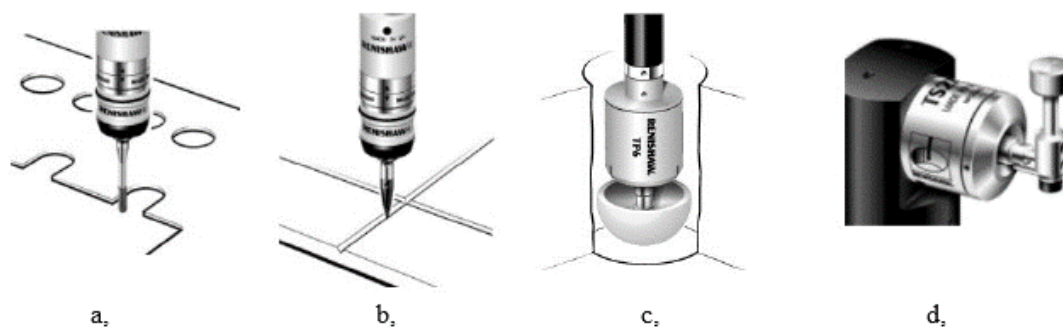
- Dotyk voliť čo najkratší, aby nedochádzalo k prehybom.
- Používať čo najmenší počet predlžovacích nástavcov. Každý spoj dotyku je zdrojom nepresností.
- Voliť čo najväčší priemer hrotu. Pri voľbe väčšieho hrotu sa volí aj väčší priemer stopky dotyku a tým sa zvyšuje aj tuhosť dotyku.

Typy dotykov – dotyky sa delia do niekoľkých skupín na [2]:

- Priame dotyky (obr. 2.7 a.), majú najjednoduchší tvar a skladajú sa z presnej guličky a stopky.
- Hviezdicové dotyky (obr. 2.7 b.), umožňujú snímanie zložitých prvkov alebo otvorov. Ich konštrukcia je tvorená stopkou so štyrmi alebo piatimi guľčkami, ktoré sú pevne pripevnené k strednému dielu.
- Diskové dotyky (obr. 2.7 c.), tie sa používajú k snímaniu zápchov a drážok, kde nie je možné použiť hviezdicový dotyk.
- Dotyky pre špeciálne účely, patrí sem valcový dotyk (obr. 2.8 a.), špička (obr. 2.8 b.), dutá keramická poglobuľa (obr. 2.8 c.) a dotyk na ustávanie nástrojov (obr. 2.8 d.).



Obr. 2.7 Základné typy dotykov: a, priamy dotyk, b, hviezdicový dotyk, c, diskový dotyk [28]



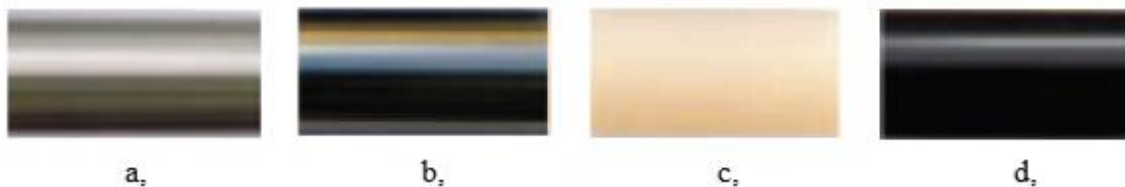
Obr. 2.8 Dotyky pre špeciálne účely: a, valcový dotyk, b, špička, c, dutá keramická poglobuľa, d, dotyk pre ustávanie nástrojov [28]

Materiál hrotu dotyku – najpoužívanejším materiálom pri výrobe guľčičiek je rubín (obr. 2.9 a.). Je vhodný pre väčšinu aplikácií, avšak existujú aj prípady, kedy sa hodí použiť iný materiál. V prvom prípade ide o snímanie hliníkových súčastí. Pri tomto snímaní môže dochádzať k adhéznemu opotrebeniu, pri ktorom sa na povrchu guľčičky môže usádzať hliník. Pre tento prípad je vhodné použiť guľčičky vyrobené z nitridu kremíka (obr. 2.9 b.). Ten má podobné vlastnosti ako rubín, nie je však vhodný pre meranie oceľových povrchov, pri ktorom dochádza k jeho značnému opotrebeniu. V druhom prípade kedy nie je vhodné použiť rubínové guľčičky, je snímanie liatinových povrchov, ktoré spôsobujú opotrebenie guľčičky oterom. Preto sa v takýchto prípadoch odporúča radšej použiť guľčičky z oxidu zirkoničitého (obr. 2.9 c.). Ide o veľmi pevný materiál s podobnou tvrdosťou, akú má rubín. V neposlednom rade môžu byť guľčičky vyrobené z technického diamantu (obr. 2.9 d.). Ten prekonáva vlastnosti všetkých konvenčných materiálov a poskytuje najpresnejšie a najekonomickejšie meranie. Veľmi vysoká tvrdosť a hladký povrch guľčičky udržiavajú opotrebenie na minimálnej hranici. Guľčičky z technického diamantu sa hodia skoro pre všetky aplikácie [2].



Obr. 2.9 Materiály hrotu dotyku: a, rubín, b, nitrid kremíku, c, oxid zirkoničitý, d, technický diamant [2]

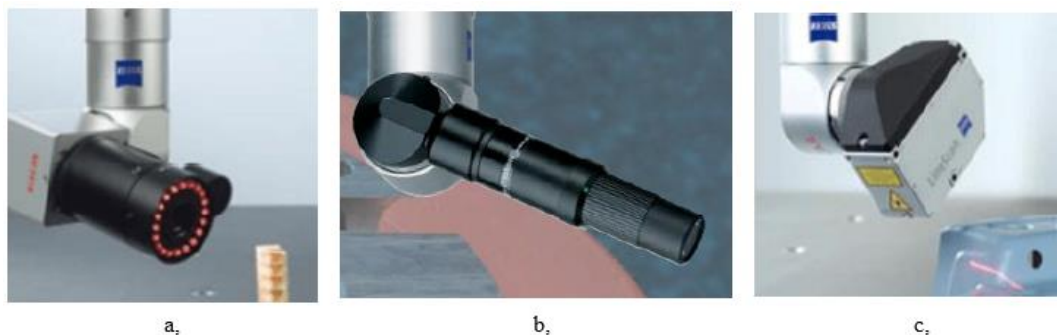
Materiál drieku dotyku – môžu byť vyrábané z korózií-odolnej ocele (obr. 2.10 a.), karbidu volfrámu (obr. 2.10 b.), keramiky (obr. 2.10 c.) alebo uhlíkových vlákien (obr. 2.10 d.). Drieky z korózií-odolnej ocele sú využívané pre dotyky s guľčkou alebo hrotom s priemerom od 2 mm a dĺžky do 30 mm. V tomto rozmedzí poskytujú optimálny pomer tuhosti a hmotnosti stopky. Karbid volfrámu sa používa pre drieky s maximálnou tuhosťou a minimálnym priemerom stopky. Tieto vlastnosti sú vyžadované pri hrotoch s priemerom menším než 1 mm a do dĺžky 50 mm. Keramické drieky zaisťujú dostatočnú ochranu sondy pri havárii, pri ktorej dôjde k ich roztriešteniu. Drieky vyrobené z uhlíkových vlákien majú vynikajúce charakteristiky tlmenia vibrácií a zanedbateľný koeficient tepelnej rozťažnosti [2].



Obr. 2.10 Materiály používané pre driek dotyku: a, oceľ, b, karbid volfrámu, c, keramika, d, uhlíkové vlákna [29]

2.3.2 Bezdotykové snímacie systémy

Pri týchto systémoch nedochádza k dotyku medzi snímaným objektom a sondou. Pri bezdotykových snímačoch sa využívajú rôzne princípy snímania, podľa toho či ide o 2D alebo 3D snímanie. Obecne sú však najčastejšie používané laserové alebo optické systémy. Laserové systémy používajú dva rôznobežné laserové lúče, ktoré sa pretnú v presne definovanej vzdialenosti. Keď dôjde na meranej súčasti k prieniku medzi týmito lúčmi, vyhodnocovacia jednotka stroja zaregistruje dotyk. Laser umožňuje skenovanie v jednej alebo troch rovinách. Pri optických systémoch sa prostredníctvom optickej kamery preniesie optický signál na digitálny obraz, z ktorého sa vo vyhodnocovacom programe vypočítajú merané body. Na obr. 2.11 je možné vidieť príklady meracích hláv bezdotykových systémov. V prvom prípade (obr. 2.11 a,) ide o kamerový merací systém Zeiss ViSCAN, druhým je (obr. 2.11 b,) optický bodový merací systém Zeiss RDS DTS a v poslednom prípade (obr. 2.11 c,) ide o laserový čiarový merací systém Zeiss RDS line SCAN [2].



Obr. 2.11 Príklady bezdotykových systémov snímania: a, 2D optický kamerový systém, b, optický bodový systém, c, laserový čiarový systém [2]

2.4 Kalibrácia CMM

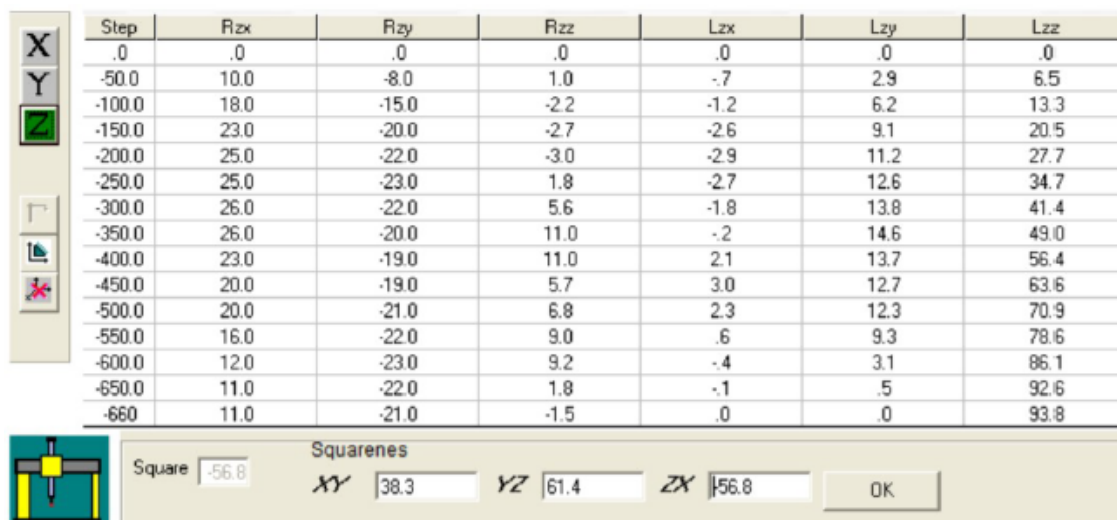
Kalibrácia je definovaná ako činnosť, ktorá za špecifikovaných podmienok najskôr stanoví vzťah medzi hodnotami veličiny a neistotami merania poskytnutými etalónmi a odpovedajúcimi indikáciami s pridruženými neistotami merania. Následne použije tieto informácie k stanoveniu vzťahu pre získanie výsledku merania z indikácie. Môže byť vyjadrená údajmi o kalibrácii, kalibračnou funkciou, kalibračnou tabuľkou, diagramom alebo krivkou. V niektorých prípadoch sa môže skladať zo súčtových alebo násobných korekcií indikácie s pridruženou neistotou merania [5].

Súradnicové meracie stroje je možné chápať ako meracie prístroje a súčasne meracie systémy, pretože sú v nich zakomponované tri a viac dĺžkové meradlá, snímače teploty a v závislosti od konštrukcie stroja aj ďalšie pomocné meradlá. Aj keď CMM obsahujú aj iné meradlá, ich primárnou funkciou je meranie dĺžky. Problematika kalibrácie sa obmedzí iba na túto veličinu [30].

V prvom kroku sa zistia chyby vedenia snímacieho systému v smere troch súradnicových osí v závislosti na polohe vnútorného rozsahu každej súradnice. Vznik týchto chýb súvisí s tým, že mechanizmus stroja má obecné šesť stupňov voľnosti v jednom smere pohybu. Ide teda o šesť nelineárnych funkcií, ktoré sú získané experimentálnym spôsobom pri použití meracích prístrojov, unikátnych etalónov a kalibračných postupov. Napríklad v ose x ide o tri funkcie rotačných chýb R_{xx} , R_{xy} , R_{xz} , ďalej dve funkcie pre translačné chyby T_{xy} a T_{xz} a funkcie nelinearity merítka L_{xx} [30].

V závislosti na rozsahu v príslušnej osi sa tieto merania robia s krokom 10, 20, 50, 100 alebo 200 mm. Väčší krok sa už nezvykne používať. V prípade, že sa jedná o súradnicový stroj, ktorý slúži k meraniu veľkých dielcov, napr. karosérií áut s rozsahom 6000 mm v najdlhšej osi obsahuje meranie desiatky hodnôt. Po zistení chybovej funkcie v smere všetkých troch súradnicových osí je potrebné ešte zistiť chyby pravouhlosti vedenia ϕ_{xy} , ϕ_{yz} , a ϕ_{zx} . Ide o dôležitý krok z dôvodu zjednodušenia, pretože výpočtový software vykonáva matematické výpočty v pravouhlom euklidovskom priestore, ktoré sú oproti výpočtu v obecnom nepravouhlom priestore pomerne zjednodušené [30].

Pre názornosť je možné na obr. 2.12 vidieť príklad tabuľky pre šesť funkcií, v závislosti na zvolenom kroku portálového CMM s údajmi pre korekciu v ose z, vrátane tabuľky údajov korekcie chýb pravouhlosti všetkých troch osí [30].



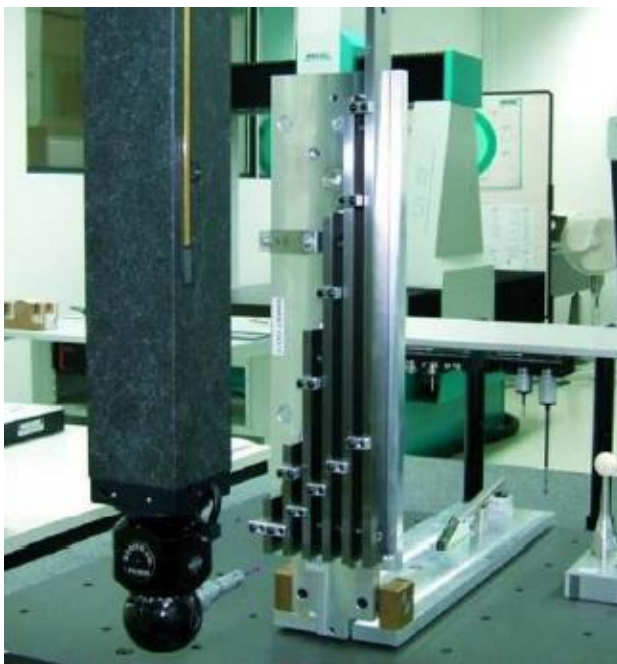
Step	Rzx	Rzy	Rzz	Lzx	Lzy	Lzz
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-50.0	10.0	-8.0	1.0	-.7	2.9	6.5
-100.0	18.0	-15.0	-2.2	-1.2	6.2	13.3
-150.0	23.0	-20.0	-2.7	-2.6	9.1	20.5
-200.0	25.0	-22.0	-3.0	-2.9	11.2	27.7
-250.0	25.0	-23.0	1.8	-2.7	12.6	34.7
-300.0	26.0	-22.0	5.6	-1.8	13.8	41.4
-350.0	26.0	-20.0	11.0	-.2	14.6	49.0
-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

Squareness			
Square	XY	YZ	ZX
56.8	38.3	61.4	56.8

Obr. 2.12 Náhľad mapy korekcií portálového CMM pre osu z vrátane konštánt ku korekcií chýb pravouhlosti v rovinách xy, yz a zx [30]

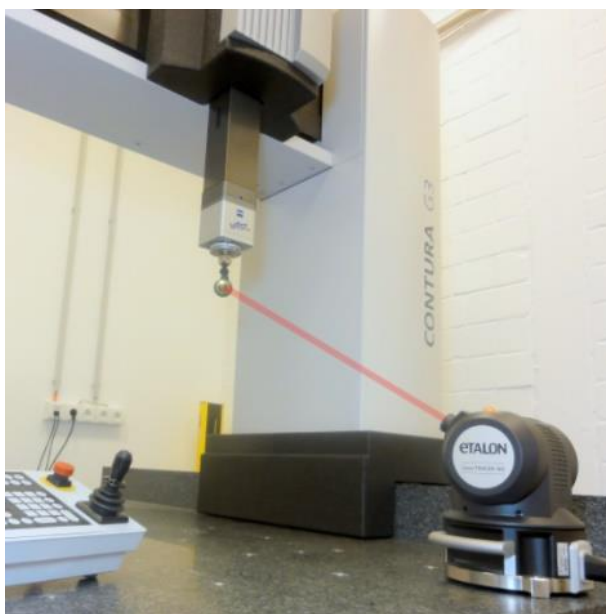
Ani vykonanie celkovej kalibrácie meracích strojov v dvoch krokoch nie je zárukou toho, že výsledky merania budú spĺňať požiadavky na metrologickú nadväznosť, alebo že je súradnicový stroj metrologicky spôsobilý a v zhode so špecifikáciou [30].

Kalibrácia strojov je rozsiahly proces, ktorý si vyžaduje zaistenie potrebných etalónov a vhodných postupov, ktoré umožňujú vykonávať a vyhodnocovať kalibráciu v potrebnom rozsahu. Pre kalibráciu CMM sa najčastejšie používajú hmotné dĺžkové etalóny, čiže koncové mierky, ktoré je možné vidieť na obrázku obr. 2.13. Použitie koncových mierok je vhodné hlavne pri prístrojoch s dotykovým snímacím systémom [10].



Obr. 2.13 Príklad kalibrácie portálového CMM pomocou koncových mierok [30]

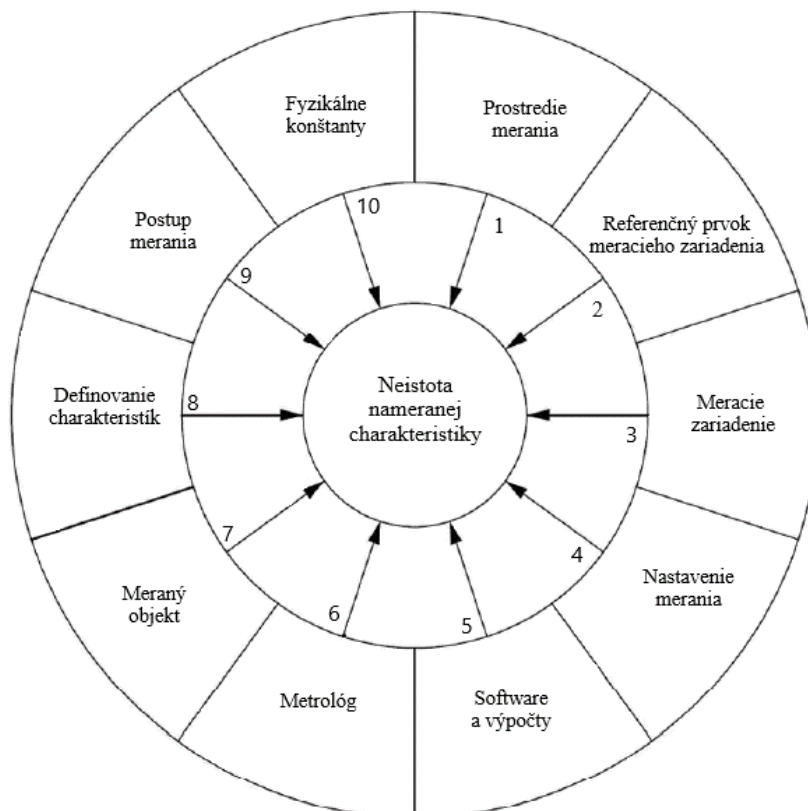
Pri strojoch s väčším rozsahom sa používa ako etalón priemyslový laserový interferometer alebo obdobný prístroj, ako napríklad trakčný laser, viď obr. 2.14. Pri prístrojoch s optickým snímaním sú využívané sklenené čiarové meradlá, sklenené mriežky, prípadne ich kombinácia s laserovým interferometrom [10].



Obr. 2.14 Príklad kalibrácie portálového CMM pomocou trakčného laseru [31]

2.5 Presnosť merania a zdroje neistôt

Aj keď neexistuje jednotný systém vyjadrovania presnosti merania na CMM, je ju možné chápať ako schopnosť meracieho zariadenia poskytovať namerané výsledky zhodné so skutočnými hodnotami meranej veličiny [2; 27]. Celková presnosť na súradnicových strojoch je ovplyvnená jednotlivými nepresnosťami. Každý súradnicový stroj je zložitý systém, ktorý sa skladá z veľkého množstva častí a tie sú zdrojom čiastkových neistôt, ktoré negatívne ovplyvňujú výsledné meranie. Okrem toho sú tu aj okolité podmienky, ktoré rovnako vplyvajú na presnosť merania [2]. Významné zdroje neistôt pri meraní na súradnicových strojoch je možné vidieť na obr. 2.15.



Obr. 2.15 Zložky neistôt merania [32]

Prostredie merania – vo väčšine prípadov je teplota hlavnou zložkou neistoty či už ako absolútna teplota, alebo zmena v čase. Ďalšími zložkami môžu byť vibrácie, hluk, vlhkosť, prúdenie vzduchu, osvetlenie a iné [32].

Referenčný prvok meracieho zariadenia – neistoty z referenčného prvku môžu pochádzať z teplotného súčiniteľa rozťažnosti, nevyhovujúcej stálosti, nevhodnej kalibrácie, alebo uplynutia dlhej doby od poslednej kalibrácie [32].

Meracie zariadenie – rovnako aj meracie zariadenie môže byť zdrojom neistôt vyplývajúcich z tuhosti stroja, doby od poslednej kalibrácie, charakteristik odozvy, geometrickej nedokonalosti zariadenia, nestálosti nulového bodu, alebo systému odčítania nameraných hodnôt [32].

Nastavenie merania – môže ísť o nevhodné umiestnenie, uchytenie alebo osvetlenie meranej súčasti, čoho dôsledkom môžu byť chyby pri odčítavaní meraných údajov [32].

