



# 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

# VYTVOŘENÍ ETALONU PRO KALIBRACI PŘENOSNÉHO MĚŘICÍHO RAMENE

CREATION OF A STANDARD FOR CALIBRATION OF A PORTABLE MEASURING ARM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Murín

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2022



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Milan Murín</b>
Studijní program:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Šrámek, Ph.D.</b>
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:

### Vytvoření etalonu pro kalibraci přenosného měřicího ramene

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zavedení přenosných CMM (měřících ramen) vybavených dotykovým snímacím systémem umožňuje provádění přesných délkových měření, které v minulosti vyžadovalo specializované vybavení a postupy. Úkolem práce je vytvoření vhodného etalonu délky pro měřicí rameno v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Etalon bude sloužit pro rychlou kalibraci měřicího ramene v rámci jeho použití v laboratořích ÚVSSR FSI.

#### Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu v oblasti měření pomocí přenosných ramen (rešerše).  
Charakteristika zvoleného přístroje a rozbor řešené problematiky.  
Volba vhodného kalibrovaného etalonu délky.  
Provedení souboru měření při kalibraci přístroje za pomoci etalonu.  
Identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje při kalibraci.  
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 měřících 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.

ISO 10360-12:2016. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 12: Articulated arm coordinate measurement machines (CMM).

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. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Závěrečná práce sa zaoberá stanovením neistoty prenosného dotykového meracieho prístroja Hexagon Absolute Arm Compact, ktorý sa nachádza na Fakulte strojního inžinierstva v Brne. V rešeršnej časti je popísaný prehľad prenosných súradnicových meracích strojov a súčasný stav prenosných súradnicových meracích strojov. Práca tiež obsahuje popis základných metrologických pojmov a metodík stanovenia neistoty meracieho stroja. Ďalšie časti práce sa zaoberajú popisom meracieho ramena Hexagon Absolute Arm Compact a vytvorenia etalónu, ktorý bol použitý pri stanovení rozšírenej neistoty merania. V závere práce sa nachádza zhrnutie dosiahnutých výsledkov a odporúčania pre prax.

## **ABSTRACT**

This final thesis is dealing with stating uncertainty of optical measuring device Hexagon Absolute Arm Compact, which is located at Faculty of mechanical engineering in Brno. Overview of portable coordinate measuring machines and analyzed present status of portable coordinate measuring machines is in summation. This part also includes basic metrology concepts and methodology of determination of uncertainty of measuring instrument. Content of following parts of thesis is detailed description of Hexagon Absolute Arm Compact machine and creation of etalon, which was used to determine the uncertainty of measurement. Last part of this thesis includes summary of achieved results and recommendations for practice.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Prenosné súradnicové meracie stroje, neistota merania, presnosť merania, etalón, kalibrácia meradla, metrologická nadväznosť

## **KEYWORDS**

Portable coordinate measuring machines, uncertainty of measurement, accuracy of measurement, etalon, calibration of device, metrological traceability



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

MURÍN, Milan. *Vytvoření etalonu pro kalibraci přenosného měřicího ramene*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140258>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.





## **POĎAKOVANIE**

Týmto ďakujem pánovi doc. Ing. Jánovi Šrámkovi, Ph.D. za trpezlivý a ochotný prístup, cenné rady a pripomienky pri spracovávaní tejto diplomovej práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať svojej rodine a priateľke za ich veľkú podporu, ktorú mi prejavovali počas celej doby štúdia.



# ČESTNÉ PREHLÁSENIE

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

V Brne dne

.....

Murín Milan



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>POPIS SÚČASTNÉHO STAVU V OBLASTI MERANIA POMOCOU PRENOSNÝCH CMM</b> .....	<b>17</b>
2.1	Kontaktné Prenosné CMM (dotykové sondy) .....	18
2.2	Bezkontaktné Prenosné CMM .....	19
2.2.1	Laserové Sledovače (Laser Tracker) .....	20
2.2.2	Prenosné Optické CMM .....	22
2.2.3	Prenosné Skenery .....	24
2.3	Meracie Ramená .....	25
<b>3</b>	<b>METROLOGICKÝ SYSTÉM A NADVÄZNOŠŤ</b> .....	<b>27</b>
3.1	Metrická Konvencia.....	27
3.2	Národné Metrologické Inštitúty.....	28
3.3	Národný Metrologický Systém ČR.....	28
3.4	Dôležité Subjekty so Vzťahom k Metrologii v ČR .....	30
3.5	Meracie Etalóny .....	30
3.6	Metrologická Nadväznosť .....	31
3.7	Kalibrácia.....	32
<b>4</b>	<b>VYJADRENIE MERANEJ VELIČINY</b> .....	<b>33</b>
4.1	Chyba merania .....	34
4.1.1	Hrubá chyba.....	34
4.1.2	Systematická chyba .....	34
4.1.3	Náhodná chyba .....	35
4.2	Neistota merania .....	35
4.2.1	Štandardná neistota typu A.....	35
4.2.2	Štandardná neistota typu B pri priamom meraní .....	36
4.2.3	Kombinovaná štandardná neistota.....	36
4.2.4	Rozšírená neistota.....	36
<b>5</b>	<b>URČENIE NEISTOTY MERANIA NA CMM</b> .....	<b>39</b>
5.1	Prehľad používaných metód .....	39
5.2	Neistota merania CMM pri použití substituenej metódy.....	39
5.2.1	Štandardná neistota kalibrovaného objektu <i>ucal</i> .....	40
5.2.2	Štandardná neistota postupu merania <i>up</i> .....	40
5.2.3	Štandardná neistota systematickej chyby <i>ub</i> .....	40
5.2.4	Štandardná neistota z výrobného procesu <i>uwt</i> .....	40
<b>6</b>	<b>KALIBRÁCIA ETALÓNU</b> .....	<b>43</b>
6.1	Kalibrovaný etalón.....	43
6.2	Kalibrácia etalónu na Českom Metrologickom Inštitúte .....	44
6.2.1	SIP 1002M.....	44
6.2.2	Talyrond TR595S .....	44
6.2.3	Zeiss UPMC .....	45
6.3	Výsledné hodnoty kalibrácie .....	46
<b>7</b>	<b>KALIBRÁCIA RAMENA POMOCOU ETALÓNU</b> .....	<b>49</b>
7.1	Hexagon Absolute Arm 83 Compact.....	49
7.2	Kalibrácia ramena pomocou etalónu .....	51

7.3	Určenie neistoty merania .....	52
7.3.1	Výpočet neistoty rozptylu merania $u_A$ .....	53
7.3.2	Výpočet štandardnej neistoty použitého etalónu.....	53
7.3.3	Výpočet vplyvu rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému.....	53
7.3.4	Výpočet štandardnej neistoty snímacieho systému .....	54
7.3.5	Výpočet neistoty vplyvu rozdielu teplôt CMM a meraného objektu .....	54
7.3.6	Výpočet neistoty vplyvom rozdielu teplôt od 20 °C .....	54
7.4	Kvantifikácia neistôt merania.....	55
7.4.1	Neistoty rozptylu merania .....	56
7.4.2	Štandardná neistota rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému.....	57
7.4.3	Štandardná neistota snímacieho systému .....	57
7.4.4	Štandardná neistota vplyvu rozdielu teplôt etalónu a meradla.....	57
7.4.5	Štandardná neistota vplyvom rozdielu teplôt od 20 °C.....	57
7.4.6	Výsledná rozšírená neistota merania ramena .....	57
<b>8</b>	<b>ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ .....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....</b>	<b>63</b>
<b>11</b>	<b>ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK.....</b>	<b>67</b>
11.1	Zoznam skratiek a symbolov .....	67
11.2	Zoznam tabuliek .....	68
11.3	Zoznam obrázkov .....	68
<b>12</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>71</b>

# 1 ÚVOD

Vo všetkých odvetviach priemyslu postupne dochádza k nárastu konkurencie a s tým sa taktiež zvyšujú požiadavky na presnosť a rýchlosť výrobných procesov ako aj kvalitu produkcie. S týmto zvyšujúcim sa tlakom v odvetviach musí držať krok aj meracia technika. V súčasnej dobe je na trhu veľké množstvo meradiel a voľba toho vhodného záleží iba od parametrov, ktoré nám vyhovujú. Niektoré rozmery možno merať posuvným meradlom, iné so zvyšujúcimi sa nárokmi na presnosť vyžadujú presnejšie meranie, ktoré dokážu docieľiť súradnicové meracie stroje. Niektoré objekty vzhľadom na svoju veľkosť alebo uloženie nemusia byť vhodné ku premiestňovaniu, a je preto jednoduchšie ich merať priamo na mieste. Práce v týchto prípadoch sú výhodným variantom prenosné súradnicové meracie stroje.

Prenosné súradnicové meracie stroje dokážu využívať kontaktný aj bezkontaktný spôsob merania a komplexné meranie výrobkov. Dokážu zmerať skutočný tvar a rozmer výrobku, porovnať tento rozmer alebo tvar s rozmerom špecifikácie a následne pomocou softvéru vyhodnotiť požadované parametre. Ich prenosnosť oproti klasickým súradnicovým strojom je ich najväčšou výhodou.

Pre naozaj presné meranie pomocou prenosného súradnicového meracieho stroja je potrebné dbať na jeho správne nastavenie. Súčasťou každého merania je rozšírená neistota merania, ku ktorej prispievajú chyby merania a faktory ovplyvňujúce celý proces merania. Stanovenie neistoty merania prenosného súradnicového stroja je jedným z cieľov tejto práce.

Pre stanovenie tejto neistoty sú dostupné rôzne postupy. V ideálnom prípade je k dispozícii etalón, ktorého presné rozmery sú známe a umožňujú ich meraním stanoviť hodnoty neistoty zariadenia. Táto práca sa taktiež zaoberá vytvorením tohto etalónu.





## 2 POPIS SÚČASTNÉHO STAVU V OBLASTI MERANIA POMOCOU PRENOSNÝCH CMM

Súradnicový merací stroj (CMM - z angl. Coordinate Measuring Machines) je počítačom kontrolované zariadenie, ktoré má zložitý merací systém a je schopný merať v rovine alebo v priestore danej súradnicovej sústavy. Súradnicový merací stroj pracuje s dvoma súradnicovými systémami: súradnicový systém stroja a súradnicový systém meraného predmetu. Navrhnutý 3D model súčiastky a k nemu prislúchajúca technická dokumentácia, ako výstupný produkt konštrukčného procesu, zobrazujú súčiastku ideálne presnú, s presne geometricky definovanými tvarmi a ich vzájomnými polohami. [1] Tradičné CMM sú vysoko presné, ale sú ťažkopádne, nedajú sa ľahko presúvať a vyžadujú si kontrolované prostredie. Na Obr. 1 je CMM Mitutoyo rady LEGEX.



Obr. 1 Súradnicový merací stroj Mitutoyo rady Legex [2]

Rovnako ako u počítačov, aj v prípade CMM technologický pokrok spôsobil, že sa postupne na trhu objavili aj varianty malých rozmerov, tzv. prenosné CMM. Ich malé rozmery oproti tradičným CMM sú ich hlavnou výhodou.

Prenosné CMM sú teda flexibilnejšou a lacnejšou alternatívou. Operátori ich môžu premiestniť do dielne, lebo tieto ľahké stroje nevyžadujú kontrolované prostredie. Dokážu zachytiť 3D merania z rôznych kategórií dielov, a zatiaľ čo tradičné CMM sa používajú iba na kontrolu kvality, prenosné CMM sa dajú použiť aj na iné aplikácie vrátane reverzného inžinierstva, rýchleho prototypovania a vedeckého výskumu. [3]

Na Obr. 2 môžeme vidieť bezkontaktné meracie rameno od výrobcu FARO, vybavené skenerom.



Obr. 2 Meracie rameno Edge Faroarm [4]

## 2.1 Kontaktné Prenosné CMM (dotykové sondy)

Prenosné CMM sa dodávajú v dvoch základných variantoch: kontaktné a bezkontaktné. Kontaktné prenosné CMM používajú dotykovú sondu (Obr. 3), ktorá dáva softvéru vedieť, kde sa nachádza povrch. Prakticky jediným konštrukčným variantom prenosného kontaktného merania sú kĺbové meracie ramená (ďalším je asi už len valcový prenosný CMM), ktoré ale môžu byť vybavené aj bezkontaktným systémom merania alebo skenerom (vid' kap.2.3).



Obr. 3 Pevná dotyková sonda Hexagon R-3-A-50 [5]

V praxi sa pri kontaktnom meraní prenosnými ramenami používajú dva typy dotykových sond: pevné sondy a dotykové spínacie sondy.

*Pevnú sondu* (Obr. 3) operátor CMM ručne uvedie do kontaktu s obrobkom, umožní stroju usadiť sa a manuálne signalizuje CMM, aby zaznamenal polohu sondy. Softvér CMM automaticky upraví hodnoty tak, aby sa kompenzoval priemer hrotu sondy. Napríklad pri čítaní priemeru otvoru softvér kompenzuje priemer hrotu sondy CMM tak, aby sa zobrazil skutočný priemer otvoru.

Pevné sondy sú dostupné v rôznych konfiguráciách a naďalej majú široké uplatnenie v súradnicovej metrológii, keď sa používajú v spojení s manuálnymi CMM. Najčastejšie sa používajú na meranie zakrivených povrchov, vzdialeností medzi prvkami obrobku, uhlov a priemeru a umiestnenia stredovej čiary otvorov v aplikáciách, ktoré vyžadujú nízku až strednú presnosť. Pevné sondy sa jednoducho používajú a sú odolné, ale ich opakovateľnosť závisí od dotyku operátora. Pretože každý operátor má pri pohybe a privádzaní sondy do kontaktu s obrobkom iný dotyk, môžu sa medzi operátormi vyskytnúť nezrovnalosti vo výsledkoch merania.

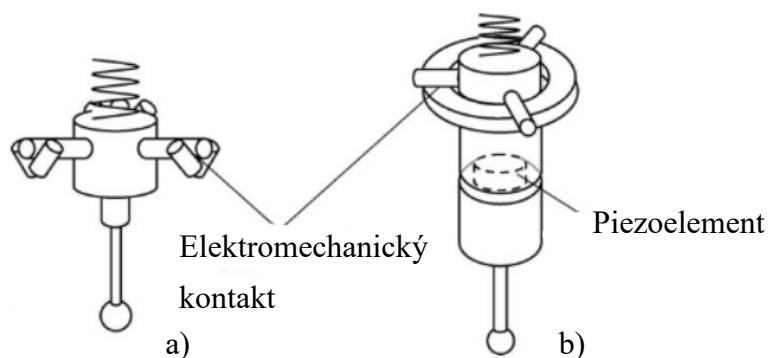


Obr. 4 Dotyková spínacia sonda Hexagon HP-T-RP [6]

*Dotyková spínacia sonda* (Obr. 4) je dnes najbežnejším typom sondy používanej na CMM. Dotykové spínacie sondy sú presne vyrobené zariadenia citlivé na dotyk, ktoré generujú elektronický signál vždy, keď sa sonda dotkne bodu na obrobku. Kontakt s dielom je zvyčajne indikovaný LED diódou a počuteľným „pípnutím“. Samotná hlava sondy je

namontovaná na konci jednej z pohyblivých osí CMM. Dá sa otáčať manuálne alebo automaticky a môže obsahovať mnoho rôznych hrotov a nástavcov. Vďaka týmto vlastnostiam je spínacia sonda všestranným a flexibilným zariadením na zber údajov. Dotykové spínacie sondy eliminujú vplyv dotyku operátora na výsledky merania a možno ich namontovať na priame ovládanie počítačom a manuálne CMM. Klasické spínacie dotykové sondy fungujú na princípe elektromagnetických kontaktov (Obr. 5a).

Vylepšenie základného dizajnu dotykovej spínacej sondy zahŕňa piezo senzory (Obr. 5b). Tieto snímače premieňajú vychýlenie sondy na konštantný digitálny akustický signál, ktorý zaznamenáva CMM. Tento dizajn zlepšuje presnosť výsledkov merania dotykovou spínacou sondou, pretože eliminuje efekt ohýbania dotykového hrotu (spôsobeného zmenami sily pri kontakte dotykovej spúšťacej sondy s obrobkom) a nepresnosti spôsobené vnútornými elektromechanickými časťami sondy.



Obr. 5 Rozdielne konštrukcie spínacích dotykových sond: a) elektromechanická b) piezoelektrická [7]

Ďalším vylepšením je použitie technológie tenzometra. Tento princíp činnosti účinne spúšťa sondu konštantnou silou bez ohľadu na to, aký je uhol kontaktu sondy s obrobkom. Konštrukcia eliminuje smerovú citlivosť, ktorá je bežná u iných dotykových spínacích sond. Submikrónová presnosť je možná aj pri dlhých kombináciách dotykového pera. [8]

## 2.2 Bezkontaktné Prenosné CMM

Bezkontaktné CMM fungujú na princípe optického alebo laserového snímania polohy, a disponujú širšou škálou riešení oproti kontaktným CMM.

Patria medzi ne: [3]

- laserové sledovače
- prenosné optické CMM
- prenosné skenery

V praxi sa môže stierať rozdiel medzi pojmami laserový sledovač (2.2.1) a laserový skener (2.2.3) snáď kvôli tomu, že laserové sledovače bývajú rozšírené o funkciu skenovania. Oba systémy sú vysoko presné, majú veľký pracovný rozsah a využívajú lasery. Existujú však určité výrazné rozdiely.

Laserový skener je plne bezkontaktný, zatiaľ čo sledovač meria polohu retroreflektora, ktorý prichádza do kontaktu s dielom. Pretože sa sledovač spolieha na retroreflektory, ich premiestňovanie na rôzne miesta na diele vyžaduje určitú manuálnu prácu. Skener je na druhej strane automatizovaný. [9]

### 2.2.1 Laserové Sledovače (Laser Tracker)

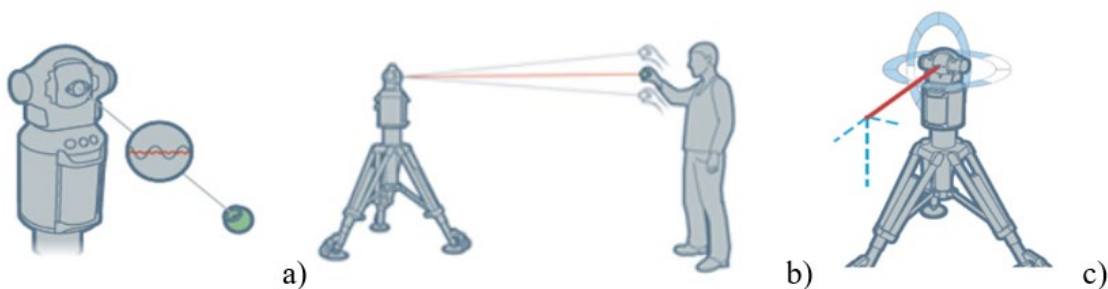
Laser tracker je vysoko presný prenosný laserový prístroj pre veľkoobjemovú metrológiu. Ponúka efektívne riešenie úloh pri meraní rozmerných dielov priamo vo výrobe, ktoré je možné len s ťažkosťami merať klasickými dotykovými metódami. Systém sa skladá zo stojana, optickej hlavice a kontroléra (Obr. 6). [10]



Obr. 6 Leica Absolute Tracker AT500 [9]

Činnosť laserového sledovača je ľahko pochopiteľná: Meria dva uhly a vzdialenosť. Sledovač vysiela laserový lúč na retroreflexný cieľ, ktorý sa drží proti objektu, ktorý sa má merať. Svetlo odrazené od cieľa sa vracia po svojej dráhe a znovu vstupuje do sledovača v rovnakej polohe, v akej ho opustilo. Retroreflexné terčičky sa líšia, ale najobľúbenejší je sféricky montovaný retroreflektor (SMR), Obr. 7a. Keď svetlo znova vstúpi do sledovača, časť z neho prejde do merača vzdialenosti, ktorý meria vzdialenosť od sledovača k SMR. Merač vzdialenosti môže byť dvoch typov, interferometer alebo merač absolútnej vzdialenosti.

