



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ  
SOUŘADNICOVÉHO MĚŘICÍHO STROJE ZEISS  
UPMC CARAT**

DETERMINING THE MEASUREMENT ACCURACY OF A COORDINATE MEASURING  
MACHINE ZEISS UPMC CARAT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Roman Kiška

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Roman Kiška</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Šrámek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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

## **Stanovení přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC Carat**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zavedení velmi přesných CMM vybavených dotykovým snímacím systémem umožňuje provádění vysoce přesných délkových měření, které v minulosti vyžadovalo specializované vybavení a postupy. Úkolem je vytvoření komplexní studie přesnosti měření CMM Zeiss UPMC Carat pro potřeby národního metrologického orgánu ČMI Brno v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Včetně stanovení nejistoty měření pro tento přístroj a návodů pro její výpočet, který bude sloužit pro operátory CMM v praxi akreditované kalibrační laboratoře,

### **Cíle diplomové práce:**

Popis současného stavu v oblasti přesného měření na CMM (rešerše)  
Charakteristika přístroje Zeiss UPMC Carat  
Provedení souboru experimentálních měření  
Identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje  
Stanovení nejistoty měření přístroje  
Vyhodnocení dosažených výsledků  
Závěr a doporučení pro praxi

### **Seznam doporučené literatury:**

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

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

ČSN EN ISO 17025:2018. Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 48 s. Třídící znak 015253.

EA 4/02:2013. Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2)). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.

TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s. Třídící znak 83031.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je vytvoření komplexní studie přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje (dále jen CMM) Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC (dále jen Zeiss Carat) pro potřeby národního metrologického orgánu ČMI OI Brno v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Součástí je také vytvoření návodu pro výpočet nejistoty měření, který poslouží v praxi akreditované kalibrační laboratoře. První část práce je věnována popisu současného stavu poznání a vymezení základních pojmů v oblasti metrologie a přesného měření na CMM. V druhé části je popsán měřicí stroj Zeiss Carat, jsou zde identifikováni jednotliví přispěvatelé k výsledné nejistotě měření a je zde také definována metodika pro jejich kvantifikaci. Poslední část se zabývá vyhodnocením dat z kalibrace a výpočtem rozšířené nejistoty měření přístroje Zeiss Carat, která slouží pro kvantifikaci jeho přesnosti.

## **ABSTRACT**

The aim of this diploma thesis is to create a comprehensive study of measurement accuracy of coordinate measuring machine (hereinafter CMM) Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC (hereinafter Zeiss Carat) for the needs of the national metrological institute in Brno in accordance with ČSN EN ISO / IEC 17025 and the follow-up system standards of the ČSN EN ISO 10360 series. Additionally, it includes the creation of instructions for the calculation of measurement uncertainty, which will be put into effect in an accredited calibration laboratory. The first part of the work focuses on the description of the current state of knowledge and the definition of basic concepts in the field of metrology and accurate measurements on CMM. The second part describes the Zeiss Carat measuring machine, identifies the individual contributors to the resulting measurement uncertainty and defines the methodology for their quantification. The last part deals with the evaluation of calibration data and the calculation of the expanded measurement uncertainty of the Zeiss Carat instrument, which is used to quantify its accuracy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Souřadnicový měřicí stroj, přesnost měření, nejistota měření, chyba měření, Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC, kalibrace

## **KEYWORDS**

Coordinate-measuring machine, measurement accuracy, measurement uncertainty, measurement error, Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC, calibration

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KIŠKA, Roman. *Stanovení přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC Carat*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133301>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Janu Šrámkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, vstřícný přístup a za čas, který mi věnoval. Nemalý dík patří i mé rodině a přátelům za neutuchající podporu po dobu celého studia.





## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Jana Šrámka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Bc. Roman Kiška



# OBSAH

1	ÚVOD.....	13
2	MOTIVACE .....	15
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ V OBLASTECH METROLOGIE A PŘESNÉHO MĚŘENÍ NA CMM, VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ.....	17
3.1	Metrologie.....	17
3.1.1	Definice metrologie.....	17
3.2	Vymezení základních metrologických pojmů .....	18
3.2.1	Měřidlo.....	18
3.2.2	Měření .....	19
3.2.3	Chyba měření .....	21
3.2.4	Nejistota měření .....	22
3.2.5	Druhy nejistot.....	23
3.3	Hodnocení výsledků měření .....	28
3.4	Metrologická návaznost.....	29
3.5	Národní metrologický systém České republiky (NMS) .....	31
3.6	Souřadnicové měřicí stroje CMM.....	34
3.6.1	Základní mechanické prvky CMM .....	35
3.6.2	Typy konstrukcí CMM.....	36
3.6.3	Snímací systém CMM.....	37
3.6.4	Dotykové snímací systémy .....	38
3.7	Kalibrace portálového CMM .....	41
3.7.1	Obecné podmínky kalibrace.....	41
3.7.2	Postup kalibrace CMM .....	42
3.7.3	Požadavky na přesnost CMM .....	44
3.7.4	ČSN EN ISO 10 360-2:2010.....	47
4	CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE ZEISS UPMC 850 CARAT S-ACC.....	51
5	PROVEDENÍ SOUBORU EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ.....	57
6	IDENTIFIKACE A KVANTIFIKACE JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK NEJISTOT MĚŘENÍ PŘÍSTROJE .....	59
6.1	Identifikace zdrojů nejistot .....	59
6.2	Kvantifikace zdrojů nejistot.....	62

7	STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ PŘÍSTROJE .....	65
7.1	Výpočet standardní nejistoty typu A .....	65
7.2	Výpočet standardní nejistoty typu B .....	65
7.3	Výpočet kombinované standardní nejistoty měření .....	65
7.4	Výpočet rozšířené nejistoty měření a posouzení shody se specifikací.....	66
7.5	Návod pro výpočet rozšířené nejistoty pomocí přílohy B.....	68
8	VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	71
9	ZÁVĚR .....	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM SYMBOLŮ .....	77
	SEZNAM ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	79
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH .....	80



# 1 ÚVOD

Základní podstata metrologie čili snaha o měření provázela lidstvo již od pradávna a v průběhu let neustále docházelo k jeho zdokonalování. S postupem času a se zvyšujícími se požadavky na kvalitu výrobků začal být kladen čím dál vyšší důraz na ověřování, zda naměřené hodnoty skutečně odpovídají pravé hodnotě měřené veličiny, a to za použití rozličných měřidel. Technická úroveň měřidel a měřící postupy se neustále inovují a zdokonalují, avšak stále není možné, a nejspíš také nikdy nebude, vyjádřit skutečnou hodnotu měřeného znaku, jelikož každé měření je zatíženo chybou [1]. V praxi se lze setkat se dvěma přístupy pro hodnocení chyby měření. Chybový přístup definuje, že pravá hodnota měřené veličiny je jedinečná a v praxi nepoznatelná. Modernější nejistotový přístup však připouští, že ačkoliv neexistuje jediná pravá hodnota měřené veličiny, je možné definovat soubor pravých hodnot ve shodě s předepsanou definicí [2].

Tato diplomová práce se zabývá problematikou stanovení přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje, což je technologie, která pro svou univerzálnost a flexibilitu patří k nejrychleji se rozvíjejícím. CMM je díky svému širokému spektru využití, možnosti zpracování dat pomocí softwaru a použití kontaktních a bezkontaktních snímacích sond praktické a cenově velmi efektivní měřící zařízení, které má schopnost rychle a přesně zachytit data a vyhodnotit je. Pro své vlastnosti našly CMM uplatnění obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu, kde je kladen značný důraz na vysokou kvalitu výrobků, a tedy i na přesnost měření [1].

Prvním úkolem této práce je zpracovat komplexní studii přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC. Přesnost měření není sama o sobě veličinou, a proto bude pro její kvantifikaci použita rozšířená nejistota měření. Lze prohlásit, že čím nižší je hodnota nejistoty měření, tím vyšší je přesnost měřicího stroje.

Druhým úkolem je vytvoření návodu pro výpočet nejistoty měření, který bude sloužit operátorům CMM v praxi akreditované kalibrační laboratoře. Součástí je i vytvoření souboru v programu Microsoft Excel, do kterého operátor jednoduše zadá příslušná data a program pomocí předdefinovaných funkcí vypočítá hodnotu rozšířené nejistoty měření.





## 2 MOTIVACE

Souřadnicový měřicí stroj Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC, jehož komplexní studii se zabývá tato práce, je využíván pracovníky oddělení primární nanometrologie a technické délky (6014) Oblastního inspektorátu Českého metrologického institutu v Brně pro potřeby vysoce přesného délkového měření. Přesnějším CMM v rámci ČMI disponuje pouze Laboratoř primární metrologie v Praze, jedná se o CMM Zeiss Xenos, který sice je novější a přesnější, ale jeho provoz vyžaduje mnohem náročnější podmínky prostředí.

Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC disponuje dotykovým snímacím systémem HSS a pro zpracování naměřených dat využívá velmi moderní software Calypso. Jako snímací dotyk je používána rubínová kulička, nejmenší používaný průměr je 0,5 mm. Měřicí rozsahy stroje v jednotlivých osách jsou:  $x = 850$  mm,  $y = 1200$  mm,  $z = 600$  mm. Udávaná mezní hodnota pro chybu měření délky v jedné ose je  $u_1 = (0,40 + 1,11 \cdot L)$   $\mu\text{m}$  a v prostoru  $u_3 = (0,70 + 1,67 \cdot L)$   $\mu\text{m}$ , kde  $L$  je měřená délka v metrech.

Koupí tohoto stroje ČMI rozšířila nabídku služeb v oblasti kalibrace etalonů a přesných měřidel délky a rozměrové kontroly rozličných typů obrobků dle výkresové dokumentace a 3D modelů.

Hlavní přínos této práce je vytvoření komplexní studie přesnosti stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC pro potřeby národního metrologického orgánu ČMI Brno, a to včetně stanovení nejistoty měření pro tento stroj a vytvoření návodu na její výpočet, který bude moci posloužit operátorům Zeiss Carat v praxi akreditované kalibrační laboratoře.

Všechny cíle, definované v zadání této práce, jsou řešeny v samostatných kapitolách.

První cílem je popis současného stavu poznání v oblastech metrologie a přesného měření na CMM. Tento cíl je řešen ve třetí kapitole. Pro své velmi podrobné zpracování poslouží tato kapitola zejména čtenářům, kteří se dané problematice dosud blíže nevěnovali.

Druhým cílem je charakterizace přístroje Zeiss UPMC Carat. Tento cíl je řešen ve čtvrté kapitole. Jsou zde uvedeny základní informace jako: popis mechanických prvků, měřicí rozsahy stroje, výrobcem uvedené maximální dovolené chyby měření, charakteristika softwaru používaného pro hodnocení náměrů aj.

Třetím cílem je provedení souboru experimentálních měření. Tento cíl je řešen v páté kapitole. Bohužel v době, kdy tato práce byla zpracovávána, nebylo možné, aby autor práce prošel školením, které je pro měření na stroji Zeiss Carat nezbytné, a to z důvodu platnosti mnoha vládních nařízení a restrikcí. Soubor experimentálních měření byl proto proveden a poskytnut vedoucím této diplomové práce. Kapitola obsahuje tabulku naměřených hodnot a několik snímků pořízených v laboratoři během měření.

Čtvrtým cílem je identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje. Tento cíl je řešen v kapitole šest. V první části jsou identifikovány všechny relevantní zdroje nejistot, které přispívají k výsledné nejistotě měření stroje. V druhé části je následně popsána metodika jejich kvantifikace.

Pátým cílem je stanovení nejistoty měření přístroje. Tento cíl je řešen v kapitole sedm. Kapitola obsahuje výpočet rozšířené nejistoty měření, která v této práci slouží jako kvantifikace přesnosti stroje a návod pro práci ve výpočtovém souboru (příloha B).

Šestým cílem je vyhodnocení dosažených výsledku. Tento cíl je řešen v kapitole osm. Tato kapitola shrnuje poznatky a výsledky z předchozích dvou kapitol.

Posledním sedmým cílem je závěr a doporučení pro praxi. Tento cíl je řešen v kapitole devět a jsou zde shrnuty informace a poznatky z celé diplomové práce.

## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ V OBLASTECH METROLOGIE A PŘESNÉHO MĚŘENÍ NA CMM, VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Cílem této kapitoly je čtenáři přiblížit současný stav poznání v oblastech metrologie a přesného měření na CMM. Pro své velmi podrobné zpracování je určena zejména pro čtenáře mimo metrologické zaměření.

### 3.1 Metrologie

Trest smrti, takové hrozbě čelil každý královský architekt ve starém Egyptě již 3000 let před naším letopočtem, pokud zapomněl či zanedbal svoji povinnost zkalibrovat své měřidlo délky při každém úplňku. První královský loket byl definován, jako vzdálenost od konce předloktí až ke špičce nataženého prostředníčku vládnoucího faraona plus šířka jeho ruky, tato délka byla vytesána do černé žuly a její dřevěné či kamenné kopie byly následně předány architektům, kteří byli odpovědní za jejich udržování [3].

Skutečnost takto vzdálená od naší doby poukazuje na to, že důraz na měření správných výsledků zde byl již odedávna. Náklady na měření a vážení představují plných 6 % celkového hrubého národního produktu, metrologie se stala součástí každodenního života. Nákup přesné délky látky na šaty, řízení kvality v průmyslu, měření hladiny alkoholu v krvi, to vše je vyhodnocováno na základě měření. Metrologie je patrně jednou z nejstarších věd vůbec a znalost toho, jak ji v praxi využít je v dnešní době nezbytná [3].

#### 3.1.1 Definice metrologie

Mezinárodní metrologický slovník definuje metrologii jako „vědu o měření a její aplikaci“ [4]. Metrologie v sobě zahrnuje veškeré teoretické i praktické aspekty měření, jakékoliv nejistoty měření a obory použití [5].

Základními úlohami metrologie jsou [3]:

- definování mezinárodně uznávaných jednotek měření (metr, kilogram aj.),
- realizace jednotek měření za pomoci vědeckých metod,
- vytváření řetězců návazností cestou stanovení a dokumentování hodnoty a přesnosti měření a přenosu těchto údajů.

Metrologie se dále člení do tří kategorií v závislosti na různém stupni složitosti a požadavků na přesnost [3]:

- *vědecká metrologie* – kategorie, která má za úkol vývoj a organizaci etalonů na té nejvyšší úrovni. Ve spojení s touto kategorií je patřičné zmínit *metrologii fundamentální*, která nemá mezinárodní definici, ale lze ji popsat jako činnost s nevyšší přesností měření v daném oboru, tedy jako špičkovou část vědecké metrologie,

- *průmyslová (praktická) metrologie* – jejím cílem je zajišťování náležité funkčnosti měřidel používaných v průmyslu a ve výrobních, zkušebních a vývojových procesech,
- *legální metrologie* – je to ta část metrologie, která se zaměřuje na měření, jenž mají vliv na průhlednost ekonomických transakcí zvláště tam, kde je potřeba předepsaného ověřování měřidel. Tuto kategorii lze dále rozdělit na legální metrologii *státní a mezinárodní*.

## 3.2 Vymezení základních metrologických pojmů

Cílem této kapitoly je objasnění základních metrologických pojmů, které poslouží k lepší orientaci v dalších částech této práce.