Software a výpočty – ide o chyby vyplývajúce zo zavedenia a korekcie algoritmov, zaokrúhľovania a kvantifikácie údajov, prepočtu číslíc vo výpočte, filtrovania nameraných údajov, manipulácie s odľahlými hodnotami, interpolácie a extrapolácie hodnôt [32].

Metrológ – meranie je ovplyvnené fyzickými schopnosťami, vzdelaním, skúsenosťami, znalosťami, tréningom alebo čestnosťou obsluhy, ktorá ho vykonáva [32].

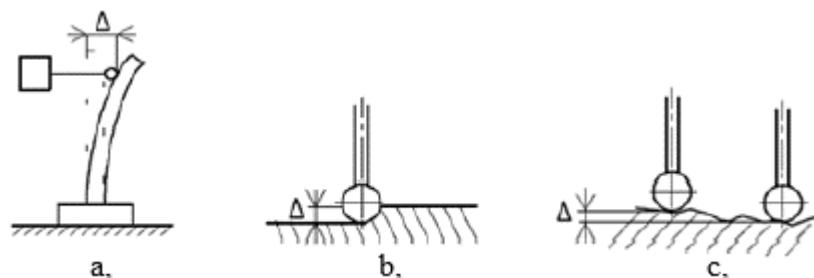
Meraný objekt – na výsledok merania vplýva drsnosť povrchu, teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti, nečistoty, vnútorné napätie, veľkosť a tvar, prípadne starnutie objektu [32].

Definovanie charakteristík – ide o stanovenie geometrickej špecifikácie produktu (GPS) alebo stanovenie charakteristiky meracieho stroja. Nesprávne nastavenie referenčného systému, stupňov voľnosti, základne, vzdialenosti alebo uhla, môže viesť k skresleným výsledkom merania [32].

Postup merania – ovplyvňuje ho počet a poradie meraní, doba trvania merania, voľba princípu merania, upevnenie meranej súčasti a stratégia merania [32].

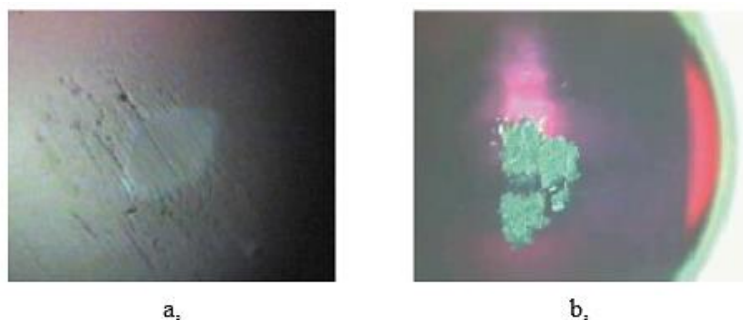
Fyzikálne konštanty – je potrebné poznať správne fyzikálne hodnoty, aby nedochádzalo k nesprávnym postupom a vyhodnocovaniu merania [32].

Presnosť merania je ovplyvnená aj charakterom meraného objektu. Pri meraní súčasti môže dotyková sonda spôsobiť deformácie poddajných miest (obr. 2.16 a.), poddajnosť povrchu súčasti (obr. 2.16 b.) alebo tvarovú odchýlku kontrolovaného objektu (obr. 2.16 c.) [2].



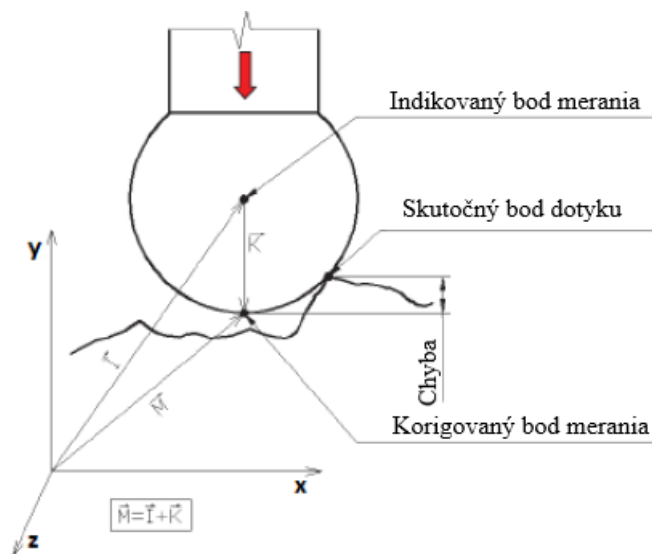
Obr. 2.16 Chyby vznikajúce pri meraní: a, deformácia poddajných súčastí, b, poddajnosť povrchu súčastí, c, tvarová úchylka kontrolovaného povrchu [2]

Ďalší vplyv na presnosť merania vychádza z opotrebenia hrotu dotyku (obr. 2.17 a.). Ak dôjde ku kontaktu medzi snímacím hrotom a meraním objektom v mieste opotrebenia hrotu, môžu vznikať systematické chyby merania. Skutočný rozmer snímačej guľičky je v mieste opotrebenia iný, než s akým počíta súradnicový stroj. Príčinou takéhoto opotrebenia môže byť napríklad opotrebenie oterom alebo usádzanie materiálu meraného objektu na povrchu hrotu (obr. 2.17 b.) [2].



Obr. 2.17 Opatrenie hrotu dotyku: a, oterom, b, usadzovanie hliníku na povrchu hrotu [2]

Na presnosť môže mať aj vplyv prepočtu súradníc meraného bodu. Na obr. 2.18 je možné vidieť princíp prepočtu týchto súradníc. Princíp merania na súradnicovom stroji vychádza zo zaznamenávania súradníc indikovaného bodu merania, ktorý sa nachádza v strede snímačieho hrotu. Po zaznamenaní snímaného objektu CMM prepočíta jeho súradnice do korigovaného bodu merania, ktorý je predpokladaným bodom na povrchu meranej súčasti. Môže nastať problém, že korigovaný bod merania nie je rovnaký ako skutočný bod dotyku a z toho vzniká chyba merania.



Obr. 2.18 Prepočet súradníc zo snímaného bodu [2]

2.6 Obecné postupy k stanoveniu neistoty merania CMM

V praxi existuje mnoho metód, ktoré slúžia ku stanovovaniu neistoty merania na CMM. Ide o metódy často využívané v laboratórnych podmienkach a okrem toho stále častejšie nachádzajú aj svoje uplatnenie v priemysle. Medzi tieto metódy patrí substitučná metóda, multipozičná metóda, alebo metóda Monte Carlo.

2.6.1 Substitučná metóda

Je experimentálna metóda, ktorá sa používa k stanovovaniu presnosti merania a je založená na porovnaní meraného a referenčného objektu. K určeniu hodnoty neistoty merania sa používa štatistické vyhodnocovanie nameraných hodnôt meraného objektu vzhľadom ku kalibrovanej hodnote referenčného objektu. Jej cieľom je určenie účinkov neistoty vo forme odchýlok od nominálneho rozmeru, čiže stanovenie veľkosti neistoty, ktorá sa môže vyskytovať pri meraní [18]. Táto metóda vyžaduje dostatočný počet opakovaných meraní a zaoberá sa ňou norma ČSN EN ISO 15 530-3 [33].

Prvou úlohou pri vyhodnocovaní neistoty merania pomocou substitučnej metódy je nastavenie CMM a zaistenie teplotnej stability etalónu, alebo kalibrovaného objektu a rovnako aj súradnicového stroja. Ďalej na to nadväzuje vykonanie dostatočného množstva meraní určeného etalónu alebo kalibrovaného objektu pri rovnakých podmienkach merania. Ide hlavne o systematické meranie polohy a orientácie kalibrovaných objektov, rovnaký počet a postup merania a použitie rovnakého druhu sondy a nastavení [33].

Dôležité je tiež sledovať a kontrolovať podmienky okolia, ako je teplota, vlhkosť alebo tlak. V prípade ak nie je možné zachovať rovnaké podmienky merania, musia byť všetky tieto zmeny brané na zreteľ. Pred samotným meraním je dôležité, aby po zapnutí prístroja prebehli prípravy na meranie ako je napríklad konfigurácia sondy, vynulovanie os alebo nastavenie korekcií vzhľadom k okolitej teplote [18].

Rozdiely medzi nameranými hodnotami kalibrovaných objektov a stanovenými hodnotami kalibrovaných objektov slúžia k odhadu neistoty merania. Tento rozdiel medzi hodnotami je možné označiť ako neistotu s akou meria súradnicový stroj [18].

2.6.2 Multipozičná metóda

Princíp metódy spočíva v opakovanom meraní určeného objektu, pri ktorom sa mení rozloženie meraných bodov a orientácia pre každú sériu merania. Vyhodnotenie nameraných hodnôt vychádza zo smerodajnej odchýlky meraných charakteristík, pričom sa rozlišujú dve zložky neistôt. Prvou je vplyv opakovateľnosti merania CMM spolu s rozložením meraných bodov a odchýlkou tvaru, drsnosti a vlnitosti meraného objektu. Druhou je vplyv geometrických chýb súradnicového stroja v spojitosti s vplyvom meracieho dotyku [18].

Pri meraní hodnôt pozície alebo vzdialenosti je potrebné brať do úvahy ďalšie zložky neistôt. Konkrétne ide o priemernú neistotu merania štandardu dĺžky, priemernú neistotu dotyku a štandardnú neistotu tepelných korekcií súradnicového stroja, meranej súčasti a etalónu dĺžky. Výsledok kalibrácie meraných charakteristík je ďalej upravený o priemernú neistotu merania. Počas celého merania musia byť zachované stabilné podmienky [18].

2.6.3 Metóda Monte Carlo

Princíp tejto metódy spočíva v stanovení neistoty merania pomocou využitia nameraných hodnôt získaných zo substitučnej alebo multipozičnej metódy. Stanovenie neistoty nie je robené pomocou výpočtu jednotlivých zložiek neistoty a ich výsledného vplyvu na celkovú neistotu, ale pomocou simulácie [18].

Metóda Monte Carlo nezahŕňa len jednu hodnotu akou je napríklad priemer zo série meraní, ale skúma správanie systému pre rôzne hodnoty prevzaté z rozdelenia pravdepodobnosti pre vstupné veličiny. Tieto hodnoty sa pohybujú okolo priemernej hodnoty. V prípade, keď už je určený matematický model merania, priradí sa každej vstupnej veličine rozdelenie pravdepodobnosti, ktoré ju popisuje [10].

2.7 Legislatíva a normy

Praktická časť diplomovej práce je venovaná stanoveniu neistoty merania CMM v oblasti nanometrológie. Práca musí byť urobená v súlade so stanovenými požiadavkami podľa už spomínaného zákona o metrológii č. 505/1990 Sb. a technických noriem ČSN EN ISO 10360 a ČSN EN ISO 17 025.

2.7.1 ČSN EN ISO 10 360

Ide o rad technických noriem, ktoré sa venujú meraniu na súradnicových strojoch. Každá časť je vyhradená určitej oblasti, ako napríklad definovaniu základných pojmov, odhadu chýb pri výpočte prvkov, strojom pre meranie lineárnych rozmerov, strojom s osou otočného stola ako štvrtou osou, optickým CMM, alebo trakčným laserom.

V tomto prípade je dôležitá druhá časť venovaná súradnicovým meracím strojom, používaných pre meranie lineárnych rozmerov. Jej cieľom je definovanie skúšobných postupov pre [34]:

- Skúšku chyby indikácie kalibrovannej skúšobnej dĺžky pomocou snímačej hlavy bez akéhokoľvek odsadenia hrotu snímačieho dotyku.
- Skúška chyby indikácie kalibrovannej skúšobnej dĺžky pomocou snímačej hlavy so špecifikovaným odsadením hrotu snímačieho dotyku.
- Skúška reprodukovateľnosti merania kalibrovannej skúšobnej dĺžky.

Výhodou týchto skúšok je, že výsledok merania má priamu nadväznosť na jednotku dĺžky metra a poskytuje informácie o súradnicovom stroji pri obdobných meraniach dĺžok [34].

Norma špecifikuje výrobcovi stanovené preberacie skúšky pre overenie spôsobilosti CMM používaných pre meranie lineárnych rozmerov, zároveň charakterizuje periodické skúšky, ktoré umožňujú používateľom overovať spôsobilosť CMM v pravidelných časových odstupoch [34].

Preberacie a periodické skúšky podľa tejto časti normy sú použiteľné len pre karteziánske súradnicové stroje využívajúce dotykové snímacie hlavy, s akýmkoľvek operačným typom v režime snímania diskretných bodov. Technická norma neplatí pre stroje, ktoré nevyužívajú karteziánsky súradnicový systém a pre stroje s optickým snímaním. V oboch prípadoch je možnosť použitia tejto časti normy pre takéto CMM po vzájomnej dohode [34].

Norma ďalej špecifikuje požiadavky na spôsobilosť, ktoré môžu byť stanovené výrobcom alebo užívateľom zariadenia. Jedná sa o typ a spôsob vykonania preberacích a periodických skúšok k preukázaniu určených požiadavkou, pravidiel pre skúšku zhody a aplikácie, pre ktoré môžu byť tieto skúšky použité [34].

Samotné skúšky musia byť robené podľa určitých postupov, ktoré zvykne udávať výrobca zariadenia. Ide napríklad o spustenie stroja a jeho zahriatie, konfiguráciu systému snímacích dotykov, proces čistenia snímacích dotykov, kvantifikáciu snímacieho systému, teplotnú stabilitu systému pred samotnou kalibráciou alebo umiestnenie, typ a počet senzorov [34].

2.7.2 ČSN EN ISO 17025:2018

Táto norma rozoberá požiadavky na kompetenciu skúšobných a kalibračných laboratórií a jej cieľom je podporiť dôveru v pracovnú činnosť laboratórií. Obsahuje obecné požiadavky pre laboratória, ktoré im umožňujú preukázať, že pracujú nezávisle a sú schopné poskytovať platné výsledky. Laboratória, ktoré pracujú podľa tejto normy sú spravidla aj v súlade so zásadami ISO 9001 [35].

Zásady uvedené v tejto norme vyžadujú, aby laboratórium plánovalo a uplatňovalo opatrenia zamerané na riešenie rizík a tým vytvárali základ pre zvýšenie efektivity systému riadenia, dosiahnutie lepších výsledkov a predchádzali negatívnym dopadom. Rovnako uľahčuje spoluprácu medzi laboratóriami a ostatnými subjektami pri výmene skúsenosti a informácií [35].

Vyžaduje sa, aby laboratóriom bolo právnym subjektom alebo jeho definovanou súčasťou, ktorá právne zodpovedá za svoju laboratórnu činnosť. Musí mať definovaný a dokumentovaný rozsah činností, ktoré sú v súlade s touto normou. Dôležité je tiež, aby laboratórium malo určenú organizačnú štruktúru s definovanými vzťahmi medzi vedením, prevádzkou a podpornými službami laboratória [35].

V rámci metrologickej nadväznosti musí laboratórium stanovovať a udržiavať výsledky merania pomocou dokumentovaného nepretržovaného reťazca kalibrácií, z ktorých každá prispieva k neistote merania a vzťahuje ich k príslušnej referencii. Takisto je dôležité zaistiť, aby výsledky merania boli nadviazané na medzinárodnú sústavu jednotiek (SI). Robí sa to pomocou kalibrácie, ktorú vykonáva certifikované laboratórium. Ďalej je to pomocou hodnôt z certifikovaných referenčných materiálov s uvedenou metrologickou nadväznosťou, alebo pomocou priamej realizácie jednotiek SI zaistovanej porovnávaním buď priamo alebo nepriamo s využitím národných alebo medzinárodných etalónov. Kde nie je možné zaistiť metrologickú nadväznosť na jednotky SI, musí laboratórium deklarovat' nadväznosť pomocou certifikovaných referenčných materiálov alebo výsledkov referenčných meracích postupov, špecifikovaných metód alebo konsenzuálnych postupov. Tie musia byť jasne popísané a akceptované ako poskytujúce výsledky merania vhodné pre uvažované použitie [35].

Metrologickú nadväznosť je možné stanoviť pomocou špecifikácie meranej veličiny, alebo dokumentovaným nepretrženým reťazcom kalibrácií až k stanoveným referenciám. Tými sú národné a medzinárodné etalóny a prirodzené štandardy [35].

Pri všetkých laboratórnych činnostiach musia byť používané vhodné postupy a metódy pre vyhodnocovanie neistoty merania a štatistickú analýzu vyhodnocovania údajov [35].

3 CHARAKTERISTIKA PRÍSTROJOV POUŽÍVANÝCH PRE MERANIE

Práca sa zaoberá stanovením presnosti súradnicových meracích strojov používaných v nanometrológii. Pre tento účel budú využívané dva prístroje, ktoré budú medzi sebou navzájom porovnávané. Konkrétne ide o súradnicový stroj Zeiss UPMC 850 Carat a SIOS NMM-1. Ide o stroje, ktoré sa nachádzajú na pôde ČMI v Brne. Jeden z nich, SIOS NMM-1 patrí výskumnému inštitútu CEITEC, s ktorým ČMI dlhodobo spolupracuje. Účelom práce je stanovenie neistoty oboch týchto súradnicových strojov a porovnanie výsledkov merania. Meranie prebehne na rovnakom etalóne oboma prístrojmi. Pri zariadení od výrobcu SIOS pôjde o meranie na hranici najväčších rozmerov, ktoré je daným strojom možné merať. V prípade prístroja od výrobcu Zeiss pôjde naopak o hranicu najmenších rozmerov. Bude zaujímavé porovnať, či sa medzi sebou budú namerané hodnoty líšiť a akým spôsobom. Pre správne pochopenie používaných prístrojov je žiadané sa zoznámiť s ich základnými špecifikáciami a fungovaním, čomu sa venujú kapitoly 3.1 a 3.2.

3.1 Špecifikácia prístroja SIOS NMM-1

Ide o meracie zariadenie, ktoré bolo vyvinuté spoločnosťou SIOS Meßtechnik GmbH v spolupráci s Technickou univerzitou v Ilmenau. Je určené k meraniu malých trojrozmerných objektov v rozsahu $25 \times 25 \times 5$ mm a s rozlíšením 0,1 nm [36; 37]. Tento prístroj je možné vidieť na obr. 3.1.

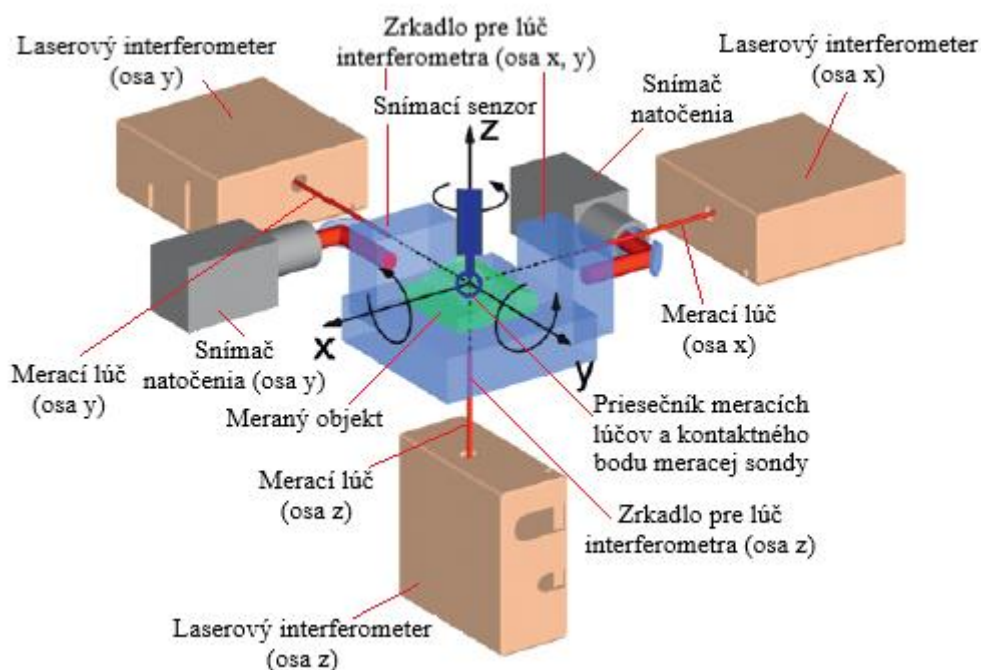


Obr. 3.1 SIOS NMM-1 v laboratóriu ČMI

Dôležité časti stroja sú vyrobené zo sklo-keramického materiálu, ktorý sa označuje ako Zerodur a vyznačuje sa minimálnym koeficientom tepelnej rozťažnosti ($\alpha = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Spolu s unikátnym usporiadaním snímačov to umožňuje elimináciu Abbého chyby vo všetkých troch osiach merania [10]. K meraniu dĺžky sa používajú tri laserové interferometre, ktorých

osi merania sa pretínajú v kontaktnom bode snímacieho systému a meraného objektu. Zaujímavosťou je, že na rozdiel od ostatných CMM všetky pohyby v osiach x, y a z sú vykonávané pracovným stolom, ktorého súčasťou sú rohové zrkadlá. Meracia sonda je stále v rovnakej, nepohyblivej polohe [10; 37].