Laserový sledovač obsahuje dva uhlové kódovače. Tieto zariadenia merajú uhlovú orientáciu dvoch mechanických osí sledovača: os azimutu a elevačnej osi. Uhly zo snímačov a vzdialenosť od diaľkomeru sú dostatočné na presný výpočet stredu SMR (Obr. 7c). Kvôli sférickému dizajnu SMR je jeho stred vždy v pevnej vzdialenosti odsadenia vzhľadom na akýkoľvek meraný povrch, takže súradnice povrchov alebo bodov meraných pomocou SMR sa dajú ľahko získať. Meranie vzdialenosti, dôležitá funkcia laserového sledovača, môže byť inkrementálne alebo absolútne.



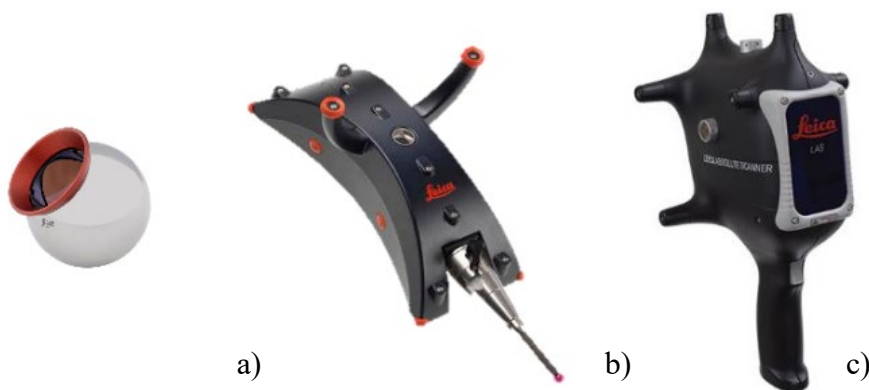
Obr. 7 Princíp fungovania Laserového sledovača:

a) Laserový lúč sa doráža od sféricky montovaného reflektora a vracia sa do sledovača b) Snímač sleduje zmenu polohy odrážača c) Meranie uhlov v osi azimutu a elevačnej osi, a vzdialenosti odrážača od hlavy sledovača [11]

Laserové svetlo sa rozdelí na dva lúče. Jeden putuje priamo do interferometra. Druhý lúč prechádza zo sledovača, odráža sa od SMR (Obr. 7b) a na spätnej dráhe prechádza do interferometra. Vo vnútri interferometra dva lúče svetla interferujú, čo vedie k cyklickej

zmene zakaždým, keď sa SMR priblíži alebo oddiali od sledovača o vzdialenosť rovnajúcu sa jednej štvrtine vlnovej dĺžky svetla ( $\sim 0,0158$  mikrónu). Elektronické obvody počítajú cyklické zmeny, aby určili prejdenú vzdialenosť. [11]

Laserové sledovače môžu disponovať okrem kútového odrážačab (Obr. 8a) aj príručnými sondami vybavenými odrážačom (Obr. 8b) alebo 3D skenerom s odrážačom (Obr. 8c). Príručné sondy obsahujú viac ovládacích prvkov pre získanie 3D súradnicových dát a komunikáciu s meracím systémom [10]. V prípadoch, ktoré vyžadujú laserové skenovanie, môžu príručné skenery načítať na laserový sledovací systém státisíce bodov za sekundu, čo umožní presne zmerať obrovské mraky bodov vo veľkých objemoch. Pomocou tejto technológie je možné podrobne vytvoriť CAD model počas procesu merania, čo skráti dobu kontroly z dní na niekoľko hodín. V minulosti bolo jedinou možnosťou ako naskenovať diel pomocou laserového sledovacieho systému, „otierať“ odrážač po celom povrchu [12]



Obr. 8 a) sférický kútový odrážač b) dotyková sonda s odrážačom c) skener s odrážačom [13]

Niektoré laserové sledovače priamo disponujú funkciou skenovania (Obr. 9). Leica ATS600 od Hexagonu dokáže skenovať povrch s metrologickou presnosťou do vzdialenosti až 40 metrov bez potreby použitia skenovacích sprejov, optických reflektorov a sond.



Obr. 9 Leica Absolute Tracker ATS600 umožňuje vykonávať laserové merania bez laserových terčov, priamo z laserového systému snímacieho zariadenia. [5]

### 2.2.2 Prenosné Optické CMM

U optických CMM je rukoväť so sondou vybavená niekoľkými infračervenými LED diódami, polohu je možné zachytiť špeciálnu kameru.



Obr. 10 Presnosný optický merací systém Metronor ONE [14]

Kamera, umiestnená najčastejšie na trojnožke, zachytí IR žiarenie a keďže majú všetky diódy na rukoväť sa sondou svoji konkrétnu konšteláciu, dokáže systém z polohy zachytených bodov presne určiť, v akej vzdialenosti a orientácii sa rukoväť nachádza (rukoväť Obr. 11). Pri požiadavke na vyššiu presnosť určenia polohy je možno polohu rukoväti snímať dvoma kamerami súčasne a potom určovať z dát nazberaných oboma kamerami. Pre určenie polohy v priestore a voči meraným súčastiam, je potrebné umiestniť IR diódu tiež na pevné prvky v priestore merania (napr. nosné stĺpy v hale) alebo priamo pripevniť na meranú súčiastku. Vďaka tomu môže kamera priebežne overovať, že k nej nedošlo nechcenému posunu voči meraným súčastiam. Zároveň ale diódy na merané súčasti plní funkciu referenčných bodov. Ich poloha je snímaná v rade desiatok Hz, čo umožňuje manipuláciu s kamerou počas merania bez straty informácie o polohe častí. Umožňuje zväčšenie meracieho objemu a možnosť merať z viacerých uhlov. [15] [16]



Obr. 11 Rukoväť so sondou: a) Creaform, [17] b) Keyence, [18] c) Metronor [19]

Z toho vyplýva podstatná výhoda, ktorou je zníženie vplyvu vibrácií na presnosť merania. Vplyv vibrácií je pre prenosné CMM kľúčový, keďže predpokladá ich použitie priamo vo výrobných halách, a nie v metrologických laboratóriách. Neustále sledovanie polohy meranej súčasti vedie k ďalším výhodám, ktorou je zníženie možných chýb operátora pri meraní (napr. nechcené posunutie meranej súčasti). Ďalšou výhodou, ktorú majú optické systémy je menší vplyv teplotnej rozťažnosti, keďže ako bolo zmienené, nie je rukoväť so sondou nijako mechanicky spojená so zbytkom meracieho systému. [20] [16]

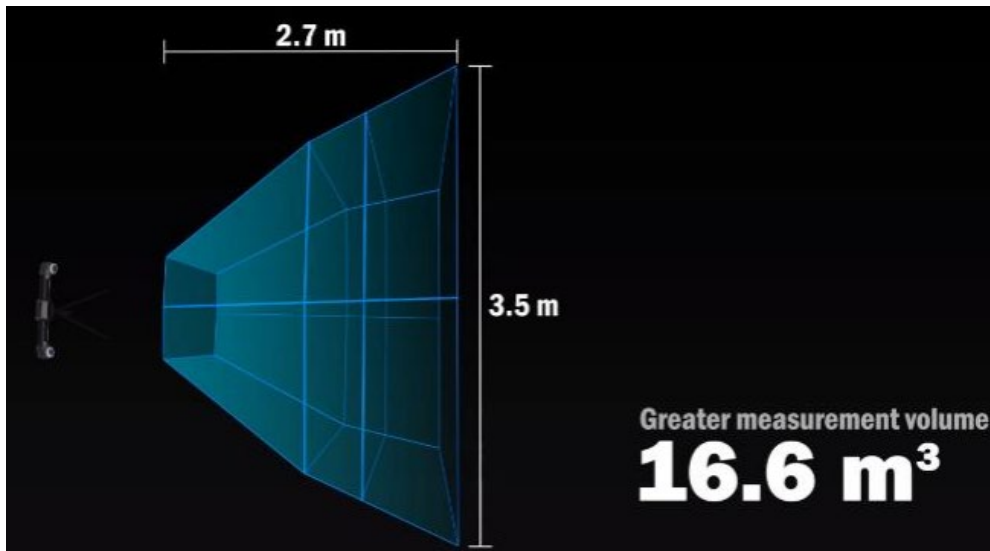


Obr. 12 Sonda pre meranie hlbokých úzkych dier (Metronor) [16]

Vlastnosti meracieho systému je možné rozšíriť použitím rôznych sond a hrotov. Výrobcovia ponúkajú špeciálne sondy a nástavce pre meranie horšie dostupných miest ako sú hlboké úzke diery. V dnešnej dobe je štandardom možnosť kúpiť k rôznym hrotom tiež samotné telo sondy. Vďaka tomu je možné všetky kalibrované sondy rýchlo meniť meraní bez nutnosti recalibrácie. Tým je značne skrátený čas merania, pri ktorom je nevyhnutná zmena typu sondy. [18] [16]

Ďalším rozšírením možnosti merania je následné použitie 3D skenera. Ak je skener vybavený IR diódami, môže jeho polohu presne zachytiť kamerou. Použitie 3D skeneru umožňuje snímať neporovnateľne väčšie množstvo bodov oveľa rýchlejšie, než dotyková sonda a vďaka tomu merať súčasti s komplikovanou geometriou. Toto je použité napríklad pri meraní súčastí ako sú lopatky turbíny, časti lietadiel, alebo aut a všeobecne súčasti, ktoré sa neskladajú zo základných geometrických prvkov. [21] [16]

Vďaka výše zmieneným vlastnostiam nachádzajú optické CMM svoje uplatnenie obzvlášť pri meraní veľkých súčiastok. Ich použitie eliminuje dobu nutnú pre prepravu veľkých meraných súčastí do meracieho priestoru veľkých CMM. Pri meraní veľkých súčiastí aj v efektívnosti predčia meracie ramena, ktorých merací rozsah je limitovaný dĺžkou ramena a pri meraní väčších súčastí, než je rozsah ramena a je nutné ich premiestnenie v priebehu merania. Napríklad optický prenosný CMM od spoločnosti Creaform je vhodný pre komponenty o veľkosti 0,2 – 6 m. Snímač dokáže zachytiť referenčný bod vo vzdialenosti 2,7 m od snímača, v tejto vzdialenosti dokáže zároveň zachytiť body vzdialené až 3,5 m od seba (Obr. 13). Merací objem týmto však nie je obmedzený, pretože so snímačom možno manipulovať behom merania. Lineárna presnosť merania je 0,025 mm, objemová presnosť sa následne odvíja od veľkosti meracieho objemu a toho, či je použité základné vybavenie, alebo vybavenie rady Elite. V druhom prípade je objemová presnosť rovná 0,064 mm. Pri použití sondy z radu Elite v kombinácii s 3D skenerom, je objemová presnosť vyjadrená ako 0,044 mm + 0,015 mm/m. Celý systém, vrátane softvéru a 3D skeneru potom stojí až 85 000 €. [17] [16]



Obr. 13 Znáznornenie meracieho objemu (Snímač od spol. Creaform) [16]

### 2.2.3 Prenosné Skenery

Doposiaľ spomínané dotykové a optické riešenia možno použiť na meranie 3D bodov kontaktom so sondou alebo označením bodu s retroreflektorom alebo LED. Tento proces nie je vhodný na povrchové kontroly, pretože je príliš pomalý, keď je potrebný veľký počet bodov, najmä pri šikmých plochách (najrýchlejšie CMM dokážu merať stovky bodov za sekundu). Preto sa začiatkom osemdesiatych rokov objavili návrhy 3D skenovania, ktoré boli schopné vytvárať mraky bodov na základe meraného povrchu. Dnes existujú dve hlavné kategórie skenerov.

#### *Optické prenosné skenery*

3D optické skenery premietajú vzor svetla na súčiastku a sledujú, ako je vzor zdeformovaný. Svetelný vzor je premietaný buď LCD projektorom alebo skenovaným popripade difraktovaným laserovým lúčom. Na pozorovanie projektovaného vzoru sa používa jedna alebo viac kamier.

Ak sa používa iba jedna kamera, musí byť poloha projektora vo vzťahu ku kamere vopred určená; ak sa použijú dve kamery, stačí skalibrovať stereoskopický pár. Rýchlosť je najväčšou výhodou týchto skenerov, pretože je možné získať tisícky bodov v jednom snímaní namiesto toho, aby sa museli postupne skenovať body. Štruktúrované svetlo tiež umožňuje snímať nestabilné alebo pohybujúce sa predmety. Pri metódach optického skenovania sú problematické reflexné a priehľadné materiály. Táto prekážka sa najčastejšie prekonáva poprášením materiálu.



Obr. 14 RS-SQUARED optický skener pre prenosné ramená od Hexagon



### Laserové prenosné skenery

Laserové skenery premietajú na objekt bod alebo čiaru laserového lúča, na rozdiel od optických, ktoré snímajú celú plochu objektu. Tento bod alebo čiara je pozorovaná jednou alebo dvoma kamerami, čo umožňuje trianguláciu 3D súradníc premietnutého bodu. Povrch je postupne zrekonštruovaný pohybom skenera.



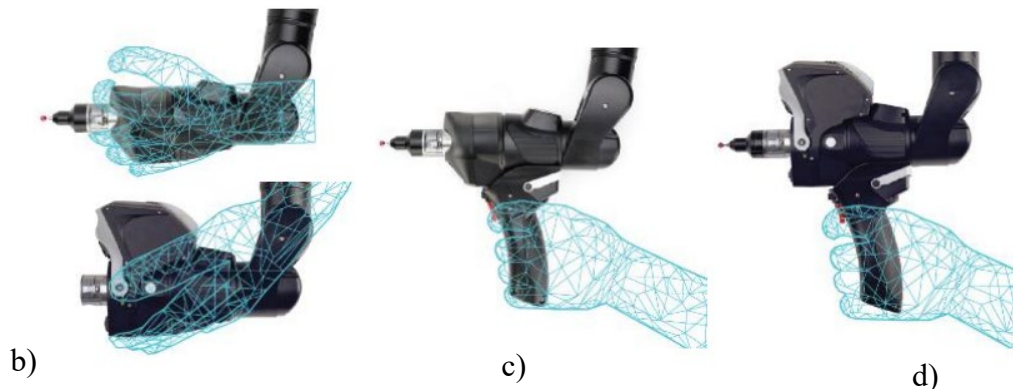
Obr. 15 Absolute Scanner ASI laserový skener pre prenosné ramená od Hexagon

### 2.3 Meracie Ramená

Meracie ramená predstavujú konštrukčný typ ručných prenosných meracích CMM, ktorý môže byť vybavený kontaktným aj bezkontaktným systémom merania.

Svojím kinematickým usporiadaním veľmi pripomína robotické rameno, avšak v jeho kĺboch, resp. osiach sú namiesto elektrických motorov presné enkóдеры (inkrementálne – napr. Faro Arm, API Arm, absolútne – napr. Hexagon Absolute Arm), ktoré z natočenia jednotlivých osí dokážu presne určiť, kde sa nachádza sonda, resp. 3D skener. Pohyb ramena zaisťuje operátor, ktorý prikladá sondu na meranú súčasť a druhou rukou prípadne zaisťuje stabilitu ramena. [16]

Na trhu sa vyskytuje široká škála meracích ramien, od 5-osých, až po 7-osé, ponúkané ramená majú tiež rôznu veľkosť (merací dosah od 1 až po necelých 5 m). Spravidla platí, že s rastúcim počtom osí klesá presnosť merania dotykom, avšak práca so skenerom je s väčším počtom osí jednoduchšia, viac ergonomická a presnejšia. Väčšina výrobcov ponúka svoje meracie ramená s možnosťou použitia ako skenera, tak aj sondy, mnohokrát je dokonca oboje integrované do spoločnej rukoväte. Veľkosť ramena má tiež vplyv na presnosť. Menšie ramená majú väčšiu presnosť ako veľké, takže je pre zákazníka ideálne si vybrať najmenšie možné rameno, ktoré dosahom pokryje jeho meracie potreby. [22]



Obr. 16 Typy rukovätí spoločnosti Hexagon:

a) zápästie so sondou b) zápästie so skenerom c) pištoľová rukoväť so sondou d) pištoľová rukoväť so skenerom a sondou

Najväčšou výhodou meracích ramien je univerzálnosť ich použitia, vďaka ich modulárnemu dizajnu. Vďaka širokej škále dotykových aj bezdotykových sond, skenerov, upínacích prípravkov (ako pre rameno, tak aj meranú súčasť) a ďalšiemu príslušenstvu je ľahké prispôbiť rameno konkrétnym potrebám zákazníka, ktorý potom nemusí prispôbovať merací proces parametrom ramena. Napríklad spoločnosť Hexagon má vo svojom sortimente takmer 100 rôznych dotykových a bezdotykových sond. Sonda je možné navyše rýchlo meniť bez nutnosti recalibrácie, obdobne ako pri optických CMM. Na zápästie ramena je možné umiestniť sondu, prípadne ergonomickú rukoväť (napr. pištoľovú rukoväť) s držiakom sondy, prípadne samotný skener, alebo pištoľovú rukoväť s držiakom sondy a skenerom zároveň (viď Obr. 16). [23]

### 3 METROLOGICKÝ SYSTÉM A NADVÄZNOŠŤ

Medzi jednu z troch hlavných aktivít metrologie patrí vytváranie reťazcov nadväznosti na určenie hodnoty a dokumentovanie presnosti merania vrátane rozšírenia tejto vedomosti. Delí sa na tri kategórie s roznoými úrovňami úplnosti a presnosti: [24]

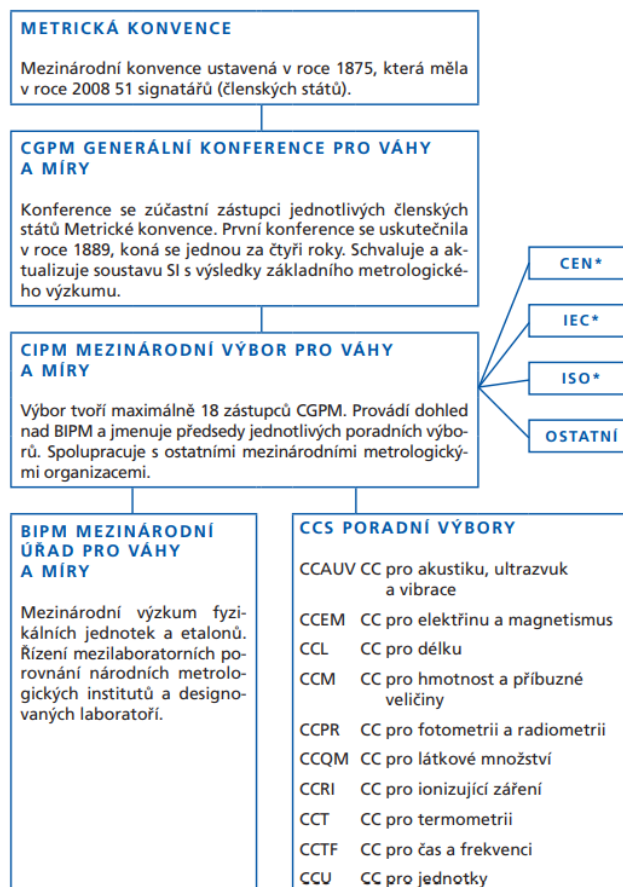
1) *vedecká metrologia* sa zaoberá organizáciou a vývojom etalónov a ich uchovávaním (najvyššia úroveň),

2) *priemyselná metrologia* musí zabezpečiť adekvátnu funkciu meradiel, ktoré sa používajú v priemysle, vo výrobe a pri skúšobných postupoch, čím sa zabezpečí kvalita života občanov a akademický výskum,

3) *legálna metrologia* sa zaoberá meraniami, ktoré ovplyvňujú transparentnosť ekonomických vzťahov, najmä ide o merania, kde existuje požiadavka na overenie meradla.