### 3.2.1 Měřidlo

„Měřidlo je zařízení používané k měření buď samotné, nebo ve spojení s jedním nebo více přídatnými zařízeními.“ [4]. Spolu s nezbytnými pomocnými měřicími zařízeními se dle zákona 505/1990 Sb. Zákon o metrologii, dělí na [6]:

- *etalony,*
- *pracovní měřidla stanovená,*
- *pracovní měřidla nestanovená,*
- *certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály.*

#### ***Etalon***

etalon měřicí jednotky anebo stupnice určité veličiny je měřidlo sloužící k realizaci a uchování této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti [4]. Uchováváním etalonu se rozumí všechny úkony potřebné k zachování metrologických charakteristik etalonu ve stanovených mezích [6].

Etalon je v praxi často využíván jako reference ke stanovení naměřených hodnot veličin a přidružených nejistot měření pro jiné veličiny stejného druhu, čímž stanovuje metrologickou návaznost kalibrací jiných etalonů, měřidel nebo měřících systémů [5].

#### ***Pracovní měřidla stanovená***

(v praxi jen stanovená měřidla) jsou měřidla, která Ministerstvo průmyslu a obchodu stanovilo vyhláškou k povinnému ověřování, a to s ohledem na jejich společenský význam, např. pro ochranu zdraví a životního prostředí, pro bezpečnost při práci, pro stanovení sankcí, poplatků, daní či tarifu, aj [6].

#### ***Pracovní měřidla nestanovená***

(v praxi jen pracovní měřidla) jsou měřidla jenž nejsou ani etalonem ani stanoveným měřidlem [6].

### ***Certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály***

jsou materiály či látky přesně stanoveného složení či vlastností, používané zejména pro ověřování nebo kalibraci přístrojů, vyhodnocování měřicích metod a kvantitativní určování vlastností materiálů [6].

#### **3.2.2 Měření**

„Měření je proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny, které mohou být důvodně přiřazeny veličině“ [4].

##### ***Přesnost měření***

„je těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny“ [4]. Pojem přesnost měření není veličinou, a tím pádem ji nelze jednoduše vyjádřit číselnou hodnotou. Přesnost výsledku je často kvantifikována nejistotou měření. Při vyhodnocování výsledků se obvykle vyhodnocují dvě základní složky [7]:

- *správnost měření* – odhad průměru,
- *preciznost měření* – odhad variability.

##### ***Správnost měření***

(nebo též pravdivost měření dle [8]) je definována v mezinárodním metrologickém slovníku definována jako: „těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny“ [4]. Správnost měření přímo ovlivňuje systematickou chybu [4].

##### ***Preciznost měření***

(nebo též shodnost dle měření [8]) je definována v mezinárodním metrologickém slovníku definována jako: „těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek“ [4]:

- *podmínky opakovatelnosti měření* – při opakovaném měření je použita stejná metoda měření, identické zkušební jednotky, měří tentýž operátor na témže vybavení a v krátkých časových intervalech,
- *podmínky reprodukovatelnosti měření* – je použita stejná metoda měření i identické zkušební jednotky, ale v různých laboratořích, s různým obslužným personálem a na různém vybavení [8].

Jak již bylo zmíněno výše, preciznost měření lze kvantifikovat pomocí charakteristik variability, tj. rozptylu, výběrového rozpětí či výběrové směrodatné odchylky [7].

Výpočet rozpětí  $R$  [7]:

$$R = y_{\max} - y_{\min} , \quad (3.1)$$

kde:

$y_{\max}$  ..... maximální hodnota měřené veličiny  $Y$ ,

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

Výpočet výběrové směrodatné odchylky  $s_y$  (rozpětí lze snadno vypočítat umocněním směrodatné odchylky na druhou) [7]:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.2)$$

kde:

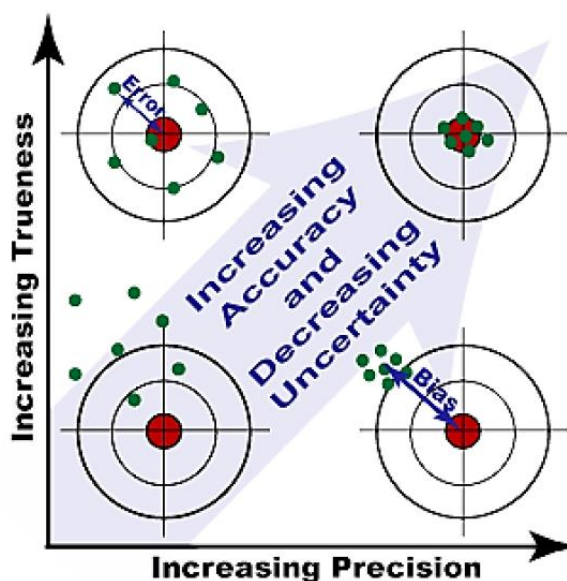
$n$  ..... počet naměřených hodnot veličiny  $Y$ ,

$i$  ..... číslo měření,

$y_i$  .....  $i$ -tá hodnota měřené veličiny  $Y$ ,

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

Obrázek 1 znázorňuje princip posuzování správnosti a preciznosti měření daného měřidla či měřicího systému. Snaha je dosáhnout při opakovaném měření co nejvyšší míry přesnosti s co nejnižší nejistotou měření [9].



Obrázek 1: princip přesného měření: horizontální osa – preciznost měření, vertikální osa – správnost měření [9].

Za ideální lze považovat terč v pravém horním rohu obrázku 1, kdy je dosažena minimální hodnota biasu (rozdíl mezi opakovaně naměřenou a referenční hodnotou) a všechna měření jsou co nejbližší středu terče čili referenční hodnotě.

Lze prohlásit, že neexistuje žádná metoda měření či měřicí zařízení, které by bylo schopno zajistit stoprocentně přesný výsledek. Do procesu měření v jeho celém průběhu vstupuje velké množství faktorů, způsobujících vznik chyb a odchylek, které zapříčiní rozdíl mezi skutečnou a naměřenou hodnotou sledované veličiny. Naměřená hodnota měření se vždy pohybuje v určitém rozmezí kolem skutečné hodnoty, a proto se v praxi jako nedílná součást výsledku uvádí nejistota měření [10].

### 3.2.3 Chyba měření

Chyba měření je definována jako „rozdíl mezi naměřenou hodnotou veličiny a referenční hodnotou veličiny“ [4].

Jak již bylo zmíněno, přesnost měření ovlivňuje řada faktorů (nedokonalost měřících metod, lidský faktor, proměnné okolní podmínky při měření aj.), rozdíl skutečné a naměřené hodnoty měřené veličiny se nazývá absolutní chyba, ta se skládá z chyby systematické a chyby náhodné [11].

#### *Systematická chyba*

je definována jako: „složka chyby měření, která v opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem“ [4].

Systematické chyby jsou zapříčiněny použitím nevhodné měřicí metody, nepřesným měřidlem či měřicím zařízením nebo nezkušeností obsluhy měřicího zařízení. Systematická chyba v opakovaných měřeních zkresluje výsledek předvídatelným způsobem a zůstává konstantní. Často ji nelze rozpoznat na první pohled a bývá odhalena až při porovnávání s výsledky z minulých měření. Znamá systematická chyba měření může být kompenzována pomocí vhodné korekce [11].

#### *Náhodná chyba*

je definována jako: „složka chyby měření, která se v opakovaném měření mění nepředvídatelným způsobem“ [4].

Náhodné chyby se vyskytují při každém měření a není možno je nijak ovlivnit, kolísají náhodně co do velikosti i znaménka a jsou zapříčiněny velkým počtem nepředvídatelných náhodných vlivů [11].

S vysokou pravděpodobností lze prohlásit, že náhodná chyba bude nabývat při opakovaném měření hodnot ležících v intervalu  $\pm 3s$  (tři výběrové směrodatné odchylky). Snížit ji můžeme tím způsobem, že výsledek měření vypočítáme jako aritmetický průměr z naměřených hodnot (za splnění podmínek opakovatelnosti) [7].

### ***Hrubá chyba***

vzniká omylem při odečtení nebo zapsání naměřené hodnoty anebo v případě, že měřicí zařízení přestalo správně pracovat. Tato chyba bývá zpravidla dobře rozpoznatelná a snadno odstranitelná, jelikož hodnoty zatížené touto chybou se od ostatních výrazně liší. Naměřené hodnoty zatížené hrubou chybou se při vyhodnocování měření neberou v potaz [7].

### **3.2.4 Nejistota měření**

„Nejistota měření je nezáporný parametr, charakterizující rozptýlení hodnot veličiny, který je na základě užité informace přidružen k měřené veličině“ [4].

Nejistota měření je výsledkem kvantifikace systematických a náhodných chyb, kterými byl výsledek v průběhu měření zatížen. Vymezuje interval, o kterém se s určitou úrovní pravděpodobnosti předpokládá, že zahrnuje výsledek měření. Významnou roli má nejistota měření zejména v případě, vztahují-li se výsledky měření k nějaké mezní hodnotě [11].

Nejistota měření je neodmyslitelnou součástí výsledku měření. Výsledek se zahrnutou nejistotou měření se uvádí ve tvaru [11]:

$$Y = y \pm U. \quad (3.3)$$

kde:

$Y$  ..... měřená veličina,

$y$  ..... odhad měřené veličiny,

$U$  ..... rozšířená nejistota měřené veličiny  $Y$ .

Rozšířená nejistota  $U$  bývá často uváděna s nejvýše dvěma platnými číslicemi a odhad měřené veličiny  $y$  je odpovídajícím způsobem zaokrouhlen na stejný počet číslic [11].

*Příklad:*

Délka  $L$  naměřená digitálním třmenovým mikrometrem je 20,055 mm. Mikrometr má dle specifikace výrobce nejistotu 5  $\mu\text{m}$ . V dokladu o výsledku měření se uvede výsledek uvede následujícím způsobem:

$$L = (20,055 \pm 0,005) \text{ mm}. \quad (3.4)$$

### ***Zdroje nejistot***

jsou to veškeré jevy, které mohou znepřesnit stanovení výsledku měření, a tím pádem oddálit naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Mezi nejčastější zdroje nejistot patří například [11]:

- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny nebo její realizace,
- nesprávný postup při měření,
- nezkušenost operátora,
- vlivy prostředí,

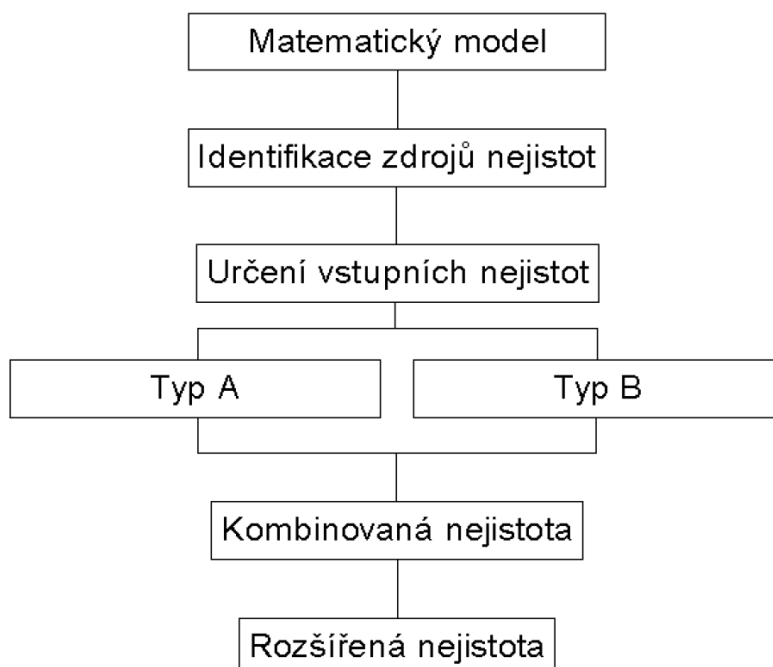


- nesprávný výběr vzorku měření,
- nepřesnost etalonů či referenčních materiálů,
- nevhodné zaokrouhlování výsledků.

### ***Postup stanovení nejistot***

nejistota měření může být popsána několika různými způsoby. Níže je popsán široce používaný postup, dle filosofie GUM [12], což je postup používaný například akreditačními orgány [3].

Proces stanovení rozšířené nejistoty měření lze shrnout v několika po sobě následujících krocích, jejichž sled je vyobrazen na obrázku 2 (tento postup může být přizpůsoben individuálním potřebám řešeného úkolu) [11].



Obrázek 2: schéma stanovení rozšířené nejistoty měření [11].

### **3.2.5 Druhy nejistot**

V praxi se rozlišují následující základní druhy nejistot měření [11]:

- *standardní nejistota typu A* ( $u_A$ ),
- *standardní nejistota typu B* ( $u_B$ ),
- *kombinovaná standardní nejistota* ( $u_C$ ),
- *rozšíření nejistota* ( $U$ ).

### Standardní nejistota typu A ( $u_A$ )

do této kategorie patří složky nejistoty stanovené pouze na základě statistického zpracování naměřených dat. Při opakovaném měření veličiny  $Y$  získáme  $n$  hodnot ( $y_1, y_2, \dots, y_n$ ). Hodnota nejistoty typu A je rovna výběrové směrodatné odchylce výběrového průměru [11].

Vzorec pro výpočet výběrového průměru  $\bar{y}$  [11]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.5)$$

kde:

$i$  ..... číslo měření,

$n$  ..... celkový počet měření,

$y_i$  .....  $i$ -tá naměřená hodnota veličiny  $Y$ .

Vzorec pro výpočet nejistoty typu A [2]:

$$u_A = s_{\bar{y}} = \frac{s_y}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.6)$$

Výběrová směrodatná odchylka  $s_{\bar{y}}$  popisuje, jak moc jsou naměřené hodnoty rozptýleny kolem výběrového průměru  $\bar{y}$ . Výběrová odchylka a průměr se pro stanovení nejistoty typu A používají z toho důvodu, že počet hodnot z měření představuje pouze malý výběr z prakticky nekonečného množství hodnot [13].

Vztah (3.6) platí pouze v případě, že je celkový počet měření  $n \geq 10$ . Vyhodnocujeme-li ale měření s menším počtem opakování, je nutné zavést korekci, která zohledňuje menší počet měření zavedením koeficientu  $k_S$ , který vychází ze Studentova rozdělení pravděpodobnosti a je závislý na počtu opakování  $n$  (viz vzorec 3.7 a tabulka 1) [2]:

$$u_A = k_S \cdot s_{\bar{y}}, \quad (3.7)$$

Tabulka 1: závislost hodnoty koeficientu  $k_S$  na počtu měření [2].