Prístroj pracuje na princípe využitia hélum-neónových laserových interferometrov s vlnovou dĺžkou 633 nm, ktoré majú vysoko stabilnú frekvenciu a softwarovo ovládaným prístrojovým vybavením [10]. Pracovný stôl je vyrobený z materiálu Invar, ktorý sa vyznačuje nízkym koeficientom tepelnej rozťažnosti ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Akékoľvek odchýlky, ktoré by mohli nastať behom posunu základne, sú kontrolované a korigované pomocou dvoch uhlových snímačov. Laserové lúče sú vedené pomocou optických vlákien priamo z elektrickej jednotky laserového interferometru cez laserový delič lúčov do združeného rohového zrkadla, ktoré slúži ako odrážač. Takéto konštrukčné riešenie poskytuje odolnosť voči teplotným vplyvom z hľadiska dĺžkovej rozťažnosti materiálu [10; 37]. Princíp fungovania meracieho zariadenia je možné vidieť na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Schéma princípu prístroja SIOS NMM-1 [37]

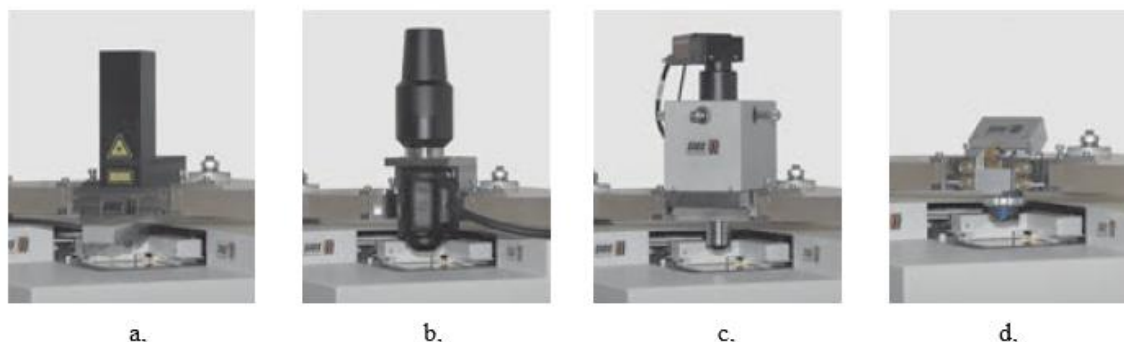
Z dôvodu obmedzenia vibrácií je celá meracia základňa umiestnená na odpružených prvkoch. Konštrukcia prístroja umožňuje celý priestor, v ktorom sa vykonáva meranie, odizolovať pomocou uzatvárateľného veka. V tomto priestore sú tiež umiestnené senzory pre monitorovanie teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu [36; 37].

Pre jednoduchšiu manipuláciu a ovládanie prístroja pri meraní sú v pracovnom priestore zabudované dve digitálne kamery. Polohu týchto kamier je možné upravovať pomocou nastaviteľných držiakov. Ich výhoda je hlavne pri translačných posuvoch pracovného stolu alebo pri kontrole vlastného priestoru merania, pričom kamery monitorujú posuv v osiach x a y. K ich ovládaniu sa používa software microEye a kamery sú priamo napojené na počítač USB rozhraním [10].

Riadiacim centrom prístroja je procesor DSP (Digital Signal Processor), ktorý spracováva všetky vstupné signály, ovláda pohonné systémy a riadi vlastný proces merania. Táto riadiaca jednotka je umiestnená v samostatnej časti z dôvodu minimalizácie nežiadúcich vplyvov na proces merania a činnosť stroja [36; 37].

Spolu so strojom sa dodáva aj software Nanopositioning and Nanomeasuring Control Software, ktorý slúži k prepojeniu a prenosu údajov medzi riadiacou jednotkou prístroja a užívateľom, umožňuje aj nastavenie všetkých potrebných parametrov pre meranie. Tento software pracuje na operačnom systéme Windows, ale umožňuje aj využívanie vlastných skriptov napísaných napríklad v programe Matlab [10].

Výhodou prístroja je možnosť výmeny snímacích systémov, ktoré sa umiestňujú v ose z nad pracovným stolom. Tieto systémy je možné vidieť na obr. 3.3. Každý snímací systém je vhodný pre určitú oblasť merania. Záleží od zvolenej stratégie merania a od povahy meraného objektu. Konkrétne ide o laserový zaostrovací systém (obr. 3.3 a.), mikroskop atómových síl (obr. 3.3 b.), snímač chromatického bieleho svetla (obr. 3.3 c.) a 3D dotykovú sondu (obr. 3.3 d.) [36].



Obr. 3.3 Druhy snímacích systémov pre NMM-1 [36]

Pre účely merania bude využívaná dotyková sonda Gannen XP, vid' obr. 3.4. Ide o sondu s najnižšou neistotou merania zo všetkých dostupných dotykových snímacích systémov na trhu. Základ sondy tvorí kremíkový čip s integrovanými piezoelektrickými prvkami. Jej celková hmotnosť je približne 34 mg v závislosti od použitého priemeru snímača. Táto sonda umožňuje meranie malých a krehkých súčastí, ktoré by nemohli byť merané štandardným súradnicovým strojom s dotykovými sondami [10; 38]. Jej umiestnenie je statické, translačný pohyb vo všetkých troch osiach vykonáva pohyblivá základňa stroja. To umožňuje zaistiť plynulý a rovnomerný posun počas celého merania s presne definovanou prítlačnou silou [10].

Súradnicové meracie stroje SIOS NMM-1 sú vyrábané v kusovej produkcii s možnou špecifikáciou prevedenia podľa potrieb zákazníka. Užívateľmi sú zväčša vedecké a študijné inštitúcie, prípadne národné metrologické úrady, ktorých cieľom nie je klasické komerčné využitie [10; 37].



Obr. 3.4 Dotyková sonda Gannen XP [37]

3.2 Špecifikácia prístroja Zeiss UPMC 850 Carat

Ide o portálový CMM s pevným stolom a pohyblivým portálom od výrobcu Carl Zeiss AG. Hlavný rozdiel oproti stroju SIOS NMM-1 je v rozsahu merania. Stroj dokáže merať súčasti s rozmerom $850 \times 1200 \times 600$ mm a maximálnou hmotnosťou 1500 kg. Je koncipovaný ako meracie zariadenie s CNC riadením. Je ho možné vidieť na obr. 3.5 [39].



Obr. 3.5 CMM Zeiss UPMC 850 Carat na pracovisku ČMI [40]

Pohyb v osiach x, y a z vykoná dotyková sonda prostredníctvom portálovej konštrukcie, pričom meraný objekt je pripevnený na pracovnom stole. Výrobca poskytuje aj opciu v podobe rotačného stola pre možnosť pohybu v štvrtvej ose [39].

Prístroj je vybavený univerzálnou dotykovou snímacou hlavou HSS, ktorá umožňuje aplikáciu rôznych snímacích dotykov. Ak by došlo k modernizácii stroja, mohla by byť na ňom použitá snímacia hlava Zeiss VAST Gold. Táto by poskytovala vyššiu dynamiku snímania a mala by vyššiu tuhosť vďaka vylepšeným kĺbovým spojeniam [41]. Pri meraní bude využívaná hlava HSS, ktorú je možné vidieť na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Snímacia hlava Zeiss HSS s pripevnenou dotykovou sondou

Rovnako aj v tomto prípade sú niektoré časti stroja z dôvodu minimalizácie teplotnej rozťažnosti vyrobené z materiálu Zerodur. Pracovný stôl stroja je vyrobený z granitu. Zaujímavosťou je, že stroj je vybavený rôznymi senzormi, ktoré umožňujú vykonávať tepelné a volumetrické kompenzácie pre potlačenie odchýlok pri meraní. Stroj je vybavený aj systémom pre potlačenie vibrácií tak, aby došlo k zníženiu ich negatívneho vplyvu na meranie. K pohybu stroja sa využívajú výkonné servopohony, ktoré umožňujú elimináciu tiažových síl vo všetkých osiach. Jeho najnižšia medzná hodnota pre neistotu merania dĺžky v jednej ose je $(0,40 + 1,11 L) \mu\text{m}$ a pre meranie dĺžky v priestore je $(0,70 + 1,67 L) \mu\text{m}$, kde L je meraná dĺžka v metroch [10; 39].

Pre zaistenie správnej prevádzky je potrebné dodržať stanovené požiadavky na okolité prostredie, inak by mohlo dôjsť k skresleným výsledkom merania alebo poškodeniu prístroja. Vlhkosť vzduchu by sa mala pohybovať v rozmedzí (40 - 60) %. Teplota okolia sa môže pohybovať v rozmedzí + 15 °C až + 30 °C. Doporučenou okolitou teplotou je však $+ 20 \pm 1$ °C. Z tohto dôvodu je pracovisko, kde je umiestený tento prístroj vybavené klimatizáciou [39].

Spolu so strojom je dodávaný software Calypso. Ide o vlastný software od spoločnosti Zeiss, ktorý slúži k ovládaniu a programovaniu stroja a dokáže fungovať na operačných systémoch UNIX a Windows. Software umožňuje plánovať a simulovať priebeh merania, alebo prevziať tolerancie tvaru a polohy na základe CAD modelu a uľahčiť tak samotné meranie. K ovládaniu prístroja sa používa riadiaca páka, ktorá je súčasťou ovládacieho panela, viď obr. 3.7 [39; 42].



Obr. 3.7 Riadiaci panel CMM Zeiss UPMC 850 Carat

Súradnicový merací stroj Zeiss UPMC 850 Carat je vhodný hlavne pre komerčné aplikácie, napríklad v oblasti kalibrácie etalónov a presných meradiel dĺžky, kontroly rôznych vzoriek a prototypov. Jeho výhodou je vysoká stabilita skenovania a univerzálnosť. Relatívne nižšia rýchlosť pri meraní poskytuje vysokú presnosť merania. Meranie je bez zrýchlenia s konštantnou presnosťou v celom rozsahu merania. Na stroji je možné regulovať rýchlosť posuvov pri konštantnej meracej sile pôsobiacej vždy kolmo na povrch meranej súčasti [39].

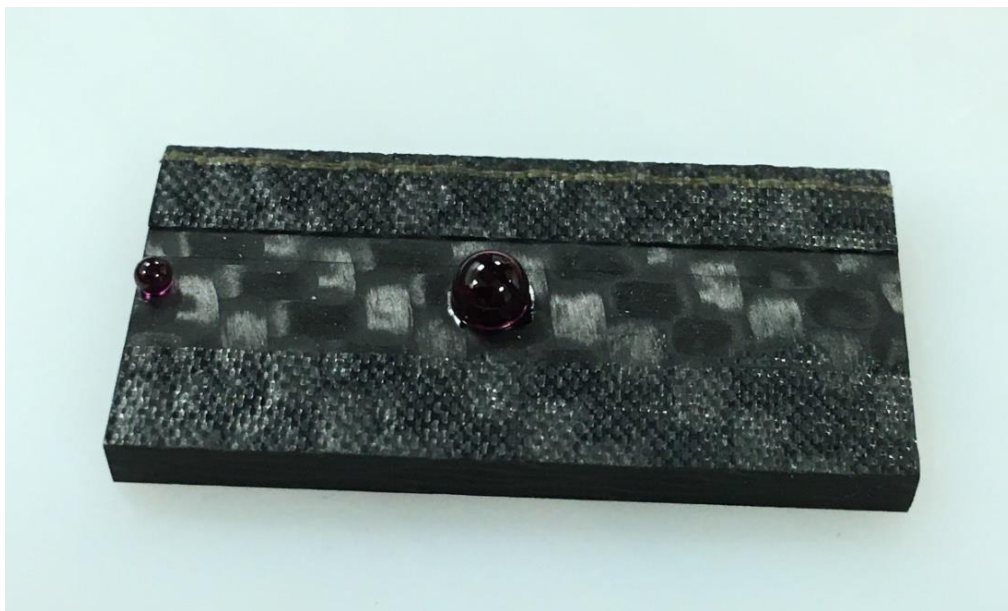
4 PREVEDENIE SÚBORU EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ

Samotné experimentálne meranie prebiehalo v priestoroch ČMI. Z časových dôvodov a harmonogramu meraní na ČMI bolo ako prvé urobené meranie na súradnicovom meracom stroji Zeiss UPMC 850 Carat a následne na stroji SIOS NMM-1. Obe meracie zariadenia sa nachádzajú v klimatizovaných laboratóriách tak, aby bolo možné udržať optimálne podmienky pre meranie. Laboratória sú okrem iného vybavené aj externými zariadeniami na meranie teploty a relatívnej vlhkosti, ktoré v krátkych pravidelných časových intervaloch vyhodnocujú aktuálnu teplotu a relatívnu vlhkosť v miestnosti. Ide o zariadenia od výrobcu Comet.

4.1 Rozbor meranej súčasti

Pre určenie neistoty meracích zariadení bolo najskôr potrebné vytvoriť etalón, na ktorom budú vykonávané merania s následným stanovením neistoty merania CMM. Etalón bol vytvorený tak, aby bolo možné porovnávať výsledky merania na prístroji Zeiss UPMC 850 Carat a SIOS NMM-1. Tieto prístroje majú rozdielne rozsahy merania a preto musela byť veľkosť etalónu prispôbená meraniu na oboch týchto prístrojoch.

Samotný etalón sa skladá z dvoch častí. Ide o karbónovú doštičku, v ktorej sú vytvorené slepé otvory, do ktorých sú pomocou epoxidového lepidla prilepené v definovanej vzdialenosti dve guľičky, vid' obr. 4.1. Guľičky majú rozdielnu veľkosť a sú vyrobené z rubínu Al_2O_3 . Na kraji sa nachádza menšia guľička, ktorej priemer je 2 mm a od nej, bližšie k stredu doštičky je guľička s priemerom 4 mm. Definovaná vzdialenosť medzi stredmi guľičiek je 17,3 mm, vid' príloha 1. Karbón pre doštičku bol zvolený pre jeho rozmerovú stabilitu a minimálnu teplotnú rozťažnosť, ktorá je $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Táto hodnota bola získaná experimentálnym meraním. Materiál bol meraný pri 20°C a pri 21°C , pričom sa pozorovala zmena jeho rozmerov a následne došlo k prepočtu, pri ktorom sa určil tento koeficient.

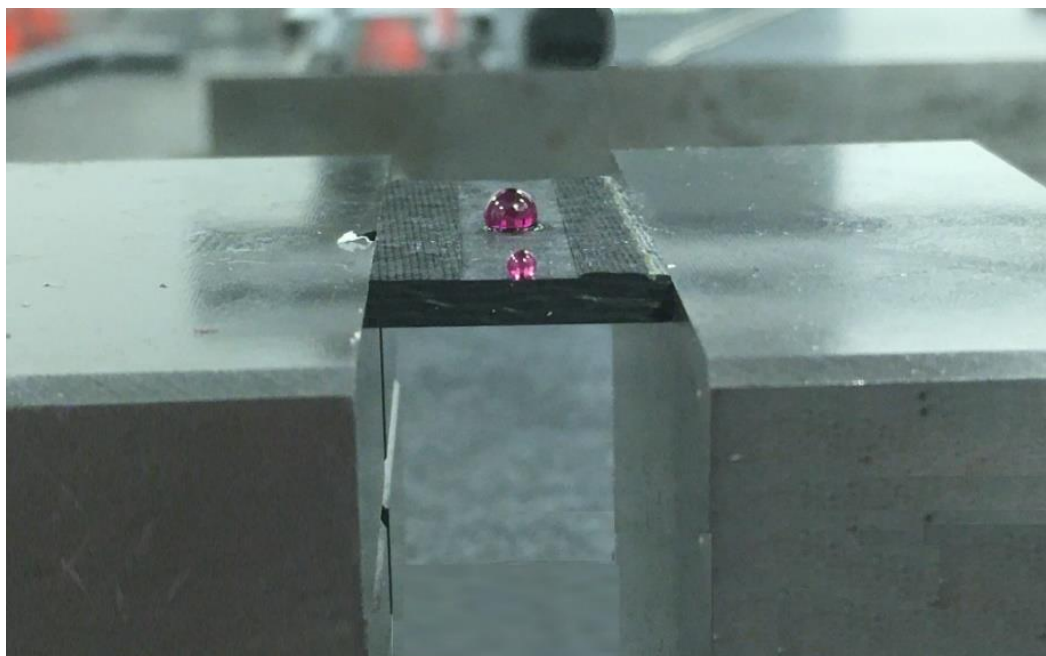


Obr. 4.1 Meraný objekt

4.2 Experimentálne meranie na prístroji Zeiss

Pred samotným meraním bolo potrebné urobiť nevyhnutnú prípravu. Tá spočívala v upevnení meraného objektu do zveráka tak, aby horná hrana karbónovej doštičky bola vyššie než hrana zveráku, z dôvodu zabránenia kolízie medzi snímacím dotykom a zverákom. K tomu boli využité podložky, na ktoré sa položil meraný objekt a následne došlo k jeho upnutiu. Po

upnutí boli tieto podložky spod zveráka odstránené. Upevnenie muselo byť primerane tuhé, aby nedošlo počas merania k uvoľneniu, prípadne k posunu meraného objektu. Avšak na druhej strane nemohlo byť príliš silné, pretože by mohlo dôjsť k deformácii karbónovej doštičky a k následnému posunu guľičiek od definovaných rozmerov. Upnutý meraný objekt je možné vidieť na obr. 4.2.



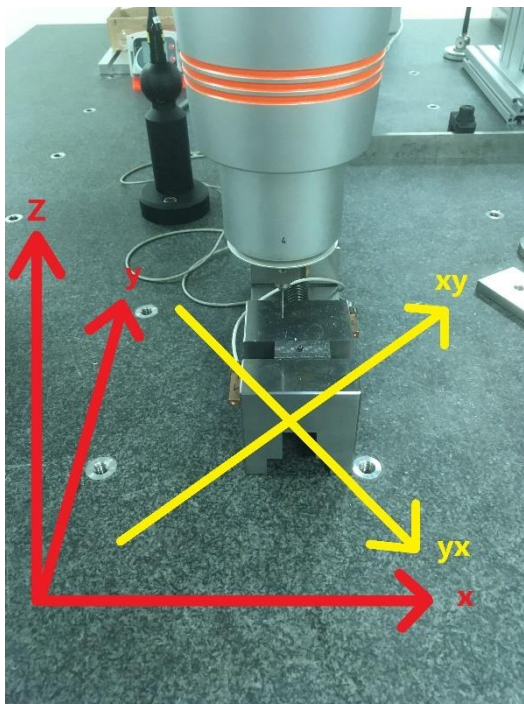
Obr. 4.2 Upnutie meraného objektu

Rovnako pred samotným meraním bolo potrebné vytvoriť program pre meranie. K tomu bol využitý dodávaný software Calypso od spoločnosti Zeiss. Tento program bol vytvorený v súlade s obecným postupom pre meranie tak, aby bolo možné zmerať požadované parametre. Pred začiatkom merania prebehlo temperovanie stroja, aby sa dostal na pracovnú teplotu a stabilizoval sa.

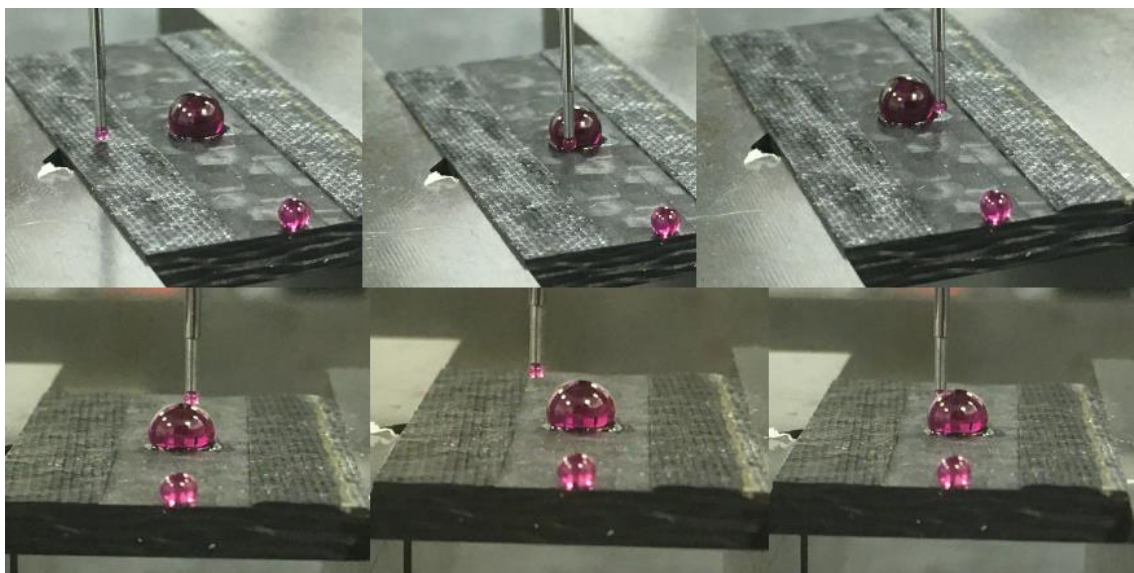
Stroj po zapnutí automaticky prejde do základnej polohy a je potrebné stanoviť počiatok súradnicového systému pre dané meranie. Počiatok súradnicového systému bol stanovený do stredu krajnej guľičky. Išlo o manuálne nastavenie pomocou využitia riadiaceho panela prístroja. Potom, ako bol definovaný počiatok súradnicového systému, prebehlo vyrovnanie pomocou hornej a čelnej plochy karbónovej doštičky, ktoré slúži k určeniu súradnicového systému. Súradnicový systém je orientovaný podľa týchto plôch. Samotné vyrovnanie následne prebehlo päťkrát.

Meranie bolo zamerané na priemery oboch guľičiek a hlavne na vzdialenosť medzi nimi. Stratégia snímania guľičiek bola taká, že každá guľička bola snímaná v dvoch výškových rovinách - kružniciach po šesť bodov. Celkovo každá guľička bola snímaná pomocou dvanástich bodov. Meranie týchto kružníc sa realizovalo na hornej polosfére guľičiek. Pre guľičku s priemerom 2 mm bolo prvé meranie 0,1 mm nad rovníkom a druhé 0,6 mm nad rovníkom. Pre guľičku s priemerom 4 mm bolo prvé meranie na úrovni rovníku a druhé 1 mm nad rovníkom. Uhol natočenia medzi jednotlivými dotykmi bol 60 °. Pootočením medzi prvou a druhou rovinou snímania bolo 30 °, vid' príloha 2. Stroj následne spracuje namerané body na povrchu guľičiek do jednotlivých záznamov. Do budúca je vhodné zvážiť úpravu etalónu, konkrétne uchytenie guľičiek, aby bola umožnená voľba meraných bodov na povrchu guľičky podľa normy ISO 10360-2.

Prvé meranie prebehlo v osi y, po nej nasledovala os x, ďalej došlo k meraniu v smere osi yx a osi xy (obr. 4.3). Čiže meranie prebiehalo celkovo v štyroch smeroch, v dvoch osiach a v dvoch uhlopriečkach. V každom smere bolo urobených desať meraní tak, aby bolo možné urobiť štatistické vyhodnocovanie neistoty merania. Posun pri meraní vo všetkých osiach vykonával snímací dotyk. Samotné meranie už prebiehalo automaticky s priebežným zaznamenávaním nameraných hodnôt (obr. 4.4).