Manažment meracích systémov s dôrazom na ich presnosť merania je jednou z najdôležitejších oblastí v súčasnom globalizovanom a miestami aj pretechnizovanom svete, majúci vplyv na prosperitu strojársky vyspelých krajín. Jednou z charakteristík, ktorou je ovplyvňovaná presnosť merania je kalibráciou prístroja, ktorá je jedným zo základných kameňov metrologickej nadväznosti, bez ktorej sa stanovenie presnosti merania daného prístroja nezaobíde. [25]

#### 3.1 Metrická Konvencia



Obr. 17 Organizácia Metrickej konvencie [26]

V polovici 19. storočia sa stala zjavnou potreba zavedenia univerzálnej desatinnej metrickej sústavy, čo sa prejavilo najmä v priebehu prvých svetových priemyselných výstav. V roku 1875 sa v Paríži uskutočnila diplomatická konferencia o metre (pozn. jednotka dĺžky), na ktorej 17 vlád podpísalo zmluvu nazvanú „Metrická konvencia“. Signatári tejto zmluvy sa rozhodli vytvoriť a finančne zabezpečiť stálu vedeckú inštitúciu – „Medzinárodný úrad pre váhy a miery“ („Bureau International des Poids et Mesures“ (*BIPM*)). Znenie Metrickej konvencie bolo v roku 1921 mierne pozmenené.

Hlavným účelom činnosti *BIPM* je správa medzinárodnej sústavy jednotiek SI. Zástupcovia vlád členských štátov sa schádzajú každé štyri roky na „Generálna konferencia pre váhy a miery“ („Conférence Générale des Poids et Mesures, *CGPM*). *CGPM* prerokúva a posudzuje činnosť jednotlivých národných metrologických inštitútov ako aj *BIPM* a podáva odporúčania týkajúce sa nových základných metrologických ustanovení a všetkých dôležitých otázok v súvislosti s *BIPM*.

Dojednanie *CIPM* o vzájomnom uznávaní *CIPM MRA* (*CIPM Mutual Recognition Arrangement*) je dohodou medzi národnými metrologickými inštitútmi. Tento dohovor, ktorý bol podpísaný v roku 1999 a ktorého niektoré technické ustanovenia prešli drobnou revíziou v roku 2003, má dve časti. Prvá časť sa vzťahuje na stanovenie stupňa ekvivalencie štátnych etalónov (meracích štandardov), zatiaľ čo druhá časť sa týka vzájomného uznávania výstupných dokladov o kalibráciách a meraniach (certifikátov, listov, protokolov atď.) vydávaných inštitútmi podieľajúcimi sa na tomto dohovore. Organizácia Metrickej konvencie je znázornená na Obr. 17. [26]

### 3.2 Národné Metrologické Inštitúty

Národný metrologický inštitút je inštitút, ktorý je na základe rozhodnutia štátu určený okrem iného na vývoj a uchovávanie (štátnych) etalónov (meracích štandardov) jednej alebo viacerých veličín.

Národný metrologický inštitút zastupuje príslušný štát na medzinárodnej úrovni vo vzťahu k národným metrologickým inštitútom iných štátov, regionálnym metrologickým organizáciám a vo vzťahu k *BIPM*. Národné metrologické inštitúty sú chrbticou *organizácie medzinárodnej metrologie*.

Zoznam národných metrologických inštitútov a designovaných inštitúcií je dostupný prostredníctvom webovej stránky *BIPM* a regionálnych metrologických organizácií – napr. v Európe je možné nájsť národné metrologické inštitúty a designované inštitúty, ktoré sú združené v regionálnej metrologickej organizácii *EURAMET*, na jej webových stránkach ([www.euramet.org](http://www.euramet.org)).

Mnoho národných metrologických inštitútov sa zaoberá primárnou realizáciou základných meracích jednotiek a odvodených meracích jednotiek na najvyššie dosiahnuteľnej technickej úrovni, zatiaľ čo niektoré metrologické inštitúty majú v držbe sekundárne etalóny, ktoré sú nadväzované na iné národné metrologické inštitúty.

### 3.3 Národný Metrologický Systém ČR

*Národný metrologický systém* (ďalej len *NMS*, vid' Obr. 18) znamená systém, ktorý slúži na zabezpečenie jednotnosti a správosti meradiel a meraní v danom štáte, a to prostredníctvom

sústavy technických prostředků a zařízení, ako aj technických predpisov, práv a povinností správnych orgánov a právnických osôb alebo podnikajúcich fyzických osôb.

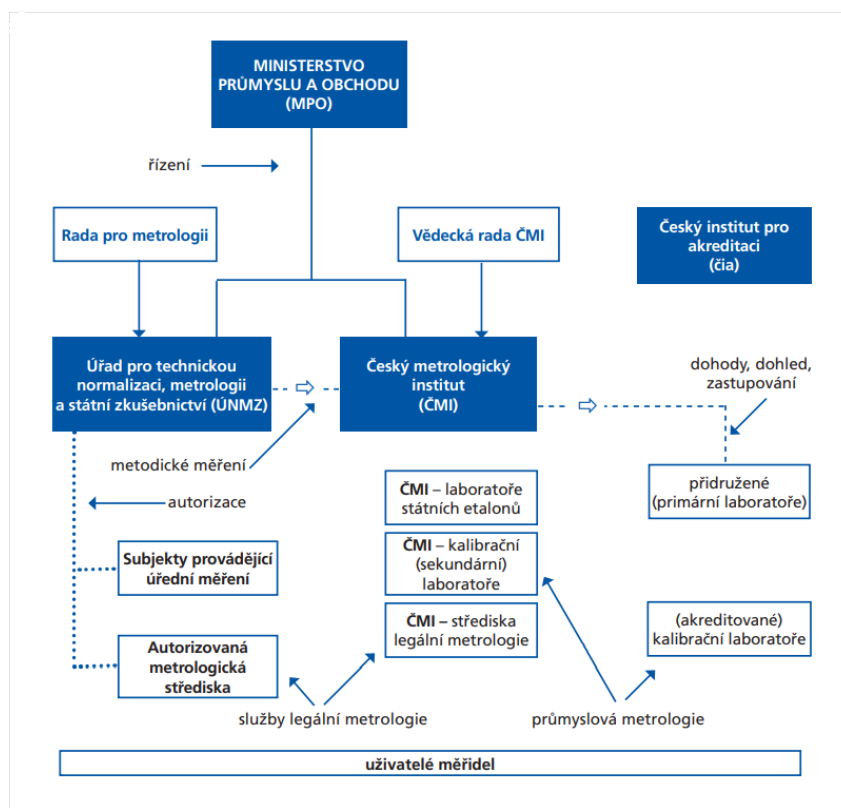
Základným prvkom NMS ČR sú spotrebiteľia a všeobecne verejnosť (teda nielen občania ČR, ale aj cudzí štátni príslušníci, ktorí sa na území ČR vyskytujú). Pre nich tu existuje infraštruktúra výrobcov a služieb a pre nich tiež objektívne existujú hľadiská verejného záujmu, ktoré je potrebné rešpektovať a dodržiavať.

Druhým významným prvkom NMS ČR sú podnikateľské subjekty. Tento prvok zahŕňa aj výrobcov a opravcov meradiel, ako aj subjekty vykonávajúce montáže meradiel. Ďalej tento prvok zahŕňa aj subjekty s výstupmi, ktoré nemajú charakter výrobkov (napr. služby).

Jedným z kľúčových prvkov je nesporne národný metrologický inštitút, predstavovaný Českým metrologickým inštitútom (ďalej len ČMI).

NMS zahŕňa aj ďalšie dôležité prvky, ako vzdelávanie v oblasti metrologie, vrátane siete fungujúcich certifikačných orgánov pre certifikáciu osôb v oblasti metrologie a samozrejme tiež český národný akreditačný systém, na základe ktorého je možné predovšetkým v oblasti použitej metrologie preukazovať odbornú spôsobilosť kalibračných laboratórií, skúšobných laboratórií, certifikačných orgánov a inšpekčných orgánov. Český národný akreditačný systém má tiež významné postavenie v oblasti subjektov, pôsobiacich v legálnej metrologii. Rada pracovísk ČMI, ktoré poskytujú služby v oblasti metrologie všeobecne a ktoré súčasne pracujú v legálnej metrologii, je totiž akreditovaná. Akreditácia slúži okrem preverenia odbornej spôsobilosti zo strany ČMI aj ako podklad pre autorizáciu subjektov, ktoré potom pracujú ako autorizované metrologické strediská (AMS).

Národný metrologický systém ČR je úplne porovnateľný a zlučiteľný so systémami, bežnými v členských štátoch Metrickej konvencie a najmä so systémami krajín v EÚ. [26]



Obr. 18 Národný metrologický systém ČR [26]

### 3.4 Dôležité Subjekty so Vzťahom k Metrologii v ČR

*Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO)* je ústredným orgánom štátnej správy ČR, ktorý má vo svojej kompetencii aj oblasť technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva. Zabezpečuje úlohy stanovené v zákone č. 20/1993 Zb. o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva, v znení neskorších predpisov.

Okrem iného riadi Úrad pre technickú normalizáciu, metrologiu a štátne skúšobníctvo a Český metrologický inštitút.



Obr. 19 Ministerstvo průmyslu a obchodu [zdroj: webové sídlo]

*Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ)* bol zriadený zákonom Českej národnej rady č. 20/1993 Zb. o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva ako orgán štátnej správy pre predmetné činnosti. ÚNMZ je organizačnou zložkou štátu v rezorte MPO. Hlavným poslaním ÚNMZ je zabezpečovať predovšetkým úlohy vyplývajúce zo zákonov Českej republiky, upravujúcich technickú normalizáciu.



Obr. 20 Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [zdroj: webové sídlo]

*Český metrologický inštitút (ČMI)* je národným metrologickým inštitútom Českej republiky. Bol zriadený k 1. 1. 1993 a je štátnou príspevkovou organizáciou v podriadenosti MPO. Plní funkcie, patriace do pôsobnosti štátnej správy v oblasti metrologie, zverenej mu zákonom č. 505/1999 Zb. v platnom znení – je základným výkonným orgánom českého národného metrologického systému.



Obr. 21 Český metrologický inštitút [zdroj: webové sídlo]

### 3.5 Meracie Etalóny

Merací etalón (etalón) (angl. measurement standard alebo etalon) je zhmotnená miera, meradlo, referenčný materiál, alebo merací systém určený na definovanie, realizovanie, uchovanie alebo reprodukovanie jednotky alebo jednej prípadne viacerých hodnôt veličiny, ktoré budú slúžiť ako referencia. [24] Rôzne úrovne etalónov ukazuje Obr. 22 sú uvedené niektoré dĺžkové etalóny a ich ďalšie rozdelenie. Neexistuje medzinárodný zoznam všetkých etalónov. [24]

Oblast	Podoblast	Dôležité etalóny
Dĺžka	Vlnové dĺžky a interferometria	Stabilizované lasery, interferometre, laserové interferenčné meracie systémy, interferenčné komparátory
	Metrológia rozmerov	Koncové mierky, čiarkové meradlá, stupňové mierky, etalóny priemeru, valcové kalibre, výškové kalibre, číselníkové odchýlkomery, meracie mikroskopy, optické etalóny rovinnosti, súradnicové meracie stroje, laserové skenovacie mikrometre, mikrometrické hĺbkomery, geodetické dĺžkové meradlá
	Meranie uhlov	Autokolimátory, otočné stoly, uhlové mierky, polygóny, libely
	Tvar	Priamosť, rovinnosť, rovnobežnosť, 90° hranoly, etalóny kruhovitosti, etalóny valcovitosti
	Kvalita povrchu	Etalóny výšky schodu a hĺbky ryhy, etalóny drsnosti, zariadenie na meranie drsnosti

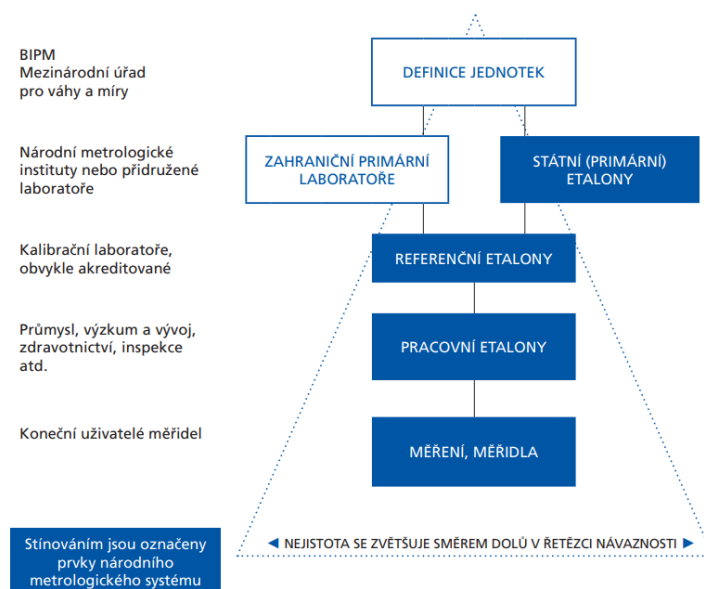
Obr. 22 Dôležité etalóny v metrológii rozmerov [24]

### 3.6 Metrologická Nadväznosť

Metrologická nadväznosť je vlastnosť výsledku merania, pomocou ktorej môže byť výsledok vzťahnutý k stanovenej referencii cez dokumentovaný neprerušovaný reťazec kalibrácií, z ktorých každá sa podieľa svojim príspevkom na stanovenej neistote merania. [25]

Reťazec nadväznosti (viď Obr. 23) predstavuje neprerušovaný reťazec porovnaní, z ktorých všetky majú stanovené neistoty. Tým sa zabezpečí, že výsledok merania alebo hodnota etalónu sa vzťahuje na referencie vyšších rádov, pričom na najvyššej úrovni sa nachádza primárny etalón. [24]

Koncový používateľ môže získať nadväznosť na najvyššiu medzinárodnú úroveň priamo od národného metrologického ústavu alebo od sekundárneho kalibračného laboratória, zväčša akreditovaného laboratória. Výsledkom rôznych vzájomných dohôd o uznávaní je, že medzinárodne uznaná nadväznosť sa môže získať aj z laboratórií mimo domovskej krajiny používateľa. [24]



Obr. 23 Reťazec metrologickej nadväznosti [26]

### 3.7 Kalibrácia

Základný nástroj na zaistenie nadväznosti merania predstavuje kalibrácia meradiel, meracích systémov alebo referenčných materiálov. Kalibráciou sa určujú charakteristiky zariadenia, systému alebo referenčného materiálu. Zvyčajne sa to dosahuje pomocou priameho porovnania s etalónmi alebo s certifikovanými referenčnými materiálmi. K meradlu sa vydáva kalibračný certifikát a vo väčšine prípadov sa pripája kalibračná značka vo forme nálepky.

Existujú štyri hlavné dôvody, aby sa zariadenie kalibrovalo:

1. ustanoví a preukáže sa nadväznosť,
2. zaistí sa, že údaje odčítané zo zariadenia sú konzistentné s inými meraniami,
3. určí sa správnosť údajov odčítaných zo zariadenia,
4. potvrdí sa spoľahlivosť zariadenia, teda že sa mu dá veriť

Na Obr. 24 je uvedená tabuľka, ktorá znázorňuje subjekty delegované k metrologickým úkonom v ČR. Táto tabuľka nie je záväzná, je k dispozícii pre lepšiu orientáciu ohľadom kalibrácie a overovania meradiel.