Celkový počet opakování – $n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Koeficient – $k_S$	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

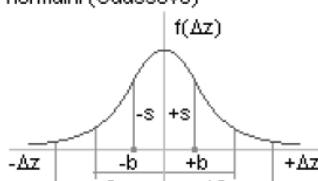
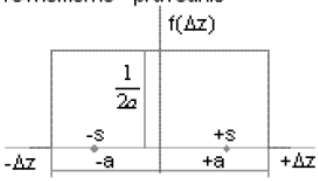
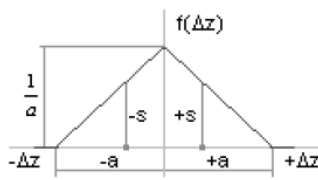
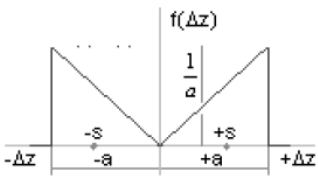
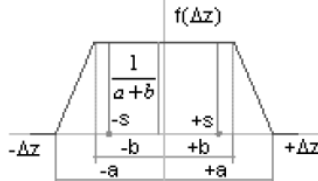
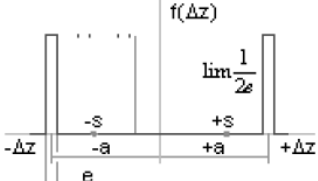
### Standardní nejistota typu B ( $u_B$ )

složky standardní nejistoty B jsou stanoveny jinak než statistickým vyhodnocováním opakovaných měření a nejsou tedy závislé na počtu měření [11]. Vychází se z odborných zkušeností pracovníka, který měření provádí a vyhodnocuje. Složky nejistoty mohou být odvozeny na základě [13]:

- údajů z předchozích měření,
- zkušeností s chováním a vlastnostmi použitých materiálů a zařízení nebo jejich obecné znalosti,
- vlivů podmínek prostředí, za jakých bylo měření provedeno a jejich změn,
- údajů od výrobce měřicího zařízení,
- vlivů použitých měřících přístrojů, etalonů a vybavení,
- vlivů nejistot převzatých z příruček, norem a jiných dokladů,
- vlivů nejistot stanovených v kalibračních listech, certifikátech apod.

Postup při určování standardní nejistoty typu B [2]:

1. vytipují se možné zdroje nejistot  $z_1, z_2, \dots, z_n$ ,
2. pro každý z vytipovaných zdrojů se odhadne maximální rozsah změn  $\pm \Delta z_{\max,j}$  (hodnota musí být dostatečně velká, aby pravděpodobnost jejího překročení byla minimální),
3. odhadne se pravděpodobnostní rozdělení, které nejlépe popisuje odchylky  $\Delta Z$  v intervalu  $\pm \Delta z_{\max,j}$  a z tabulky rozdělení pravděpodobností (obrázek 3) se odečte součinitel  $\chi$ ,

Rozdělení	$z_{\max}$	$\chi$	Rozdělení	$z_{\max}$	$\chi$
normální (Gaussovo) 	a	3	rovnoměrné - pravoúhlé 	a	$\sqrt{3}$
trojúhelníkové (Simpsonovo) 	a	$\sqrt{6}$	bimodální - (trojúhelníkové) 	a	$\sqrt{2}$
lichoběžníkové 	a	2,32 $b = \frac{a}{3}$	bimodální (Diracovo) 	a	1
	a	-2,19 $b = \frac{a}{2}$			
	a	-2,04 $b = \frac{2a}{3}$			

Obrázek 3: tabulka definující součinitele  $\chi$  [11].

4. dle vzorce (3.8) se určí všechny zdroje nejistot  $u_{z_j}$ , (příspěvatelé k  $u_B$ ),

$$u_{z_j} = A_j \cdot \frac{\Delta z_{\max,j}}{\chi}, \quad (3.8)$$

kde  $\chi$  je součinitel vycházející ze zákona rozdělení a  $A_j$  je koeficient citlivosti. Přepočítání pomocí koeficientu citlivosti se provádí proto, že odhadnuté nejistoty z jednotlivých zdrojů  $Z_j$  ovlivňují nejistotu naměřené veličiny a tvoří její složku. Pro koeficient citlivosti  $A_j$  platí následující vztah [11]:

$$A_j = \frac{\partial X}{\partial z_j}, \quad (3.9)$$

kde  $X$  je měřená veličina a  $z_j$  zdroj nejistoty. V případě, že  $u_{z_j}$  je vyjádřeno v hodnotách měřené veličiny, bude  $A_j = 1$ ,

5. výsledná standardní nejistota typu B  $u_B$  je dána vztahem (3.10) [2]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{z_j}^2}, \quad (3.10)$$

kde  $u_B$  je výsledná nejistota typu B a  $m$  je celkový počet měření.

#### **Kombinovaná standardní nejistota ( $u_C$ )**

dle vztahu (3.11),  $u_C$  slučuje nejistoty typu A a B do jedné [11]:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (3.11)$$

v praxi se předpokládá, že výsledné hodnoty měřené veličiny mají přibližný tvar normálního rozdělení. Kombinovaná standardní nejistota měření pokrývá zhruba 68,27 % možných variant výsledků, což je z metrologického hlediska zcela nedostačující, a proto se jako součást výsledku měření uvádí rozšířená nejistota.

### *Rozšířená nejistota ( $U$ )*

používá se pro určení intervalu okolo výsledku měření, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází výsledek měření. Výpočet  $U$  je definován, dle vztahu (3.12) [2]:

$$U = k \cdot u_C, \quad (3.12)$$

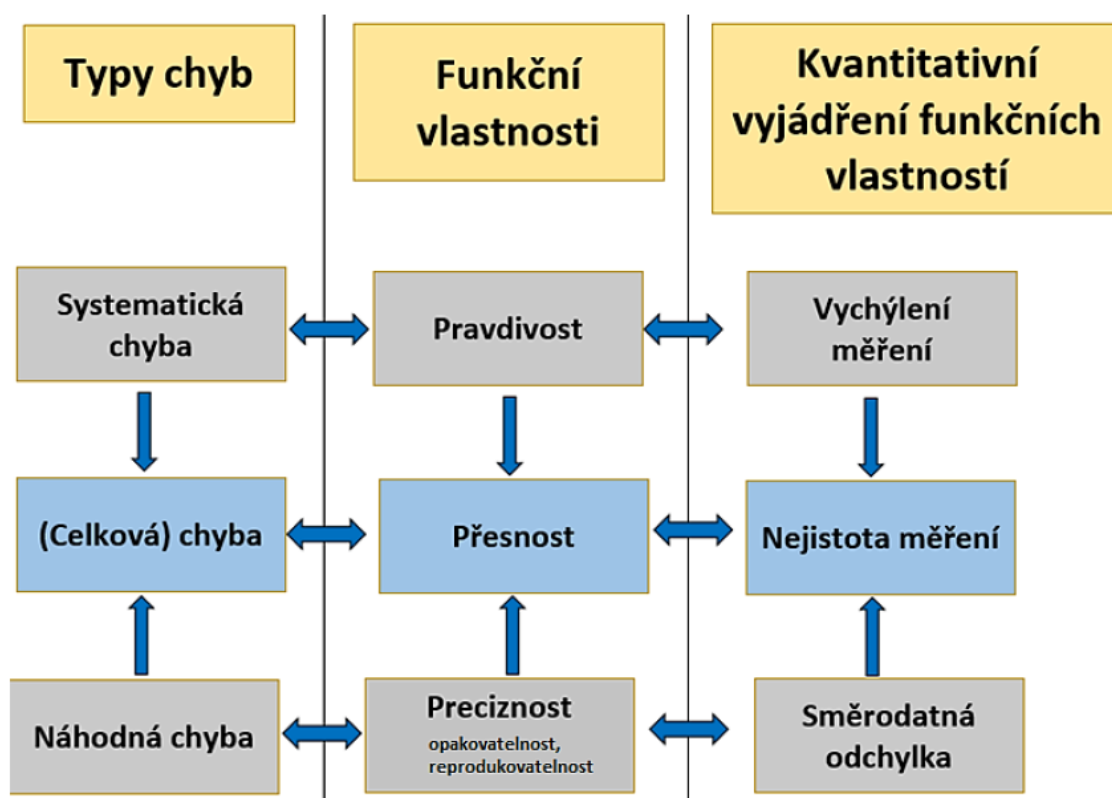
kde  $k$  je koeficient rozšíření (nebo též krytí), který se určí na základě požadované konfidence výsledku. Tabulka 2 zobrazuje základní doporučené koeficienty  $k$  včetně pravděpodobnosti pokrytí pro normální rozdělení [2].

*Tabulka 2: základní doporučené koeficienty rozšíření [2].*

Koeficient rozšíření – $k$	Pravděpodobnost pokrytí [%]
<b>1</b>	68,27
<b>1,96</b>	95
<b>2</b>	95,45
<b>3</b>	99,73

### 3.3 Hodnocení výsledků měření

V kapitole 3.2 byly vysvětleny základní metrologické pojmy, tato kapitola dále čtenáře seznámí se způsobem, jakým interpretovat výsledky měření v praxi. Předpokladem je znalost specifikace použití měřicího zařízení a pracovních podmínek, ve kterých zařízení pracuje. Také je třeba stanovit, jaké výstupy z měření jsou očekávány a s jakou přesností. Hodnocení výsledků měření je úzce spjato s pojmy přesnost (preciznost a správnost) a nejistota měření, obrázek 4 poslouží k lepšímu objasnění jejich návazností [14].



Obrázek 4: návaznost mezi přesností a nejistotou měření [14].

Jak je patrné z levé části obrázku 4, celková chyba měření se skládá z chyby systematické a náhodné. Lze ji definovat jako rozdíl mezi naměřenou a referenční hodnotou měřené veličiny. Přesnou hodnotu celkové chyby nelze nikdy přesně definovat, proto se v praxi pracuje pouze s jejím odhadem [14].

Dále obrázek 4 připomíná poznatek z podkapitoly 3.2.2, kde bylo zmíněno, že přesnost měření je složena ze dvou složek, pravdivosti (správnosti) a preciznosti měření. Pravdivost je kvantifikována pomocí vychýlení měření, tj. rozdíl mezi referenční a opakovaně naměřenou hodnotou (bias) a preciznost pomocí směrodatné odchylky. Tyto dva pojmy lze společně zahrnout jako přispěvatele nejistoty měření, kterou lze považovat za kvantitativní vyjádření přesnosti měření [14].

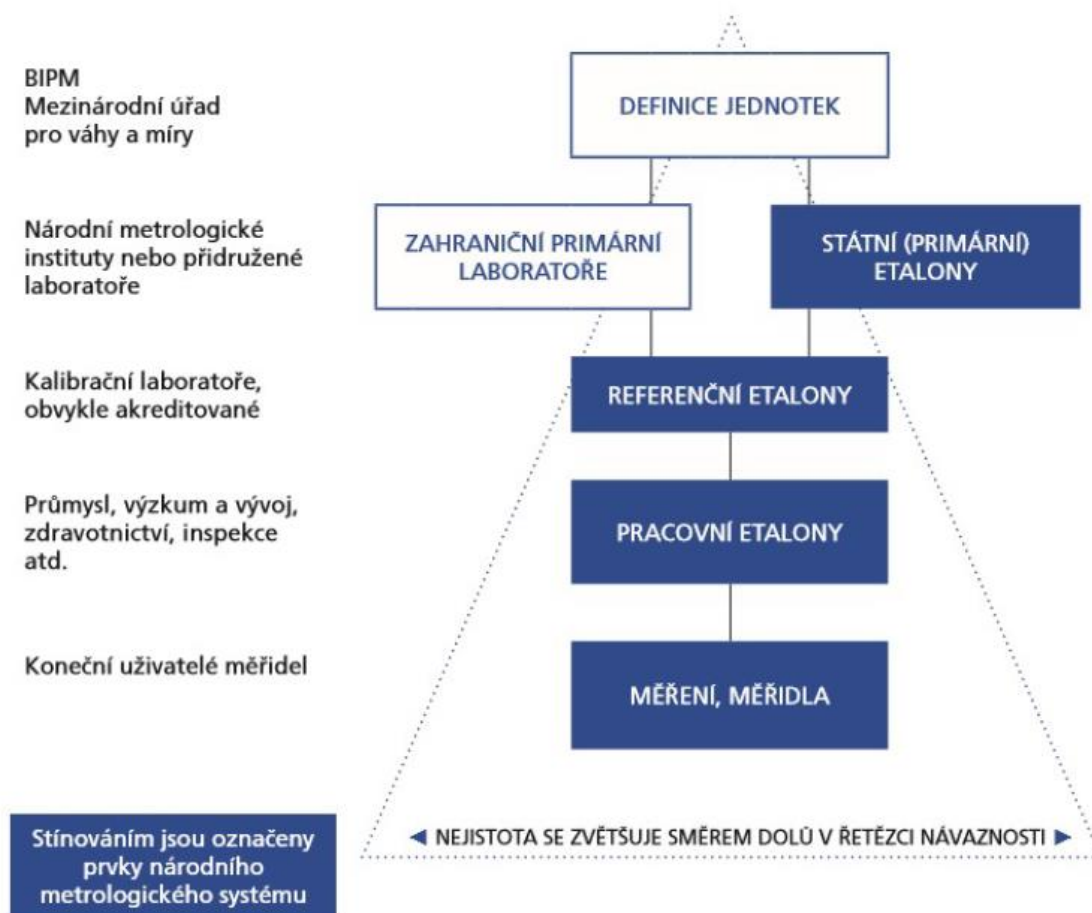
### 3.4 Metrologická návaznost

V moderní době je kladen velký důraz na co nejvyšší přesnost měření a měřících systémů. Jedním ze základních prvků metrologické návaznosti, která je pro stanovení přesnosti měřícího stroje nezbytná, je kalibrace. Tato kapitola je věnována právě objasnění problematiky metrologické návaznosti a kalibrace.

#### *Metrologická návaznost*

definice dle VIM zní, že metrologická návaznost je: „vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovaný nepřerušovaný řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření“ [4].

Obrázek 5 popisuje řetězec návazností s definovanými nejistotami, který zobrazuje, že výsledek měření či hodnota etalonu je vztažena k referenci vyšší úrovně nakonec až k primárním etalonům [3].



Obrázek 5: schéma řetězce metrologické návaznosti [3].

Metrologickou návaznost na nejvyšší mezinárodní úrovni v Evropě zajišťují především akreditované evropské laboratoře a národní metrologické instituty [11].

### ***Kalibrace***

presná definice kalibrace dle TNI 01 0115:2009 Mezinárodního metrologického slovníku zní: „kalibrace je činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace.

#### **Poznámka 1.**

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

#### **Poznámka 2.**

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

#### **Poznámka 3.**

Samotný první krok ve výše uvedené definici je často chápán jako kalibrace“ [4].

### ***Justování měřicího systému***

„je soubor činností provedených na měřicím systému tak, aby poskytoval předepsané indikace odpovídající daným hodnotám veličiny, která má být měřena“ [4].

### ***Ověření kalibrace***

tento pojem nemá oficiální definici, ale lze si jej představit jako činnost, která následuje po kalibraci. V případě, že nejsou splněny konkrétní požadavky měřidla, dochází k opakování procesu kalibrace a jejího následného ověření. Do kategorie pojmu ověření kalibrace lze zařadit zkoušku funkčních a metrologických parametrů měřidla, které má mít po provedené kalibraci [10].