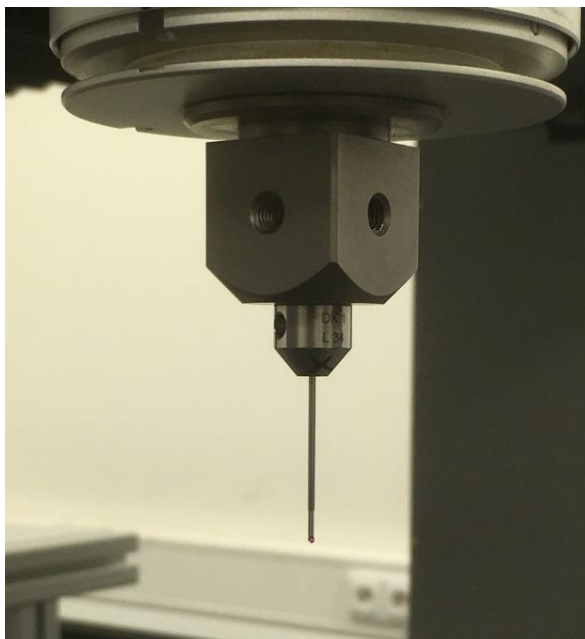


Obr. 4.3 Súradnicový systém pri meraní na prístroji Zeiss



Obr. 4.4 Ilustratívny priebeh snímania meraného objektu pomocou dotykovej sondy

Pri meraní rozmerov, či už guľičiek alebo vzdialenosti medzi nimi, bol použitý snímací dotyk s rubínovou guľičkou, ktorá mala priemer 1 mm. Driek dotyku bol vyrobený z korózií-odolnej ocele a mal dĺžku 34 mm. Ide o priamy dotyk od výrobcu Zeiss pripnutý k HSS hlave pomocou štandardného závitú M5. Pre merané guľičky s priemerom 2 a 4 mm ide o dostačujúci snímací dotyk z hľadiska tuhosti snímacieho systému (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Dotyk používaný k meraniu

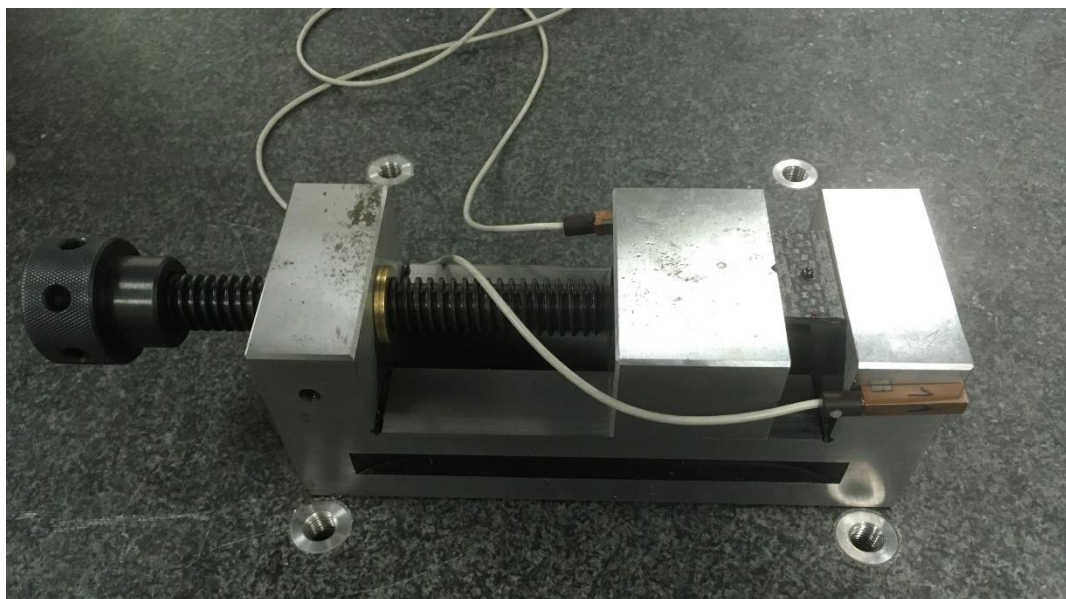
Podmienky merania boli v laboratóriu priebežne monitorované spomínaným externým zariadením Comet DataLogger pre meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu.

Teplota v miestnosti počas merania nedosahovala presnú hodnotu 20 °C, pretože sa v priebehu merania postupne zvyšovala. Pri poslednom meraní v smere osi xy bola najvyššia a dosiahla približnú hodnotu 20,7 °C (obr. 4.6). Bolo to spôsobené jednotným systémom klimatizácie v podzemných laboratóriách. Tým, že je systém klimatizácie prepojený s inými laboratóriami, nie je úplne možné dosiahnuť požadovanú teplotu 20 °C. Ďalšími vplyvmi bolo teplo od obsluhy, osvetlenia, alebo teplo od riadiacej jednotky prístroja. Nárast teploty bol postupný, nie skokový, čiže pre meranie to nepredstavovalo problém. V protokoloch merania je možné pozorovať tento postupný nárast teploty od začiatku merania v osi y až po jeho koniec v osi xy (príloha 3-6). Tento nárast teploty bol priebežne vyhodnocovaný a korigovaný CMM.



Obr. 4.6 Zariadenie pre meranie teploty a vlhkosti vzduchu

Teplotné kompenzácie na stroji boli vykonávané na základe údajov z dvoch teplotných snímačov, ktoré boli pripevnené na čeľustiach zveráku a rovnako aj pomocou zabudovaných teplotných senzorov v samotnom CMM Zeiss. Stroj priebežne monitoruje teplotu a vykonáva potrebné korekcie, čím minimalizuje jej vplyv na meranie. Rovnako aj samotná konštrukcia a mohutnosť stroja dokáže kompenzovať tento nie veľký postupný nárast teploty. Pokiaľ ide o dva snímače pripevnené na čeľustiach zveráku, tie by mali byť uchytené na meranom objekte, ale ten nie je magnetický. Z tohto dôvodu boli pripevnené na čeľustiach zveráku, vid' obr. 4.7.



Obr. 4.7 Teplotné snímače upevnené na čeľustiach zveráku

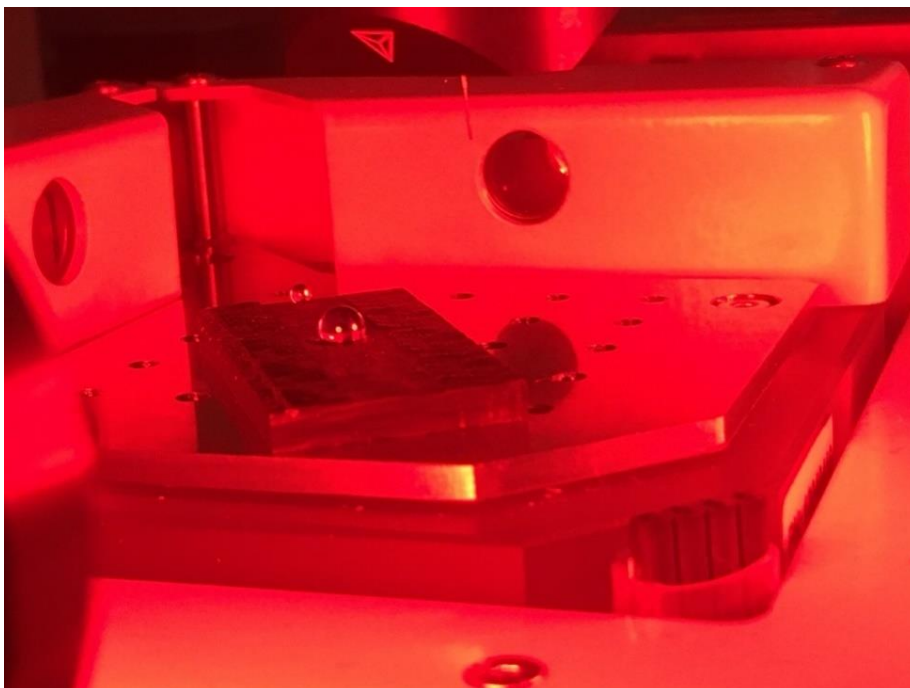
Pri určovaní charakteristík merania boli v softvare Calypso stanovené korekcie pre teplotnú rozťažnosť $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pre doštičku, ktorá je z karbónu. Počas merania dochádza k priebežnému zaznamenaniu a následnému spracovaniu získaných údajov do protokolu o meraní (príloha 3-6).

4.3 Experimentálne meranie na prístroji SIOS

Aj pred meraním na prístroji SIOS bolo potrebné urobiť prípravu, ktorá spočívala v umiestnení meraného objektu do pracovného priestoru stroja a k jeho temperovaniu.

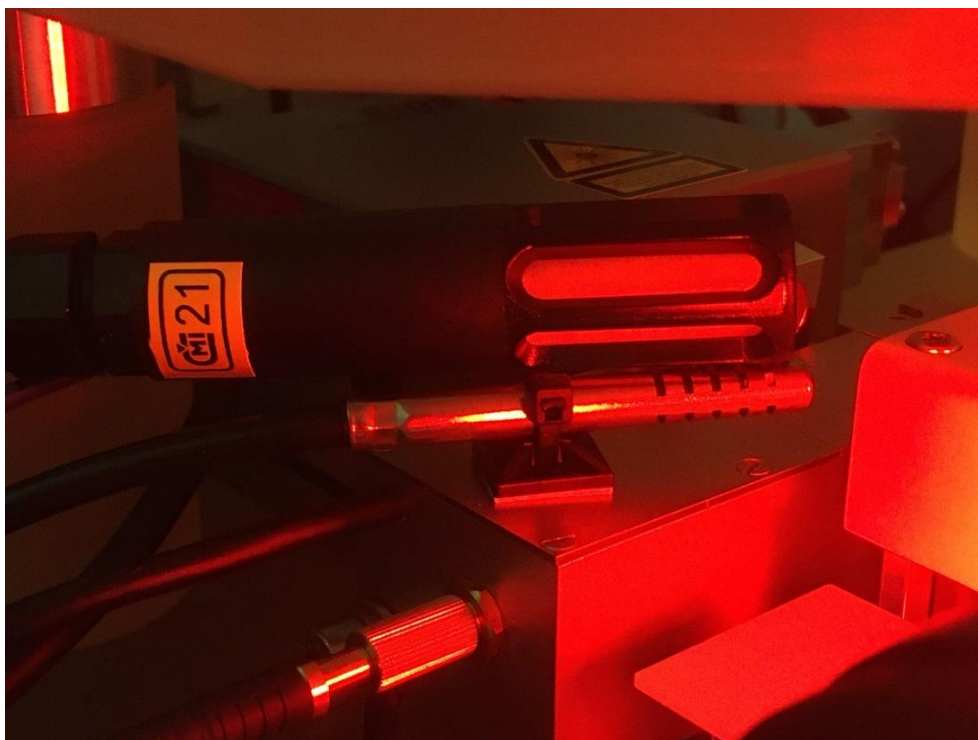
Meraný objekt bol voľne položený do pracovného priestoru stroja (obr. 4.8). Upevnenie karbónovej doštičky bolo voľné, pretože k stabilizácii sa využíva vlastná tiaž etalónu a zároveň rýchlosť posuvu etalónu k dotykovej sonde je veľmi nízka. Pri týchto minimálnych silách snímania je možné si dovoliť mať meraný objekt voľne položený bez toho, aby došlo k jeho posuvu počas merania. Potom, ako bol etalón umiestnený v pracovnom priestore, došlo k uzavretiu izolačného krytu pracovného priestoru stroja.

Následne bolo potrebné urobiť teplotnú stabilizáciu, pretože po zapnutí prístroja bolo možné sledovať postupný nárast teploty v pracovnom priestore. Meraný objekt sa pri zapnutom stroji nechal temperovať do ďalšieho dňa a až tak bolo možné pristúpiť k meraniu. Po tomto náraste teploty došlo k jej ustáleniu na úrovni približne $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento teplotný rozdiel počas merania od požadovaných $20 \text{ }^\circ\text{C}$ sa zohľadní pri vyhodnocovaní jednotlivých zložiek neistôt. Teplotný nárast bol spôsobený vplyvom vyžarovania tepla zo zariadení umiestnených v pracovnom priestore. Ide napríklad o interferometre, kamery, osvetlenie, posuvy, atď.



Obr. 4.8 Umiestnenie meraného objektu do pracovného priestoru stroja

Podmienky počas merania boli monitorované pomocou dvoch samostatných snímačov umiestnených v pracovnom priestore zariadenia (obr. 4.9). Prvý snímač je interný od výrobcu prístroja a druhý snímač je od výrobcu Comet. Zariadenie Comet slúži okrem monitorovania podmienok v pracovnom priestore aj k snímaniu okolitých podmienok v laboratóriu (obr. 4.10). Pri nastavovaní podmienok merania a samotnom meraní bol využívaný výrobcom dodávaný software Nanopositioning and Nanomeasuring Control Software.

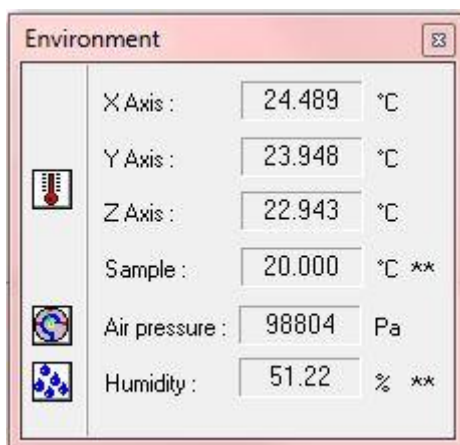


Obr. 4.9 Snímače umiestnené v pracovnom priestore meracieho zariadenia



Obr. 4.10 Zariadenie Comet k snímaniu podmienok v laboratóriu

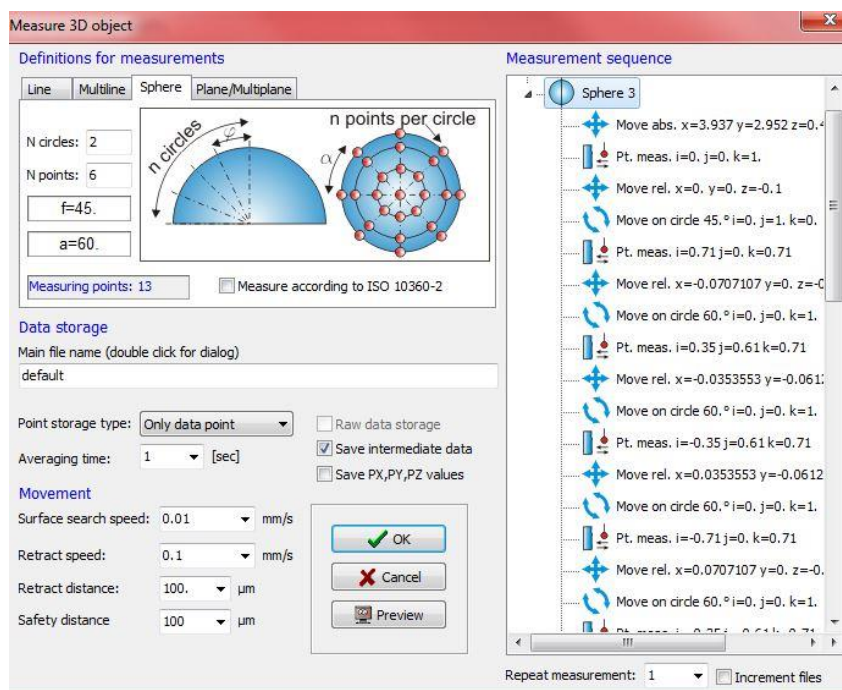
Dodávaný software okrem iného umožňuje zobrazovať aktuálnu teplotu v pracovnom priestore, tlak vzduchu alebo relatívnu vlhkosť vzduchu (obr. 4.11). Vplyv teploty v laboratóriu nie je pri meraní až tak zásadný, pretože pracovný priestor stroja, kde prebieha meranie, je izolovaný od okolia.



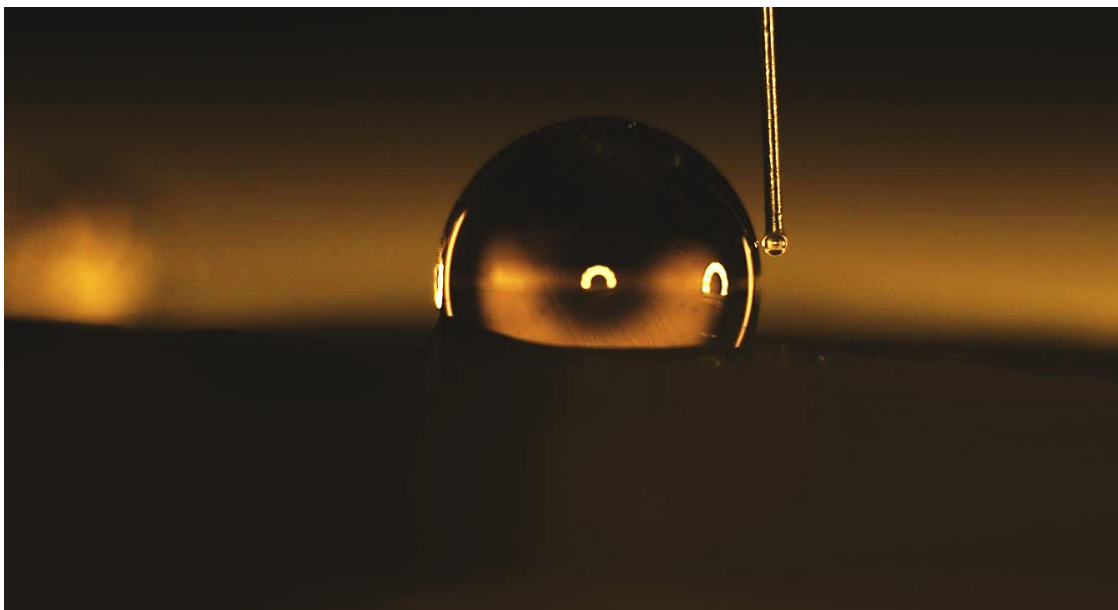
Obr. 4.11 Príklad zobrazenia podmienok merania

Po zapnutí stroja dôjde k spusteniu a inicializácii riadiacej jednotky a stabilizácii všetkých troch interferometrov pre odmeriavanie v osách x, y a z. Prvým krokom pri meraní bolo definovanie súradnicového systému meraného objektu. Ten je rovnaký, ako pri meraní na prístroji Zeiss. Na rozdiel od prístroja Zeiss bolo potrebné manuálne zadať polohu oboch meraných guľčiek a následne urobiť kalibráciu snímacieho systému. Vzhľadom k tomu, že pri zmene smeru merania je potrebné meraný objekt otáčať ručne pre daný smer, musí opätovne dôjsť k manuálnemu určeniu polohy obidvoch guľčiek. Určovanie polohy guľčiek prebieha každé zvlášť. Najskôr dôjde k určeniu polohy jednej guľčky a potom druhej. Na poradí guľčiek nezáleží. Vyrovnávanie prebieha na základe nameraných bodov, kedy dôjde k určeniu súradnicového systému.

Aj v tomto prípade bolo meranie zamerané na priemery a hlavne na vzdialenosť medzi stredmi guľičiek. Program umožňuje manuálne definovať počet meraných bodov, alebo automaticky nastaviť meranie 25 bodov podľa ISO 10360-2 (obr. 4.12). V tomto prípade bola stratégia snímania rovnaká, ako na prístroji Zeiss. Každá guľička bola snímaná v dvoch výškových kružniciach pre každú kružnicu po šesť bodov (obr. 4.13). Pri meraní na tomto prístroji bol zosnímaný navyše na každej guľičke trinásť dotyk v póle guľičky v smere osi z. Na rozdiel od toho, prístroj Zeiss neumožňuje vykonať tento trinásť dotyk. Meranie týchto bodov, uhol natočenia a vzdialenosti medzi kružnicami sú rovnaké, ako pri meraní na prístroji Zeiss. Uhol natočenia medzi dotykmi bol 60° a medzi rovinami 30° , viď príloha 2. Aj v tomto prípade sa ukazuje potreba do budúcnosti zvážiť konštrukčné úpravy etalónu pre možnosť potencionálnej kolízie súčasti s meracím dotykom.

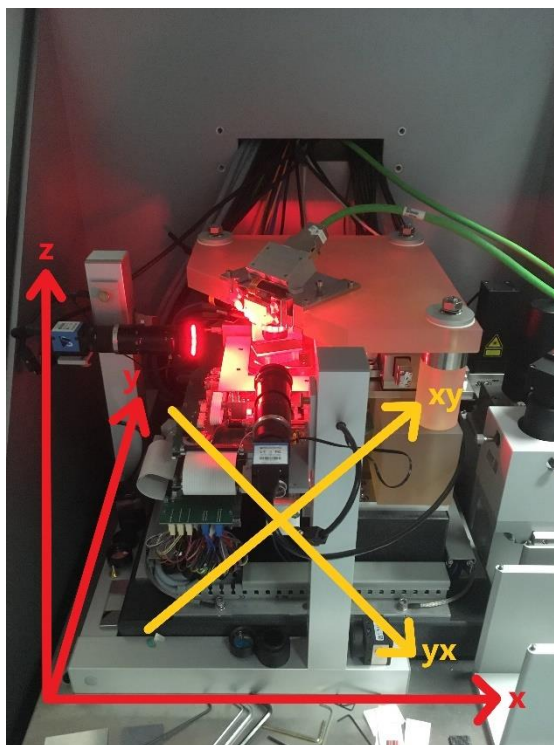


Obr. 4.12 Nastavovanie úrovni a počtu snímaných bodov



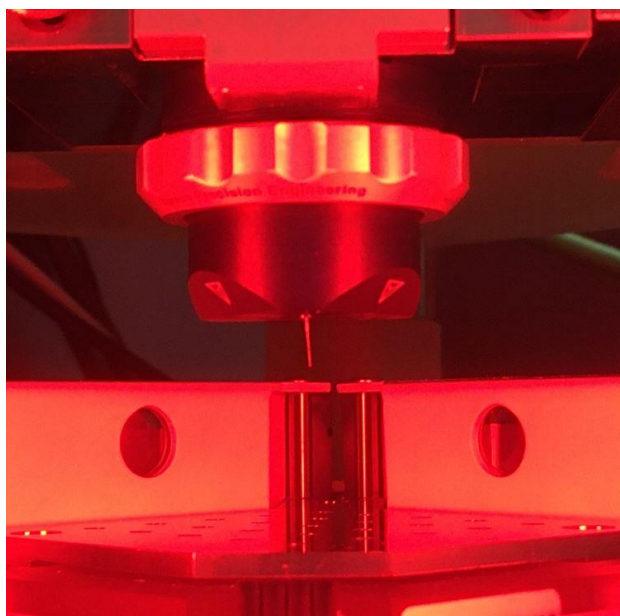
Obr. 4.13 Priebeh snímania na prístroji SIOS (na ľavej strane v pozadí druhá guľička)

Meranie je prebieha v smere osí y , x a uhlopriečkach yx a xy (obr. 4.14). V každom smere bolo realizovaných desať meraní z dôvodu štatistického vyhodnocovania. Meranie v smere osí x a y prebehlo na hrane možného rozsahu stroja z dôvodu bezpečného priestoru pre dotykovú sondu. Posun pri samotnom meraní už prebiehal automaticky, manuálne je akurát zadávanie pozície guľčiek.