<i>Problematika</i>	<b>stanovená měřidla</b>	<b>pracovní měřidla</b>	<b>etalony</b>
<i>Způsob metrologické návaznosti</i>	<b>ověření</b>	<b>kalibrace</b>	<b>kalibrace</b>
<i>Provede</i>	Český metrologický institut nebo autorizované metrologické středisko	jakýkoli subjekt, disponující vhodnými etalony navázanými v souladu se zákonem o metrologii	Český metrologický institut nebo středisko kalibrační služby (pověřené dle zákona o metrologii)
<i>Postup při metrologickém navázání stanoví</i>	opatření obecné povahy (popřípadě jiný normativní technický předpis)	není stanoven právní úpravou (ale stanoví obvykle kalibrační laboratoř v dohodě s uživatelem měřidla)	
<i>Výstup činnosti</i>	umístění úřední značky nebo vydání ověřovacího listu nebo obojí	není stanoven právní úpravou (ale obvykle je vydán kalibrační list a na měřidlo umístěna kalibrační značka, ale v některých případech není provedeno ani jedno z toho)	
<i>Kritéria shody stanoví</i>	opatření obecné povahy (popřípadě jiný normativní technický předpis)	nejsou stanovena právní úpravou (ale stanoví je obvykle uživatel měřidla, v některých případech po konzultaci s kalibrační laboratoří, s přihlednutím ke stanovisku výrobce měřidla apod.)	
<i>Lhůtu platnosti metrologické návaznosti stanoví</i>	vyhláška	uživatel měřidla podle metrologických a technických vlastností, způsobu a četnosti používání měřidla, doporučení výrobce či kalibrační laboratoře a svých zkušeností atd.	uživatel podle metrologických a technických vlastností, způsobu a četnosti používání etalonu

Obr. 24 Porovnávací tabuľka zaistenia metrologickej návaznosti [26]



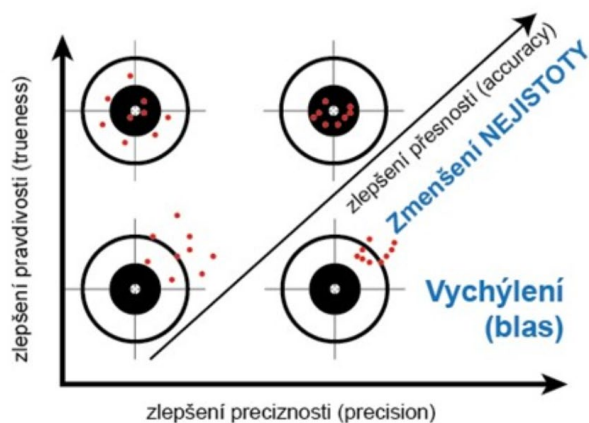
## 4 VYJADRENIE MERANEJ VELIČINY

*Meranie* je definované v Medzinárodnom metrologickom slovníku [27] ako proces experimentálneho získavania jednej alebo viacerých hodnôt veličiny, ktoré môžu byť dôvodne priradené veličine.

*Pravú hodnotu* meranej veličiny v praxi nepoznáme, pretože ju nedokážeme úplne presne určiť. Dokážeme ju určiť iba s určitou presnosťou v závislosti na použitej technológii merania, avšak *nameraná hodnota* meranej veličiny bude vždy obsahovať menšiu či väčšiu chybu. *Presnosť merania* je teda tesnosť zhody medzi nameranou hodnotou a pravou hodnotou meranej veličiny. Presnosť merania nie je veličina, meranie môžeme prehlásiť za presnejšie, keď ponúka menšiu chybu merania. [27]

Presnosť merania sa nemá zamieňať s pojmami *pravdivosť merania* a *precíznosť merania*. Závislosť medzi nimi je znázornená na Obr. 25.

Vztah preciznosti, pravdivosti a nejistoty měření



Obr. 25 Vztah mezi precizností, pravdivostí a neistotou měření [28]

*Pravdivosť merania* (niekedy označovaná ako správnosť merania) je tesnosť zhody medzi aritmetickým priemerom nekonečného počtu opakovaní nameraných hodnôt veličiny a referenčnej hodnoty veličiny. Pravdivosť merania taktiež nie je veličinou, a preto nemôže byť vyjadrená číselne. Je nepriamo vzťahnutá k systematickej chybe merania, ale nie je vzťahnutá k náhodnej chybe merania. [27]

*Precíznosť merania* je zase definovaná ako tesnosť zhody medzi indikáciami alebo nameranými hodnotami veličiny získanými opakovanými meraniami na rovnakom objekte alebo na podobných objektoch za špecifických podmienok. Precíznosť merania býva vyjadrená číselne mierami neprecíznosti, ako napríklad smerodajnou odchýlkou, rozptylom alebo variačným koeficientom za špecifikovaných podmienok merania. [27]

Špecifikovanými podmienkami môžu byť napr. podmienky opakovateľnosti merania, podmienky medziľahlej precíznosti merania a reprodukovateľnosti merania. [27]

V praxi to znamená, že meranie jednej veličiny na jednom objekte, ktoré bolo opakované za špecifikovaných podmienok, a ktorého výsledné hodnoty nameranej veličiny sa od seba na požadovanej presnosti skoro vôbec nelíšia môžeme prehlásiť sa precízne, avšak to ešte nemusí znamenať, že sa jedná o skutočnú hodnotu meranej veličiny, pretože meranie nemuselo byť správne. Napríklad, ak bolo meracie zariadenie nesprávne skalibrované, tak

výsledná hodnota stále obsahuje systematickú chybu a nezodpovedá sa so skutočnou hodnotou meranej veličiny, lebo jej hodnota je vychýlená o túto chybu.

Úplný výsledok merania sa skladá z nameranej hodnoty a neistoty merania, ktorá nesie informácie o presnosti, s akou sa blíži nameraná hodnota ku pravej hodnote meranej veličiny. Výsledok sa zapisuje do tvaru (4.1), kde  $Y$  je *nameraná veličina*,  $y$  je *odhad meranej veličiny* a  $U$  je *rozšírená neistota* meranej veličiny. Všetky hodnoty musia byť uvedené v rovnakých jednotkách. [25]

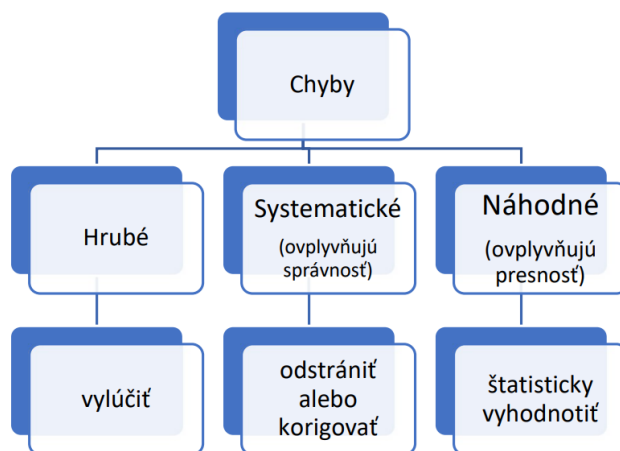
$$Y = (y \pm U) \quad (4.1)$$

## 4.1 Chyba merania

Samotný pojem *chyba merania* je v slovníku [27] definovaný ako rozdiel nameranej hodnoty veličiny a referenčnej hodnoty veličiny a tento pojem môže byť použitý, keď existuje jediná referenčná hodnota veličiny, ktorá sa vyskytuje pri kalibrácii vykonanej pomocou etalónu s nameranou hodnotou veličiny, ktorá má zanedbateľnú *neistotu merania* (viď kap. 4.2) alebo je daná konvenčná hodnota veličiny v prípade, v ktorom je chyba merania *známa*.

V prípade, keď je chyba merania *neznáma*, môže byť tento pojem použitý ak je meraná veličina reprezentovaná jedinou pravou hodnotou veličiny alebo súborom pravých hodnôt veličiny zanedbateľného rozpätia.

Rozdelenie chýb merania je znázornené na Obr. 26.



Obr. 26 Delenie chýb merania [29]

### 4.1.1 Hrubá chyba

Vznikajú prevažne z nedbalosti, napríklad chybným odčítaním alebo zapísaním údajov z prístroja. Pri opakovanom meraní môžeme spozorovať ich výskyt a to tak, že sa v súbore nameraných hodnôt jedna výrazne líši od ostatných. Aby sme teda predišli skresleným výsledkom takto spozorovanú odlišnú hodnotu vylúčime zo spracovania. [25] [29]

### 4.1.2 Systematická chyba

Na rozdiel od náhodných chýb, tieto chyby ovplyvňujú správnosť každého merania. Pri opakovanom meraní sú tieto chyby pravidelné a systematicky zväčšujú alebo zmenšujú výsledok. Preto sme schopný určiť z čoho vznikajú, odhadnúť ich veľkosť a eliminovať výslednú chybu merania. Sú spôsobované výberom nevhodnej meracej metódy, nepresným meradlom alebo meracím prístrojom. [25] [29]

### 4.1.3 Náhodná chyba

Tieto chyby sa nedajú predvídať a sú opísané určitým rozdelením pravdepodobnosti. Je ťažké ich eliminovať, pretože ich vznik je podmienený veľkým počtom náhodných vplyvov. Aj pri použití ideálneho meradla a ideálnej meracej metódy sa výsledky nebudú úplne zhodovať. Pri vyhodnocovaní výsledku je nutné stanoviť najpravdepodobnejšiu hodnotu nameranej veličiny a stanoviť jej presnosť – kvantitatívne vyhodnotiť ako náhodné chyby ovplyvňujú výsledok merania. [25] [29]

## 4.2 Neistota merania

Jedná sa o nezáporný parameter, charakterizujúci rozptylenie hodnôt priradených k meranej veličine. Tento parameter sa neudáva len pri výsledku merania, ale tiež u meradiel, hodnôt použitých konštánt, pri overovaní prístrojov, kalibráciách. Stanovenie neistoty merania je ovplyvnené, podľa toho čo vyhodnocujeme. Môže ísť o priame meranie jednej veličiny alebo nepriame meranie jednej, poprípade viacerých veličín.

Neistota sa skladá z mnohých zložiek. Základom pri určovaní neistôt je štatistický prístup. Predpokladáme určité (normálne) rozdelenie pravdepodobnosti. Toto rozdelenie udáva, ako sa môže meraná hodnota odchyľovať od skutočnej. Postup výpočtu neistôt meraní sa delí podľa toho či ide o priame alebo nepriame meranie.

Priama metóda merania je taká, kedy výsledkom merania je hodnota danej meranej veličiny. Do tejto metódy môžeme zaradiť aj automatizujúce meracie zariadenia. Tieto merania sú charakteristické tým, že nepotrebujú, okrem výnimiek, kedy ide o korekciu merania, žiadne ďalšie výpočty.

Pri nepriamej metóde merania sa výsledná hodnota danej veličiny určuje na základe výsledkov priamych meraní pomocných veličín, ktoré sú s veličinou viazané známym vzťahom. [25]

### 4.2.1 Štandardná neistota typu A

Získava sa z opakovaných meraní. Čím je týchto meraní viac, tým hodnota neistoty typu A klesá. V prípade malého počtu meraní ( $n < 10$ ) je spoľahlivosť výpočtu pomocou tejto metódy malá. Preto je dôležité zopakovať toto meranie najmenej 10 krát. Zložky neistoty tohto typu sú charakterizované odhadom rozptylov a smerodajných odchýlok stanovených z opakovaných meraní.

V tomto prípade sa štandardná neistota typu A určí ako výberová smerodajná odchýlka z výberového priemeru. Používame výberovú odchýlku, pretože namerané hodnoty  $x$  predstavujú určitý malý výber, z takmer neobmedzeného množstva hodnôt, ktoré môže meraná veličina dosiahnuť. Výberový priemer používame zase pretože, hodnota, uvedená ako výsledok merania sa vypočíta ako priemer hodnôt opakovaných odčítaní. [25] [29]

Výpočet výberového priemeru  $\bar{x}$  pri priamom meraní sa určí zo vzťahu (4.4) kde  $n$  je počet meraní a  $x_i$  je  $i$ -té meranie.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.2)$$

Štandardná neistota typu a sa určí pomocou vzťahu pre smerodajnú odchýlku (4.3).

$$u_{Ax} = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

#### 4.2.2 Štandardná neistota typu B pri priamom meraní

Vyhodnotenie tohto typu štandardnej neistoty je iné ako v prvom prípade, nevychádza zo štatistického vyhodnotenia série pozorovaní. Základom je určovanie jednotlivých zložiek neistôt od rôznych zdrojov, podľa odborných znalostí a racionálneho úsudku pracovníka, ktorý meranie vykonáva. [25]

Tieto zdroje neistôt môžu byť:

- Nedokonalosti meracích prostriedkov
- Nedokonalosť použitých metód meraní
- Nestálosť podmienok prostredia a jeho neustála zmena (vlhkosť, tlak, pôsobenie elektrického alebo magnetického poľa)
- Vplyv ľudskej chyby (osobnostné zvyklosti, tepelné vyžarovanie tela)
- Ostatné možné vplyvy (poloha prístroja, denná doba, ročné obdobie, nedokonalosť vzťahov alebo závislostí pri vyhodnocovaní)

Výpočet neistoty typu B potom prebieha tak, že sa vytipujú možné zdroje niestot, určí sa neistota každého zdroja, tieto istoty sa prepočítajú na odpovedajúce zložky neistoty meranej veličiny a následne sa zlúčia do výslednej štandardnej neistoty typu B.

Štandardná neistota  $u_B$  sa určí pomocou vzťahu (4.4).

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{z_j}^2} \quad (4.4)$$

Kde  $u_{z_j}^2$  je druhá mocnina j-tého príspevku k neistote  $u_B$ .

#### 4.2.3 Kombinovaná štandardná neistota

Podľa zákona o šírení neistoty je neistota  $u_C$  kombináciou neistôt typu A a B. Kombinovaná neistota  $u_C$  sa určí pomocou vzťahu (4.5) kde  $u_A^2$  je druhá mocnina neistoty typu A a  $u_B^2$  je druhá mocnina neistoty typu B:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4.5)$$

#### 4.2.4 Rozšírená neistota

Je súčinom kombinovanej neistoty  $u_C$  a koeficientu rozšírenia (pokrytia)  $k$ .

V prípade ak vo výsledku použijeme len kombinovanú neistotu, až tretina výsledkov merania sa môže ocitnúť mimo stanovené pásmo neistoty. Preto je nutné rozšíriť túto neistotu tak, aby sme pokryli čo najväčší interval. Určí sa podľa vzťahu (4.6):

$$U_x = k \cdot u_C \quad (4.6)$$

Hodnotu koeficientu  $k$  volíme tak, aby hodnota prekročenia  $U$  bola minimálna.  
Základné koeficienty  $k$  sú:

$k=1$  Pravdepodobnosť pokrytia približne 68,27%

$k=2$  Pravdepodobnosť pokrytia približne 95,45%

$k=2,58$  Pravdepodobnosť pokrytia približne 99,01%

$k=3$  Pravdepodobnosť pokrytia približne 99,73%



## 5 URČENIE NEISTOTY MERANIA NA CMM

V nasledujúcej podkapitole stručne popíšeme metódy, ktoré sa využívajú k stanoveniu neistoty na CMM.

### 5.1 Prehľad používaných metód

*Substitučná metóda* (metóda použitia kalibrovaných objektov alebo etalónov) je založená na štatistickom vyhodnotení chýb merania pozorovaných vo vzťahu ku kalibračnej hodnote meraného (referenčného) objektu. Pre správnosť je nutné použiť dostatočné množstvo meraní (> 20) za rôznych podmienok. Táto metóda experimentálne stanoví účinok chýb, ktorý sa prejaví vo forme odchýlky od nominálneho rozmeru. Výsledkom teda je stanovenie veľkosti chyby nie však ich identifikácia.

Pri aplikácii tejto metódy je potrebné zachovať niekoľko podmienok :

- Umiestnenie a orientácia meraného objektu musí byť na tej istej osi, rovine a v rovnakej výške,
- Merací postup musí byť stály, tzn. zachovaný rovnaký postup a počet meraní,
- Nastavenie a použitie sondy musí byť vždy rovnaké.
- Podmienky prostredia, tzn. že počas merania musí byť zachovaná teplota a vlhkosť prostredia.

Rozdiel, ktorý získame z merania kalibrovaných objektov a ich stanovenými hodnotami sú použité na výpočet neistoty merania. Túto neistotu môžeme potom prehlásiť za chybu CMM.

*Multipozičná metóda* sa často označuje aj ako nesubstitučná metóda. Špecifikácia ja podobná ako pri substitučnej metóde, no na rozdiel od nej je jednoduchšie implementovateľná a použiteľná.

Meranie nekalibrovaného objektu prebieha vo viacerých bodoch a rovinách. Analýza prebieha na základe vyhodnotenia smerodajnej odchýlky meraných charakteristík, ktoré rozlišujú dve zložky neistoty: Vplyv opakovania merania CMM s rozdelením meracích bodov, odchýlkami tvaru vlnitosti a drsnosti povrchu meraného objektu a vplyv geometrických chýb CMM v súvislosti s vplyvom meracieho dotyku.

*Metóda Monte Carlo* je založená na algoritmoch, využívajúcich simuláciu systému. Ako vstupné hodnoty sú použité namerané dáta pomocou jednej z metód. Predchádzajúce metódy predpokladajú známe a relatívne stabilné rozloženie pravdepodobnosti ich jednotlivých zložiek, čím vytvárajú výborné podmienky pre použitie simulačnej metódy, akou je aj metóda Monte Carlo. Výsledkom je stanovenie výsledného vplyvu na celkovú neistotu a nie jej jednotlivé zložky, pomocou simulácie.

### 5.2 Neistota merania CMM pri použití substitučnej metódy

V tejto podkapitole sú uvedené významné príspevky k neistote merania a vzťahy k ich určeniu, ako ich uvádza Sladek [30].

### 5.2.1 Štandardná neistota kalibrovaného objektu $u_{cal}$

Výpočet neistoty  $u_{cal}$  sa uskutoční podľa nasledujúceho vzťahu (5.1). Neistota je vyhodnotená pomerom rozšírenej neistoty merania  $U_{cal}$  a koeficientom  $k$ . Tento parameter nájdeme v kalibračnom certifikáte daného meraného objektu.

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (5.1)$$

### 5.2.2 Štandardná neistota postupu merania $u_p$

Neistota  $u_p$  sa vyhodnotí podľa vzťahu (5.2):

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.2)$$

Pričom  $\bar{y}$  je dané vzťahom (5.3):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.3)$$

Kde  $n$  je počet meraní a  $y_i$  je výsledok  $i$ -tého merania počas vyhodnotenia neistoty merania.

### 5.2.3 Štandardná neistota systematickej chyby $u_b$

Vo väčšine prípadov môžeme spozorovať systematickú chybu  $b$ , ktorá nastane medzi indikovanou hodnotou CMM  $\bar{y}$  a kalibrovanou hodnotou kalibrovaného objektu  $x_{cal}$ . Táto chyba sa potom vypočíta podľa vzťahu (5.4).

$$b = \bar{y} - x_{cal} \quad (5.4)$$

Hodnota tejto chyby je odhadovaná pomocou najmenej 20 meraní. Štandardná neistota, ktorá je spojená z touto chybou sa potom vypočíta podľa vzťahu (5.5).

$$u_b = (T - 20^\circ\text{C}) \times u_a \times L \quad (5.5)$$

pričom  $u_a$  je štandardná neistota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti kalibrovaného objektu,  $T$  je priemerná teplota kalibrovaného objektu,  $L$  je nominálna hodnota kalibrovaného objektu.