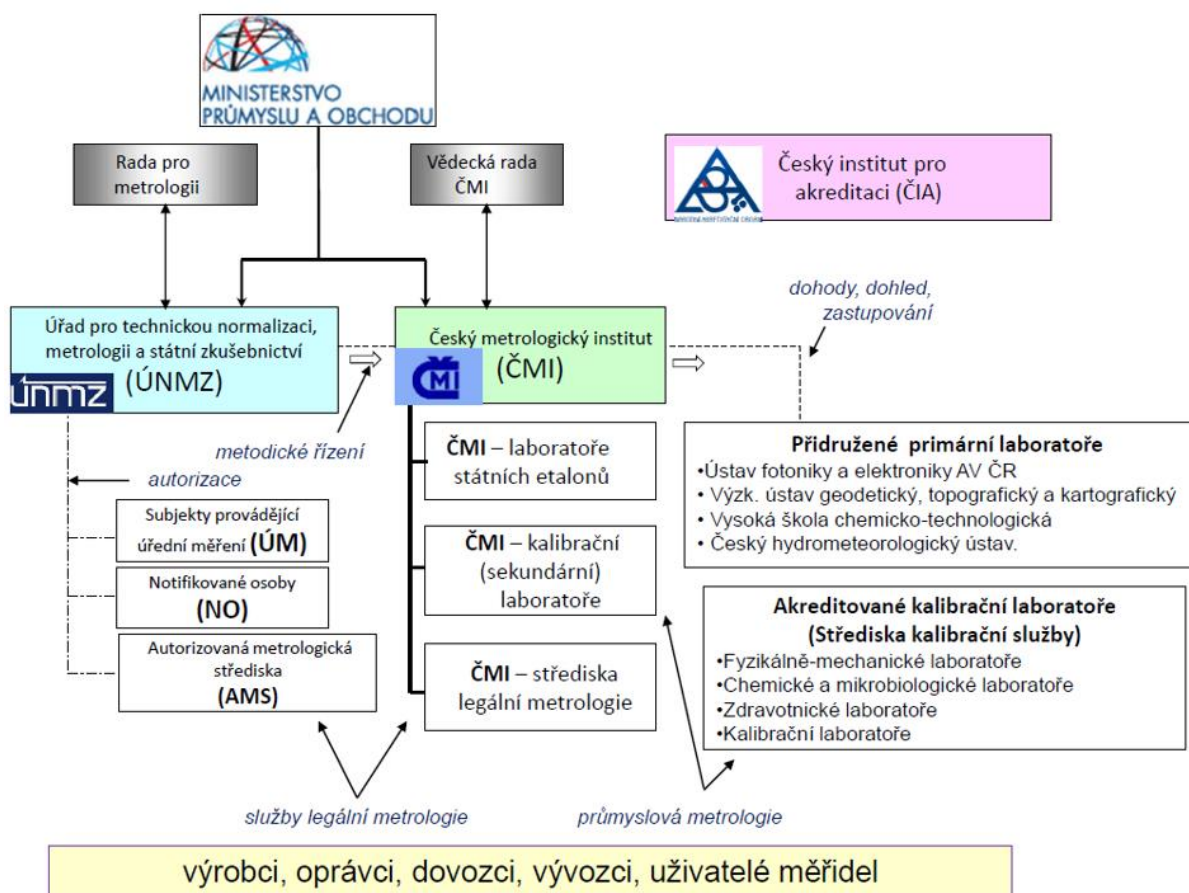


### 3.5 Národní metrologický systém České republiky (NMS)

NMS je systém, který zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření v daném státě, a to skrze soustavy technických prostředků a zařízení, technických předpisů, práv a povinností správních orgánů a právnických osob nebo podnikajících fyzických osob [3].

Základními prvky NMS v České republice jsou spotřebitelé a obecná veřejnost (občané ČR nebo cizinci na území ČR), podnikatelské subjekty (výrobci a opravci měřidel) a další subjekty, které se podílejí na managementu, zabezpečování a rozvoji NMS [3].

Obrázek 6 zobrazuje schéma NMS České republiky.



Obrázek 6: schéma NMS České republiky [2].

#### Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO)

MPO je ústřední orgán české státní správy, jehož úlohou je zabezpečovat stanoviska uvedena v zákoně č. 20/1993 Sb., o zabezpečení výkonu státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví, ve znění pozdějších předpisů. V oblasti metrologie MPO řídí její státní politiku a koncipuje odpovídající legislativní akty, vypracovává nové koncepty pro rozvoj NMS ČR, řídí Český metrologický institut (ČMI) a Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) a má rozhodující slovo ve věci opravných prostředků proti rozhodnutí ÚNMZ [3].

### ***Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ)***

ÚNMZ byl zřízen zákonem vydaným Českou národní radou č. 20/1993 Sb., o zabezpečení výkonu státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví jakožto orgán státní správy pro předmětné činnosti a je organizační složkou státu v resortu MPO. Primárním úkolem ÚNMZ je zajišťovat úlohy stanovené v zákonech České republiky, které, jak z názvu úřadu vyplývá, upravují technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. ÚNMZ je dále pověřen zabezpečováním úkolů v oblasti technických předpisů a norem uplatňovaných v rámci členství ČR v EU a od roku 2009 je ÚNMZ pověřeno tvorbou, vydáváním a distribucí českých technických norem v souladu s odpovídajícími zákony [3].

### ***Český metrologický institut (ČMI)***

ČMI je národní metrologický institut ČR podřízený MPO. Úlohou ČMI je plnit funkce, jenž spadají do působení státní správy v metrologii v souladu se zákonem č. 505/1999 Sb. Zákon o metrologii, který je základním výkonným orgánem metrologického systému v ČR. Činnosti ČMI jsou [3]:

- certifikace referenčních materiálů,
- výzkum a uchovávání státních etalonů a přenos hodnot měřících jednotek na měřidla nižší přesnosti,
- kontrola státních měřidel,
- fungování jako státní dozor autorizovaných metrologických středisek a subjektů, které provádějí úřední měření, opravují stanovená měřidla či provádějí montáž měřidel u jejich uživatelů,
- poskytování odborných služeb v oblasti metrologie.

ČMI je zplnomocněn k povolení předběžné výroby před validací typu měřidla a k povolení krátkodobého používání stanoveného měřidla v čase mezi ukončením jeho opravy a omezením této doby. Dále ČMI ohlašuje orgánům Evropských společenství či kompetentním státním orgánům informace o vydání, změnách, zrušení nebo omezení certifikátů týkajících se schvalování měřidel [11].

Působení ČMI je možno vztáhnout ke třem základním kategoriím metrologie v závislosti na složitosti a požadavků na přesnost, jak již bylo popsáno v kapitole 3.1.1, tj. *vědecká metrologie, legální metrologie a průmyslová metrologie* [3].

### *Český institut pro akreditaci (ČIA)*

ČIA je pověřen poskytovat akreditační služby v oblastech své působnosti. Služby ČIA je možno využívat jak v oblastech regulovaných právními předpisy, tak i ve vztazích smluvních [3].

Cílem ČIA je vyvíjet a zabezpečit akreditační systém České republiky v souladu s evropskými normami, realizovat akreditace kalibračních a zkušebních laboratoří spolu s propůjčováním, odebráním a obměňováním osvědčení o akreditaci, provádění hodnocení žadatelů o akreditaci a zpracovávání a vydávání předpisů, pokynů a příruček z oblastí své působnosti [11].

### *Autorizovaná metrologická střediska (AMS)*

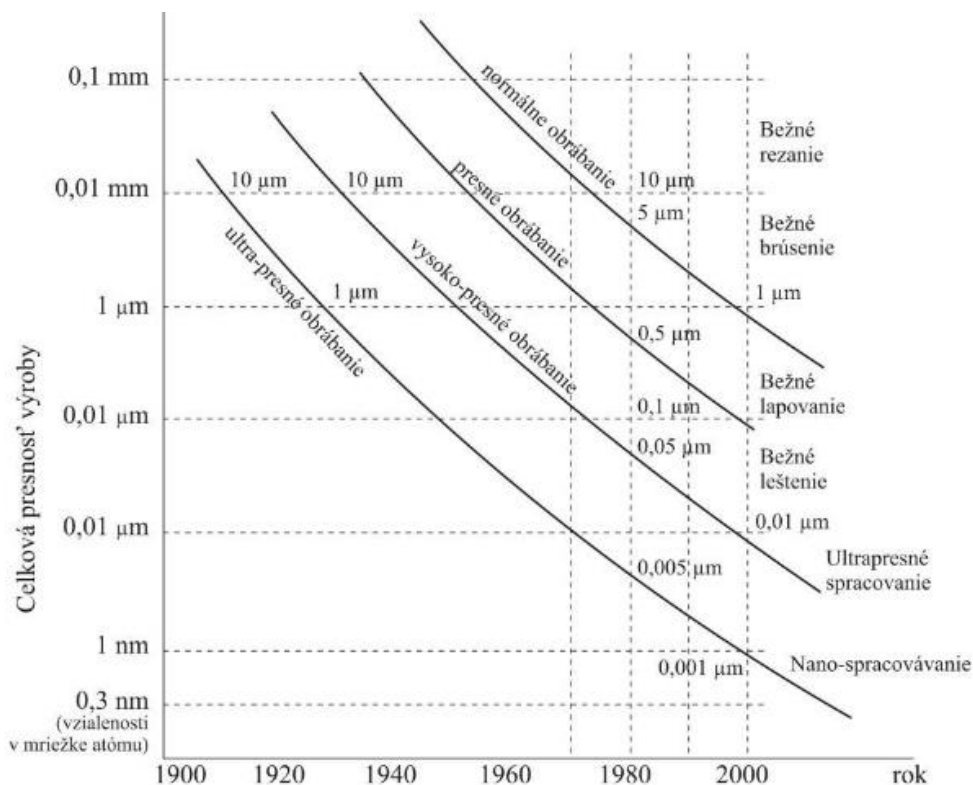
AMS jsou subjekty, jež byly ÚNMZ autorizovány k ověřování stanovených měřidel. Celkový počet AMS je v současnosti zhruba 250, která každý rok ověřují více než 10 milionů stanovených měřidel. Tato střediska se projeví jako velmi přínosná, a proto s nimi NMS ČR počítá i v budoucnu [3].

### 3.6 Souřadnicové měřicí stroje CMM

CMM (coordinate measuring machine), česky SMS (souřadnicové měřicí stroje) se poprvé objevili na začátku 60. let minulého století, jejich příchod byl velkým zlomem napříč širokým spektrem průmyslových odvětví a staly se neodmyslitelnou součástí výrobních procesů. Jejich hlavní výhody tkví v praktičnosti a univerzálnosti měření. CMM jsou schopny velmi přesně a pohotově zaznamenávat data a vyhodnocovat je. Kombinace měřicí sondy, ať už kontaktní či bezkontaktní, a zpracování dat pomocí softwaru činí z CMM strojů ekonomicky velmi výhodnou měřicí technologii. Moderní průmysl aktuálně vyrábí přes šest tisíc CMM strojů ročně a dodatečně vybavuje a upgraduje další desítky tisíc [15].

Úplně poprvé byl CMM stroj představen roku 1959 na mezinárodním veletrhu obráběcích strojů v Paříži, výrobcem byla britská firma Ferranti (ta roku 1951 vyvinula první komerční počítač pro širokou veřejnost – Ferranti Mark 1). Dále se během 60. let do výroby komerčních souřadnicových měřicích strojů zapojilo několik velkých společností z nejrozvinutějších zemí té doby, včetně USA, Japonska, Německa a Francie. Poté jejich používání ve firmách rychle nabralo tempo. Další zlomový okamžik nastal v roce 1970, kdy spoluzakladatel společnosti Renishaw, Sir David McMurtry, vynalezl sondu Touch Trigger Probe<sup>1</sup>, která spustila revoluci a otevřela svět přesným a automatickým měřením samostatných komponent anebo i celých sestav [15].

Obrázek 7 zobrazuje, jak se s časem vyvíjel trend požadavků na výrobní přesnost.



Obrázek 7: vývoj trendu celkové přesnosti výroby v čase [1].

<sup>1</sup> česky – spouštěcí dotyková sonda

### 3.6.1 Základní mechanické prvky CMM

Základní konstrukce CMM se skládá z rámu, pracovní desky, stojanu, portálu, mostu, pinoly a vedení [1].

#### *Rám*

je to svařovaná konstrukce, která nese ostatní prvky CMM. U mostového CMM je rám nahrazen deskou umístěnou na podlaze [1].

#### *Pracovní deska*

u CMM se nejčastěji pracovní desky vyrábějí buďto z granitu nebo žuly, případně z litinového odlitku. Pracovní deska je upevněna na čtyřech základních podpěrách. Horní část desky bývá broušená a opatřena děrami se závity, které za pomoci šroubů a upínek slouží k upevnění měřených kusů na pracovní ploše [16]. Mezi základní vlastnosti materiálu pracovní desky patří vysoká životnost, objemová stálost, co nejnižší tepelná roztažnost, korozivzdornost a opravitelnost při případné poruše [1].

#### *Sloupové, portálové a mostové konstrukce*

jsou zkonstruovány jako velmi tuhé svařence s rozměrovou a tvarovou stálostí. Portál CMM bývá zkonstruován tak, aby byl zajištěn minimální průhyb při pohybu pinoly [1].

#### *Pinola*

jedná se o tyč vyrobenou z duralu, litiny nebo keramiky, mající profil H [1]. Pro zajištění přesnosti měření, kdy je pinola v horizontální poloze, je nutné její mechanické vyvažování pomocí dvou souměrných závaží, vlastní hmotnost pinoly a snímacího zařízení totiž způsobují ohyb [16].

#### *Uložení pohyblivých částí CMM (vedení)*

musí být provedeno tak, aby se pohyblivé prvky stroje mohly lehce a přesně pohybovat, bez trhavých pohybu, a to i při nízkých posuvných rychlostech. Pro zajištění minimálního tření a opotřebení se dříve používali kluzná uložení, která jsou z dnešního pohledu poměrně drahá a složitá [16].

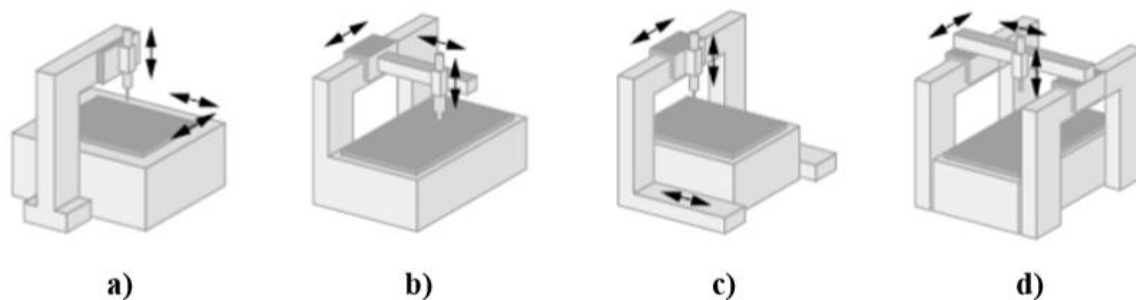
Vhodnější variantou je aerostatické uložení s plynným třením. Výhodou je velmi nízké tření, minimalizace trhavého pohybu a značná tuhost [1]. Nevýhodou je pak obtížné čištění vzduchu a nižší korozivzdornost [16].

Jako nejvhodnější řešení se jeví použití valivého uložení (na válečcích nebo kuličkách). Výhodou je velmi malé tření, vysoká rovnoměrnost pohybů, korozivzdornost a značná tuhost při správném zakrytování. [16].

### 3.6.2 Typy konstrukcí CMM

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, CMM se skládá z pracovní desky a měřícího mechanismu, ten je vybaven sondou, která „otřukává“ měřenou součást a identifikuje její polohu. Souřadné osy, ve kterých CMM pracuje, jsou si navzájem kolmé, rovnoběžné s pracovní deskou v případě horizontálních os a kolmé s pracovní deskou v případě vertikální osy [16].

Norma ČSN EN ISO 10 360-1 rozlišuje čtyři možná uspořádání CMM, a to stojanové, výložníkové, portálové a mostové [1].



Obrázek 8: typy konstrukce CMM [1].