Obr. 4.14 Súradnicový systém pri meraní na prístroji SIOS

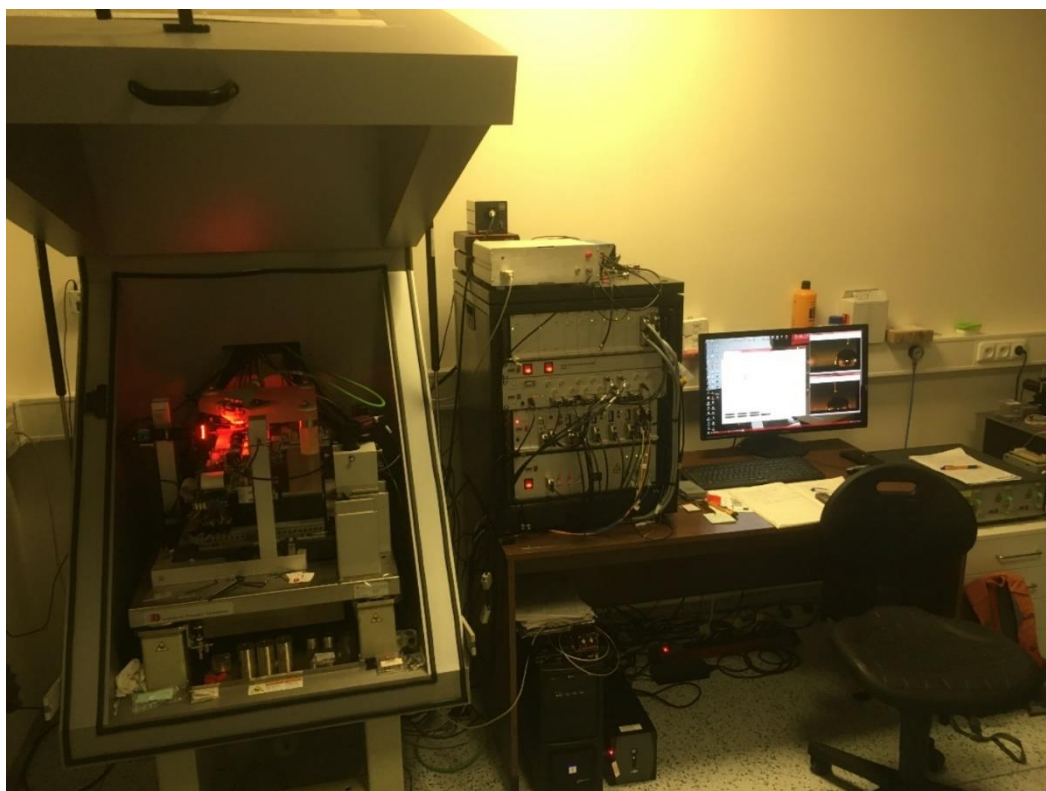
Pri meraní bola použitá snímacia hlava Gannen XP s rubínovou guľčkou s priemerom 0,3 mm a stopkou s dĺžkou 6,8 mm (obr. 4.15). Vzhľadom k tomu, že meranie prebieha pri nízkych rýchlostiach s malými snímacími silami, ide o dostačujúci snímač.



Obr. 4.15 Snímacia sonda Gannen XP používaná k meraniu

Kompenzácie nie sú aktívne riešené, pretože sa vychádza z konštrukcie stroja. Využívajú sa pri nej materiály ako Zerodur alebo Invar, ktoré majú skoro nulovú teplotnú rozťažnosť. Rovnako je izolovaný aj samotný pracovný priestor stroja (obr. 4.16). Záznam údajov z merania je vo formáte 3D file. Pre ďalšiu prácu s nimi je ich potrebné previesť do univerzálnejšieho formátu.

K ovládaniu meracieho zariadenia sa používa klávesnica a počítačová myš. Všetky pohyby, ktoré sú vykonávané v pracovnom priestore, je možné sledovať prostredníctvom dvoch kamier s vysokým rozlíšením. Kamery sú umiestnené v smere osi x a y a obraz je zaostrý na oblasť dotykovej sondy a prenášaný na obrazovku počítača.



Obr. 4.16 Izolovaný pracovný priestor prístroja SIOS od okolitého prostredia

4.4 Porovnanie meraní

Oba prístroje majú odlišné konštrukčné riešenie a každý z nich je určený pre inú oblasť použitia.

Prístroj Zeiss UPMC 850 Carat je určený ku komerčnému využitiu v priemysle. Meranie je na ňom oveľa rýchlejšie, je možné merať rozmerovo väčšie a ťažšie súčasti, než na prístroji SIOS. Prístroj má zabudované senzory pre tepelné a volumetrické kompenzácie, má vlastný software prispôbený pre intuitívne ovládanie a je užívateľsky príjemnejší.

Súradnicový merací stroj Sios NMM-1 poskytuje presnejšie meranie než Zeiss, avšak má menší rozsah merania. Nie je vhodný ku komerčnému využitiu v priemysle, skôr sa hodí pre meranie, kde sa vyžaduje veľmi vysoká presnosť merania. Meranie na tomto prístroji je v porovnaní s prístrojom Zeiss pomalšie a dodávaný software nie je tak užívateľsky prívetivý.

5 IDENTIFIKÁCIA A KVANTIFIKÁCIA JEDNOTLIVÝCH ZLOŽIEK NEISTOTY MERANIA PRÍSTROJOV

Potom, ako prebehli experimentálne merania etalónu na prístrojoch Zeiss a SIOS, bolo možné pristúpiť k samotnému vyhodnocovaniu neistoty merania, ktorou je zaťažené každé meranie a nie je možné sa jej vyhnúť. Aby bolo možné túto neistotu merania vyhodnocovať, je najskôr potrebné identifikovať jednotlivé zložky, ktoré ho ovplyvňujú.

5.1 Identifikácia zdrojov neistôt

Po vzájomnej konzultácii s odborníkmi z ČMI a na základe ich skúseností a znalostí problematiky z predchádzajúcich meraní bolo identifikovaných celkovo sedem relevantných zdrojov ovplyvňujúcich meranie. Konkrétne sa jedná o:

- vplyv rozptylu nameraných hodnôt, neistota typu A (u_A),
- vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1}),
- vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2}),
- vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3}),
- vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4}),
- vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5}),
- vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6}).

5.1.1 Vplyv rozptylu nameraných hodnôt, neistota typu A (u_A)

Ide o štatistickú analýzu vychádzajúcu z opakovaných meraní objektu. Pre relevantné vyhodnotenie získaných údajov sa vyžadujú rovnaké podmienky počas celého merania. Pre namerané hodnoty pri vyhodnocovaní neistoty typu A je najskôr potrebné určiť výberový priemer podľa vzťahu (1.4) a následne dôjde k určeniu neistoty typu A pomocou výpočtu výberovej smerodajnej odchýlky aritmetického priemeru podľa vzťahu (1.5). Podrobnejšiu charakteristiku a tieto vzťahy je možné nájsť v kapitole 1.2.3, ktorá sa venuje neistotám merania.

5.1.2 Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1})

Táto neistota je jednou zo zložiek neistoty typu B, ktorá v sebe zahŕňa vplyv kalibrácie CMM. Jej hodnota môže byť priamo uvedená v kalibračných listoch, prípadne sa určí podľa vzťahu:

$$U_{CMM} = a + bL, \quad (5.1)$$

kde a a b sú experimentálne určené koeficienty výrobcom meracieho zariadenia a L je meraná dĺžka v metroch.

Výsledný vplyv neistoty kalibrácie CMM sa určí pomocou vzťahu (1.7) uvedeného v kapitole 1.2.3. Po úprave je jeho podoba nasledovná:

$$u_{B1} = c_j \frac{U_{CMM}}{k}, \quad (5.2)$$

kde c_j je koeficient citlivosti a k koeficient rozšírenia. Pri určovaní neistoty sa predpokladá koeficient citlivosti $c_j = 1$ a koeficient rozšírenia $k = 2$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45 %.

5.1.3 Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2})

Jedná sa o štandardnú neistotu rozlíšenia meracieho prístroja, ktorá je spôsobená konečnou rozlišovacou schopnosťou meracieho zariadenia. Pri digitálnych meraciach zariadeniach je táto neistota rovná najmenšiemu digitu, prípadne podielu vlnovej dĺžky interferometra. Pri jej výpočte sa vychádza z rovnomerného rozdelenia pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$u_{B2} = c_j \frac{R_{CMM}}{\chi}, \quad (5.3)$$

kde R_{CMM} – hodnota rozlíšiteľnosti daného CMM,
 χ – koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti.

Rovnomerné rozdelenie sa obecné volí vtedy, keď sa predpokladá rovnaká pravdepodobnosť výskytu odchýlky v celom definovanom intervale. V metroológii ide o najčastejšie používané rozdelenie, pretože vo väčšine prípadov nie sú k dispozícii dostatočné poznatky o rozdelení pravdepodobnosti výskytu odchýlok. Preto nie je možné niektoré odchýlky uprednostňovať použitím iného typu rozdelenia.

5.1.4 Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3})

Ide o štandardnú neistotu použitej dotykovej sondy, ktorú udáva výrobca danej sondy. Neistota v sebe zahŕňa napríklad vplyv deformácie sondy pri dotyku s meranou súčasťou, hodnotu z kalibrácie sondy alebo dotyku a iné. Túto neistotu získame zo vzťahu:

$$u_{B3} = c_j \frac{U_{prob}}{k_{prob}}, \quad (5.4)$$

kde U_{prob} – kombinovaná neistota použitej sondy stanovená výrobcom,
 k_{prob} – koeficient rozšírenia použitý výrobcom pri výpočte neistoty.

5.1.5 Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4})

Táto neistota popisuje vplyv ďalšieho spracovania získaných údajov z merania a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$u_{B4} = c_j \frac{U_{FIT}}{\chi}, \quad (5.5)$$

kde U_{FIT} – hodnota vplyvu matematického spracovania nameraných údajov pomocou špecializovaného softwaru.

5.1.6 Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5})

Jedná sa o neistotu, ktorá má nezanedbateľný vplyv na výsledok celkovej neistoty merania. V ideálnom prípade by mala byť teplota meraného objektu rovnaká, ako je teplota meracieho zariadenia, to však nie je možné nikdy úplne dosiahnuť. A táto neistota určuje vplyv tohto rozdielu teplôt medzi meraným objektom a meracím zariadením.

Pri vyhodnocovaní sa vychádza z rovnomerného rozdelenia pravdepodobnosti. Neistota sa vypočíta sa podľa vzťahu:

$$u_{B5} = \frac{\Delta\alpha_A \cdot \Delta t \cdot L}{\chi}, \quad (5.6)$$

kde $\Delta\alpha_A$ – rozdiel hodnoty koeficientu teplotnej rozťažnosti etalónu a CMM,
 Δt – je rovná rozdielu teplôt meraného objektu a stroja.

Hodnotu koeficientu teplotnej rozťažnosti CMM pre obe meracie zariadenia zanedbávame. Dôležité časti strojov sú postavené z materiálov, ktoré majú skoro nulovú teplotnú rozťažnosť, ide o materiály Zerodur a Invar. Preto je možné uvažovať s nulovou hodnotou tohto koeficientu.

5.1.7 Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6})

Ide o neistotu, ktorá určuje vplyv odchýlky teploty od 20 °C počas merania. Aj keď pri samotnom meraní by mala byť zabezpečená táto teplota, v praxi to nie je možné vždy dosiahnuť. Preto je potrebné teplotu priebežne monitorovať a následne pri vyhodnocovaní merania tento rozdiel zohľadniť. Pri vyhodnocovaní tejto neistoty sa vychádza z rovnomerného rozdelenia a neistota sa vypočíta podľa vzťahu:

$$u_{B6} = \frac{\alpha_0}{\chi} \cdot \frac{\Delta t_{20}}{\chi} L, \quad (5.7)$$

kde α_0 – koeficient teplotnej rozťažnosti meraného objektu,
 Δt_{20} – odchýlka teploty od 20 °C.

Z rovnakých dôvodov, ako boli vyššie popísané (viď 5.2.6), sa aj v tomto prípade neuvažuje s koeficientom teplotnej rozťažnosti CMM.

5.2 Kvantifikácia zdrojov neistôt SIOS

Podľa vyššie uvádzaných vzťahov v kapitole 5.1 došlo ku kvantifikácii identifikovaných zdrojov neistôt pre získané údaje z merania na prístroji SIOS. Ako príklad stanovenia jednotlivých neistôt budú použité hodnoty z merania v ose x, viď príloha 7. Rovnakým spôsobom by boli vyhodnocované aj údaje z ostatných smerov merania. Ide o vyhodnocovanie rozmerov medzi stredmi rubínových guľičiek. Výsledky sú zaokrúhľované na päť desiatinných miest, avšak pri výpočtoch sa počítalo s nezaokrúhľovanými hodnotami.

5.2.1 Vplyv rozptylu nameraných hodnôt (u_A)

Na základe toho, že počet meraní v smere osi x bol desaťkrát, nie je potrebné používať koeficient rozšírenia. Ako prvé bol pri určovaní neistoty typu A vypočítaný výberový priemer podľa vzťahu (1.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (17,2694134 + \dots + 17,2693434),$$

$$\bar{y} = 17,26941 \text{ mm.}$$

Následne je možné pristúpiť k výpočtu neistoty typu A podľa vzťahu (1.5):

$$u_A = s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{(17,2694134 - 17,2694106)^2 + \dots + (17,2693434 - 17,2694106)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s_{\bar{y}} = 0,00948 \text{ } \mu\text{m.}$$

5.2.2 Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1})

Táto neistota vychádza z kalibračného listu č. 6014-KL-A0002-21, v ktorom je hodnota $U_{CMM} = 0,18 \text{ } \mu\text{m}$. Tento kalibračný list je interným majetkom výskumného centra CEITEC a nie je ho možné zverejniť. Koeficient citlivosti je 1 a koeficient rozšírenia je 2. Výpočet hodnoty neistoty kalibrácie CMM vychádza zo vzťahu (5.2):

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,18}{2},$$

$$u_{B1} = 0,09 \text{ } \mu\text{m.}$$

5.2.3 Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2})

Pri výpočte rozlíšiteľnosti na CMM SIOS sa predpokladá rovnomerné rozdelenie s hodnotou $\chi = \sqrt{3}$, koeficientom citlivosti $c_j = 1$ a rozlišovacou schopnosťou 0,1 nm. Neistota sa určí podľa vzťahu (5.3):

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,1}{\sqrt{3}},$$
$$u_{B2} = 0,05774 \text{ nm} \doteq 0,00006 \text{ }\mu\text{m}.$$

5.2.4 Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3})

Ide o neistotu použitej dotykovej sondy Gannen XP. Výrobcom udávaná hodnota tejto neistoty je 45 nm s koeficientom rozšírenia 2. Koeficient citlivosti je 1. Táto neistota je určená podľa vzťahu (5.4):

$$u_{B3} = 1 \cdot \frac{45}{2},$$
$$u_{B3} = 22,5 \text{ nm} = 0,0225 \text{ }\mu\text{m}.$$

5.2.5 Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4})

Ide o neistotu, ktorá vzniká pri ďalšom spracovaní nameraných údajov prístrojom SIOS. Hodnota $U_{FIT} = 0,26 \text{ }\mu\text{m}$, pri rovnomernom rozdelení $\chi = \sqrt{3}$. Neistota sa vypočíta podľa vzťahu (5.5):

$$u_{B4} = 1 \cdot \frac{0,26}{\sqrt{3}},$$
$$u_{B4} = 0,15011 \text{ }\mu\text{m}.$$

5.2.6 Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5})

Rozdiel teplôt medzi CMM a meraním objektom je $\Delta t = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Koeficient tepelnej rozťažnosti pre etalón je $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (ďalej v $2,1 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) a pre CMM SIOS sa tento koeficient zanedbáva. Meraná dĺžka L je 0,0173 m. Aj v tomto prípade sa ráta s rovnomerným rozdelením pravdepodobnosti $\chi = \sqrt{3}$, neistota sa vypočíta podľa vzťahu (5.6):

$$u_{B5} = \frac{2,1 \cdot 0,2 \cdot 0,0173}{\sqrt{3}},$$
$$u_{B5} = 0,00420 \text{ }\mu\text{m}.$$

5.2.7 Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6})

Teplota merania bola približne 24,5 °C, čiže rozdiel oproti požadovaným 20 °C je 4,5 °C. Koeficient tepelnej rozťažnosti CMM sa aj v tomto prípade zanedbáva, pre etalón je jeho hodnota $2,1 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a meraná dĺžka $L = 0,0173 \text{ m}$. Pri rozdielne teplôt sa predpokladá rovnomerné rozloženie pravdepodobnosti s koeficientom $\chi = \sqrt{3}$. Táto neistota je určená pomocou vzťahu (5.7):

$$u_{B6} = \frac{2,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{24,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,0173,$$
$$u_{B6} = 0,05450 \text{ }\mu\text{m}.$$

5.3 Kvantifikácia zdrojov neistôt Zeiss

Aj v tomto prípade došlo ku kvantifikácii nameraných údajov na prístroji Zeiss podľa vzťahov uvedených v kapitole 5.1. Pre zachovanie čo najvyššej relevantnosti sú v tomto prípade rovnako vyhodnocované údaje zo smeru merania v osi x pre vzdialenosť medzi stredmi guľičiek. Takisto platí, že pre ostatné osi by sa údaje vyhodnocovali rovnakým postupom. Prehľad nameraných údajov vo všetkých smeroch je možné nájsť v prílohe 8.

5.3.1 Vplyv rozptylu nameraných hodnôt (u_A)

Meranie v osi x prebehlo desaťkrát, čiže pre štatistické spracovanie nie je potrebné používať koeficient rozšírenia. Výberový priemer je určený podľa vzťahu (1.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (17,26855 + \dots + 17,26848),$$
$$\bar{y} = 17,26854 \text{ mm.}$$

Neistota typu A je následne určená podľa vzťahu (1.5):

$$u_A = s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{(17,26855 - 17,268537)^2 + \dots + (17,26848 - 17,268537)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$
$$u_A = s_{\bar{y}} = 0,00955 \text{ } \mu\text{m.}$$

5.3.2 Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u_{B1})

Pre merací prístroj Zeiss je táto hodnota uvedená v kalibračnom liste č. 81047504, v ktorom je určená hodnota experimentálne získaných koeficientov $a = 0,11 \text{ } \mu\text{m}$ a $b = 0,4 \text{ } \mu\text{m}$. Tento kalibračný list je interným majetkom ČMI a nie je ho možné rovnako zverejniť. Dĺžka meraného objektu L je $0,0173 \text{ m}$, koeficient citlivosti je 1 a koeficient rozšírenia je 2. Výpočet hodnoty neistoty kalibrácie CMM vychádza zo vzťahu (5.2):

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{(0,11 + 0,4 \cdot 0,0173)}{2},$$
$$u_{B1} = 0,05846 \text{ } \mu\text{m.}$$

5.3.3 Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2})

Pre rozlíšiteľnosť na CMM Zeiss sa predpokladá rovnomerné rozdelenie s hodnotou koeficientu $\chi = \sqrt{3}$, koeficient citlivosti $c_j = 1$ a rozlišovacia schopnosť prístroja je $0,1 \text{ } \mu\text{m}$. Vplyv rozlíšiteľnosti sa určí podľa vzťahu (5.3):

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,1}{\sqrt{3}},$$
$$u_{B2} = 0,05774 \text{ } \mu\text{m.}$$

5.3.4 Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (u_{B3})

Ide o neistotu použitej snímačej hlavy HSS. Výrobcom udávaná hodnota tejto neistoty je $0,5 \text{ } \mu\text{m}$ s koeficientom rozšírenia 2. Koeficient citlivosti je 1. Táto neistota je určená podľa vzťahu (5.4):

$$u_{B3} = 1 \cdot \frac{0,5}{2},$$
$$u_{B3} = 0,25 \text{ } \mu\text{m.}$$

5.3.5 Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4})

Vplyv tejto neistoty vzniká pri spracovaní nameraných údajov prístrojom. Vzhľadom k tomu, že namerané údaje nie je potrebné nijako ďalej upravovať a sú automaticky spracované pomocou dodávaného originálneho softwaru Calypso od spoločnosti Zeiss, je možné túto neistotu pri vyhodnocovaní zanedbať.

5.3.6 Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5})

Rozdiel teplôt medzi meracím zariadením a meraním objektom $\Delta t = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Koeficient teplotnej rozťažnosti pre etalón je $2,1 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, pre CMM sa koeficient zanedbáva. Rovnako aj v tomto prípade sa uvažuje s rovnomerným rozdelením pravdepodobnosti, $\chi = \sqrt{3}$ a neistota sa určí podľa vzťahu (5.6):

$$u_{B5} = \frac{2,1 \cdot 0,2 \cdot 0,0173}{\sqrt{3}},$$
$$u_{B5} = 0,00420 \text{ } \mu\text{m}.$$

5.3.7 Vplyv rozdielu teploty od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (u_{B6})

Pri výpočte sa uvažuje s koeficientom teplotnej rozťažnosti etalónu $2,1 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, pre prístroj sa jeho hodnota zanedbáva. Teplota počas merania v smere osi x bola približne $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$, čiže bola o $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ vyššia než je požadovaných $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Meraná dĺžka $L = 0,0173 \text{ m}$ a vychádza sa z rovnomerného rozdelenia pravdepodobnosti, $\chi = \sqrt{3}$. Hodnota tejto neistoty je určená pomocou vzťahu (5.7):

$$u_{B6} = \frac{2,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,0173,$$
$$u_{B6} = 0,00606 \text{ } \mu\text{m}.$$

6 STANOVENIE NEISTOTY MERANIA PRÍSTROJOV

K spracovaniu nameraných údajov a stanoveniu neistoty merania bola využitá substitučná metóda. Táto metóda bola zvolená, pretože sa pri experimentálnom meraní vychádzalo z metrologicky naviazaných a kalibrovaných prístrojov SIOS a Zeiss.