### 5.2.4 Štandardná neistota z výrobného procesu $u_{wt}$

Stanovenie neistoty  $u_{wt}$  patrí medzi najťažšie. Vychádza z kolísaní chýb tvaru a drsnosti v dôsledku výrobných zmien. Môžeme ju zanedbať ak sú na meranie použité kalibrované objekty, poprípade majú nekalibrované objekty zanedbateľné zmeny. Ak sú tieto zmeny vychádzajúce z výrobného procesu nezanedbateľné, príspevok k neistote sa vypočíta zo zmeny súčiniteľa teplotnej rozťažnosti, podľa vzťahu (5.6).

$$u_{wt} = (T - 20^\circ\text{C}) \times u_a \times l \quad (5.6)$$



kde  $u_a$  je štandardná neistota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti objektu,  $T$  je priemerná teplota, počas vyhodnotenia neistoty merania a  $l$  je dĺžka meraného objektu.

Potom  $u_w$  sa vypočíta podľa vzťahu (5.7).

$$u_w = \sqrt{u_{wt}^2 + u_{wp}^2} \quad (5.7)$$

$u_{wp}$  je štandardná neistota spojená so zmenami mechanických vlastností nekalibrovaných objektov. Musíme ju zobrať v úvahu vtedy, keď sa príspevok k neistote z výrobného procesu nedá zanedbať.



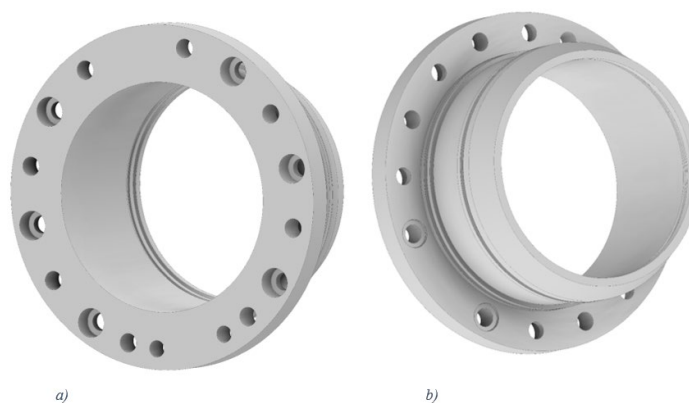
## 6 KALIBRÁCIA ETALÓNU

Jedným z cieľov tejto práce je vytvorenie špeciálneho etalónu dĺžky pre meracie rameno Hexagon Absolute Arm Compact, ktorý sa po kalibrácii pomocou etalónu vyššieho rádu stane nositeľom dĺžkových rozmerov deklarovaných národným metrologickým inštitútom v zmysle zachovania metrologickej nadväznosti.

Etalón bude slúžiť k rýchlej kalibrácii meracieho ramena a bude súčasťou jeho vybavenia. Meraním kalibrovaných rozmerov dĺžky bude možné overiť presnosť merania priamo na mieste (pozn. neslúži k overovaniu meradla).

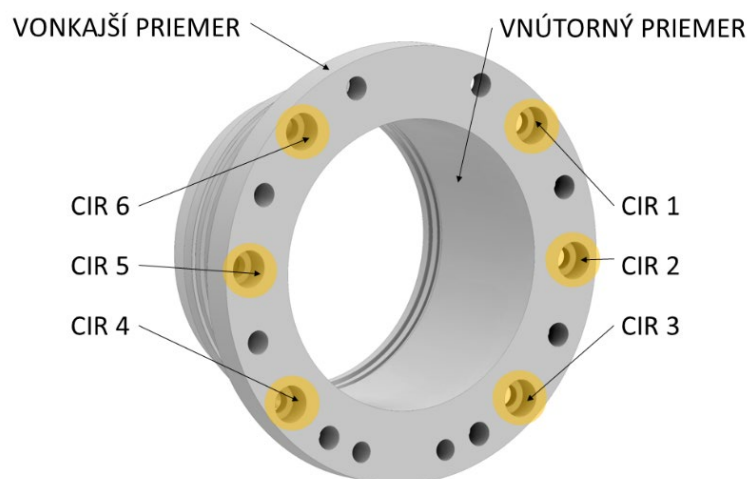
### 6.1 Kalibrovaný etalón

Pre vytvorenie etalónu bola zvolená príruha z oceli triedy 12 050 o hmotnosti 2,2 kg na Obr. 27. Výkresová dokumentácia príruhy je súčasťou prílohy práce.



Obr. 27 Príruba kalibrovaná na ČMI: a) pohľad zozadu b) pohľad spredu

Po konzultácii s vedúcim práce bolo ku kalibrácii zvolených šesť dier na zadnej strane súčasti, jej vnútorný priemer a vonkajší priemer. Ako vyhodnocované parametre boli zvolené priemer a poloha v prípade šiestich malých dier, priemer a kruhovitosť vnútorného priemeru a priemer a kruhovitosť vonkajšieho priemeru. Kalibrované prvky etalónu sú znázornené na Obr. 28.



Obr. 28 Kalibrované prvky etalónu

## 6.2 Kalibrácia etalónu na Českom Metrologickom Inštitúte

Aby bolo možné zvolený objekt prehlásiť za etalón, musí byť dodržaná metrologická nadväznosť kalibráciou na pracovisku delegovanom k tomuto úkonu a vybavenom akreditovanými zariadeniami.

Nami zvolený objekt bol kalibrovaný na Českom Metrologickom Inštitúte (ČMI) akreditovanými etalónmi, konkrétne presným dĺžkomerom *SIP 1002M* pre hodnoty vnútorného a vonkajšieho priemeru, kruhomerom *Talyrond TR595S* pre hodnoty kruhovitosti vnútorného a vonkajšieho priemeru príruby a CMM *Zeiss UPMC* pre hodnoty priemeru a polohy šiestich zahĺbení dier po obvode príruby.

### 6.2.1 SIP 1002M

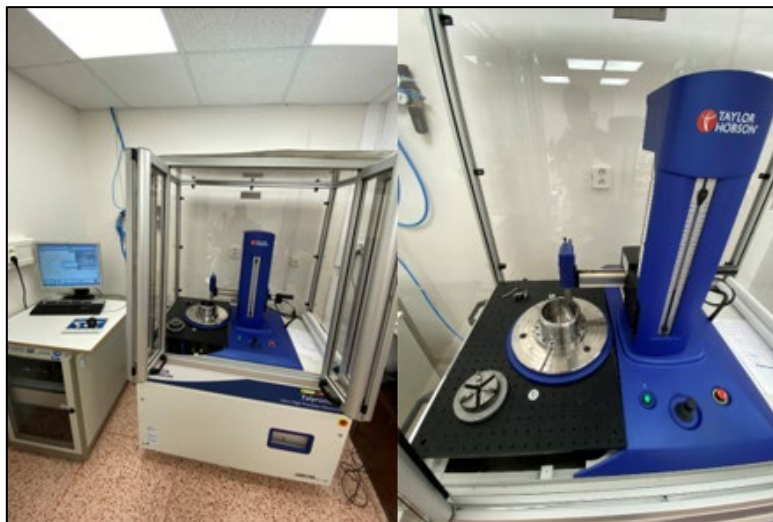
Vlastný digitálny dĺžkomer na Obr. 29 je jednoosí dotykový prístroj, ktorý umožňuje meranie rozmerov do maximálneho rozmeru 1m s rozlíšením 0,0001 mm. Jeho výhodou je stabilná prepracovaná konštrukcia, ktorá sa vyznačuje dodržaním Abbého princípu merania. Dĺžkomer je vybavený nastaviteľným stolíkom v troch osiach, čo umožňuje precízne ustavenie a vyrovnanie meranej súčasti. Ďalej dĺžkomer disponuje bohatým prídavným vybavením, ktoré umožňuje meranie rôznych typov meradiel a kalibrov, vrátane vnútorných rozmerov. Táto meracia metóda je používaná na kalibráciu etalónov a je akreditovaná ČIA s udávanou hodnotou CMC:  $(0,3 + 0,4L) \mu\text{m}$ , kde L je meraná dĺžka v metroch. [25]



Obr. 29 Digitálny jednoosí dotykový dĺžkomer SIP 1002M v laboratóriu ČMI [foto: autor]

### 6.2.2 Talyrond TR595S

Parameter kruhovitosti bol vyhodnocovaný na presnom kruhomery od výrobcu Talyrond TR595S na Obr. 30. Meranie prebehlo v laboratóriu 23 Oddelenia primárnej nanometrológie a technickej dĺžky ČMI Brno. Na meranie sa používal dotyk s diamantovým hrotom o polomere 2  $\mu\text{m}$ , ktorý je štandardným príslušenstvom presného kruhomery TR595S. Meracia sila bola nastavená na hodnotu 0,20N v súlade s užívateľskou príručkou prístroja. Teplota v uzavretom boxe meracieho prístroja bola štandardne monitorovaná a pohybovala sa v rozmedzí  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ . [25]



Obr. 30 Presný kruhomer Taloryond TR595S vľavo, vpravo detail pracovného priestoru [foto: autor]

### 6.2.3 Zeiss UPMC

Ide o portálový CMM s pevným stolom a pohyblivým portálom od výrobcu Carl Zeiss AG. 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. [31]

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. Pracovný stôl stroja je vyrobený z granitu. [31]

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 umiestnený tento prístroj vybavené klimatizáciou. [31]



Obr. 31 CMM Zeiss UPMC 850 Carat v laboratóriu ČMI [31]

### 6.3 Výsledné hodnoty kalibrácie

Výstupom kalibrácie etalónu je kalibračný list, ktorý je súčasťou prílohy tejto práce. Okrem nameraných hodnôt sú v ňom uvedené použité etalóny, kalibračné postupy, podmienky merania aj neistota merania, uvedené na Obr. 32.

<b>Zákazník</b>	: VUT v Brně, FSI, ÚVSSR Technická 2896/29, 619 00 Brno
<b>Měřidlo</b>	: Příruba
<b>Výrobce</b>	: -
<b>Identifikační číslo</b>	: V-40-113141
<b>Rozsah</b>	: dle výkresu č. UHAMi SDHS - Axis A
<b>Metrolog. návaznost</b>	: Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony
<b>Použité etalony</b>	: Souřadnicový měřicí stroj UPMC 850 CARAT, v.č. 115499 Délkoměr SIP 1002M, v.č. 1103 Kruhoměr Taylor Hobson TR 595 S, v.č. 0009
<b>Kalibrační postupy</b>	: 815-MP-C503, 614-MP-C029 a 614-MP-C103
<b>Místo kalibrace</b>	: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
<b>Podmínky měření</b>	: Teplota vzduchu (20,0 ± 0,5) °C
<b>Nejistota měření</b>	: $U = (1,5 + 5L) \mu\text{m}$ pro průměr, $L$ je měřený rozměr v metrech $U = (0,2 + 0,02R) \mu\text{m}$ pro kruhovitosť, $R$ je naměřená kruhovitosť v $\mu\text{m}$
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 $k = 2$ .	

Obr. 32 Důležité informace o kalibrácii etalónu uvedené v kalibračnom liste [autor]

V Tabuľka 1 sú uvedené označenia a namerané hodnoty parametrov priemeru všetkých kalibrovaných dier príruby. Okrem toho tabuľka obsahuje namerané rozmery troch uhlov, ktoré zvierajú zahĺbenia šiestich malých dier na Obr. 28. Veľký vnútorný priemer príruby bol, kvôli relatívne veľkej hĺbke a vyšším požiadavkám na presnosť výroby, meraný v troch rezoch uvedených výšok, pre každú v dvoch osiach. Tieto hodnoty sú uvedené v kalibračnom liste v prílohe práce.

Tabuľka 1 Merané hodnoty priemerov etalónu

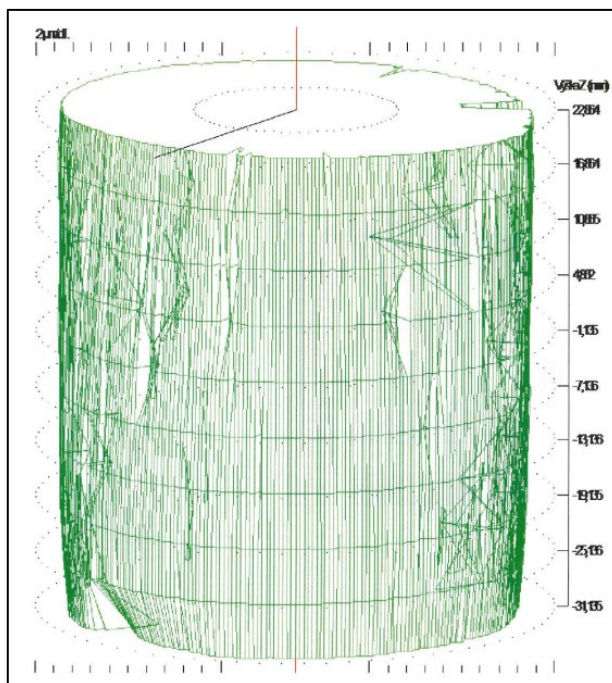
Použitá zariadenie	Meraný prvok	Špecifikácia	Výška merania	Označenie parametru	Meraná hodnota	Jednotky
Délkomer SIP 1002M	Veľký vnútorný priemer	110 JS4 ± 0,005 mm	10 mm od čela	Dx <sup>10</sup>	109,9985	[mm]
				Dy <sup>10</sup>	109,9976	
			15 mm od čela	Dx <sup>15</sup>	109,9982	
				Dy <sup>15</sup>	109,9973	
			15 mm zo strany konusu	Dx <sup>-15</sup>	109,9935	
				Dy <sup>-15</sup>	110,0003	
CMM Zeiss UPMC	Veľký vonkajší priemer príruby	165 - 0,1 mm	6,5 mm od čela	DxMAX	164,9697	[mm]
				DyMAX	164,9678	
CMM Zeiss UPMC	Vnútorný priemer zahĺbenia dier v príрубе 6x d = 14 mm	14 ± 0,1 mm	10 mm od čela	D1	14,044	[mm]
				D2	14,049	
				D3	14,043	
				D4	14,051	
				D5	14,035	
				D6	14,040	
CMM Zeiss UPMC	Hodnoty uhlov zvierajúcich osi dier zahĺbenia	(*označenie parametru) ± 0,1 mm		90°	89,88	[°]
				180°	179,92	
				270°	270,00	

Parameter kruhovitosti bol vyhodnocovaný pre veľký vnútorný a veľký vonkajší priemer príruby. Aj v tomto prípade bol veľký vnútorný priemer kvôli relatívne veľkej hĺbke meraný v dvoch rezoch v uvedených výškach v Tabuľka 1.

Tabuľka 2 Hodnoty kruhovitosti veľkého vnútorného priemeru príruby

		Použitý etalón: Kruhomer Talyrond TR595S									
Meraný prvok príruby	Vzdialenosť odchýlok kruhovitosti $RON_t$ [ $\mu\text{m}$ ]										
	Číslo merania	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Výška merania										
Veľký vnútorný priemer	15 mm od čela	2,83	2,79	2,80	2,80	2,77	2,73	2,73	2,69	2,64	2,66
	20 mm od čela	2,54	2,43	2,38	2,03	2,25	2,2	1,85	1,88	2,23	2,19
Veľký vonkajší priemer	V strede plochy	3,26	3,25	3,25	3,18	3,11	3,1	3,11	3,13	3,07	3,03

Stredné hodnoty kruhovitosti veľkého vnútorného priemeru v dvoch rezoch sa pomerne dosť líšia, čo je zrejme aj z uvedených hodnôt v tabuľke hore, z toho dôvodu bola na kruhomery vyhodnotená aj valcovitosť veľkého vnútorného priemeru na Obr. 33.



Obr. 33 Valcovitosť vnútorného priemeru meraná v desiatich rezoch [autor]

Z výstupu merania valcovitosti vnútorného priemeru na obrázku hore je zrejme, že v určitých výškach sú prítomné relatívne veľké výstupky. Kvôli tejto skutočnosti je hodnota kruhovitosti vnútorného priemeru nehomogénna, čo nemusí mať veľký vplyv na výslednú hodnotu priemeru meranej na dĺžkomery, ale v prípade spojitého merania celého obvodu na CMM sa môže výraznejšie prejavovať. To môže viesť k veľkému rozdielu stredných hodnôt parametru priemeru a väčšej chybe merania, ktorá by sa prejavila veľkým rozptylom výsledných hodnôt. Zároveň sa tým vysvetľujú evidentné rozdielne hodnoty kruhovitosti merané v dvoch rôznych výškach uvedené v Tabuľka 1, avšak uvedené hodnoty sú v tisícinách milimetru, čo je pre meracie rameno dostačujúca presnosť.

Výsledná vzdialenosť odchýlok kruhovitosti  $CYL_t$  je 16,96  $\mu\text{m}$ , dá sa preto predpokladať, že pri dostatočne presnom meraní, by rozdiel meraných kruhovitosti na vnútornom priemere nemal presiahnuť túto hodnotu.