#### ***Stojanový typ (obrázek 8a)***

základem je nosný sloup, posuvné horizontální rameno a snímací hlava. Měřený objekt je umístěn na stole, který se může pohybovat v osách  $x$  a  $y$ . Pinola se pohybuje v ose  $z$ . CMM tohoto typu se řadí mezi ty nejpřesnější a je vhodné pro měření malých rozsahů. Základní charakteristikou tohoto stroje je tuhá úhlová konstrukce, která umožňuje snadný přístup k měřenému objektu [1].

#### ***Výložníkový typ (obrázek 8b)***

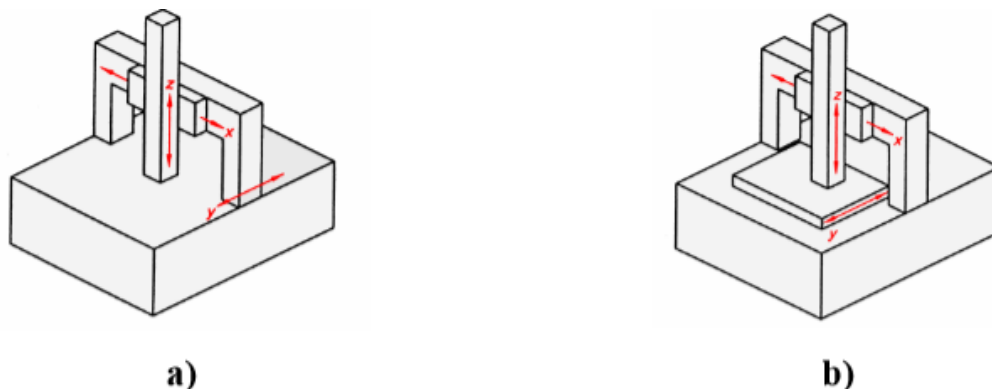
konstrukce obsahuje konzolové rameno s pojízdou pinolou, která se pohybuje ve směru osy  $y$  a k ní kolmé ose  $x$ . Vysunutí pinoly od vodící plochy je ve směru osy  $y$ , což způsobuje, že je zapotřebí její vyvažování. Aby byla zajištěna dostatečná tuhost konstrukce je osa  $y$  poměrně krátká [1]. Výložníkové typy CMM nevyžadují nijak velký pracovní prostor, bývají používány pro měření menších a středně velkých součástí [16].

#### ***Portálový typ (obrázek 8c)***

vyznačuje se vysokou tuhostí konstrukce, a tedy i vysokou přesností měření. Používá se zejména pro měření středních a větších objektů. Rozlišují se dvě varianty portálových CMM [1]:

*pohyblivý portál* – pohyb je vykonáván pohyblivým portálem, pracovní stůl je pevně připevněn (obrázek 9a),

*pevný portál* – pohyb vykonává pohyblivý pracovní stůl v ose  $x$ , portál je nepohyblivý (obrázek 9b).



Obrázek 9: typy konstrukce portálových CMM [1].

### **Mostový typ (obrázek 8d)**

vyznačuje se svou velikostí, bývá používán na ty největší rozsahy měření (v ose  $x$  je možno naměřit více než 24 m). Nejčastěji bývá využíván v leteckém a automobilovém průmyslu [1].

### **3.6.3 Snímací systém CMM**

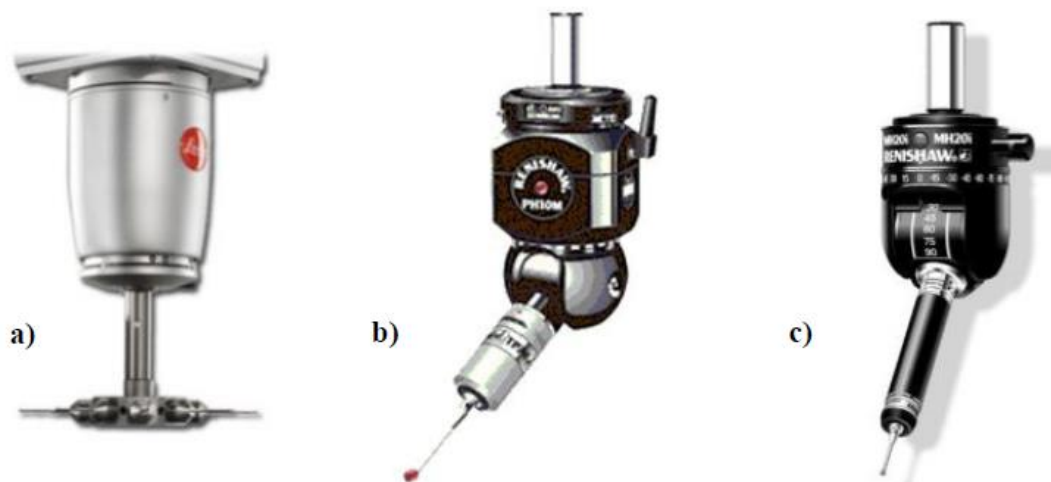
Důležitou částí CMM je snímací systém. Jeho úkolem je zaznamenávání bodů měřené součásti, které jsou za pomoci měřicího softwaru vyhodnoceny, výstupem je číselná informace o měřené veličině. Snímací systém je propojený s pinolou a je tvořen: snímací hlavou, prodloužením snímací hlavy, systémem výměny snímací hlavy, snímacím dotykem, systémem výměny snímacího dotyku a prodloužením snímacího dotyku. Snímací systémy CMM se obecně dělí na dotykové a bezdotykové [1].

Součástí této diplomové práce je stanovení přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC Carat za použití dotykového snímacího systému, tudíž další část této kapitoly bude věnována pouze bližšímu popisu dotykových snímacích systémů.

### **Hlavice dotykového snímacího systému**

dělí se na pevné a indexovatelné. Pevné hlavice (obrázek 10a) dosahují vyšší přesnosti měření, ale není možno je v prostoru natáčet. Indexovatelné hlavice jsou používány pro přesné natáčení snímacích sond v jednotlivých osách za účelem zajištění požadované polohy sondy a dělí se na [1]:

- *motorické* – jsou určeny k polohování měřicí sondy, a tedy snímání v různých úhlech (obrázek 10b),
- *manuální* – jsou nastavovány manuálně a jsou schopny provádět měření i komplikovaných tvarů (obrázek 10c).



Obrázek 10: typy snímacích hlavic [1].

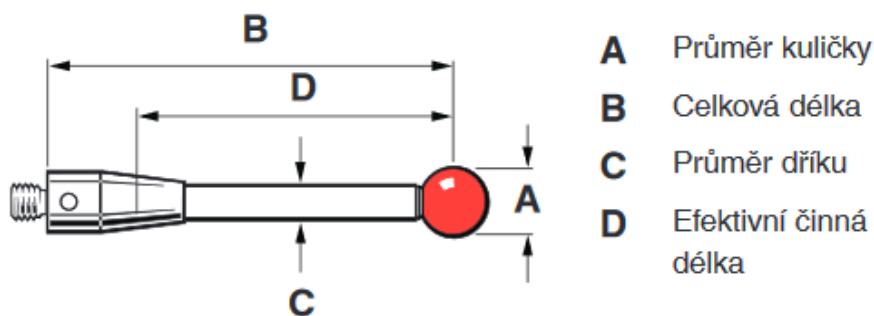
### 3.6.4 Dotykové snímací systémy

Jak z názvu vyplývá, princip dotykových měřících systémů je založen na kontaktu sondy a měřené součásti. Jejich kontakt zapříčiňuje sepnutí v mechanismu sondy a vygenerování signálu, který následně umožňuje provedení vlastního měření [17]. U CMM s CNC řízením jsou nejvíce používány následující snímací systémy [1]:

- *systemy snímacího typu* – zde je použita skenovací sonda, jejíž měřící hrot je v neustálém kontaktu s povrchem měřeného objektu během měření,
- *systemy spínacího typu* – v okamžiku, když se sonda dotkne měřeného objektu vydá signál, pohyb sondy je zastaven a je odečtena a zaznamenána její aktuální poloha.

#### Měřící dotyky

zprostředkovávají kontakt mezi měřenou součástí a měřící sondou. Druh a rozměry dotyku jsou voleny dle specifikací měření. Důležitými charakteristikami měřících dotyků je jejich tuhost a dokonalý tvar. Obrázek 11 definuje základní rozměry měřícího dotyku. Celková délka je vzdálenost od čela závitu po střed kuličky, efektivní činná délka udává maximální hloubku měření, kdy je zaručeno, že nedojde ke kolizi stopky doteku s měřenou součástí [17].



Obrázek 11: schéma a rozměry měřícího dotyku [1].



Pro zajištění co nejvyšší přesnosti měření je nutné, aby dotyk byl co nejkratší a bylo tedy zamezeno jeho ohybu v průběhu měření. Dále je nutné volit co nejmenší počet nástavců, jelikož každý z nich je dalším zdrojem nejistot. V neposlední řadě je vhodné použít co největší možný průměr kuličky a tím pádem i dráku (stopky) dotyku pro zajištění celkově vyšší tuhosti mechanismu [1].

### ***Materiál kuličky***

#### *Rubín*

používá se pro převážnou část měřících aplikací, a to pro své optimální materiálové vlastnosti: velmi hladký povrch, značná pevnost v tlaku a vysoká odolnost vůči mechanickému poškození. Syntetický rubín je tvořen z více než 99 % oxidem hlinitým a jedná se o jeden z nejtvrdších materiálů (na Mohsově stupnici tvrdosti materiálů se označuje číslem 9) [17].

V praxi se lze setkat jen s málo aplikacemi, při kterých by použití rubínové kuličky nebylo vhodné. Jsou však známy dva případy, kdy se doporučuje použití měřících kuliček z jiných materiálů [17]:

1. skenování hliníkového povrchu, kde za použití rubínové kuličky dochází k usazování hliníku na rubínové kuličce (tzv. adhezní otěr),
2. skenování litinového povrchů, kde při vzájemném působení kuličky a měřeného povrchu dochází k poškození kuličky otěrem.

#### *Nitrid křemíku*

nitrid křemíku má mnoho společných vlastností s rubínem. Je to velmi tvrdý materiál, odolný proti opotřebení, který lze pomocí leštění opracovat do vysoce přesných kulovitých tvarů s minimální tvarovou odchylkou [17].

Je to vhodný materiál pro měření hliníkových povrchů, protože při jejich vzájemném působení nedochází k adheznímu otěru. Velmi nevhodná je ale jeho aplikace na ocelové povrchy, kde je naopak míra opotřebení otěrem značná [1].

#### *Oxid zirkoničitý*

je to velmi tvrdý keramický materiál, jehož vlastnosti lze opět přirovnat k rubínu. Díky svým vlastnostem je ideálním materiálem pro skenovací aplikace u litinových povrchů [17].



Obrázek 12: materiály kuliček: a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý [1].

## ***Materiál kuličky***

### *Ocel*

používá se konkrétně nemagnetická nerezová ocel, a to pro kuličky o průměru minimálně 2 mm a o délce dřívku do 30 mm, v tomto rozmezí je poměr hmotnosti a tuhosti ideální (není snížena tuhost závitovým spojem) [17].

### *Karbid wolframu*

tento materiál je optimálním řešením pro zajištění maximální tuhosti a minimálního průměru dřívku (průměr kuličky do 1 mm, délka dřívku do 50 mm) [17].

### *Keramika*

velkou výhodou keramiky je ochrana sondy proti havárii, v případě kolize se dřík roztrhne a nedojde tedy k závažnějšímu poškození měřicího systému. Keramika se nejčastěji používá pro aplikace, kde průměr kuličky je nad 3 mm a délka dřívku nad 30 mm, výsledná tuhost je srovnatelná s ocelí [17].

### *Uhlíková vlákna*

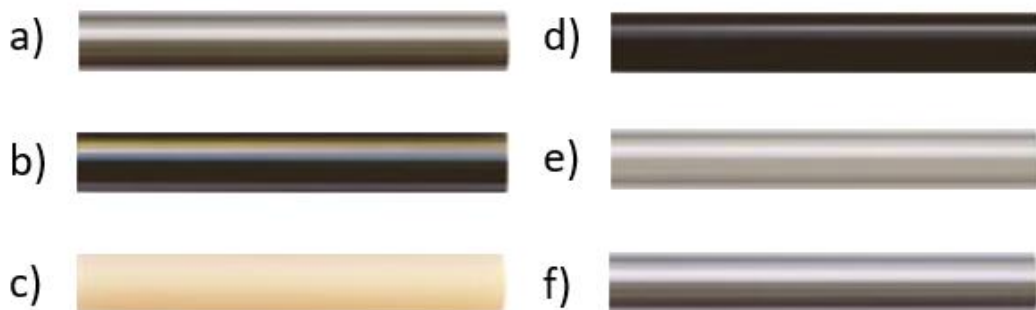
hmotnost dřívku z uhlíkových vláken je o 20 % menší než u dřívku z karbidu wolframu, je tedy vhodným materiálem pro delší doteky [17]. Použití uhlíkových vláken je ideálním řešením pro velmi přesné aplikace, jelikož tento materiál vykazuje značné tlumení vibrací a jeho koeficient tepelné roztažnosti je minimální [1].

### *Hliník*

velikou výhodou hliníku je jeho nízká hmotnost. Je to vhodný materiál pro výrobu prodloužení. Nevýhodou je jeho značná roztažnost vlivem teploty [17].

### *Titan*

ve srovnání s hliníkem je titan tepelně stálý, má vysokou ohybovou tuhost a je rovněž velice lehký. Je to vhodný materiál pro dlouhá prodloužení [17].



Obrázek 13: materiály dřívků: a) ocel, b) karbid wolframu, c) keramika, d) uhlíková vlákna, e) hliník, f) titan [17].

### 3.7 Kalibrace portálového CMM

Cílem této kapitoly je obecný popis kalibrace portálového CMM s dotykovým měřícím systémem. Pojem kalibrace byl již definován v kapitole 3.4.

Níže popsaná metodika se zabývá jak vstupní přejímkou, tak i periodickou kalibrací. Předpokladem níže popsané metodiky kalibrace je použití pouze základních etalonů: koncové měrky, kontrolního kroužku a kontrolní koule [18].

#### 3.7.1 Obecné podmínky kalibrace

Kalibrace CMM bývá zpravidla prováděna za následujících podmínek [18]:

- teplota prostředí: ..... ( $20 \pm 2$ ) °C v laboratorních prostorech,
- změna teploty vzduchu ..... max. 1 °C/h,
- relativní vlhkost vzduchu ..... max. 80% RH,
- nekorozní prostředí.

Etalony je nutno temperovat po dobu minimálně 4 hodin na pracovní desce nebo v blízkosti CMM. Před zahájením a po ukončení měření je nutno změřit teplotu etalonů a použitých měřidel, popřípadě je možno měřit teplotu v průběhu měření tělískovým či digitálním teploměrem. Obdobným způsobem je měřena i vlhkost vzduchu [18].

#### ***Rozsah kalibrace***

1. *přejímková kalibrace* – slouží ke kontrole přesnosti CMM (tj. mezní chyby a nejistoty měření) a měřícího systému CMM, jestli ve skutečnosti odpovídá úrovni přesnosti udávané výrobcem,
2. *rekalibraci* – slouží k opakovanému kontrolování přesnosti CMM a měřícího systému uživatelem, do této kategorie je možno zahrnout kalibraci, jež je popsána v praktické části této diplomové práce,
3. *mezikontrola* – ta umožňuje uživateli kontrolovat zda-li CMM a měřící systém CMM v čase mezi pravidelnými rekaliбраčními kontrolami neztratili své metrologické vlastnosti [18].