Ak by sa pri stanovovaní neistoty vychádzalo z nekalibrovaného etalónu prípadne prístroja, ktorý nebol metrologicky naviazaný a kalibrovaný, bolo by potrebné pri stanovovaní neistoty merania vychádzať z multipozíicnej metódy. Avšak táto metóda je náročnejšia z hľadiska času a vyššieho počtu meraní etalónu vo viacerých polohách, aby došlo k vylúčeniu prípadnej chyby z hľadiska presnosti merania.

Vzťah pre stanovenie neistoty merania pomocou substitučnej metódy je:

$$U_{sub} = k \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2} \quad (6.1)$$

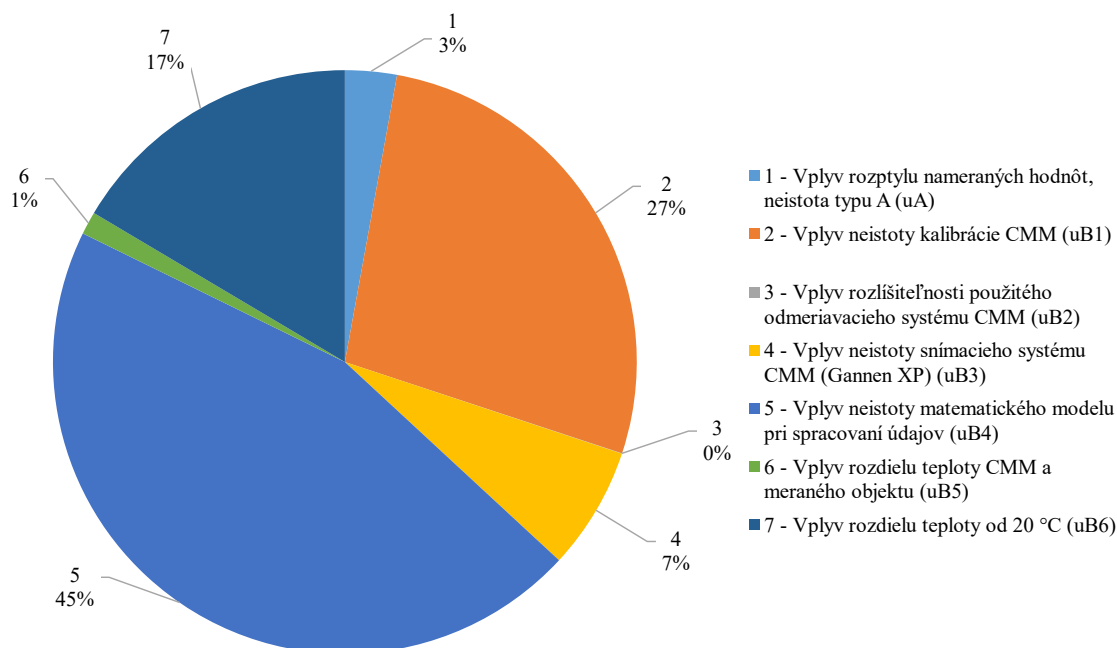
6.1 Stanovenie neistoty merania pre prístroj SIOS

Jednotlivé zložky pre stanovenie celkovej neistoty merania už boli kvantifikované v predchádzajúcej kapitole 5.2. Pri výpočte sa uvažuje s koeficientom rozšírenia $k = 2$, aby výsledný interval pokryl približne 95,45 % nameraných údajov. Celková neistota je určená podľa vzťahu (6.1):

$$U_{sub} = 2 \cdot \sqrt{0,00948^2 + 0,09^2 + 0,00006^2 + 0,0225^2 + 0,15011^2 + 0,00420^2 + 0,05450^2},$$
$$U_{sub} = 0,36995 \mu\text{m} \doteq 0,370 \mu\text{m}.$$

Výsledná celková neistota pri meraní rozpätia medzi dvomi rubínovými guľičkami na meracom zariadení SIOS NMM-1 je $0,370 \mu\text{m}$ pri menovitej vzdialenosti stredu guľičiek $17,3 \text{ mm}$, viď príloha 9.

Pre lepšiu názornosť bol vytvorený graf vplyvu jednotlivých zložiek pre kombinovanú neistotu merania, ktorý je možné vidieť na obr. 6.1:



Obr. 6.1 Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre CMM SIOS

Ako je možné vidieť na obr. 6.1 najväčší vplyv na kombinovanú neistotu merania má vplyv matematického modelu pri spracovaní údajov. Môže to byť spôsobené tým, že namerané údaje sa ukladajú do formátu 3D file. Pre ďalšiu prácu s nimi je ich potrebné previesť do iného formátu tak, aby bolo možné s nimi pracovať. Vplyv tejto neistoty je na úrovni 45 %. Druhý najväčší vplyv má neistota kalibrácie CMM a to na úrovni 27 %. Táto neistota bola počítaná na základe kalibrácie, ktorou zariadenie v minulosti prešlo. Tretím v poradí je vplyv rozdielu teploty od 20 °C a to na úrovni 17 %. Je to spôsobené vyžarovaním teploty od zariadení umiestnených v meracom priestore, ako napríklad posuv meracej plochy, interferometre, kamery, osvetlenie a iné. Prístroj nedisponuje žiadnym zariadením pre aktívne chladenie pracovného priestoru, ktoré by udržovalo teplotu na požadovanej úrovni. Ďalej nasleduje vplyv neistoty snímacieho systému CMM. V tomto prípade ide o sondu Gannen XP na úrovni 7 %. Neistota typu A je na úrovni 3 %, z čoho je možné usudzovať nízky rozptyl nameraných údajov. Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu je na úrovni 1 %. Je to dané dostatočne dlhým temperovaním etalónu v pracovnom priestore CMM. Stroj bol pri tomto temperovaní zapnutý, aby došlo k stabilizácii teploty na určitej úrovni, v tomto prípade to bolo približne 24,5 °C. Ako minimálny sa ukázal vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM. Ten netvoril ani 1 % z podielu na kombinovanej neistote merania.

6.2 Stanovenie neistoty merania pre prístroj Zeiss

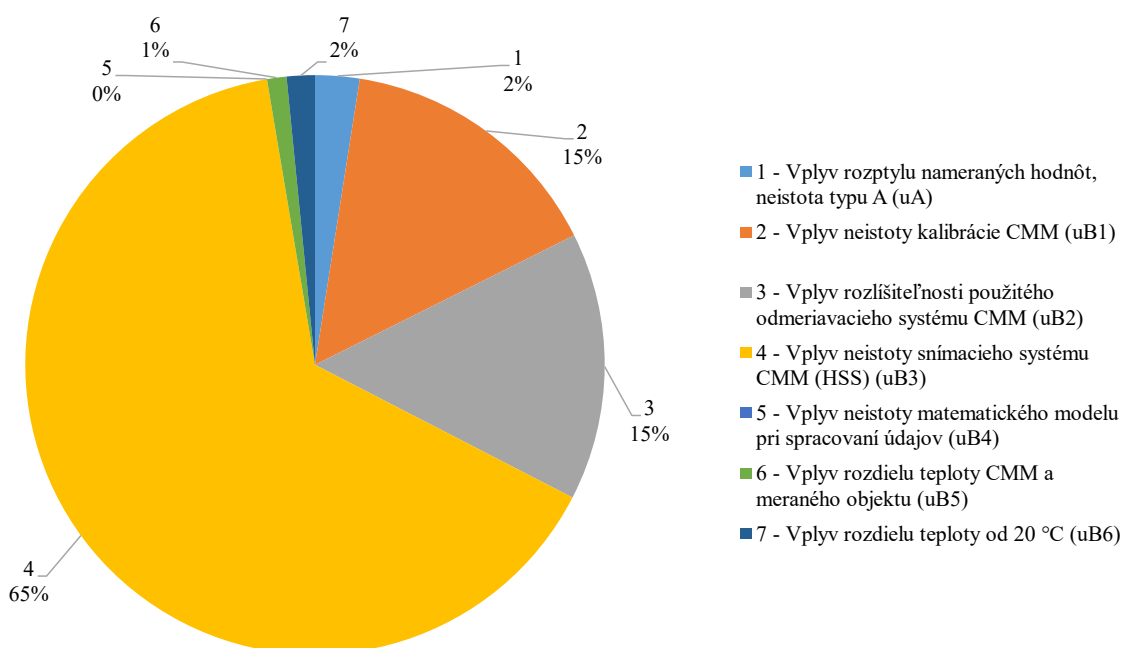
Aj v tomto prípade sú k stanoveniu kombinovanej neistoty merania použité vypočítané údaje z kapitoly 5.3. Koeficient rozšírenia je $k = 2$ pre pravdepodobnosť pokrytia nameraných údajov 95,45 %. K stanoveniu celkovej neistoty je použitý vzťah (6.1):

$$U_{sub} = 2 \cdot \sqrt{0,00955^2 + 0,05846^2 + 0,05774^2 + 0,25^2 + 0^2 + 0,00420^2 + 0,00606^2},$$

$$U_{sub} = 0,52686 \mu m \doteq 0,527 \mu m.$$

Pre meracie zariadenie Zeiss UPMC 850 Carat je výsledná celková neistota merania 0,527 μm pre etalón s menovitým rozmerom 17,3 mm medzi stredmi guľičiek, vid' príloha 10.

Aj v tomto prípade bol vytvorený graf pre znázornenie jednotlivých vplyvov pre kombinovanú neistotu merania, ktorý je možné vidieť na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre CMM Zeiss

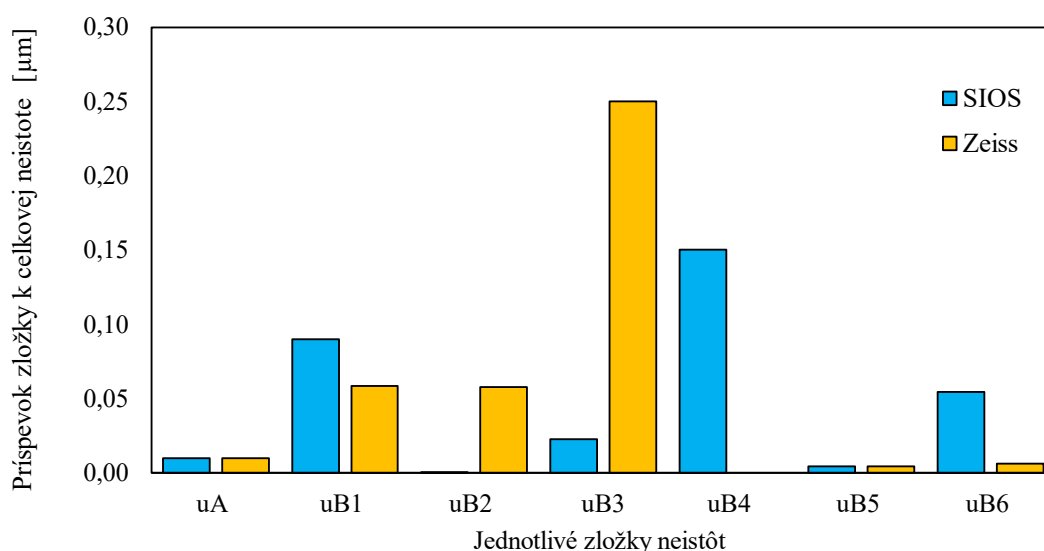
Z obr. 6.2 je možné vidieť, že v prípade merania na prístroji Zeiss má najväčší príspevok ku kombinovanej neistote merania vplyv neistoty snímacieho systému a to na úrovni 65 %. Je to dané konštrukciou a hmotnosťou snímacieho systému HSS. Pre túto snímaciu hlavu ide o hranicu minimálnych rozmerov, ktoré je ňou možné merať. Na druhom mieste s výrazne menším vplyvom je neistota kalibrácie CMM na úrovni 15 %. Výpočet neistoty vychádzal z hodnôt kalibrácie CMM, ktorou v minulosti prístroj prešiel. Na rovnakej úrovni 15 % je aj vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM. Ďalej nasleduje vplyv rozptylu nameraných hodnôt s 2 %, ktoré ukazujú na malý rozptyl nameraných údajov. Vplyv rozdielu teploty od 20 °C je minimálny a to na úrovni tiež 2 %. Je to hlavne vďaka aktívnym teplotným kompenzáciám stroja počas merania. Stroj si priebežne monitoruje teplotu a následne ju koriguje. Na úrovni 1 % je vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu. Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov je nulový a zanedbáva sa. Je to dané tým, že stroj automaticky spracuje namerané údaje a nie je ich potrebné nijakým spôsobom ďalej spracovávať.

7 VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Po stanovení výslednej rozšírenej neistoty merania pre oba prístroje je možné pristúpiť ku vyhodnoteniu dosiahnutých výsledkov. Experimentálne merania prebehli na rovnakom etalóne v laboratóriách ČMI. Tento etalón sa skladá z dvoch častí. Ide o rubínové guľičky s priemerom 2 a 4 mm, ktoré sú pripevnené pomocou epoxidového lepidla do otvorov v karbónovej doštičke. Rozmery etalónu museli byť prispôbené rozsahom merania na oboch prístrojoch. V prípade prístroja SIOS ide o hranicu maximálnych rozmerov, ktoré je na prístroji možné merať a pri prístroji Zeiss ide o hranicu najmenších rozmerov, ktoré je možné merať. Meranie bolo zamerané hlavne na vzdialenosť medzi stredmi rubínových guľičiek s následným kvantifikovaním presnosti merania pre CMM SIOS NMM-1 a Zeiss UPMC 850 Carat. Postup merania a následné vyhodnocovanie neistôt bolo v oboch prípadoch rovnaké tak, aby bola zachovaná relevantnosť výsledkov. Meranie a vyhodnocovanie výsledkov bolo v súlade s legislatívnymi a technickými požiadavkami, hlavne normou ČSN EN ISO/IEC 17205:2018.

Po meraní došlo k identifikácii celkovo siedmich zložiek, ktoré ovplyvňujú neistotu merania. Tieto jednotlivé zložky boli následne kvantifikované.

Potom, ako boli určené jednotlivé príspevky k neistote merania, je možné tieto jednotlivé zložky vzájomne porovnať, vid' obr. 7.1.



Obr. 7.1 Porovnanie príspevkov zložiek neistoty pre obe merania

Z grafu je zrejmé, že sa hodnoty jednotlivých príspevkov k neistote merania sa pre oba stroje líšia. V prípade neistoty typu A (u_A) sú spracované údaje porovnateľné. Táto neistota nepredstavuje významný vplyv na neistotu merania pri oboch prístrojoch. Skôr je možné vidieť malý rozptyl nameraných údajov pri meraní v oboch prípadoch.

Čo sa týka vplyvu neistoty kalibrácie CMM (u_{B1}) je možné vidieť, že táto neistota je o niečo väčšia na prístroji SIOS.

Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u_{B2}) na prístroji SIOS je skoro nulový, táto hodnota je väčšia v prípade prístroja Zeiss.

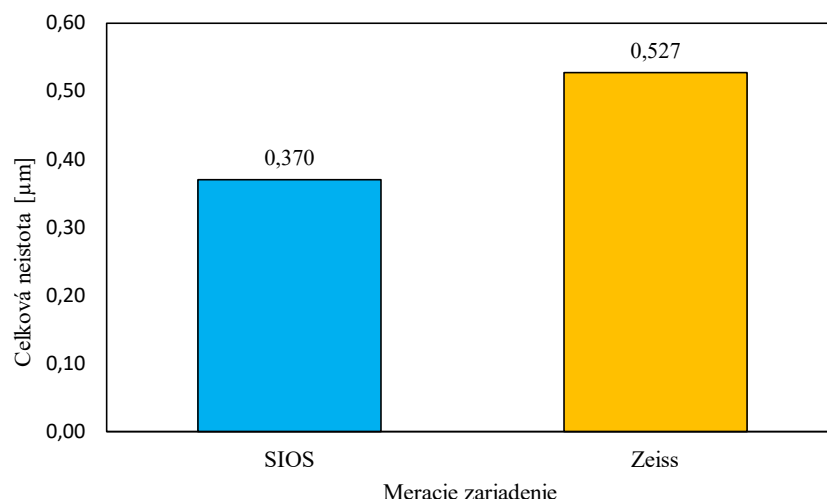
Násobne väčší rozdiel je v prípade vplyvu neistoty snímacieho systému (u_{B3}). Ako je možné vidieť, pre prístroj Zeiss ide o najväčší príspevok k neistote merania. Ide o snímací systém HSS. Táto neistota je daná samotnou konštrukciou a mohutnosťou snímacieho systému. V prípade prístroja SIOS ide o snímaciu sondu Gannen XP, ktorá je konštruovaná pre meranie veľmi malých objektov.

Pre prístroj SIOS je najväčším príspevkom vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u_{B4}). Je to spôsobené tým, že súbor s nameranými údajmi je potrebné ďalej spracovať, aby bolo možné so získanými dátami ďalej pracovať. Pre prístroj Zeiss je táto neistota nulová, pretože po nameraní sú údaje automaticky spracované softwarom Calypso do použiteľnej podoby. Software Calypso je považovaný za validovaný software.

Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u_{B5}) je v oboch prípadoch minimálny. Tento vplyv bolo možné pre oba stroje minimalizovať. V prípade prístroja SIOS išlo o dostatočne dlhé temperovanie meraného objektu v pracovnom priestore stroja, počas ktorého bol prístroj zapnutý. Pri prístroji Zeiss boli využité teplotné kompenzácie. K meranému objektu boli na zveráku pripevnené dva teplotné snímače, určené k priebežnému monitorovaniu teploty objektu, na základe ktorej stroj vykonáva kompenzácie.

Posledným posudzovaným vplyvom je neistota rozdielu teploty od 20 °C (u_{B6}). Laboratória, v ktorých sú umiestnené prístroje sú klimatizované tak, aby bola zabezpečená požadovaná teplota 20 °C. To však nie je možné úplne dosiahnuť, pretože systém klimatizácie je pre laboratória jednotný a vzájomne prepojený. Ďalšími faktormi ovplyvňujúcimi túto neistotu bolo teplo od obsluhy alebo teplo od prístrojov. K monitorovaniu okolitých podmienok boli v laboratóriách umiestnené zariadenia, ktoré monitorovali hlavne teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu. Vplyv tejto neistoty je nižší na prístroji Zeiss, ktorý má v sebe zabudované senzory pre meranie teploty okolia. Táto teplota sa priebežne monitoruje a stroj na základe nej robí kompenzácie. Pri prístroji SIOS je táto neistota väčšia. Je to dané samotnou konštrukciou stroja, ktorý má izolovaný merací priestor od okolia krytom. Ten má zabezpečovať stálosť podmienok pri meraní. Teplota v pracovnom priestore bola vyššia, než teplota okolia. Bolo to spôsobené nárastom teploty od zariadení v pracovnom priestore, ako sú kamery, osvetlenie, posuvy, interferometre a iné. Preto bolo potrebné nechať meraný etalón temperovať v pracovnom priestore stroja, aby sa stabilizoval na určitej teplote a tento rozdiel teploty bolo následne potrebné vyhodnotiť.

Porovnanie výsledných hodnôt rozšírenej neistoty meracích zariadení je možné vidieť na obr. 7.2. Pri výpočte bol využitý koeficient rozšírenia na úrovni 2. Ak by nedošlo k jeho použitiu, mohla by sa až tretina hodnôt ocitnúť mimo stanovené pásmo neistôt. Pri použití koeficientu rozšírenia na úrovni 2 je pravdepodobnosť pokrytia približne na úrovni 95,45 %. Ako je možné vidieť, prístroj SIOS má nižšiu výslednú rozšírenú neistotu merania na úrovni 0,370 μm . Pre prístroj Zeiss je táto hodnota na úrovni 0,527 μm . Rozdiel vo výslednej rozšírenej neistote medzi CMM Zeiss a SIOS je 0,157 μm . Ide o pozitívny výsledok vzhľadom k tomu, že prístroje majú rozdielne oblasti použitia.



Obr. 7.2 Výsledná rozšírená neistota meracieho zariadenia SIOS a Zeiss

Pre lepšiu predstavu konkrétnych rozdielov bol vytvorený prehľad jednotlivých príspevkov k neistote merania pre obidva CMM, ktorý je možné vidieť v tab. 7.1.

Tab. 7.1 Porovnanie podielu jednotlivých príspevkov k neistote merania

Prístroj	Porovnanie podielu jednotlivých príspevkov k rozšírenej neistote merania							
	u_A [μm]	u_{B1} [μm]	u_{B2} [μm]	u_{B3} [μm]	u_{B4} [μm]	u_{B5} [μm]	u_{B6} [μm]	U_{sub} [μm]
SIOS	0,00984	0,09000	0,00006	0,02250	0,15011	0,00420	0,05450	0,37000
Zeiss	0,00955	0,05846	0,05774	0,25000	0,00000	0,00420	0,00606	0,52700

Obecne platí, že je vhodné sa zamerať na príspevky, ktoré majú najväčší vplyv na neistotu merania. Avšak v oboch prípadoch bolo meranie na hranici technických možností CMM. Pre prístroj SIOS išlo o hranicu maximálnych rozmerov, ktoré je možné na prístroji merať. Pri samotnom meraní v smere osi x a y bolo potrebné dávať veľký pozor, aby nedošlo k havárii medzi etalónom a dotykovou sondou. Je to dané rozsahom merania prístroja. Naopak, pri prístroji Zeiss išlo o hranicu minimálnych rozmerov, ktoré je možné na prístroji merať. Preto nie je jednoduché dosiahnuť zníženie jednotlivých príspevkov k neistote merania. Samotné meranie prebehlo na hranici klasickej metrológie a nanometrológie.