## 7 KALIBRÁCIA RAMENA POMOCOU ETALÓNU

V nasledujúcej kapitole je popísané požitie meracie zariadenie kalibrované pomocou etalónu, meranie a stanovenie neistoty zariadenia v laboratóriu *Ústavu výrobných strojů, systémů a robotiky* na Obr. 34

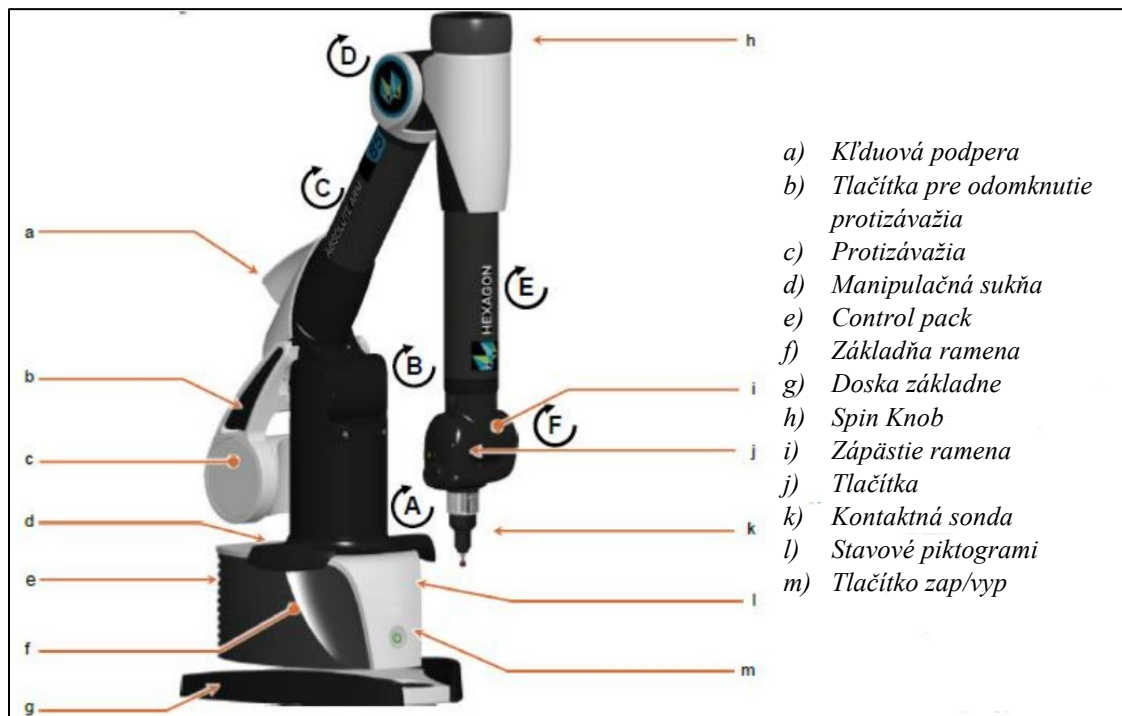


Obr. 34 Vybavenie použité k meraniu etalónu v laboratóriu UVSSR [foto: autor]

### 7.1 Hexagon Absolute Arm 83 Compact

Verzia Compact je, ako napovedá názov, najmenším ramenom z ponuky. Zároveň ide o najpresnejšie rameno, ktoré je ponúkané vo úrovniach presnosti 83 (nižšia úroveň) a 85 (stredná úroveň). Rovnako ako všetky ostatné ramená Absolute Arm má verzia Compact konštrukciu z uhlíkových vlákien. Uhlíkové vlákna majú veľmi nízky koeficient teplotnej rozťažnosti a dobrú pevnosť oproti ich nízkej hmotnosti. V kombinácii s protizávažím integrovaným v základni ramena je to ideálne riešenie na zníženie namáhavosti meracích operácií.

Hoci je verzia Compact najmenším modelom, je prekvapivo zo všetkých ramien Absolute Arm najťažšie (hmotnosť 12,1 kg). To je spôsobené konštrukciou základne, ktorá na použitie ramena nepotrebuje pevné uchytenie k pracovnému stolu, vďaka jej hmotnosti stačí rameno na pracovný stôl iba postaviť. To má zásadný vplyv na mobilitu ramena, pretože hneď po vybratí ramena z ochranného kufra môže byť rameno umiestnené napríklad dovnútra CNC obrábacieho centra pre kontrolu vyrovnanosti dielu, bez nutnosti upínania jeho základne. Pre aplikácie, ktoré vyžadujú pevnejšie uchytenie je možné rameno pevne uchytiť pomocou magnetov, alebo vákuovej základne. [16] [32]



Obr. 35 Popis Absolute Arm Compact [16]

Prednosťou všetkých ramien Absolute Arm sú absolútne enkóдеры odmeriavajúce natočenie jednotlivých osí. Použitie absolútnych enkóderov podstatne znižuje dobu prípravy na meranie, keďže oproti ramenám s inkrementálnymi enkódermi nie je potrebné nájdenie referenčnej polohy pre jednotlivé osi (nutné po každom zapnutí). K znižovaniu času prípravy a samotného merania tiež prispieva automatické rozpoznávanie typu pripojenej sondy a možnosť jej výmeny počas merania bez nutnosti recalibrácie.

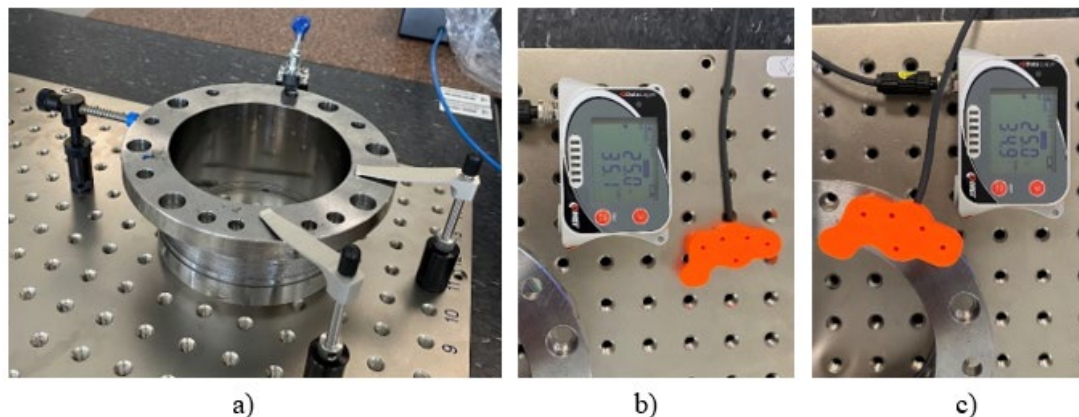
Keďže je model Compact najmenší z ramien Absolute Arm, hodí sa najviac pre presné meranie malých a stredne veľkých dielov. Maximálny dosah ramena je 1,49 m, merací rozsah má priemer 1,2 m. V tejto oblasti je maximálna prípustná chyba pre dotyk  $MPE_p$  rovná 0,008 mm a maximálna prípustná chyba na meranie dĺžky  $MPE_e$  vyjadrená  $5+L/40 < 0,018$  mm. (pre úroveň presnosti 83, podľa ISO 10360-2). Vďaka takto vysokej presnosti je rameno výrobcom odporúčané ako doplnok, alebo náhrada klasického CMM. [16] [32]

Presnosť ramena je certifikovaná podľa medzinárodne uznávaných noriem radu 10360 ktoré definujú preberacie a periodické skúšky súradnicových meracích strojov. Menovite ide o certifikáciu podľa ISO 10360-12 (Kľbové rameno súradnicových meracích strojov) a ISO 10360-2 (Súradnicové meracie stroje používané na meranie lineárnych rozmerov). Certifikácia pre presnosť 3D skenovania podľa normy ISO 10360-8, dodatku D (Súradnicové meracie stroje s optickými snímačmi vzdialenosti) je uplatňovaná pri dodávaní scannerov RS5, RS6 a RS SQUARED pre 7osé ramená, avšak rameno Absolute Arm Compact je kompatibilný iba s laserom HP-L-8.9, ktorý je dodávaný bez tejto certifikácie. [16] [32]

Spolu s ramenom je dodávaný aj metrologický softvér PC-DMIS, ktorý umožňuje pracovať s 3D modelom súčasti a je kompatibilný aj s ramenami tretích strán.

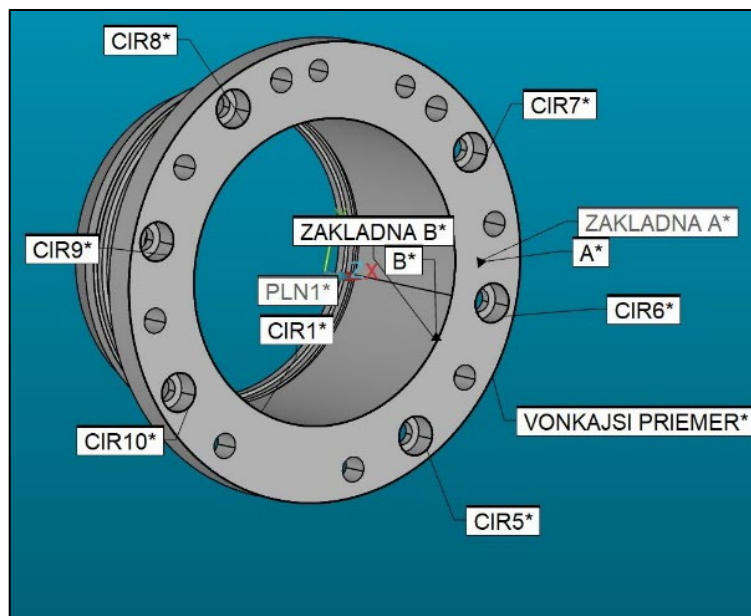
## 7.2 Kalibrácia ramena pomocou etalónu

Etalón bol po očistení upnutý pomocou prípravkov k nerezovej doske, slúžiacej ako podklad pri meraní s ramenom, vid' Obr. 36 a). Na doske bolo upnuté aj samotné rameno. Teplota vzduchu v miestnosti bola monitorovaná spolu s teplotou dosky a meraného etalónu, vid' Obr. 36 b) c).



Obr. 36 a) etalón, upevnený k nerezovej doske pomocou prípravkov b) meranie teploty dosky c) meranie teploty etalónu [foto: autor]

Pri meraní a vyhodnocovaní parametrov bol použitý 3D model súčasti nahraný do programu PC-DMIS dodávaného spolu s ramenom. 3D model príruby a označené rozmery sú na Obr. 37. Vnútny priemer je znázornený ako „základňa B“.



Obr. 37 Model a vyznačené rozmery príruby v softvéri PC-DMIS [autor]

Odobranie stupňov voľnosti a návrh meracej sekvencie boli realizované podľa postupu, ktorý uvádza Polášek [16].

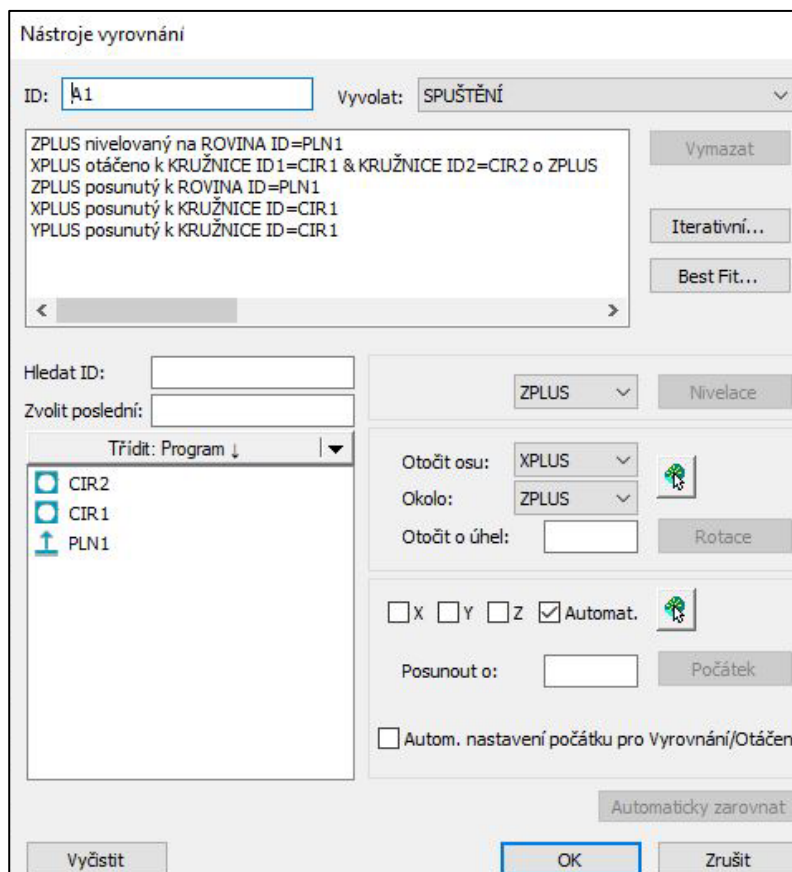
Virtuálnemu modelu je potrebné odobrať všetky stupne voľnosti a meraním geometrických prvkov zjednotiť polohu virtuálneho modelu so skutočnou polohou etalónu čím dôjde k zjednoteniu súradnicových systémov virtuálneho a reálneho etalónu. K odobraní stupňov voľnosti je v programe potrebné určiť geometrické prvky, ktoré budú po meraní definovať jeho polohu v priestore. Objekty v priestore majú všeobecne šesť stupňov voľnosti.

Obr. 38 ukazuje softvérové prostredie pre definíciu polohy etalónu odoberaním šiestich stupňov voľnosti. Pre odoberanie týchto šiestich stupňov voľnosti boli zvolené geometrické prvky:

Základňa A: definíciou sú odobrané tri stupne voľnosti.

Základňa B: definíciou sú odobrané dva stupne voľnosti.

CIR 1 (označené ako CIR 5 na Obr. 37): definíciou je odobraný posledný stupeň voľnosti.



Obr. 38 Odoberané stupne voľnosti v softvéry PC-DMIS [autor]

Počet bodov merania jednotlivých prvkov bol volený nasledovne: základňa B - pätnásť bodov, základňa A - desať bodov, CIR 1 – šesť bodov, CIR 1 až 6 – päť bodov. CIR 1 bol meraný dvakrát podľa postupu, v ktorom bol najskôr využitý k vyrovnaniu súradnicových systémov a následne k vyhodnoteniu parametrov priemeru a polohy diery.

Vyhodnocované parametre sú rovnaké ako v prípade kalibrácie etalónu s jediným rozdielom, a to síce že neboli vyhodnocované uhly, ktoré zvierajú osi šiestich dier. Meranie bolo opakované dvanásťkrát.

### 7.3 Určenie neistoty merania

Na stanovenie neistoty merania bola vybraná substitučná metóda. [25] Vzhľadom na to, boli ako etalóny kalibrovaná príruha. Jej rozmerové charakteristiky sú dostatočne presné, preto sa dajú považovať za vhodné kalibračné prvky. Pred samotným vyhodnotením neistoty merania je nutné identifikovať možné zdroje neistoty na zariadení a vzhľadom k tomu upraviť substitučnú metódu, ktorá je podrobne opísaná v norme ČSN EN ISO 15530:2012.

Ako možné zdroje štandardnej neistoty boli určené nasledujúce vplyvy:

- vplyv rozptylu nameraných hodnôt ( $u_A$ )
- vplyv neistoty použitého etalónu ( $u_E$ )
- vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému CMM ( $u_p$ )
- vplyv neistoty snímacieho systému CMM ( $u_L$ )
- Štandardná neistota dĺžky vplyvom teplotnej rozťažnosti:

vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu ( $u_{\Delta T}$ )

vplyv rozdielu teploty od 20 °C ( $u_{\Delta 20}$ )

### 7.3.1 Výpočet neistoty rozptylu merania $u_A$

Štandardná neistota typu A sa získa štatistickými prostriedkami z nameraných dát. Po nameraní dátovej sady, sa urobí v programe Minitab test odľahlých hodnôt, čím sa predíde novej náhodnej chybe.

Po odstránení odľahlých hodnôt sa v programe MS Excel vypočíta aritmetický priemer  $\bar{x}$  podľa rovnice (7.1) a následne potom výberová smerodajná odchýlka  $S_x$  podľa rovnice (7.2).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.1)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2}{n - 1}} \quad (7.2)$$

Kde:  $x_i$  sú jednotlivé zmerané hodnoty,  $n$  je počet nameraných hodnôt. Výsledný neistota  $u_A$  je potom rovná smerodajnej odchýlke aritmetického priemeru  $s_{\bar{x}}$ , ktorá sa vypočíta podľa vzťahu (7.3):

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.3)$$

### 7.3.2 Výpočet štandardnej neistoty použitého etalónu

Štandardná neistota etalónu sa určí pomocou kalibračného listu etalónu. V kalibračnom liste je uvedená rozšírená neistota merania  $U_E$  vrátane použitého koeficientu rozšírenia  $k$ . Neistotu  $u_E$  potom vypočítame podľa vzorca (7.4).

$$u_E = \frac{U_E}{k} \quad (7.4)$$

### 7.3.3 Výpočet vplyvu rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému

Neistota  $u_p$  je spôsobená konečnou rozlišovacou schopnosťou meracieho stroja. V prípade, že merací stroj má stupnicu, táto neistota sa určuje podľa schopnosti obsluhy a najmenšieho dielika stupnice v rozmedzí od 0,1 až 1 diel. Pri digitálnych strojoch je jej veľkosť rovná najmenšiemu digitu. Pri príspevku k neistote vplyvom rozlíšenia predpokladáme rovnomerné

rozdelenie. V praxi je rovnomerné rozdelenie najčastejšie používané, pretože vo väčšine prípadov nemáme presné a podrobné poznatky o rozdelení pravdepodobnosti výskytu odchýlok.

V tomto prípade uvažujeme o rovnakej pravdepodobnosti výskytu ktorejkoľvek odchýlky v celom intervale. Predpokladáme typický koeficient rozdelenia pre rovnomerné (obdĺžnikové rozdelenie) a to  $\chi = \sqrt{3}$ . Vzťah pre výpočet príspevku neistoty vplyvu rozlišovacej schopnosti stroja vychádza z všeobecného vzťahu pre výpočet príspevku neistoty merania typu B (7.5):

$$u_p = c_j \frac{R}{\chi} \quad (7.5)$$

Kde: R je rozlišovacia schopnosť prístroja,  $\chi$  je koeficient plynúci z rovnomerného rozdelenia,  $c_j$  je koeficient citlivosti.

### 7.3.4 Výpočet štandardnej neistoty snímacieho systému

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:

$$u_L = c_j \frac{U_{prob}}{k_{prob}} \quad (7.6)$$

kde  $U_{prob}$  je kombinovaná neistota použitej sondy stanovená výrobcom a  $k_{prob}$  je koeficient rozšírenia použitý výrobcom pri výpočte neistoty.

### 7.3.5 Výpočet neistoty vplyvu rozdielu teplôt CMM a meraného objektu

Pri ideálnom priebehu merania by mala byť zaistená rovnaká teplota meracieho prístroja aj predmetu. V reálnych podmienkach takýto stav nemôžeme doceliť. Meracie predmety sa preto nechávajú určitý čas v miestnosti, kde je merací stroj, aby bola ich teplota približne rovnaká. Príspevok k neistote vyplývajúci z tohto rozdielu teplôt nie je zanedbateľný.

Aj v tomto prípade predpokladáme rovnomerné rozloženie pravdepodobnosti čiže  $\chi=3$ . Vzťah pre výpočet vychádza z obecného vzťahu (7.7) a má tvar:

$$u_{\Delta T} = \frac{\Delta\alpha_A \cdot \Delta t \cdot L}{\chi} \quad (7.7)$$

Kde ( $\Delta t$ ) je rozdiel teplôt stroja a predmetu,  $L$  je meraná dĺžka a  $\chi$  je koeficient plynúci z rozdelenia pravdepodobnosti ( $\chi=3$ ).