#### ***Kontrola dodávky a příprava kalibrace***

při vstupní přejímce CMM, která musí proběhnout v souladu s příslušnými předpisy a postupy dané organizace, je nutno zkontrolovat shodu dodané technické dokumentace s dokumentací uvedenou v kupní smlouvě. Zejména parametry jako typ a výrobní číslo, měřící rozsah, mezní chyba CMM, měřící software a požadavky na podmínky prostředí musí být řádně zkontrolovány. Dále je nutné odmastit pojezdy a měřítka (např. technickým benzínem), vizuálně překontrolovat stav měřících dotyků a jejich dřívků (rýhy na povrchu jsou nepřijatelné) a u CMM s CNC řízením připravit náležitý měřící software [18].

### 3.7.2 Postup kalibrace CMM

Obecně lze prohlásit, že kalibraci měřicího zařízení provádíme za účelem zhodnocení jeho výkonnosti (tj. přesnosti a měřících schopností). Kalibraci smí provádět pouze řádně proškolený personál, a to v podmínkách prostředí, které jsou definovány výrobcem [18].

#### *Kalibrace snímacího systému CMM*

je prováděna nejčastěji pomocí kalibrační koule, případně pomocí kalibračního kroužku. Kalibrují se všechny části snímacího systému, tj. měřící dotek, hlavice i vyhodnocovací software [18].

Přesný postup kalibrace se u každého stroje různí a je definován příloženou uživatelskou příručkou od výrobce stroje. Obecně lze proces kalibrace popsat následovně. Referenční bod, což zpravidla bývá kalibrační koule velmi přesných tvarů, je postupně nasnímán všemi měřicími sondami, které CMM stroj využívá. Následně jsou tyto přesně naměřené rozměry kalibrované kuličky zadány do měřicího softwaru a vyhodnoceny [17].

Celkový počet dotyků pro bodové měření se mění dle uživatelské příručky stroje, např. 5 až 6 bodů dle [17], 26 bodů dle [18]. Rozmístění měřících bodů bývá zpravidla orientováno na horní polovinu kalibrační kuličky, body jsou pravidelně rozmístěny od jejího rovníku až po pól [18].

### ***Kalibrace odměřovacího systému CMM***

jako etalon se u této části kalibrace nejčastěji používají koncové měrky. Obecně se doporučuje, aby nejdelší koncová měrka (dále jen KM) představovala alespoň  $\frac{2}{3}$  z délky nejdelší uhlopříčky měřicího prostoru, aby nejkratší KM neměřila více než 30 mm a aby se KM o délce větší než 100 mm upínaly na podpory ve vzdálenosti  $0,211 \cdot L$  od konců měrky, kde  $L$  je jmenovitá délka KM [18].

Před měřením se etalony za účelem temperování umístí na pracovní stůl, je vhodné se KM dotýkat pouze v látkových rukavicích, aby se zamezilo přenosu tepla. Při kalibraci se zpravidla používá 3 až 5 KM s pravidelným odstupňováním jejich délek, kdy na každé z nich je provedeno 3 až 10 měření. Měření se provádí v horní i dolní poloze pinoly a v různých částech pracovního prostoru CMM [18]. Tento zmíněný postup kalibrace délkových měření CMM je v souladu s normou ČSN EN ISO 10630-2 [19].

Vlastní postup měření [18]:

1. kalibrace snímacího zařízení,
2. vyrovnání souřadného systému stroje CMM dle umístění KM a definování směru měřené osy,
3. změření délky KM – buď manuálně nebo za použití měřicího softwaru, každé měření nutno 3 – 10krát zopakovat,
4. změna umístění KM – nejprve do příčné, poté do kolmé osy a zopakování postupu měření délky,
5. nejdelší použitelná KM je změřena nejprve ve všech čtyřech prostorových úhlopříčkách, poté v pravé i levé části podélné osy, a nakonec v horní i dolní části příčné osy CMM (pro kontrolu geometrie stroje),
6. naměřené hodnoty jsou zapsány do kalibračního protokolu, provede se vyhodnocení (maximální odchylka a opakovatelnost měření) a je vytištěn finální kalibrační protokol včetně nejistoty měření.

### ***Výsledek kalibrace***

po vyhodnocení měření a po porovnání zjištěné maximální odchylky s dovolenou tolerancí CMM je definován výsledek kalibrace a vystaven patřičný dokument, nejčastěji kalibrační list [18]:

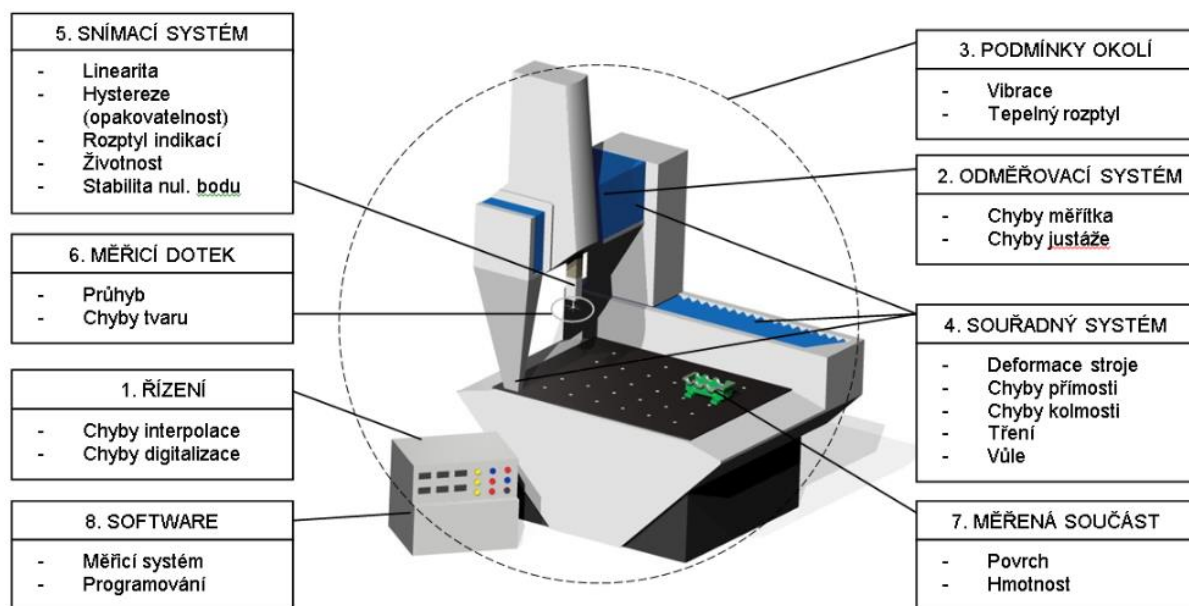
- *vyhovuje* – pokud jsou výsledky měření v toleranci definované výrobcem,
- *omezené použití* – některé z naměřených hodnot byly mimo definovanou toleranci, ale CMM ještě vyhovuje uživateli,
- *nevyhovuje* – naměřené výsledky mimo toleranci.

V obou zmíněných případech, kdy výsledek kalibrace není vyhovující, je nutné provést nápravná opatření, např. úprava korekcí měřicího softwaru.

### 3.7.3 Požadavky na přesnost CMM

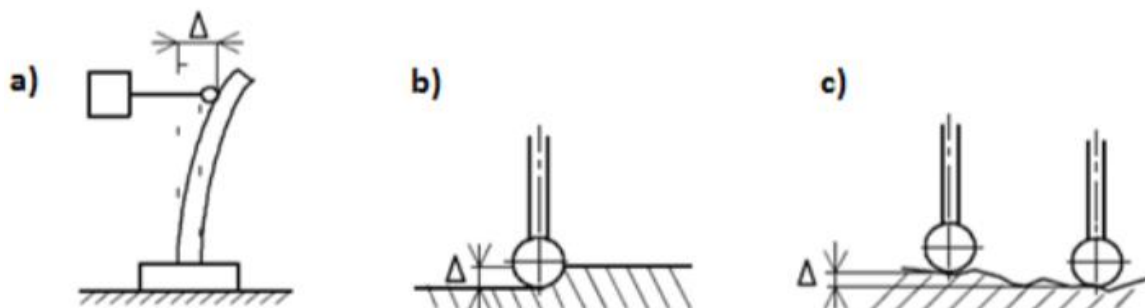
Přesnost měření je definována jako „těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny“ [4]. Jinými slovy je to rozdíl mezi tím co bylo a co mělo být naměřeno [20].

CMM, stejně jako žádné jiné měřidlo, není schopno měřit se stoprocentní přesností, navíc CMM stroje jsou velmi složitá zařízení skládající se ze značného množství konstrukčních dílů, které mohou být zdroji parciálních chyb při měření [1]. Obrázek 14 zobrazuje nejvýznamnější zdroje chyb při měření na CMM.



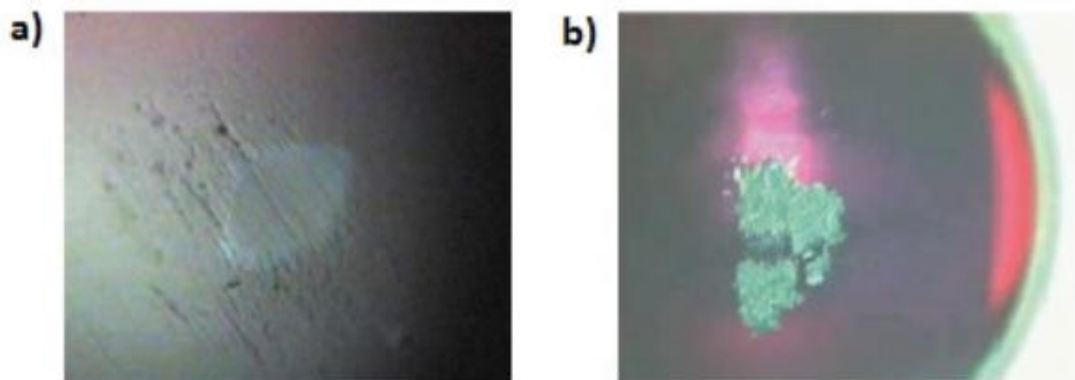
Obrázek 14: zdroje chyb při měření na CMM [20].

Přesnost měření na CMM je nejvíce ovlivněna teplotní roztažností materiálu měřeného objektu a atmosférickými podmínkami v průběhu měření. Přesnost měřicí sondy nejvíce ovlivňuje charakter měřeného objektu. Obrázek 15 znázorňuje možné chyby, které se mohou vyskytnout během měření [1].



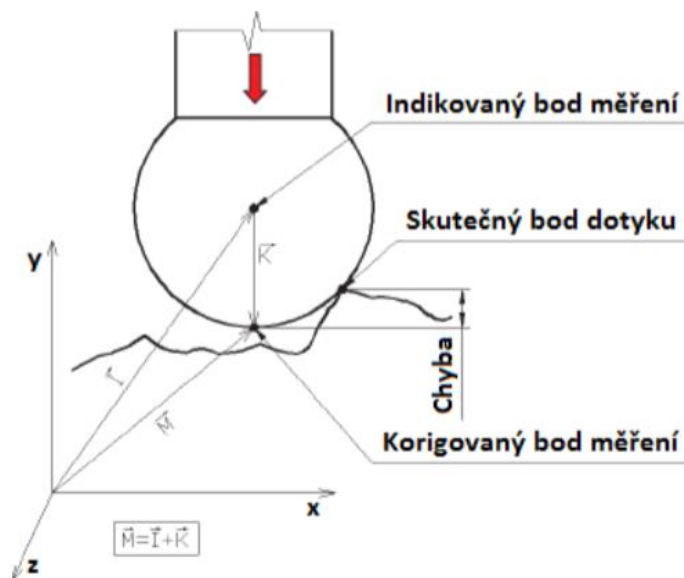
Obrázek 15: a) deformace pružných součástí, b) deformace pružného povrchu součástí, c) tvarová odchylka měřeného povrchu [1].

Vliv na výslednou přesnost měření má i opotřebení měřicí kuličky. V místě dotyku měřeného povrchu s opotřebovanou částí kuličky, dochází ke vzniku systematických chyb, a to proto, že měřicí program počítá s jinými rozměry než jaké ve skutečnosti v místě opotřebení kulička má [1]. Obrázek 16 zobrazuje příklady opotřebení měřicí kuličky.



Obrázek 16: opotřebení měřicí kuličky: a) otěrem, b) usazování hliníku na povrchu [1].

Obrázek 17 zobrazuje, jakým způsobem CMM přepočítává naměřené souřadnice. V momentu, kdy dojde ke kontaktu měřicí sondy s povrchem měřeného objektu, je zaznamenána indikace souřadnic bodu měření, který je orientován ve středu měřicí kuličky. Po jeho zaznamenání CMM přepočítá souřadnice do korigovaného bodu měření, který je předpokládaným bodem na povrchu měřené součásti. Zde vyvstává problém, že korigovaný bod není vždy totožný se skutečným bodem dotyku, což ve výsledku zapříčiní vznik chyby měření. Korekční vektor je roven poloměru snímací kuličky a je doplněn o korekci systematické chyby, která vzniká při měření [1].



Obrázek 17: schéma přepočtu souřadnic ze snímaného bodu [1].

Chyby, které se v průběhu měření vyskytují je možno kategorizovat do třech skupin: chyby hrubé, systematické a náhodné (jak již bylo definováno v kapitole 3.2.3).

### ***Hrubé chyby CMM***

přítomnost hrubých chyb je zejména důsledek systémových selhání, jelikož u stroje, který je správně navržen, zkonstruován a pravidelně přezkoumáván by jejich výskyt měl být vyloučen. Při výskytu hrubých chyb je nutné zavést systémová opatření. Možnými zdroji hrubých chyb při provozu CMM mohou být [20]:

- nevhodná metoda – nevhodný snímací systém anebo sonda, špatně zvolená metodika pro zpracování dat či měření,
- nevhodné podmínky při měření – extrémní teplota, vlhkost, prach, vibrace.

### ***Systematické chyby CMM***

se vyznačují tím, že zkreslují výsledky měření pravidelným způsobem a jejich zdroje se mohou v průběhu času vyvíjet. Jejich opakovatelnost umožňuje vzít jejich existenci v potaz a pomocí vhodné korekce je odstranit. Systematické chyby se obecně vyznačují poznatelnou příčinou a stálostí co do velikosti i znaménka. Možnými zdroji systematických chyb při provozu CMM mohou být [20]:

- znečištěný či poškozený měřicí dotek,
- poškozený snímací systém,
- nevhodně zvolený měřicí dotek či nesprávně upevněný snímač.

### ***Náhodné chyby CMM***

chyby, které nebyly označeny jako hrubé či nebyly odhaleny a popsány jako systematické jsou vyhodnoceny jako chyby náhodné. Náhodné chyby se vyznačují následujícími vlastnostmi: není možno konkrétně identifikovat jejich zdroje, není možno je kvantifikovat a nejsou stále co do velikosti a znaménka [20].

Náhodnou chybu není možno odhalit jediným měřením a jejich vliv na výslednou přesnost měření lze vyhodnocovat pouze jako sumu všech jejich zdrojů. Ty pak tvoří okamžitou hodnotu celkové náhodné chyby, u které předpokládáme, že má tvar normálního rozdělení. Zdroji náhodných chyb při měření na CMM jsou zejména uvolněný snímač či měřicí dotyk a prudké neplánované změny podmínek, např. teplota nebo vibrace [20].

Normou, která specifikuje hodnocení výkonnosti souřadnicových měřicích strojů, je norma ČSN EN ISO 10 630 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) [20].