V prípade prístroja SIOS je možné sa zamerať hlavne na minimalizáciu vplyvu neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov tak, aby nebolo potrebné údaje po meraní ďalej spracovávať a boli rovno použiteľné. Pre zníženie vplyvu rozdielu teploty od 20 °C by si pracovný priestor vyžadoval mať aktívne chladenie, ktoré by kompenzovalo vyžarované teplo od prístrojov.

Pri meraní na prístroji Zeiss mala najväčší vplyv neistota snímacieho systému CMM, išlo o meráciu hlavu HSS. Táto neistota by mohla byť znížená použitím novej snímačkej hlavy VAST GOLD, to by si však vyžadovalo konštrukčné úpravy a modernizáciu stroja.

Oba prístroje majú svoju oblasť použitia a každý z nich je prispôbený pre určitú oblasť merania. V prípade prístroja SIOS ide o veľmi presné meranie v oblasti nanometrológie. Tento prístroj je vhodný pre vedecké projekty, laboratórne meranie, alebo špeciálne aplikácie. Nie je vhodný ku komerčnému použitiu. Príprava merania, samotné meranie a vyhodnocovanie je veľmi náročné po technickej a aj časovej stránke. Cena merania na prístroji SIOS je vyššia oproti cene merania na prístroji Zeiss a nie každý zo štandardných zákazníkov je ochotný za ňu zaplatiť. Preto je možné pozitívne vnímať, že aj na prístroji Zeiss je možné merať objekty na hranici klasickej metrológie a nanometrológie.

Prístroj Zeiss je prispôbený ku komerčnému použitiu v priemysle. Síce nie je tak presný ako prístroj SIOS, ale meranie je relatívne rýchle, nevyžaduje si takú prípravu a namerané údaje sú automaticky spracované do použiteľného a prehľadného výstupu.

Stroje sa aj líšia konštrukčným prevedením a princípom ich fungovania. Pri meraní na CMM Zeiss pohyb vykonáva snímacia hlava a meraný objekt je pripevnený na pracovnom stole. Rozsah merania na prístroji Zeiss je 850 × 1200 × 600 mm. Prístroj je pri meraní schopný vykonávať teplotné a volumetrické kompenzácie a korigovať ich vplyv na neistotu merania. Rovnako výrobcom dodávaný software Calypso je užívateľsky prívetivý.

Pri meraní na prístroji SIOS pohyb vo všetkých osiach vykonáva pracovný stôl, na ktorom je umiestnený meraný objekt. Snímací systém je nepohyblivý. Rozsah merania je 25 × 25 × 5 mm. Pracovný priestor je od okolia izolovaný krytom pre zachovanie stabilných podmienok merania. Z tohto dôvodu sa vyžaduje dostatočné dlhé temperovanie meraného objektu. Prístroj nedisponuje aktívnymi kompenzáciami počas merania. K ovládaniu dochádza pomocou počítača a k zobrazeniu merania sa využívajú dve kamery s vysokým rozlíšením.

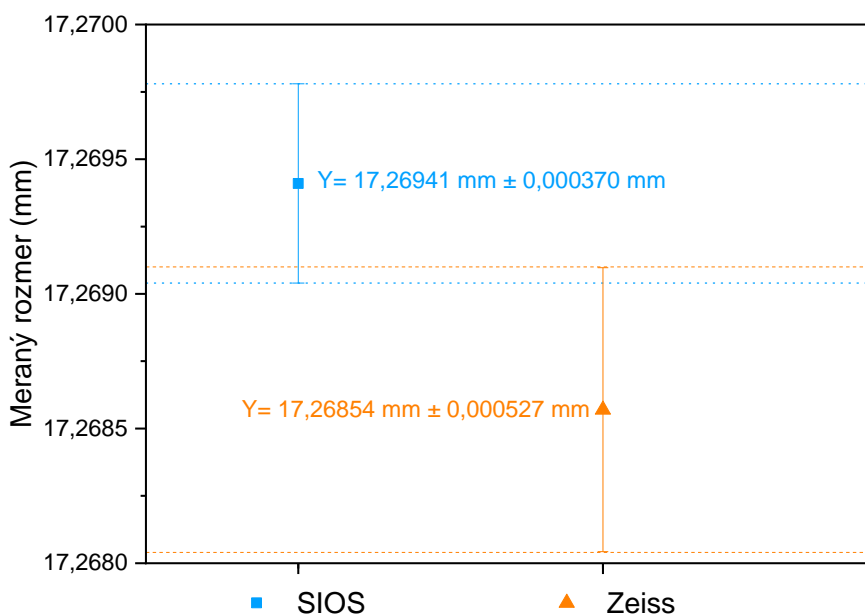
Úplný výsledok merania rozmeru medzi stredmi rubínových guľičiek na prístroji SIOS a všetky podrobnosti o meraní je možné vidieť v protokole o meraní č. 6014-PT-F0167-21, vid' príloha 9. Výsledná hodnota merania je určená podľa vzťahu (1.2) uvedeného v kapitole 1.2.1:

$$Y = 17,269410 \text{ mm} \pm 0,000370 \text{ mm}.$$

Úplný výsledok merania rozmeru medzi stredmi rubínových guľičiek na prístroji Zeiss a všetky podrobnosti o kalibrácii je možné vidieť v kalibračnom liste č. 6014-KL-F0168-22, vid' príloha 10. Výsledok merania bol rovnako určený podľa vzťahu (1.2) uvedeného v kapitole 1.2.1:

$$Y = 17,268540 \text{ mm} \pm 0,000527 \text{ mm}.$$

Porovnanie úplných výsledkov merania so stanovením celkovej rozšírenej neistoty merania je možné vidieť na obr. 7.3.



Obr. 7.3 Porovnanie úplných výsledkov merania so stanovením celkovej rozšírenej neistoty

Z obrázku je na prvý pohľad zrejmé, že priemer nameraných hodnôt sa líši. Z tohto dôvodu je do budúcnosti vhodné zaviesť korekcie do výsledkov nameraných hodnôt pre prístroj Zeiss o tento rozdiel približne o 0,1 μm tak, aby sa hodnoty posunuli na úroveň prístroja SIOS. Rozšírená neistota prístroja Zeiss je o 0,157 μm väčšia než na prístroji SIOS.

7.1 Návod pre výpočet neistoty

Pre spracovanie nameraných údajov došlo k vytvoreniu výpočtových modulov v programe Microsoft Excel, slúžiacich k vyhodnocovaniu jednotlivých zložiek neistôt so stanovením výslednej rozšírenej neistoty merania. Tieto moduly sú vytvorené pre oba prístroje a okrem stanovenia neistôt poskytujú aj grafické znázornenie jednotlivých vplyvov na kombinovanú neistotu merania s percentuálnym vyjadrením jednotlivých príspevkov. Moduly budú slúžiť pracovníkom z ČMI pri praktickom vyhodnocovaní nameraných údajov a stanovovaní neistôt na jednotlivých prístrojoch. Ich výhoda spočíva v rýchlom výpočte jednotlivých zložiek neistôt s následným grafickým znázornením pre lepšiu predstavu o neistotách daného merania. Tento modul je možné vidieť v prílohe 11.

ZÁVER A DOPORUČENIE PRE PRAX

Téma diplomovej práce je venovaná stanoveniu neistôt merania súradnicových meracích strojov. Konkrétne sa jedná o súradnicové meracie stroje SIOS NMM-1 a Zeiss UPMC 850 Carat.

Prvým cieľom práce je popis súčasného stavu v oblasti presného merania pomocou CMM so zameraním na oblasť nanometrológie. Tento cieľ bol splnený v prvej a druhej kapitole. Ide o teoretickú časť práce, v ktorej je popísaná základná terminológia v oblasti merania, vysvetľuje pojmy, akými sú chyby merania alebo neistoty merania a rozoberá vzťahy pre výpočet jednotlivých neistôt. Rovnako špecifikuje metrologickú nadväznosť.

Druhá kapitola je venovaná súčasnému stavu v oblasti CMM, kde sú podrobne rozobrané konštrukčné typy strojov, snímacie systémy, kalibrácia súradnicových strojov, presnosť merania a zdroje neistôt. Spolu s nimi sú popísané postupy k stanoveniu neistôt, legislatíva a normy súvisiace s problematikou. Hlave sa jedná o radu noriem ČSN EN ISO 10360 a normu ČSN EN ISO/IEC 17025:2018.

Druhým cieľom práce je charakteristika prístrojov použitých k experimentálnemu meraniu. Tento cieľ je splnený v tretej kapitole. Jedná sa o prístroj SIOS NMM-1, ktorý je majetkom výskumného centra CEITEC a prístroj Zeiss UPMC 850 Carat, v majetku ČMI Brno. Obidva prístroje sú umiestnené na pracovisku ČMI v Brne. Oba prístroje majú odlišnú oblasť použitia a zároveň majú odlišné konštrukčné prevedenie a princíp fungovania. CMM SIOS je určený k meraniu veľmi malých rozmerov s vysokou presnosťou, ale nie je vhodný ku komerčnému použitiu. Má vymeniteľné snímacie systémy, vhodné pre odlišné oblasti merania. Pri meraní bola využívaná dotyková snímacia sonda Gannen XP. Prístroj Zeiss je určený k meraniu rozmerovo mnohonásobne väčších a ťažších súčastí. Pri meraní bola využívaná snímacia hlava HSS.

Tretím cieľom je prevedenie experimentálnych meraní. Splnenie tohto cieľa je možné vidieť v štvrtej kapitole. Meranie prebiehalo v klimatizovaných laboratóriách ČMI. Meraným objektom bol etalón pozostávajúci z dvoch častí. Ide o dve rubínové guľičky s priemerom 2 a 4 mm, ktoré sú prilepené ku karbónovej doštičke v nominovanej vzdialenosti medzi stredmi guľičiek 17,3 mm. Guľičky sú k doštičke prilepené pomocou epoxidového lepidla do slepých otvorov. Veľkosť etalónu je prispôbená obidvom prístrojom, ktoré majú rozdielne rozsahy merania. Meranie prebiehalo na hornej polosfére guľičiek a bolo hlavne zamerané na vzdialenosť medzi stredmi guľičiek. Priebeh merania bol pre oba prístroje rovnaký, aby sa zabezpečila relevantnosť výsledkov.

Štvrtým cieľom práce je identifikovanie a kvantifikovanie jednotlivých zložiek neistoty merania pre oba prístroje. Tento cieľ je splnený v piatej kapitole. Celkovo došlo k identifikácii siedmich relevantných zdrojov ovplyvňujúcich meranie. Samotné kvantifikovanie jednotlivých vplyvov prebehlo pre oba prístroje zvlášť.

Piatym cieľom je následné stanovenie neistoty merania oboch prístrojov. Splnenie tohto cieľa je možné nájsť v šiestej kapitole. K stanoveniu neistoty merania bola použitá substitučná metóda, pomocou ktorej bola určená výsledná celková neistota. Táto metóda bola zvolená, pretože prístroje na ktorých prebehlo meranie, sú kalibrované. Okrem samotného stanovenia celkovej neistoty merania sú vyhotovené pre oba CMM aj grafické výstupy znázorňujúce jednotlivé percentuálne podiely ku kombinovanej neistote merania.

Šiestym cieľom je vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov. K splneniu tohto cieľa došlo v siedmej kapitole. Pre obidva prístroje boli už v minulosti obdobným spôsobom stanovené neistoty merania, ale v prípade prístroja Zeiss išlo o celý rozsah merania $850 \times 1200 \times 600$ mm a v prípade prístroja SIOS šlo o meranie čo najmenších rozmerov. Pre prístroj SIOS neboli stanovené maximálne rozmery, ktoré je možné ešte technicky odmerať s definovanou neistotou

a pre prístroj Zeiss neboli zase stanovené minimálne rozmery, ktoré je prístroj schopný odmerať tiež s definovanou neistotou merania.

Na základe vyhodnotených údajov je zrejmé, že celková neistota merania je väčšia na prístroji Zeiss. Ide o rozdiel približne $0,157 \mu\text{m}$ oproti meraniu na prístroji SIOS.

Tento výsledok bol očakávaný, pretože oblasť použitia prístroja Zeiss je v klasickej metrológii, naproti tomu prístroj SIOS je určený pre oblasť nanometrológie. Aj keď neistota merania je na prístroji Zeiss väčšia, ide o pozitívny výsledok, pretože prístroj Zeiss je určený pre meranie výrazne väčších rozmerov.

Hlavný prínos práce spočíva v stanovení maximálnych rozmerov, ktoré je možné merať na prístroji SIOS a minimálnych rozmerov, ktoré je možné merať na prístroji Zeiss. Vďaka týmto experimentálnym meraniam a následnému vyhodnoteniu získaných údajov došlo k overeniu, že na prístroji Zeiss je možné merať veľmi malé objekty s podobnou neistotou merania, ako na prístroji SIOS, a to za kratší čas a pri nižšej cene merania. Vyhodnotené výsledky ukazujú, že prístroj Zeiss je schopný merať na hranici prechodového pásma medzi klasickou metrológiou a nanometrológiou. Rozdiel medzi neistotami merania je vhodné brať pri vyhodnocovaní do úvahy a zaviesť potrebné korekcie, na základe ktorých sa bude meranie vyhodnocovať.

Ďalším prínosom práce je vytvorenie softwarových modulov pre spracovanie a vyhodnotenie nameraných údajov, ktorých súčasťou je aj grafické znázornenie jednotlivých príspevkov neistôt. Pomocou týchto modulov budú pracovníci ČMI vyhodnocovať výsledky merania na oboch prístrojoch. Tento návod je v súlade s akreditovaným kalibračným postupom. Ide o interný majetok ČMI a preto nie je súčasťou práce.

V závere je možné konštatovať, že v predkladanej diplomovej práci došlo k splneniu všetkých stanovených cieľov podľa zadania práce.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] *Metrologie v kostce: Sborníky technické harmonizace* [online]. Třetí upravené a doplněné vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem (ČMI), 2009 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf
- [2] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *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.
- [3] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: Studijní opora „Strojírenská metrologie“*. První. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011.
- [4] *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM): VOCABULARY*. 3rd Edition. Paris - France: ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE, 2012.
- [5] 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.
- [6] Zákon o metrologii. In: *Zbierka zákonov*. Praha, 1990, č.505/1990 Zb.
- [7] *TERMINOLOGIE Z OBLASTI METROLOGIE* [online]. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/files/Sborníky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [8] Stanovená měřidla. *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/stanovena-meridla>
- [9] JANKOVÝCH, Róbert. *Principy metrologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [10] ŠRÁMEK, Jan. *Stanovení přesnosti měření v nanometrologii*. Brno, 2019. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.
- [11] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav POSPÍŠIL. *Metrologie v praxi: Vyjadřování přesnosti měření ve strojírenské praxi. Metrologie*. 2015, **24**(4), 12-18.
- [12] JANKOVÝCH, Róbert. *STATISTICKÉ NÁSTROJE V METROLOGII: Chyby měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [13] HÁJKOVÁ, Alena. *Návrh interní metodiky pro měření výrobků a dílů na přístroji CMM UPMC ZEISS na pracovišti ČMI Brno*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.
- [14] SENFT, Václav. *Analytické vlastnosti metod* [online]. In: . [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11240670>

- [15] *Chyby měření: Hodnocení výsledků měření* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=chyby>
- [16] *Our Members: Member States, Corresponding Members* [online]. International Organization of Legal Metrology [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.oiml.org/en/structure/members>
- [17] *WELMEC: Evropská spolupráce v legální metrologii* [online]. Český metrologický institut [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/WELMEC>
- [18] SŁADEK, Jerzy A. *Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements*. Berlin: Springer, 2016. Springer tracts in mechanical engineering. ISBN 978-3-662-48463-0.
- [19] KENDER, Štefan. SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE. *Transfer inovácií* [online]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra technológií a materiálov, 2013, (26), 233-235 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/26-2013/pdf/233-235.pdf>
- [20] HOCKEN, Robert a Paulo PEREIRA. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. Second Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [21] *History of Industrial Metrology: How it all began* [online]. ZEISS [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/corporate/int/about-zeiss/history/technological-milestones/industrial-metrology.html>
- [22] NENÁHLO, Čeněk. Souřadnicová měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika>
- [23] ČSN EN ISO 10360-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Část 1: Slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [24] PETŘÍK, Milan. *Analýza použití vybraných upínacích systémů pro měření na CMM*. Praha, 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [25] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2004.
- [26] Measurement System Types and Characteristics: Coordinate Measuring Machines. In: *Measurement Fundamentals* [online]. KEYENCE CORPORATION [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp>
- [27] *SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE* [online]. Technická univerzita v Liberci. Katedra výrobních systémů a automatizace [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [28] *Katalog doteků: Technické parametry*. RENISHAW. Dostupné také z: <https://www.renishaw.cz/cs/typy-doteku--6627>
- [29] Materiály doteků: Materiály dříku. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/materialy-doteku--6423>

- [30] SKOPAL, Miroslav a Alois FIALA. Kalibrace a přesnost měření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni>
- [31] *Testing and calibration of coordinate measuring machines: Detection and compensation of all geometric deviations* [online]. In: . [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.etalonproducts.com/en/applications/testing-and-calibration-of-coordinate-measuring-machines/>
- [32] ČSN EN ISO 14253-2. *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*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [33] ČSN EN ISO 15530-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Souřadnicové měřicí stroje (CMM): Metody určování nejistoty měření - Část 3: Použití kalibrovaných obrobků nebo etalonů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [34] ČSN EN ISO 10360-2. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [35] ČSN EN ISO/IEC 17025. *Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří*. Třetí vydání. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [36] *Nanopositioning and Nanomeasuring Machine* [online]. Ilmenau: SIOS Meßtechnik GmbH [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: http://www.sios-de.com/wp-content/uploads/2016/02/NMM-1_e_2014.pdf
- [37] LANGLOTZ, Enrico a Denis DONTSOV. *3D capability for nanopositioning and nanometrology* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: http://www.sios-de.com/wp-content/uploads/2015/09/NMM_L-P_e_-1-11.pdf
- [38] *Gannen-XP: Ultra precision 3D tactile sensor* [online]. XPRESS Precision Engineering [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.xpresspe.com/probe2.php>
- [39] Specifications and Performance Features: Industrial Measuring Technology from Carl Zeiss. *ATECHAUTHORITY* [online]. Carl Zeiss Unternehmensbereich Industrielle Messtechnik [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://www.atechauthority.com/pdf/UPMC-Specs.pdf>
- [40] ŠRÁMEK, Jan. *Novinka na ČMI OI Brno: CMM Carl Zeiss UPMC 850 Carat* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/CMM%20Zeiss%20UPMC.pdf>
- [41] *Vynikající skenovací výkon zaručen: ZEISS VAST gold* [online]. Zeiss [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/tactile-scanning-probe/zeiss-vast-gold.html#brochuredownload>
- [42] *Calypso: Software pro snadné programování měření součástí* [online]. Carl Zeiss spol. s r.o. divize průmyslové měřicí techniky [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/smetrologia/prospekty/calypso.pdf>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka	Popis
2D	Dvojmerný
3D	Trojmerný
CAD	Computer Aided Design
CEITEC	Central European Institute of Technology
CMM	Coordinate Measuring Machines
CNC	Computer Numerical Control
ČIA	Český institut pro akreditaci
ČMI	Český metrologický institut
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
DPS	Digital Signal Processor
EN	Európska norma
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
EÚ	Európska únia
GPS	Geometrical Product Specifications
ISO	International Organization for Standardization
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NC	Numerical Control
NMS	Národní metrologický systém
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
SI	Système international d'unités
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
VIM	Vocabulaire international de métrologie
WELMEC	Western European Legal Metrology Cooperation
WTO	World Trade Organization
Symbol	Popis
α	Koeficient teplotnej rozťažnosti
α_o	Koeficient teplotnej rozťažnosti meraného objektu
$\Delta\alpha_A$	Rozdiel hodnoty 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
Δz_{maxj}	Rozsah odchýlok
μ	Stredná hodnota meranej veličiny
χ	Koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti
a, b	Experimentálne určené koeficienty stanovené výrobcom meracieho zariadenia
c_j	Koeficient citlivosti
k	Koeficient rozšírenia
k_{prob}	Koeficient rozšírenia použitý výrobcom pri výpočte neistoty

k_s	Koeficient rozšírenia podľa Studentovho rozdelenia pravdepodobnosti
L	Meraná dĺžka v metroch
m	Počet príspevkov neistoty typu B
n	Celkový počet meraní veličiny
R	Rozpätie
R_{CMM}	Hodnota rozlíšiteľnosti daného CMM
$s_{\bar{y}}$	Aritmetický priemer výberovej smerodajnej odchýlky
u_A	Vplyv rozptylu nameraných hodnôt, neistota typu A
u_B	Štandardná neistota typu B
u_{B1}	Vplyv neistoty kalibrácie CMM
u_{B2}	Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému
u_{B3}	Vplyv neistoty snímacieho systému CMM
u_{B4}	Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov
u_{B5}	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu
u_{B6}	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C
$u_B(z_j)$	Neistota jednotlivých zdrojov
u_C	Kombinovaná štandardná neistota
U	Rozšírená neistota meranej veličiny
U_{CMM}	Neistota kalibrácie CMM
U_{FIT}	Hodnota vplyvu matematického spracovania nameraných údajov pomocou špecializovaného softwaru
U_{prob}	Kombinovaná neistota použitej sondy stanovená výrobcom
U_{sub}	Výsledná rozšírená neistota určená pomocou substitučnej metódy
\bar{y}	Výberový priemer
y	Odhad meranej veličiny
y_i	i -tá hodnota meranej veličiny Y
y_{max}	Maximálna nameraná hodnota meranej veličiny
y_{min}	Minimálna hodnota meranej veličiny
Y	Hodnota meranej veličiny
Y_P	Konvenčná (referenčná) hodnota meranej veličiny