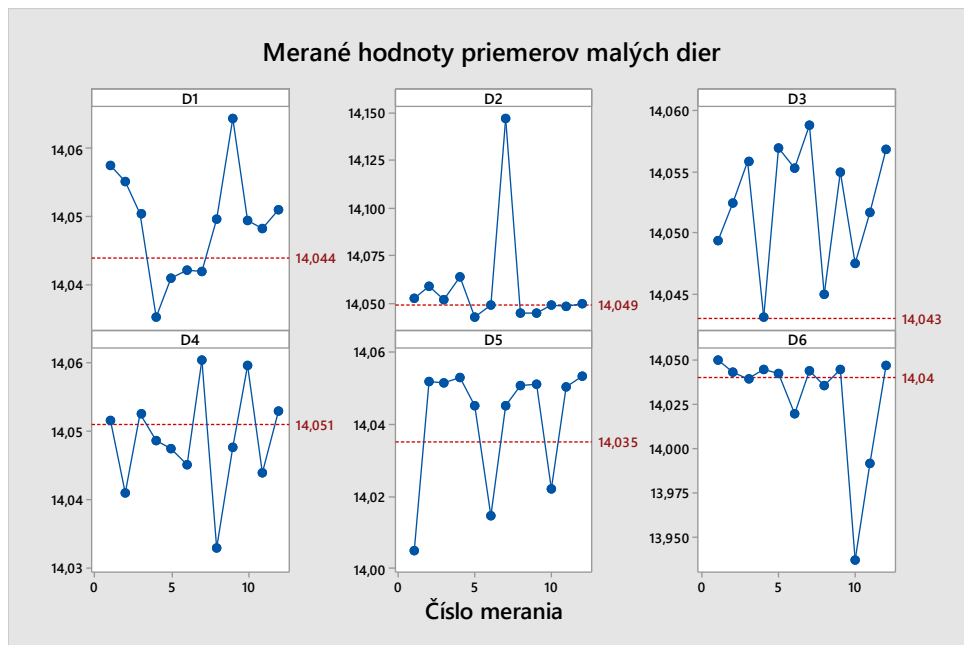
### 7.3.6 Výpočet neistoty vplyvom rozdielu teplôt od 20 °C

Predpokladom pre správne meranie je aj monitorovanie teploty v laboratóriu. Je nutné dbať na stálu teplotu čo s najmenším rozptylom. Teplota v laboratóriu je regulovaná klimatizáciou, avšak stále dochádza k odchýlke od hodnoty +20 °C. Pre túto neistotu sa predpokladá rovnomerné rozloženie s koeficientom  $\chi = \sqrt{3}$ , výpočet tejto neistoty je daný vzťahom:

$$u_{\Delta 20} = \frac{\alpha_0}{\chi} \cdot \frac{\Delta t_{20}}{\chi} L \quad (7.8)$$

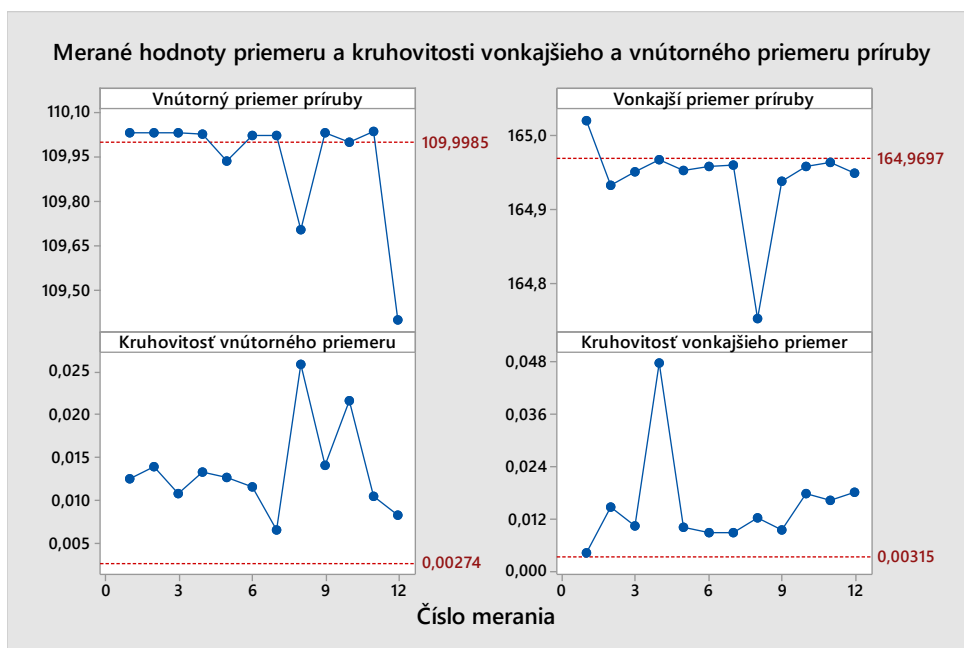
## 7.4 Kvantifikácia neistôt merania

Výsledné hodnoty merania priemerov malých dier sú ukázané na Obr. 39. Už na prvý pohľad je zrejmý rozptyl meraných hodnôt v rádoch stotín milimetra a v niektorých prípadoch (D2, D6) je možné vidieť hodnoty, výrazne sa líšiace od zbytku súboru. Veľký rozptyl hodnôt môže znamenať nízku precíznosť merania.



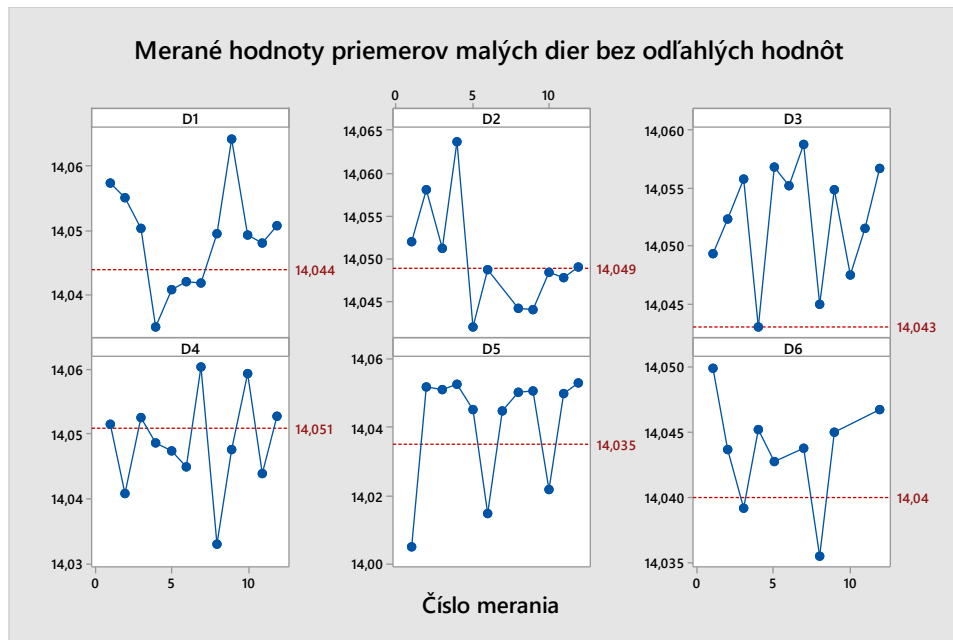
Obr. 39 Grafy výsledných hodnôt merania šiestich malých dier, červenou je znázornená hodnota s kalibrácie [autor]

Výsledné hodnoty merania priemeru a kruhovitosti vonkajšieho a vnútorného priemeru príruby sú ukázané na Obr. 40.



Obr. 40 Grafy výsledných hodnôt merania parametrov vonkajšieho a vnútorného priemeru, červenou je znázornená hodnota s kalibrácie [autor]

V štatistickom softvéri Minitab boli súbory meraných hodnôt Grubbsovou metódou testované na prítomnosť odľahlých hodnôt. Test potvrdil prítomnosť niekoľkých odľahlých hodnôt v prípade dier D2 a D6, tieto hodnoty boli zo súboru odstránené. Taktiež sa potvrdila ich prítomnosť v súboroch vnútorného priemeru príruby, vonkajšieho priemeru príruby a kruhovitosti vonkajšieho priemeru príruby. Tieto hodnoty boli odstránené. Grafy bez odľahlých hodnôt sú na Obr. 41.



Obr. 41 Grafy výsledných hodnôt merania šiestich malých dier po testovaní Grubbsovou metódou [autor]

### 7.4.1 Neistoty rozptylu merania

Podľa vzťahu (7.3) bola v programe Excel určená neistota merania  $u_A$ , ďalej aritmetický priemer výberu  $\bar{x}$  podľa vzťahu (7.4) a smerodajná odchýlka  $S_x$  podľa vzťahu (7.5) všetkých meraných súborov hodnôt.

Tabuľka 3 Aritmetický priemer, smerodajná odchýlka a neistota typu A meraní prvkov

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	DVP	DVONP	RONVP	RONVONP
$\bar{x}$ [mm]	14,049	14,050	14,052	14,049	14,041	14,044	110,027	164,953	0,014	0,012
$s_x$ [mm]	0,008	0,006	0,005	0,007	0,016	0,004	0,004	0,010	0,05	0,004
$u_A$ [mm]	0,002	0,002	0,001	0,002	0,005	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001

### 7.4.2 Štandardná neistota použitého etalónu

Neistota  $u_E$  sa môže určiť podľa vzťahu (7.4), v tomto prípade je ale súčasťou kalibračného listu na Obr. 32. Dosadením odpovedajúcich rozmerov bola získaná jej hodnota.

Tabuľka 4 Príspevky neistôt jednotlivých prvkov etalónu

	D1 -D6	DVP	DVONP	RONVP	RONVONP
$u_E$ [mm]	0,0016	0,0021	0,0023	0,0005	0,0004



#### 7.4.3 Štandardná neistota rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému

Rozlišovacia schopnosť ramena  $R$  je na menších súčiastkach šesť mikrometrov. Dosadením do vzorca (7.5) získame hodnotu  $u_p$ . Koeficient rozdelenia pre rovnomerné (obdĺžnikové rozdelenie) je  $\chi = \sqrt{3}$

$$u_p = c_j \frac{R}{\chi} = 1 \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,0006 \text{ mm} \quad (7.9)$$

#### 7.4.4 Štandardná neistota snímacieho systému

Ide o neistotu použitej snímačej sondy. Výrobcom udávaná hodnota tejto neistoty je  $0,5 \mu\text{m}$  s koeficientom rozšírenia 2. Koeficient citlivosti je 1. Táto neistota je určená podľa vzťahu (7.6):

$$u_L = 1 \cdot \frac{0,5}{2} = 0,00025 \text{ mm} \quad (7.10)$$

#### 7.4.5 Štandardná neistota vplyvu rozdielu teplôt etalónu a meradla

Rozdiel teplôt medzi meracím zariadením a meraním objektom  $\Delta t = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koeficient teplotnej rozťažnosti pre etalón je  $11,5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 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 (7.11):

$$u_{\Delta T} = \frac{\Delta\alpha_A \cdot \Delta t \cdot L}{\chi} = \frac{11,5 \cdot 0,2 \cdot 0,165}{\sqrt{3}} = 0,0002 \text{ mm} \quad (7.11)$$

#### 7.4.6 Štandardná neistota vplyvom rozdielu teplôt od $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Pri výpočte sa uvažuje s koeficientom teplotnej rozťažnosti etalónu  $11,5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , pre prístroj sa jeho hodnota zanedbáva. Teplota počas merania bola približne  $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , čiže bola o  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  vyššia než je požadovaných  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výpočet je uvedený pre veľký priemer, preto  $L = D_{\text{VONP}} = 0,165 \text{ m}$ , a vychádza sa z rovnomerného rozdelenia pravdepodobnosti,  $\chi = \sqrt{3}$ , zvyšné hodnoty sú uvedené v Tabuľke 5. Hodnota tejto neistoty je určená pomocou vzťahu:

$$u_{\Delta 20} = \frac{\alpha_0}{\chi} \cdot \frac{\Delta t_{20}}{\chi} L = \frac{11,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{4,5}{\sqrt{3}} 0,165 = 0,005 \text{ mm} \quad (7.12)$$

#### 7.4.7 Výsledná rozšírená neistota merania ramena

K spracovaniu nameraných údajov a stanoveniu neistoty merania bola využitá substitučná metóda. Táto metóda bola zvolená, pretože sa pri experimentálnom meraní vychádzalo z metrologicky naviazaného a kalibrovaného etalónu.

Vzťah pre stanovenie rozšírenej neistoty merania pomocou substitučnej metódy je: [25]

$$U = k \sqrt{u_A^2 + u_E^2 + u_p^2 + u_L^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{\Delta 20}^2} \quad (7.13)$$

Jednotlivé zložky pre stanovenie celkovej neistoty merania už boli kvantifikované. Pri výpočte sa uvažuje s koeficientom rozšírenia  $k = 2$ , aby výsledný interval pokryl približne 95,45 % nameraných údajov.

V Tabuľka 3 sú uvedené zložky neistoty merania a kombinovaná neistota vyhodnocovaných parametrov, vypočítaná podľa vzťahu (7.13).

Tabuľka 4 Zložky neistoty jednotlivých parametrov a ich rozšírená neistota

	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>VP</sub>	RON <sub>VP</sub>	D <sub>VONP</sub>	RON <sub>VONP</sub>	
u <sub>A</sub>	0,002	0,002	0,001	0,002	0,005	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	[mm]
u <sub>E</sub>	0,0016						0,0021	0,0005	0,0023	0,0004	
u <sub>p</sub>	0,0006										
u <sub>L</sub>	0,00025										
u <sub>ΔT</sub>	0,0002										
u <sub>Δ20</sub>	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,003		0,005		
U	0,005	0,005	0,004	0,005	0,011	0,004	0,008	0,007	0,013	0,010	

Výsledná hodnota merania je potom uvedená ako stredná hodnota výberu väčšia/menšia rozšírenej neistoty merania, ako je uvedené v Tabuľka 6.

Tabuľka 5 Hodnoty merania s neistotou merania

Vyhodnocovaný parameter	Stredná hodnota ± rozšírená neistota	Jednotky
D <sub>1</sub>	<b>14,049 ± 0,005</b>	[mm]
D <sub>2</sub>	<b>14,050 ± 0,005</b>	
D <sub>3</sub>	<b>14,052 ± 0,004</b>	
D <sub>4</sub>	<b>14,049 ± 0,005</b>	
D <sub>5</sub>	<b>14,041 ± 0,011</b>	
D <sub>6</sub>	<b>14,044 ± 0,004</b>	
D <sub>VP</sub>	<b>110,027 ± 0,008</b>	
RON <sub>VP</sub>	<b>0,014 ± 0,013</b>	
D <sub>VONP</sub>	<b>164,953 ± 0,007</b>	
RON <sub>VONP</sub>	<b>0,012 ± 0,010</b>	

## 8 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ

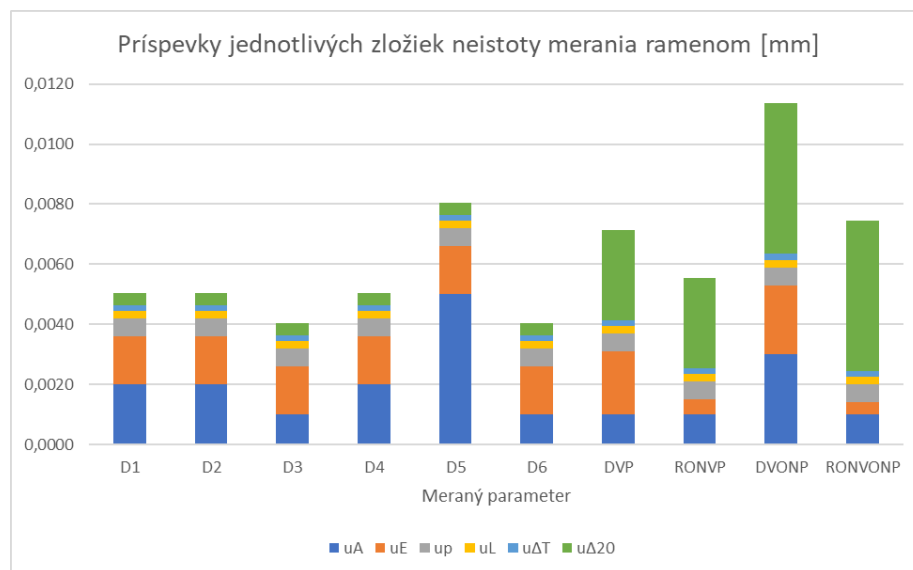
Na základe analýzy výsledkov meraní príruby na presných meracích zariadeniach, uvedených v kalibračnom liste môžeme konštatovať, že niektoré prvky neboli vyrobené podľa požiadavkou na výkrese. V tomto prípade to ale nehrá žiadnu rolu, pretože cieľom merania bolo poznať ich presné rozmery, ktoré sa budú dať použiť pri kalibrácii meracieho ramena.

Rozmery kalibrovaných prvkov etalónu sú uvedené v Tabuľka 1 a v Tabuľka 2. Pri kalibrácii je v prípade vnútorného priemeru príruby dobré dbať na výšku merania a vo výsledku ju zohľadniť.

Z výsledných hodnôt meraní CMM ramenom vyplýva, že tvoria pomerne veľký interval, ktorý má vplyv na výslednú presnosť merania. Veľký interval hodnôt môže naznačovať vplyv náhodnej chyby merania, ktorá sa týmto spôsobom prejavila. Dôvodom môže byť nízka precíznosť merania, prítomnosť nečistôt a iné. Táto chyba je vo výsledku merania zohľadnená v neistote typu A.

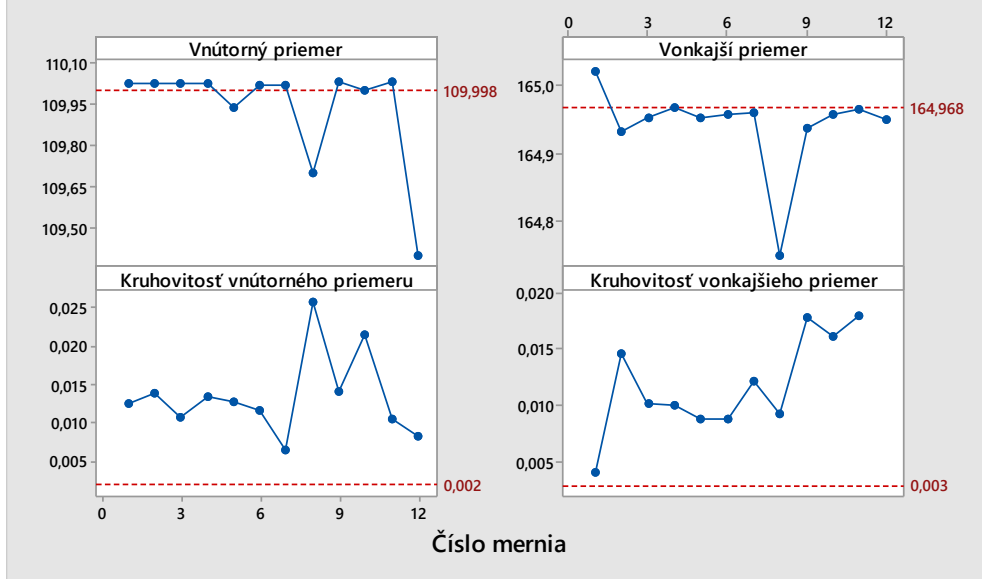
Výsledné hodnoty merania ramenom sú vyjadrené aj rozšírenou hodnotou merania s koeficientom rozšírenia 2, ktorá má pravdepodobnosť pokrytia hodnôt 95,45%. Napriek tomu vo väčšine prípadov tento interval neobsahuje kalibrované hodnoty rozmerov prvkov s kalibračného listu. Stredná hodnota všetkých súborov meraní je v prípade dier vyššia, ako bola kalibrovaná hodnota, a v prípade vonkajšieho priemeru je vyššia ako kalibrovaná hodnota. Tento fakt môže naznačovať prítomnosť systematickej chyby, ktorá sa dá odstrániť kalibráciou ramena. Avšak najzásadnejší fakt je, že intervaly výsledných hodnôt majú pomerne veľký rozsah, vid' Obr. 43 a Obr. 44. Z tohto dôvodu je na zvážení, či príčinou toho nie je nedostatočné zaškolenie obsluhy ramena, a meranie by bolo vhodné zopakovať po jej dostatočnom zaškolení. V prípade, že sa situácia s veľkým rozpätím hodnôt bude opakovať, je nutné preveriť správne fungovanie ramena.