### 3.7.4 ČSN EN ISO 10 360-2:2010

Praktická část této diplomové práce se zabývá kalibrací souřadnicového měřicího stroje Zeiss Carat, který je využíván pro účely akreditované kalibrační laboratoře ČMI. Postup kalibrace musí vyhovovat všeobecným ustanovením definovaných zákonem č. 505/1990 Sb., Zákon o metrologii, kalibrace byla proto provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 10 360-2:2010 a tato kapitola je věnována jejímu bližšímu popisu.

Norma ISO 10 360 se skládá z celkově šesti částí. Druhá část normy, popsaná v této podkapitole, definuje následující zkušební postupy [19]:

1. zkouška chyby indikace kalibrované zkušební délky bez odsazení hrotu snímacího doteku,
2. zkouška chyby indikace kalibrované zkušební délky se specifikovaným odsazením hrotu snímacího doteku,
3. zkouška reprodukovatelnosti měření kalibrované zkušební délky.

Norma popisuje požadavky na způsobilost stanovených výrobcem a uživatelem CMM, typ a postup provedení přejímacích a periodických zkoušek k prokázání shody s předem definovanými požadavky, pravidla pro kontrolu shody a aplikace, u kterých lze tyto zkoušky použít [19].

Dále norma definuje, že výrobce zařízení je povinen specifikovat mezní hodnoty dovolených environmentálních podmínek jako teplota, vlhkost vzduchu a vibrace v místě instalace a provozu CMM v případě přejímacích zkoušek. V případě periodických zkoušek tato povinnost přechází na uživatele [19].

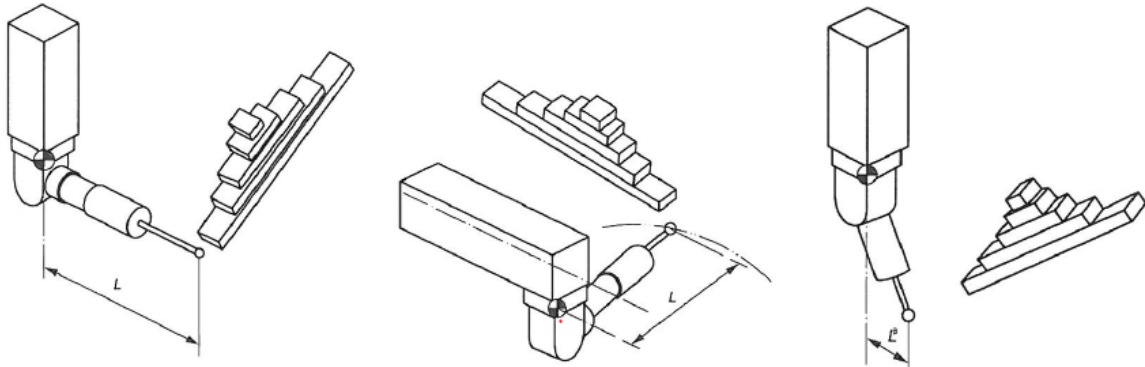
Dále norma stanovuje, že CMM musí být provozováno dle podmínek definovaných v provozní příručce stroje, a to jak v průběhu zkoušek, tak i během měření. Příklad konkrétních postupů uvedených v příručce [19]:

- spuštění stroje a cyklus zahřátí,
- uspořádání systému snímacích dotyků,
- čištění snímacích dotyků, aj.

Součástí této části normy ISO 10 360 je definice několika termínů. Níže je vypsán výběr těch, které jsou spojené s chybovostí CMM.

### ***Odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly – $L$***

„vzdálenost (pravoúhlá k ose pinoly) mezi hrotem snímacího doteku a referenčním bodem“ [19].



Obrázek 18: příklady odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly [19].

Referenční bod definuje výrobce, pokud tomu tak není, volí uživatel referenční bod v blízkosti upevnění snímací hlavy [19]. Obrázek 18 zobrazuje příklady odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly.

### ***Chyba měření délky – $E_L$***

„chyba indikace měření kalibrované zkušební délky pomocí CMM s odsazením hrotu snímacího doteku od osy pinoly  $L$  při jednobodovém snímání (nebo ekvivalentním snímání) na každém konci kalibrované zkušební délky“ [19].

V této části normy ISO 10 630 jsou předem definovány délky  $L = 0$  a 150 mm. Příklad zápisu:  $E_{0,MPE} = \pm (1,9 + L/200) \mu\text{m}$ . [19].

### ***Opakovaný rozsah chyby při měření délky – $R_0$***

„rozsah (největší hodnota minus nejmenší hodnota) při třech opakovaných měřeních chyby délky pomocí CMM s nulovou vzdáleností odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly“ [19].

### ***Maximální dovolená chyba při měření délky – $E_{L,MPE}$***

„extrémní hodnota chyby při měření délky  $E_L$  odpovídající specifikaci“ [19].

### ***Maximální dovolená mez opakovaného rozpětí – $R_{0,MPL}$***

„extrémní hodnota opakovaného rozpětí měřené délky  $R_0$  přípustná specifikací“ [19].

Jak již bylo zmíněno, hlavním předmětem této normy je specifikace přijímacích a periodických zkoušek. Tyto zkoušky se obecně provádějí ve shodě s touto druhou částí normy ISO 10 360, a to dle postupů uvedených výrobcem [19].

Přijímací zkouška je prováděna po vzájemné dohodě mezi výrobcem a uživatelem, za účelem ověření způsobilosti i stavu CMM při předání. Periodická zkouška je prováděna pro ověření způsobilosti CMM používaného pro měření délkových rozměrů v organizacích s vnitřním prokazováním systému kvality. Obě tyto zkoušky musí být ve shodě se specifikovanou maximální dovolenou chybou  $E_{L,MPE}$  a maximálním dovoleným rozpětím  $R_{0,MPL}$  [20].

Způsobilost CMM lze prohlásit za ověřenou v případě, že chyba při měření délky –  $E_L$  leží v rozpětí maximální dovolené chyby při měření délky –  $E_{L,MPE}$  a opakované rozpětí chyby při měření délky –  $R_L$  leží v rozpětí maximálních dovolených mezí opakovaného rozpětí  $R_{L,MPL}$ , jak je definováno výrobcem. U CMM strojů, které při měření nepoužívají odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly, není požadováno ověření chyby při měření délky  $E_L$  [20].

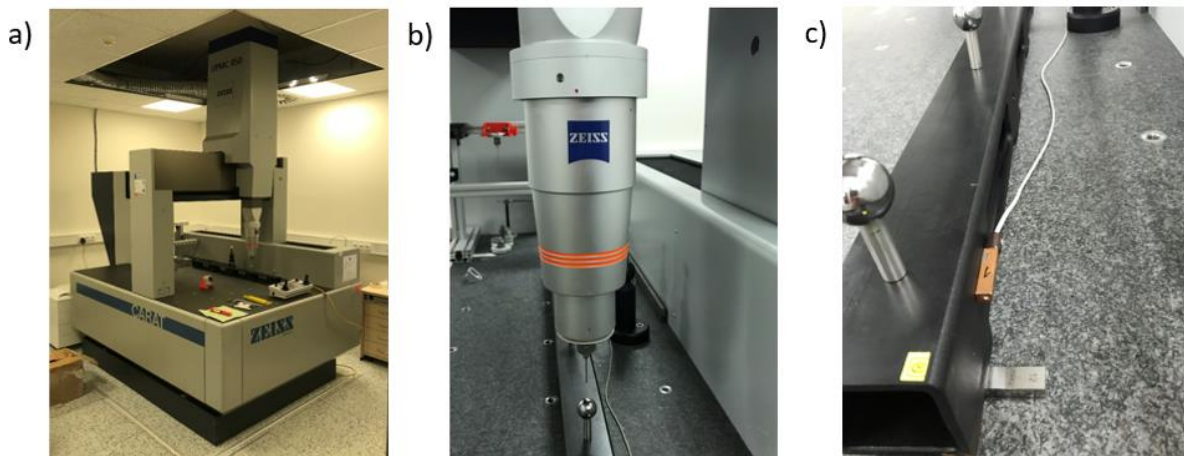


## 4 CHARAKTERISTIKA PŘÍSTROJE ZEISS UPMC 850 CARAT S-ACC

Hlavním úkolem praktické části této diplomové práce a zároveň jejím hlavním přínosem je vytvoření komplexní studie přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC, který je situován v měřicí laboratoři ČMI oblastního inspektorátu Brno, v této kapitole budou charakterizovány jeho základní mechanické a měřicí vlastnosti.

Zeiss Carat je souřadnicový měřicí stroj s pohyblivým portálem a pevným pracovním stolem pracujícím v trojrozměrném souřadnicovém systému (pomocí otočného stolu je možno přidat čtvrtou osu). Řada měřicích strojů UPMC odpovídá nejnáročnějším požadavkům na přesnost. Modely S-ACC (super accuracy) jsou druhé nejpřesnější a výrobce, ve shodě s normou ISO 10360-2, deklaruje přesnost měření (resp. max. dovolenou chybu při měření délky)  $E_{0,MPE} = (0,7 + L/600) \mu\text{m}$ , kde  $L$  je měřená délka v milimetrech a maximální dovolenou mez opakovaného rozpětí  $R_{0,MPL} = 0,6 \mu\text{m}$ , [21], což prokazuje vhodnost použití tohoto měřicího stroje pro účely kalibrace měřidel a inspekčních nástrojů [22].

Stroj je vybaven pneumatickým anti-vibračním systémem a granitovou pracovní deskou. Pro zajištění minimálního ovlivňování přesnosti vlivem výkyvů okolních teplot v průběhu měření, jsou portál a pinola stroje vyrobeny ze speciální slitiny Carat (Coated Aging Resistant Alloy Technology<sup>2</sup>). Měřítka stroje jsou vyrobena ze Zeroduru, v praxi tento sklokeramický materiál prakticky eliminuje vliv teplotních změn a zaručuje ideální tepelné vlastnosti (koeficient tepelné roztažnosti je roven  $\pm 0,05 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ). Stroj je dále vybaven teplotními senzory pro měření teploty obrobku v průběhu měření, případné odchylky jsou následně odstraněny pomocí matematických kompenzací [21].



Obrázek 19: a) souřadnicový měřicí stroj Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC v laboratoři ČMI, b) snímací hlavice HSS, c) teplotní senzor umístěný na měřeném objektu.

<sup>2</sup> Přeloženo jako – technologie slitiny odolné vůči stárnutí

Obrázek 19a zobrazuje umístění stroje Zeiss Carat v laboratoři ČMI. Na obrázku 19b lze vidět snímací hlavici HSS, která se vyznačuje vynikající přesností, reprodukovatelností a funkčností a navíc umožňuje aplikaci velkého množství dotykových snímacích sond [21]. Konstrukce hlavice HSS ale neumožňuje odsazení hrotu doteku od osy pinoly, jak bylo zobrazeno na obrázku 18 v kapitole 3.7.4.

Průměr rubínových kuliček snímacích sond se pohybuje v rozmezí (0,5 – 6,0) mm [22]. Obrázek 19c zobrazuje teplotní senzor umístěný na měřeném objektu. Během pořizování této fotky na stroji právě probíhalo měření kalibračních koulí používaných pro kalibraci dílenských CMM.

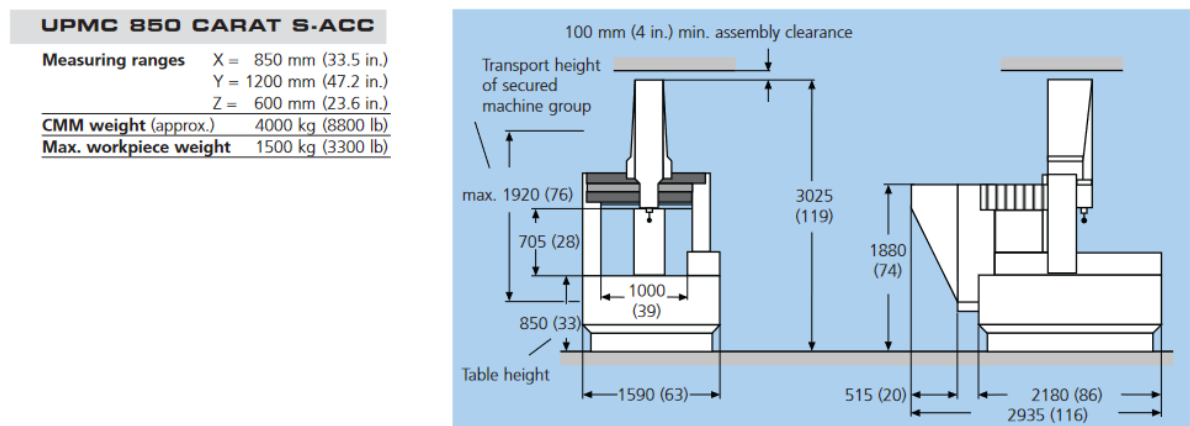
Kromě snímací hlavice HSS Zeiss Carat může ještě používat hlavici Zeiss VAST Gold, která je zobrazena na obrázku 20. Tato hlavice je využívána zejména pro dotykové skenování a vyznačuje se obecně vyšší dynamikou a vyšší tuhostí, která je daná vylepšeným kloubovým spojením [23]. Avšak v současné době touto hlavicí v rámci ČMI disponuje pouze LPM (Laboratoř primární metrologie) v Praze.



Obrázek 20: snímací hlava Zeiss VAST Gold. Vlevo fotka z katalogu [23]. Vpravo fotka z laboratoře LPM ČMI.

Výslednou přesnost stroje značně ovlivňuje i vlhkost a okolní teplota prostředí. Vlhkost vzduchu v měřicí laboratoři by se měla pohybovat mezi (40–60) %. Příručka [22] uvádí, že povolené rozmezí teploty prostředí v laboratoři je mezi +15 °C a +35 °C, avšak doporučenou okolní teplotou při provozu stroje ( $+20 \pm 1$ ) °C [22]. Měřicí laboratoř na ČMI, kde se CMM stroj Zeiss Carat nachází, je proto vybavena klimatizací.

Pro usnadnění pohybu stroje ve všech osách a odstranění tahové síly je stroj vybaven velmi výkonnými servopohony. Stroj je možno manuálně ovládat ve třech osách pomocí joysticku, který je součástí ovládacího panelu. Měřicí rozsahy pro jednotlivé osy stroje jsou:  $X = 850$  mm,  $Y = 1200$  mm a  $Z = 600$  mm. Stroj má hmotnost okolo 4000 kg a maximální možná hmotnost měřeného objektu je 1500 kg, tyto parametry definuje tabulka v levé části obrázku 21 [22].



Obrázek 21: základní parametry Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC [22].

Maximální dovolené chyby měření uvádí výrobce stroje Zeiss dle tabulky 3:

Tabulka 3: maximální dovolené chyby stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC [22].

Druh chyby	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]
$MPE_E$	$0,7 + L/600$
$MPE_P$	0,6
$MPE_{THP}$	1,8
$MPE_{RONt}$	0,7

kde význam jednotlivých chyb je následující [22]:

#### $MPE_E$

je maximální dovolená chyba při měření délky (tato chyba již byla popsána v podkapitole 3.7.4, kde je označena jako  $E_{L,MPE}$ ). Pro určení této chyby se využívá KM nebo stupňovitých KM, nadefinuje se pět různých délek v sedmi různých pozicích (jak je zobrazeno na obrázku 22a) a každá z délek je následně třikrát změřena. Výsledek měření je označen za shodný se specifikací v případě, když ani jedna z naměřených hodnot není vyšší než specifikovaná hodnota. V tomto případě  $MPE_E = (0,7 + L/600)$   $\mu\text{m}$  (kde  $L$  je měřená délka v milimetrech).