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Princíp presného merania [14].....	13
Obr. 1.2 Rozdelenie chýb merania [15].....	14
Obr. 1.3 Schéma určenia neistoty merania [3].....	16
Obr. 1.4 Režazec metrologickej nadväznosti [1].....	18
Obr. 1.5 Národný metrologický systém v ČR [1].....	19
Obr. 2.1 Typy CMM podľa schopnosti merania [2].....	22
Obr. 2.2 Konštrukčné prevedenia CMM [2].....	22
Obr. 2.3 Konštrukčné prevedenie portálového CMM [2].....	23
Obr. 2.4 Dotykový snímací systém CMM [23].....	24
Obr. 2.5 Snímacie hlavy [2].....	25
Obr. 2.6 Posudzované rozmery snímacieho dotyku [2].....	25
Obr. 2.7 Základné typy dotykov [28].....	26
Obr. 2.8 Dotyky pre špeciálne účely [28].....	26
Obr. 2.9 Materiály hrotu dotyku [2].....	27
Obr. 2.10 Materiály používané pre driek dotyku [29].....	27
Obr. 2.11 Príklady bezdotykových systémov snímania [2].....	27
Obr. 2.12 Náhľad mapy korekcií portálového CMM [30].....	28
Obr. 2.13 Príklad kalibrácie portálového CMM pomocou koncových mierok [30].....	29
Obr. 2.14 Príklad kalibrácie portálového CMM pomocou trakčného lasera [31].....	29
Obr. 2.15 Zložky neistôt merania [32].....	30
Obr. 2.16 Chyby vznikajúce pri meraní [2].....	31
Obr. 2.17 Opatrenie hrotu dotyku [2].....	31
Obr. 2.18 Prepočet súradníc zo snímaného bodu [2].....	32
Obr. 3.1 SIOS NMM-1 v laboratóriu ČMI.....	35
Obr. 3.2 Schéma princípu prístroja SIOS NMM-1 [37].....	36
Obr. 3.3 Druhy snímacích systémov pre NMM-1 [36].....	37
Obr. 3.4 Dotyková sonda Gannen XP [37].....	37
Obr. 3.5 CMM Zeiss UPMC 850 Carat na pracovisku ČMI [40].....	38
Obr. 3.6 Snímacia hlava Zeiss HSS s pripevnenou dotykovou sondou.....	38
Obr. 3.7 Riadiaci panel CMM Zeiss UPMC 850 Carat.....	39
Obr. 4.1 Meraný objekt.....	40
Obr. 4.2 Upnutie meraného objektu.....	41
Obr. 4.3 Súradnicový systém pri meraní na prístroji Zeiss.....	42
Obr. 4.4 Ilustratívny priebeh snímania meraného objektu pomocou dotykovej sondy.....	42
Obr. 4.5 Dotyk používaný k meraniu.....	43
Obr. 4.6 Zariadenie pre meranie teploty a vlhkosti vzduchu.....	43
Obr. 4.7 Teplotné snímače upevnené na čeľustiach zveráku.....	44
Obr. 4.8 Umiestnenie meraného objektu do pracovného priestoru stroja.....	45
Obr. 4.9 Snímače umiestnené v pracovnom priestore meracieho zariadenia.....	45
Obr. 4.10 Zariadenie Comet k snímaniu podmienok v laboratóriu.....	46
Obr. 4.11 Príklad zobrazenia podmienok merania.....	46
Obr. 4.12 Nastavovanie úrovni a počtu snímaných bodov.....	47
Obr. 4.13 Priebeh snímania na prístroji SIOS.....	47
Obr. 4.14 Súradnicový systém pri meraní na prístroji SIOS.....	48
Obr. 4.15 Snímacia sonda Gannen XP používaná k meraniu.....	48
Obr. 4.16 Izolovaný pracovný priestor prístroja SIOS od okolitého prostredia.....	49
Obr. 6.1 Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre SIOS.....	56
Obr. 6.2 Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre Zeiss.....	57

Obr. 7.1 Porovnanie príspevkov zložiek neistoty pre obe merania	59
Obr. 7.2 Výsledná rozšírená neistota meracieho zariadenia SIOS a Zeiss	60
Obr. 7.3 Porovnanie úplných výsledkov merania.....	62

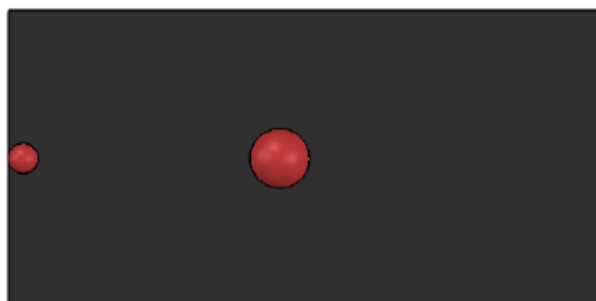
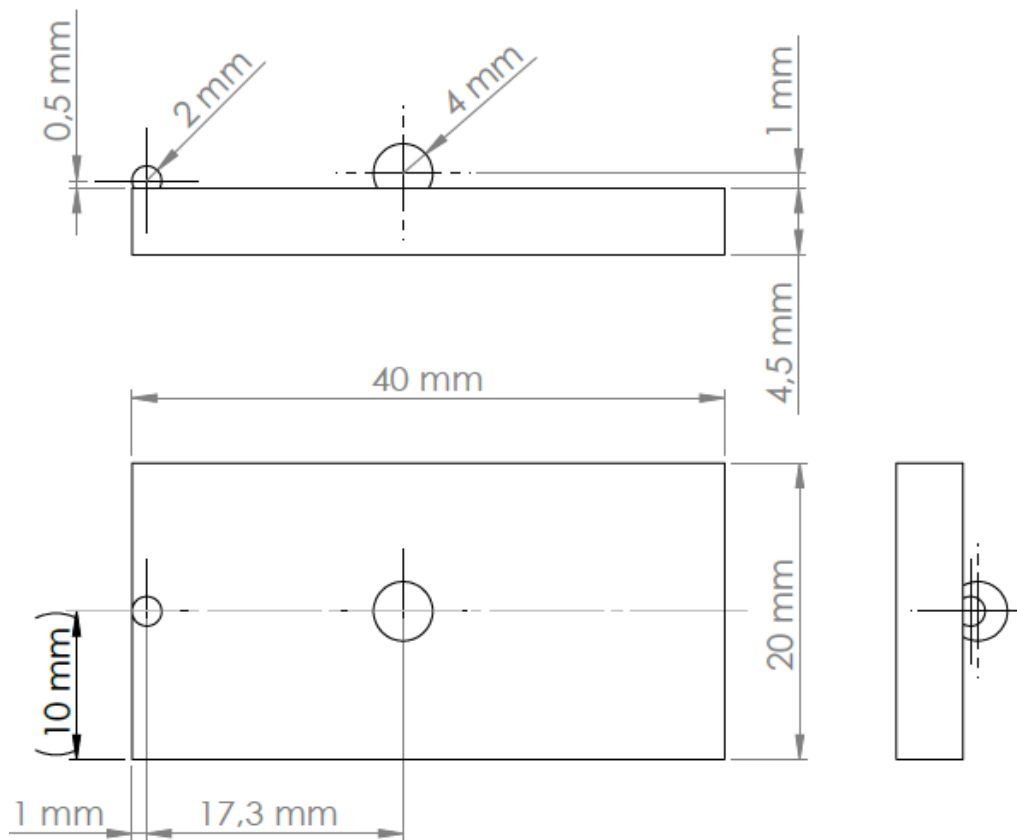
ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1.1 Hodnoty koeficientu k_s v závislosti na počte meraní [12]	17
Tab. 7.1 Porovnanie podielu jednotlivých príspevkov k neistote merania.....	61

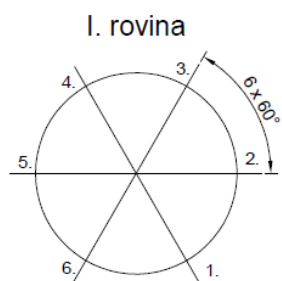
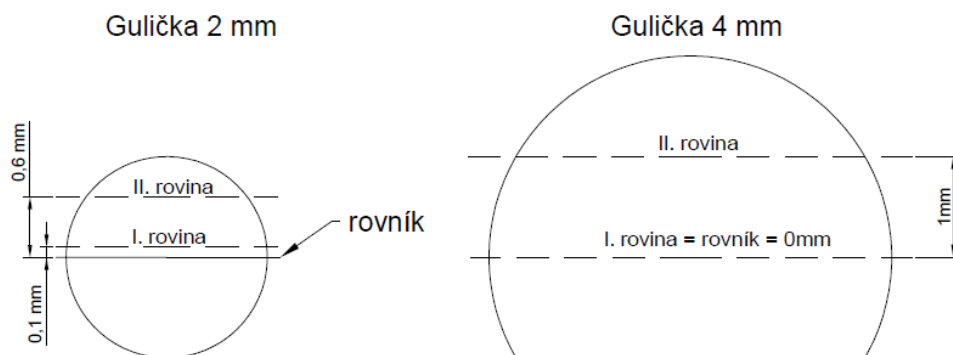
ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Charakteristika meranej súčasti
- Príloha 2 Priebeh merania
- Príloha 3 Protokol merania v ose y
- Príloha 4 Protokol merania v ose x
- Príloha 5 Protokol merania v smere yx
- Príloha 6 Protokol merania v smere xy
- Príloha 7 Prehľad nameraných údajov na prístroji SIOS
- Príloha 8 Prehľad nameraných údajov na prístroji Zeiss
- Príloha 9 Protokol o meraní SIOS
- Príloha 10 Kalibračný list Zeiss
- Príloha 11 Modul k stanoveniu rozšírenej neistoty merania CMM

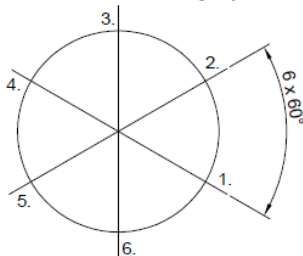
Príloha 1 Charakteristika meranej súčasti



Príloha 2 Priebeh merania

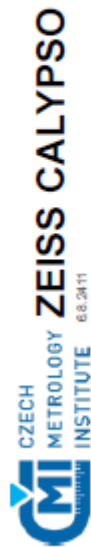


II. rovina - je pootočená o 30° voči I. rovine



Príloha 3

Protokol merania v ose y



Part name ball_plate_2-2mm-4mm

Drawing number
Order number
Company
Department
CMM No. 115499
Last 12 measurements
► Approval # Blocked

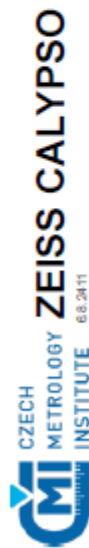
osa Y
Number of measure... 10
2022-03-17 09:43
Potanko

Time/Date	17.03.2022 08:46	17.03.2022 08:52	17.03.2022 09:05	17.03.2022 09:11	17.03.2022 09:18	17.03.2022 09:24	17.03.2022 09:30	17.03.2022 09:37	17.03.2022 09:43
Part ident	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Order number									
Text									

	Nom	+Tol	-Tol
Temperature Compensation	20,29900	20,35700	20,37400
3d Polar Distance	17,26858	17,26847	17,26853
Roundness_Sphere_2mm	0,0000	0,00099	0,00111
Roundness_Sphere_4mm	0,0000	0,00083	0,00078
Diameter_Sphere_2mm	1,99942	1,99938	1,99943
Diameter_Sphere_4mm	3,99962	3,99961	3,99968
	20,42500	20,40900	20,40150
	17,26859	17,26852	17,26855
	0,00111	0,00105	0,00113
	0,00070	0,00077	0,00065
	1,99954	1,99944	1,99942
	3,99963	3,99972	3,99961
	20,44800	20,44800	20,44800
	17,26855	17,26850	17,26861
	0,00114	0,00105	0,00105
	0,00080	0,00089	0,00089
	1,99936	1,99936	1,99936
	3,99960	3,99960	3,99954

Príloha 4

Protokol merania v ose x



Part name
ball_plate_2-2mm-4mm

Drawing number

Order number

Company

Department

CMM No.

Last 12 measurements

► Approval ▼ Blocked

osa X, Potanko

115499

Number of measure... 10

Time/Date 2022-03-17 11:37

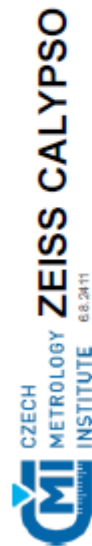
Operator Master

Text

	Time/Date	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022
Part ident	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Order number	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko
Time/Date	17.03.2022 10:28	17.03.2022 10:35	17.03.2022 10:40	17.03.2022 10:46	17.03.2022 10:55	17.03.2022 11:02	17.03.2022 11:13	17.03.2022 11:25	17.03.2022 11:30	17.03.2022 11:37	
Operator	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko	osa X, Potanko
Text											
Nom	+Tol	-Tol									
Temperature Compensation											
3d Polar Distance	17,3000										
Roundness_Sphere_2mm	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
Roundness_Sphere_4mm	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
Diameter_Sphere_2mm	2,0000	2,00057	2,00058	2,00057	2,00058	2,00061	2,00043	2,00057	2,00046	2,00047	
Diameter_Sphere_4mm	4,0000	3,99910	3,99908	3,99908	3,99908	3,99902	3,99908	3,99909	3,99902	3,99996	

Príloha 5

Protokol merania v smere yx



Part name
ball_plate_2-2mm-4mm

Drawing number
Order number

Company
otoceni 45, Potlanko

Department
CMM No.

115499

Last 12 measurements
Approval # Blocked

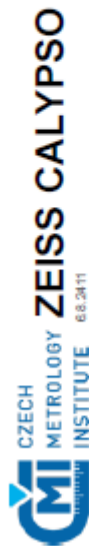
Time/Date
Operator
Text

Number of measure... 10

	17.03.2022 12:02	17.03.2022 12:09	17.03.2022 12:14	17.03.2022 12:25	17.03.2022 12:30	17.03.2022 12:41	17.03.2022 12:46	17.03.2022 12:55	17.03.2022 13:06	17.03.2022 13:16
Time/Date										
Part Ident	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Order number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Text										
	20,61600	20,62000	20,62900	20,62400	20,63450	20,63500	20,63800	20,63350	20,63950	20,65950
Temperature Compensation										
3d Polar Distance	17,3000									
Roundness_Sphere_2mm	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Roundness_Sphere_4mm	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Diameter_Sphere_2mm	2,0000	2,0004	2,0004	2,0004	2,0003	2,0003	2,0003	2,0003	2,0003	2,0003
Diameter_Sphere_4mm	4,0000	3,99893	3,99876	3,99873	3,99876	3,99879	3,99877	3,99872	3,99874	3,99879

Príloha 6

Protokol merania v smere xy



Part name ball_plate_2-2mm-4mm

Drawing number

Order number otceni -45, Potanko

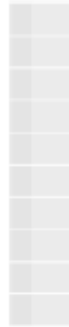
Company

Department

CMM No. 115499

Last 12 measurements

► Approval # Blocked



Number of measure... 10

Time/Date 2022-03-17 15:07

Operator Master

Text

Time/Date	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022	17.03.2022
Part Ident	13.53	14.02	14.13	14.20	14.27	14.36	14.44	14.49	14.56
Order number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Text									

	Norm	+Tol	-Tol										
Temperature Compensation				20,65500	20,69400	20,69850	20,71100	20,71250	20,71850	20,72900	20,73350	20,73750	20,74050
3d Polar Distance				17,26947	17,26942	17,26940	17,26937	17,26939	17,26944	17,26938	17,26938	17,26938	17,26933
Roundness_Sphere_2mm				0,00044	0,00052	0,00042	0,00045	0,00044	0,00049	0,00048	0,00047	0,00042	0,00045
Roundness_Sphere_4mm				0,00063	0,00071	0,00067	0,00067	0,00063	0,00074	0,00067	0,00077	0,00084	0,00069
Diameter_Sphere_2mm				2,00051	2,00052	2,00048	2,00049	2,00050	2,00043	2,00056	2,00034	2,00038	2,00042
Diameter_Sphere_4mm				3,99902	3,99902	3,99898	3,99893	3,99892	3,99909	3,99893	3,99894	3,99898	3,99890

Príloha 7 Prehľad nameraných údajov na prístroji SIOS

Prehľad nameraných údajov na prístroji SIOS NMM-1				
Meranie	Os x [mm]	Os y [mm]	Os xy [mm]	Os yx [mm]
1	17,26941343	17,26933342	17,26945126	17,26946007
2	17,26943427	17,26941998	17,26945205	17,26946077
3	17,26941343	17,26942077	17,26945283	17,26946085
4	17,26942343	17,26942155	17,26945361	17,26946924
5	17,26939343	17,26942233	17,26945439	17,26947003
6	17,26944343	17,26942311	17,26945517	17,26947081
7	17,26938343	17,26942389	17,26945596	17,26948716
8	17,26942343	17,26942468	17,26945674	17,26947238
9	17,26943428	17,26942546	17,26945752	17,26947316
10	17,26934342	17,26942624	17,26947583	17,26947394

Príloha 8 Prehľad nameraných údajov na prístroji Zeiss

Prehľad nameraných údajov na prístroji Zeiss UPMC 850 Carat				
Meranie	Os x [mm]	Os y [mm]	Os xy [mm]	Os yx [mm]
1	17,26855	17,26858	17,26847	17,26855
2	17,26854	17,26847	17,26842	17,26847
3	17,26855	17,26853	17,26840	17,26845
4	17,26856	17,26857	17,26837	17,26847
5	17,26853	17,26855	17,26839	17,26848
6	17,26858	17,26852	17,26844	17,26851
7	17,26852	17,26859	17,26839	17,26846
8	17,26856	17,26855	17,26834	17,26848
9	17,26850	17,26850	17,26838	17,26852
10	17,26848	17,26861	17,26833	17,26848



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Oddělení primární nanometrologie a technické dělky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

PROTOKOL O MĚŘENÍ

6014-PT-F0167-21

Datum vystavení : 30. března 2022 List 1 z 1 listu

Zákazník : ČMI, Oblastní inspektorát Brno, odd. 6014
Okružní 31, 638 00 Brno

Měřidlo : 2 kuličkový etalon délky
Výrobce : ČMI
Identifikační číslo : ev. č. 2d

Metrol. návaznost : Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony.
Etalon : Souřadnicový měřicí stroj SIOS NNM-1, v.č. 0017, číslo KL 6014-KL-A0002-21

Metoda měření : Dotykové snímání

Podmínky měření : Teplota vzduchu (24,5 ± 0,2) °C

Místo měření : ČMI, OI Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Nejistota měření : U – viz. naměřené hodnoty

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Výsledky měření byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto protokolu o měření a vztahují se pouze k době a místu provedení měření.

Výsledky měření rozteče středů koulí d :

$$d = 17,269\,406\text{ mm} \pm 0,000\,370\text{ mm}$$

Datum kalibrace : 22. 3. - 30. 3. 2022

Kalibraci provedl:

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.



Zástupce vedoucího oddělení :

Ing. Václav Duchoň

Príloha 10 Kalibračný list Zeiss



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle
ČSN EN ISO/IEC 17025:2018.

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST 6014-KL-F0168-22

Datum vystavení : 18. března 2022

List 1 z 1 listu

Zákazník : Český metrologický institut, odd. 6014
Okružní 31, 638 00 Brno

Měřidlo : 2 kuličkový etalon délky

Výrobce : ČMI

Identifikační číslo : ev. č. 2d

Rozsah : Průměr kuliček 2 a 4 mm, rozteč 17,3 mm

Místo měření : ČMI OI Brno - lab. 7006

Metrolog. návaznost : Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony

Použité etalony : Souřadnicový měřicí stroj UPMC 850 CARAT, v.č. 115499
číslo KL 81047504

Kalibrační postup : 815-MP-C503

Místo kalibrace : Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Podmínky měření : Teplota vzduchu (20,5 ± 0,2) °C

Nejistota měření : $U = 0,527 \mu\text{m}$

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Výsledky kalibrace : Naměřená délka mezi středy obou kuliček: 17,268 537 mm

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace : 18. 3. 2022

Kalibraci provedl:

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.



Zástupce vedoucího oddělení:

Ing. Václav Duchoň

Príloha 11 Modul k stanoveniu rozšírenej neistoty merania CMM

Stanovenie rozšírenej neistoty merania, CMM Zeiss					
Menovitý rozmer meraného objektu:					
	L=	0,0173	m		
Smerodatná odchýlka z opakovaných meraní:					
	s=	0,0302030168	μm		
Počet opakovaných meraní:					
	n=	10			
Hodnota rozlíšiteľnosti daného CMM:					
	R _{CMM} =	0,1	μm		
Vplyv neistoty kalibrácie CMM - neistota z kalibračného listu CMM					
	U _{CMM} =	0,11692	μm		
Rozdiel hodnoty koeficientu teplotnej rozťažnosti meraného objektu a CMM:					
	Δα _A =	2,1	μm·m ⁻¹ ·°C ⁻¹		
Koeficient teplotnej rozťažnosti meraného objektu:					
	α _o =	2,1	μm·m ⁻¹ ·°C ⁻¹		
Rozdiel teplôt meraného objektu a prístroja:					
	Δt=	0,2	°C		
Odchýlka teploty od 20 °C:					
	Δt ₂₀ =	0,5	°C		
Kombinovaná neistota použitej sondy stanovená výrobcom (HSS):					
	U _{prob} =	0,5	μm		
Hodnota vplyvu matematického spracovania nameraných údajov pomocou špecializovaného softwaru:					
	U _{FIT} =	0	μm		
Veličina	Odhad	Štandardná neistota	Rozdelenie	Citlivostný koeficient	Príspevok k neistote
1	-	0,00955 μm	normálne	1	0,00955 μm
2	0	0,05846 μm	rovnomerné	1	0,05846 μm
3	0	0,05774 μm	rovnomerné	1	0,05774 μm
4	0	0,25000 μm	rovnomerné	1	0,25000 μm
5	0	0,00000 μm	rovnomerné	1	0,00000 μm
6	0	0,11547 °C	rovnomerné	0,03633 μm/°C	0,00420 μm
7	0	0,35000 μm/m	rovnomerné	0,0173 m	0,00606 μm
8	-				0,26343 μm
Výsledná rozšírená neistota:				U_{sub}=	0,52700 μm

Vysvetlivky:

- | |
|---|
| 1 - Vplyv rozptylu nameraných hodnôt, neistota typu A (u _A) |
| 2 - Vplyv neistoty kalibrácie CMM (u _{B1}) |
| 3 - Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM (u _{B2}) |
| 4 - Vplyv neistoty snímacieho systému CMM (HSS) (u _{B3}) |
| 5 - Vplyv neistoty matematického modelu pri spracovaní údajov (u _{B4}) |
| 6 - Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu (u _{B5}) |
| 7 - Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u _{B6}) |
| 8 - Štandardná kombinovaná neistota typu C (u _C) |

Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre CMM ZEISS