Na Obr. 42 sú znázornené príspevky jednotlivých zložiek neistoty merania ramenom. Na grafe je vidieť výrazný vplyv neistoty typu A, neistoty kalibrovaného etalónu, a v prípade väčších rozmerov aj výrazný vplyv rozdielu teploty od 20 °C. Ostatné zložky neistoty nemajú taký výrazný vplyv na neistotu merania.



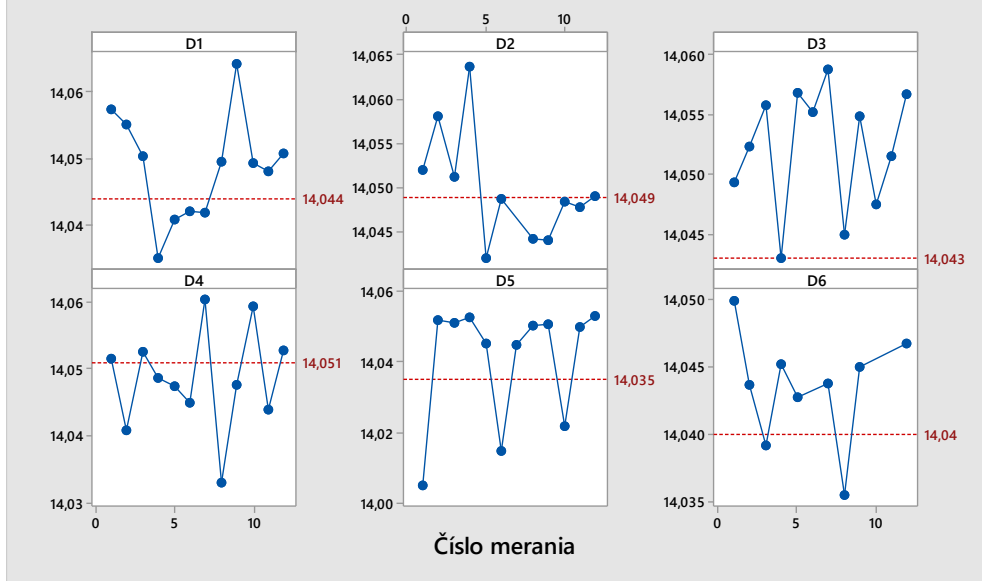
Obr. 42 Graf príspevkov jednotlivých zložiek neistoty merania

### Merané hodnoty vnútorného a vonkajšieho priemru a ich kruhovitosť



Obr. 43 Merané hodnoty ramenom a kalibrované hodnoty v mm

### Merané hodnoty priemerov malých dier bez odľahlých hodnôt



Obr. 44 Merané hodnoty ramenom a kalibrované hodnoty v mm

## 9 ZÁVER

Táto záverečná práca sa zaoberá návrhom etalónu pre CMM meracie rameno. Pre tento účel bolo vytvorených celkovo deväť kapitol.

V prvej kapitole bola vytvorená podrobná rešerš prenosných CMM zariadení. Okrem kĺbových boli popísané aj iné varianty prenosných CMM. V kapitole je hlavné delenie z hľadiska dotyku s meraným objektom venované kontaktným a bezkontaktným prenosným CMM. Pozornosť je venovaná aj bezkontaktným CMM, je priblížené ich rozdelenie z hľadiska použitej technológie.

V druhej kapitole sa práca zaoberá metrologickým systémom a metrologickou nadväznosťou v zmysle plnenia zadaných cieľov práce. Jej zámerom je prezentácia tejto práce v rámci širšieho konceptu medzinárodného a národného metrologického systému, ku ktorému sa kalibrácia ramena v ďalších kapitolách vzťahuje svojou metrologickou nadväznosťou.

Ďalšia kapitola je venovaná problematike určovania neistoty merania s CMM ramenami. Sú uvedené a stručne popísané tri základné metódy určovania neistoty a následne prezentovaný postup výpočtu pomocou jednej z nich. Kapitola obsahuje všeobecné vzťahy používané pre určenie základných typov zdrojov neistôt podľa uvedenej literatúry.

V štvrtej kapitole s názvom „Kalibrácia etalónu“ sa práca venuje praktickej časti, konkrétne vytváraniu etalónu. V kapitole je popísaný zvolený objekt, postup a použité etalóny pri kalibrácii. V jej poslednej časti sú uvedené dôležité výstupy z kalibrácie etalónu.

V ďalšej kapitole je popísané meranie kalibrovaného etalónu pomocou CMM meracieho ramena Haxagon Absolute Arm Compact. Kapitola obsahuje postup prípravy merania a samotného merania. Taktiež je v nej uvedený postup a vzťahy použité k určeniu neistoty merania. V jej závere je uvedené zhrnutie výstupov z merania.

Posledná kapitola sa venuje analýze výstupov z kalibrácie a merania a možným príčinám ich veľkého rozptylu.



## 10 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- KENDER, Štefan. SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE. *Transfer inovácií*:  
1] *SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE* [online]. 2013, (26), 3 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/26-2013/pdf/233-235.pdf>
- Mitutoyo. In: *Mitutoyo America Corporation* [online]. USA: Mitutoyo, 2022 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/ultra-high-accuracy-coordinate-measuring-machines/legex-500-700-900-1200/>
- Handbook of Optical Dimensional Metrology*. Broken Sound Parkway: Taylor &  
3] Francis Group, LLC, 2013. ISBN 13:978-1-4398-5482-2.
- FARO* [online]. USA: FARO, 2022 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z:  
4] <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-8-axis-edge-faroarm-scanarm>
- Hexagon* [online]. 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z:  
5] [https://shop.hexagonmi.com/na/en\\_US/USD/](https://shop.hexagonmi.com/na/en_US/USD/)
- Sonda HP-T-RP. In: *Hexagon* [online]. 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z:  
6] <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/touch-trigger-probes/hptrp-probe>
- WOŽNIAK, Adam a Marek DOBOSZ. CMM touch trigger probes testing using a  
7] reference axis. *Precision Engineering* [online]. 2005, **29**(3), 281-289 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635905000176>
- GENEST, David H. The Right Probe System Adds: Versatility to CMMs. In:  
8] *Qualitydigest* [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/jan97/probes.html>
- SMITH, Kennedy. Options About The Large-Part Metrology. In:  
9] *QUALITYDIGEST* [online]. 2006 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: [https://www.qualitydigest.com/sept03/articles/02\\_article.shtml](https://www.qualitydigest.com/sept03/articles/02_article.shtml)
- PROKOP, Martin. Co je laserový tracker a jak se s ním měří?. *Automa* [online].  
10] FCC public, 2009, **9**(8), 40-41 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/39584.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39584.pdf)
- How Laser Trackers Work. In: *Schaeffer Precision Allignment, Inc.* [online].  
11] 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <http://www.schaefferprecision.com/blog/how-laser-trackers-work>
- Systémy laser tracker. In: *Hexagon* [online]. 2022 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z:  
12] <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at500>
- Leica T-Probe. In: *Hexagon* [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z:

- 13] <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-probing-solutions/leica-tprobe>
- ONE: 3D meracie rameno. In: *DEOM* [online]. 2021 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.deom.sk/3d-meracie-rameno/3d-meracie-rameno/one-2.htm>
- 14] LARUE, Jean-François, Marc VIALA, Daniel BROWN a Charles MONY. *Dynamic Referencing in 3D Optical Metrology for Higher Accuracy in Shop Floor Conditions*. Francúzsko: Creaform, 2016.
- 15] POLÁŠEK, Ondřej. *Metrologické charakteristiky měřícího ramene Hexagon Absolute Arm 83*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Tomáš Marek, Ph.D.
- 16] *Creaform Handyprobe Technical specifications* [online]. In: . Canada: Creaform [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/coordinate-measuring-machines-handyprobe/technical-specification>
- 17] *Keyence Wide Area Coordinate Measuring Machine brochure* [online]. In: . Itasca, USA, 2021 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/products/measure-sys/cmm/>
- 18] *Alwaid Metronor One* [online]. In: . Nesbru, Norway: Metronor [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/metronor/>
- 19] *21st Century Measuring Challenges* [online]. In: . Lévis, Canada: Creaform, 2013 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: [https://www.creaform3d.com/en/resource-center?type=technical\\_document](https://www.creaform3d.com/en/resource-center?type=technical_document)
- 20] *Metrascan - Speed and accuracy combined with versatility* [online]. In: . Lévis, Canada: Creaform [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/optical-3d-scannermetrascan>
- 21] *Které rameno Absolute Arm?* [online]. In: . Stockholm, Sweden: Hexagon Manufacturing Intelligence [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/csCZ/products/portable-measuring-arms/about-portable-measuring-arms/which-absolute-arm>
- 22] *Absolute Arm: Univerzálnost* [online]. In: . Stockholm, Sweden: Hexagon Manufacturing Intelligence [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/csCZ/products/portable-measuring-arms/about-portable-measuring-arms/absolute-armversatili>
- 23] HOWARTH, Preben a Fiona REDGRAVE, Martin HALAJ, Ivan MIKULECKÝ. *Metrológia v skratke: Doplnené Vydanie*. 3. Slovenská legálna metrológia, ENTERPRISE, 2014. ISBN 978-80-85342-35-2.
- 24] JAN, ŠRÁMEK. *Stanovení přesnosti měření v nanometrologii*. Brno, 2019. Disertační práce. Vysoké Učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
- 25] *Metrologie v kostce: Preklad dokumentu: Metrology in short:3rd edition* [online].



- 26] 3. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art., 2009 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: [https://www.unmz.cz/sborniky\\_th/sb2009/MvK\\_7\\_vidit\\_hypervazby\\_small.pdf](https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf)
- TNI 01 0115. *Medzinárodní metrologický slovník: Základní a všeobecné pojmy a*
- 27] *přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- SENFT, Václav. Analytické vlastnosti metod. In: *SlidePlayer* [online]. [cit. 2022-28] 07-27]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11240670/>
- FULOVÁ, S. *Stanovenie neistoty optického meracieho stroja pomocou*
- 29] *laserinterferometra*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jan Šrámek, Ph.D.
- ŚIADEK, Jerzy. *Coordinate metrology: accuracy of systems and measurements*.
- 30] Cham: Springer, 2016. Springer tracts in mechanical engineering. ISBN 978-3-662-48463-0.
- ANDREJ, POTANKO. *Stanovení nejistoty měření souřadnicového měřicího*
- 31] *stroje v nanometrologii*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.
- Hexagon Absolute Arm brochure* [online]. In: . Stockholm, Sweden, 2020 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/about-portablemeasuring-arms/absolute-arm-versatility>



# 11 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

## 11.1 Zoznam skratiek a symbolov

<b>Skratka</b>	<b>Popis</b>
3D	Trojrozmerný
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
EÚ	Európska únia
ISO	International Organization for Standardization
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NMS	Národní metrologický systém
$\alpha$	Koeficient teplotnej rozťažnosti
$\alpha_o$	Koeficient teplotnej rozťažnosti meraného objektu
$\Delta\alpha_A$	Rozdiel hodnoty koeficientu teplotnej rozťažnosti etalónu a CMM
$\Delta s$	Systematická chyba
$\Delta t$	Rozdiel teplôt medzi meraným objektom a strojom
$\Delta t_{20}$	Odchýlka teploty od 20 °C $\Delta z_{maxj}$ Rozsah odchýlok
$\mu$	Stredná hodnota meranej veličiny
$\chi$	Koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti
$c_j$	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
$s_{\bar{y}}$	Aritmetický priemer výberovej smerodajnej odchýlky
$u_A$	Vplyv rozptylu nameraných hodnôt, neistota typu A
$u_B$	Štandardná neistota typu B
$u_E$	Vplyv neistoty použitého etalónu
$u_L$	Vplyv neistoty snímacieho systému CMM
$u_p$	Vplyv neistoty rozlíšiteľnosti odmeriavacieho systému
$u_{\Delta T}$	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu
$u_{T20}$	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C
$u_B(z_j)$	Neistota jednotlivých zdrojov
$u_c$	Kombinovaná štandardná neistota
$U$	Rozšírená neistota meranej veličiny
$U_{prob}$	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
$y_{max}$	Maximálna nameraná hodnota meranej veličiny
$y_{min}$	Minimálna hodnota meranej veličiny
$Y$	Hodnota meranej veličiny

## 11.2 Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Hodnoty kruhovitosti veľkého vnútorného priemeru príruby.....	47
Tabuľka 2 Aritmetický priemer, smerodajná odchýlka a neistota typu A meraní prvkov .....	56
Tabuľka 3 Neistoty merania .....	56
Tabuľka 4 Zložky neistoty jednotlivých parametrov a ich rozšírená neistota.....	58
Tabuľka 5 Hodnoty merania s neistotou merania.....	58

## 11.3 Zoznam obrázkov

Obr. 1 Súradnicový merací stroj Mitutoyo rady Legex [2] .....	17
Obr. 2 Meracie rameno Edge Faroarm [4].....	17
Obr. 3 Pevná dotyková sonda Hexagon R-3-A-50 [5].....	18
Obr. 4 Dotyková spínacia sonda Hexagon HP-T-RP [6].....	18
Obr. 5 Rozdielne konštrukcie spínacích dotykových sond: a) elektromechanická b)piezoelektrická [7].....	19
Obr. 6 Leica Absolute Tracker AT500 [9] .....	20
Obr. 7 Princíp fungovania Laserového sledovača: .....	20

Obr. 8 a) sférický kútový odrážač b) dotyková sonda s odrážačom c) skener s odrážačom [13].....	21
Obr. 9 Leica Absolute Tracker ATS600 umožňuje vykonávať laserové merania bez laserových terčov, priamo z laserového systému snímacieho zariadenia. [5] .....	21
Obr. 10 Presnosný optický meraí systém Metronor ONE [14] .....	22
Obr. 11 Rukoväť so sondou: a) Creaform, [17] b) Keyence, [18] c) Metronor [19] ...	22
Obr. 12 Sonda pre meranie hlbokých úkych dier (Metronor) [16] .....	23
Obr. 13 Znáznorenie meracieho objemu (Snímač od spol. Creaform) [16].....	24
Obr. 14 RS-SQUARED optický skener pre prenosné ramená od Hexagon .....	24
Obr. 15 Absolute Scanner AS1 laserový skener pre prenosné ramená od Hexagon ...	25
Obr. 16 Typy rukovätí spoločnosti Hexagon: .....	25
Obr. 17 Organizácia Metrickej konvencie [26].....	27
Obr. 18 Národný metrologický systém ČR [26] .....	29
Obr. 19 Ministerstvo průmyslu a obchodu [zdroj: webové sídlo] .....	30
Obr. 20 Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [zdroj: webové sídlo].....	30
Obr. 21 Český metrologický inštitút [zdroj: webové sídlo].....	30
Obr. 22 Dôležité etalóny v metrologii rozmerov [24].....	31
Obr. 23 Reťazec metrologickej nadväznosti [26] .....	31
Obr. 24 Porovnávací tabuľka zaistenia metrologickej návěznosti [26].....	32
Obr. 25 Vzťah medzi precíznosťou, pravdivosťou a neistotou merania [28] .....	33
Obr. 26 Delenie chýb merania [29].....	34
Obr. 27 Príruba kalibrovaná na ČMI: a) pohľad zozadu b) pohľad spredu .....	43
Obr. 28 Kalibrované prvky etalónu.....	43
Obr. 29 Digitálny jednoosí dotykový dĺžkomer SIP 1002M v laboratóriu ČMI [foto: autor].....	44
Obr. 30 Presný kruhomer Taloryond TR595S vľavo, vpravo detail pracovného prestoru [foto: autor].....	45
Obr. 31 CMM Zeiss UPMC 850 Carat v laboratóriu ČMI [31].....	45
Obr. 32 Dôležité informácie o kalibrácii etalónu uvedené v kalibračnom liste [autor].....	46
Obr. 33 Valcovitosť vnútorného priemeru meraná v desiatich rezoch [autor] .....	47
Obr. 34 Vybavenie použité k meraniu etalónu v laboratóriu UVSSR [foto: autor].....	49
Obr. 35 Popis Absolute Arm Compact [16].....	50
Obr. 36 a) etalón, upevnený k nerezovej doske pomocou prípravkov b) meranie teploty dosky c) meranie teploty etalónu [foto: autor].....	51
Obr. 37 Model a vyznačené rozmery príruby v softvéry PC-DMIS [autor] .....	51
Obr. 38 Odoberané stupne voľnosti v softvéry PC-DMIS [autor] .....	52
Obr. 39 Grafy výsledných hodnôt merania šiestich malých dier, červenou je znázornená hodnota s kalibrácie [autor] .....	55
Obr. 40 Grafy výsledných hodnôt merania parametrov vonkajšieho a vnútorného priemeru, červenou je znázornená hodnota s kalibrácie [autor] .....	55
Obr. 41 Grafy výsledných hodnôt merania šiestich malých dier po testovaním Grubbsovou metódou [autor].....	56
Obr. 42 Graf príspevkov jednotlivých zložiek neistoty mrenia .....	59
Obr. 43 Merané hodnoty ramenom a kalibrované hodnoty .....	60
Obr. 44 Merané hodnoty ramenom a kalibrované hodnoty .....	60



## 12 ZOZNAM PRÍLOH

- A Výsledné hodnoty merania pomocou ramena Hexagon Absolue Arm Compact (samostatný súbor)
- B Výkres etalónu (samostatný súbor)