#### $MPE_P$

je maximální dovolená chyba snímání. Norma ČSN EN ISO 10360-2 [19] doporučuje pro určení této chyby nasnímání koule se zanedbatelnou tvarovou odchylkou o průměru (10 – 50) mm, a to na 25 pozicích, dle obrázku 22b. Z výsledků měření se vypočítá tzv.

Gaussova vyrovnávací koule. Velikost všech radiálních vzdáleností od referenční koule musí být menší než stanovená specifikace, v tomto případě  $MPE_P = 0,6$  mm.

### $MPE_{THP}$

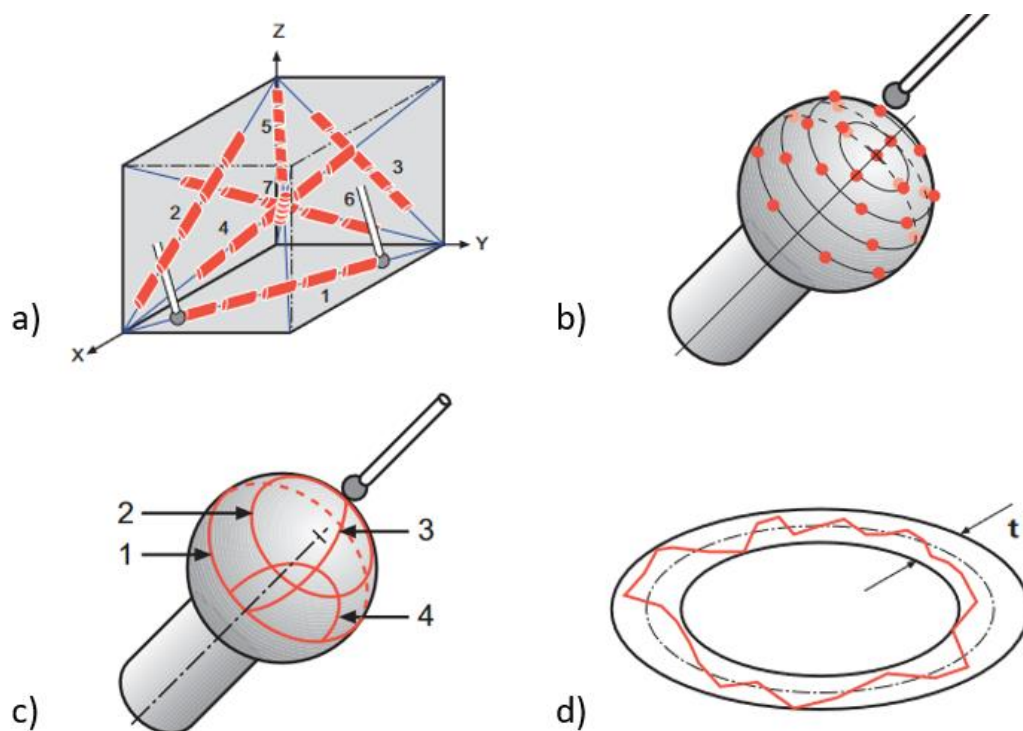
je maximální dovolená chyba dotykového snímání. Pro její určení se praxi používá referenční koule o průměru 25 mm, zobrazena na obrázku 22c, kdy je její povrch nasnímán ve čtyřech doporučených drahách (dle normy ISO 10360-4). Následně při porovnávání naměřených hodnot se specifikovanou  $MPE_{THP}$  je nutno splnit dvě podmínky:

- 1) rozsah odchylek v radiálním směru od referenční koule musí být menší než specifikovaná hodnota (stejně jako v případě  $MPE_E$ ), v tomto případě  $MPE_{THP}$  je rovno 1,8 mm,
- 2) jelikož rychlost snímání je velice důležitý parametr, nesmí doba měření přesáhnout předem specifikovanou dobu. Pro Zeiss Carat je tato doba specifikována jako 88 sekund.

Specifikace chyby dotykového snímání je důležitým ukazatelem produktivity CMM.

### $MPE_{RONt}$

je maximální dovolená chyba při měření kruhovitosti. Pro její určení se využívá referenční prstenc s minimální tvarovou odchylkou o průměru 50 mm. Ve skenovacím režimu přístroje Zeiss je naměřeno velké množství bodů na vnitřním povrchu prstence (viz obrázek 22d). Z naměřených indikací je následně vyhodnocena tzv. Tschebyscheffova kružnice (minimální vepsaná kružnice). Výsledkem je určení rozsahů radiálních vzdáleností, které nesmí překročit stanovenou specifikaci, v tomto případě je  $MPE_{RONt}$  rovno 0,7 mm.

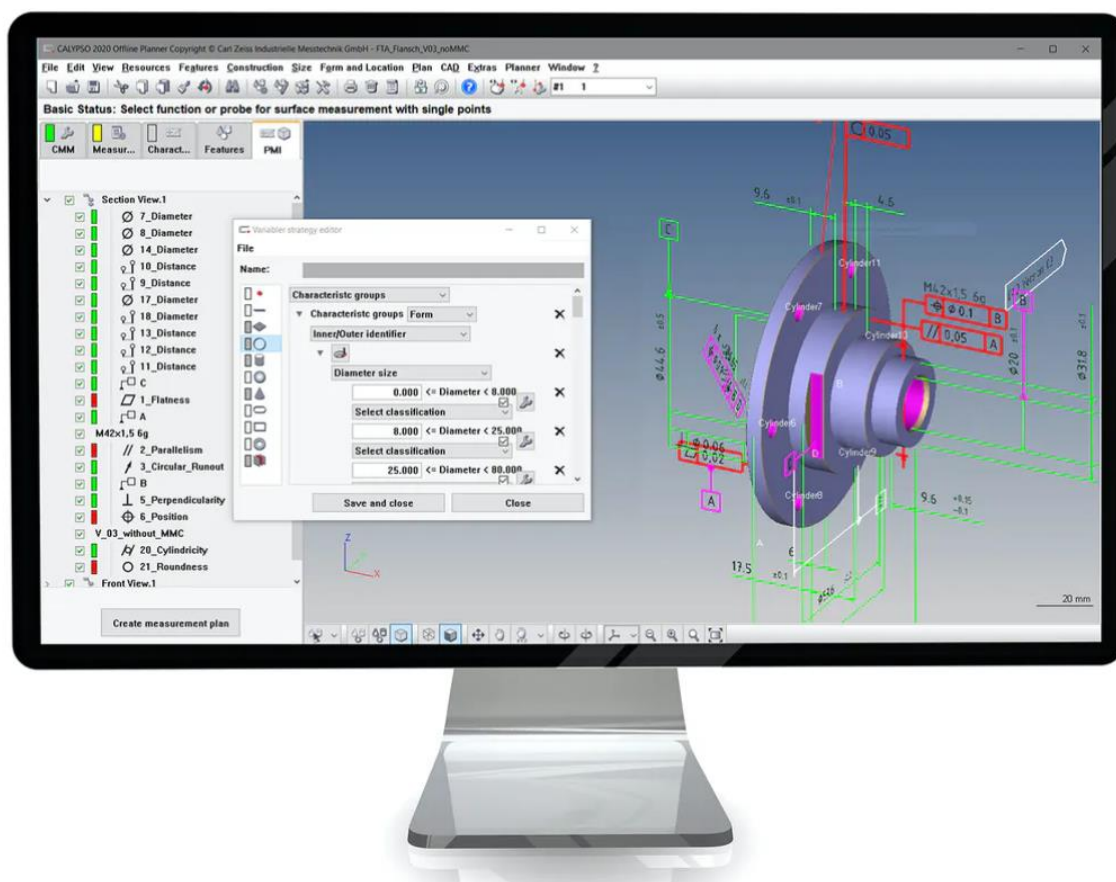


Obrázek 22: a)  $MPE_E$ , b)  $MPE_P$ , c)  $MPE_{THP}$ , d)  $MPE_{RONt}$  [22].



Krom výše zmíněných chyb v tabulce 3, jsou definovány mezní hodnoty pro chybu měření délky v jedné ose  $u_1 = (0,40 + 1,11 \cdot L) \mu\text{m}$  a v prostoru  $u_3 = (0,70 + 1,67 \cdot L) \mu\text{m}$ , kde  $L$  je rovna měřené délce v metrech [24].

Stroj Zeiss Carat využívá software Zeiss Calypso. Jeho hlavními výhodami jsou: automatická tvorba pojezdových drah, efektivní průběh měření bez zaznamenávání nepotřebných charakteristik a možnost okamžitě provést automatické dílčí měření libovolného prvku. Za zmínku stojí funkce Zeiss Calypso PMI (PMI = product and manufacturing information), díky které je software schopen automaticky implementovat tolerance rozměrů, tvaru a polohy, které jsou jako informace PMI obsaženy v CAD modelu, do plánu měření, což značně sníží náročnost tvorby měřicího programu [23].



Obrázek 23: uživatelské prostředí softwaru Zeiss Calypso [23].



## 5 PROVEDENÍ SOUBORU EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

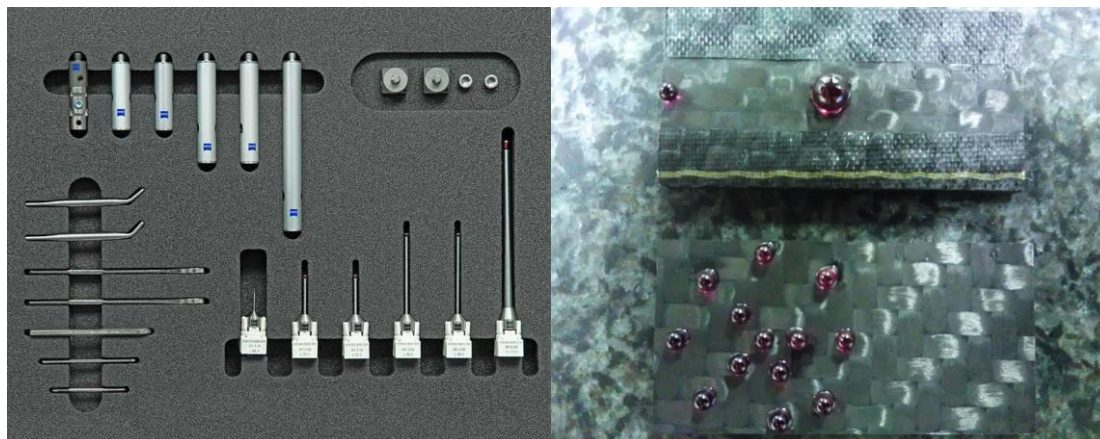
Soubor naměřených hodnot byl proveden a poskytnut vedoucím této diplomové práce. V době, kdy byla data měřena, nebylo možné, aby autor sám prošel školením, které je pro měření na stroji Zeiss Carat nezbytné, a to z důvodu platnosti mnoha vládních nařízení a restrikcí.

Před provedením kalibrace pomocí hmotných etalonů (koncové měrky a kalibrační koule) proběhla prvotní kalibrace CMM v osách  $x$ ,  $y$  a  $z$  pomocí laserinterferometru Renishaw XL80. Tabulka 4 zobrazuje naměřené hodnoty KM v rozsahu (100–1000) mm v uhlopříčce os XY. Pro vzorový příklad výpočtu rozšířené nejistoty měření budou v následující kapitole použity náměry koncové měrky o délce  $L = 1000$  mm. Je žádoucí, aby byla rozšířená nejistota měření kvantifikována pro KM, u níž lze předpokládat, že její hodnota bude nejvyšší. Lze očekávat, že právě pro nejdelší KM bude hodnota výsledné nejistoty měření maximální.

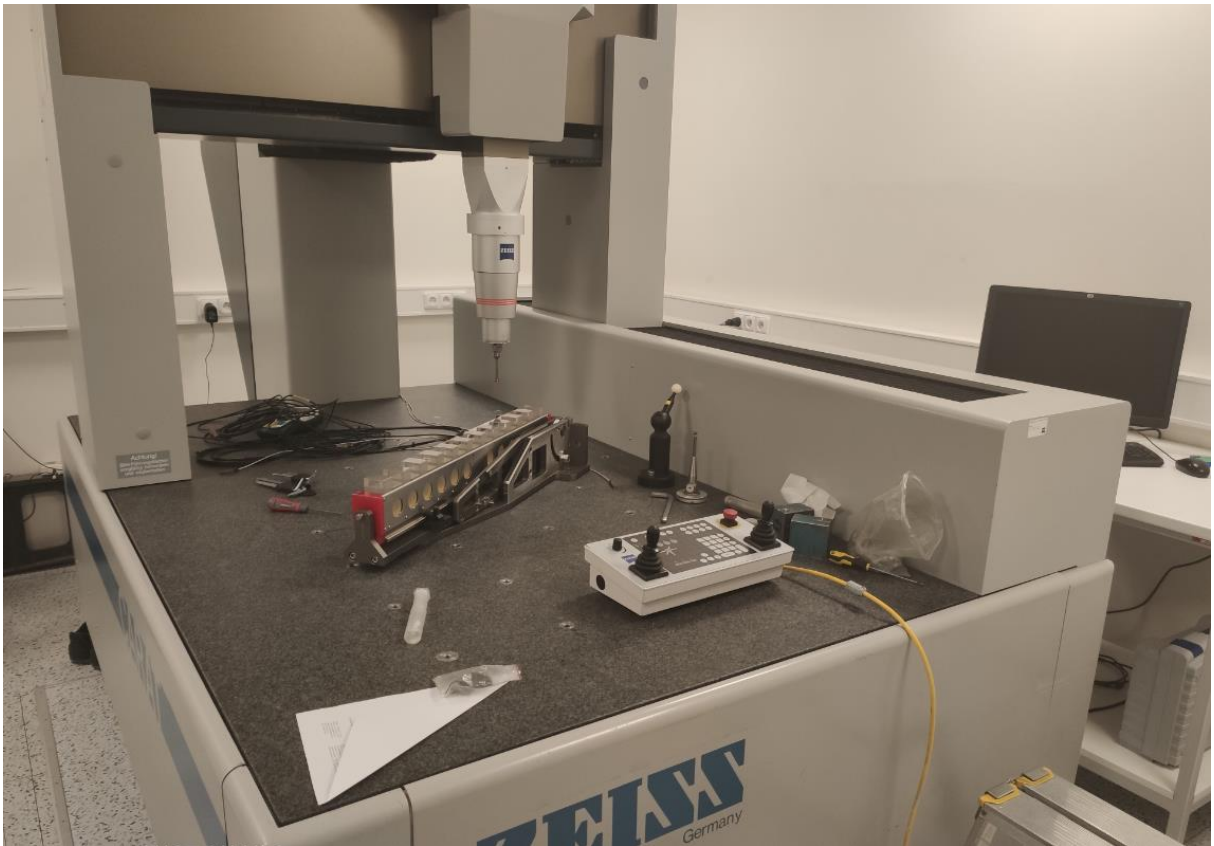
Kromě hodnot v tabulce 4 byly poskytnuty ještě náměry KM v uhlopříčce YX, ve vertikální ose  $z$  a naměřené hodnoty kalibrační koule Renishaw. Všechna tato data jsou zpracována v příloze B.

Tabulka 4: náměry KM v uhlopříčce XY.

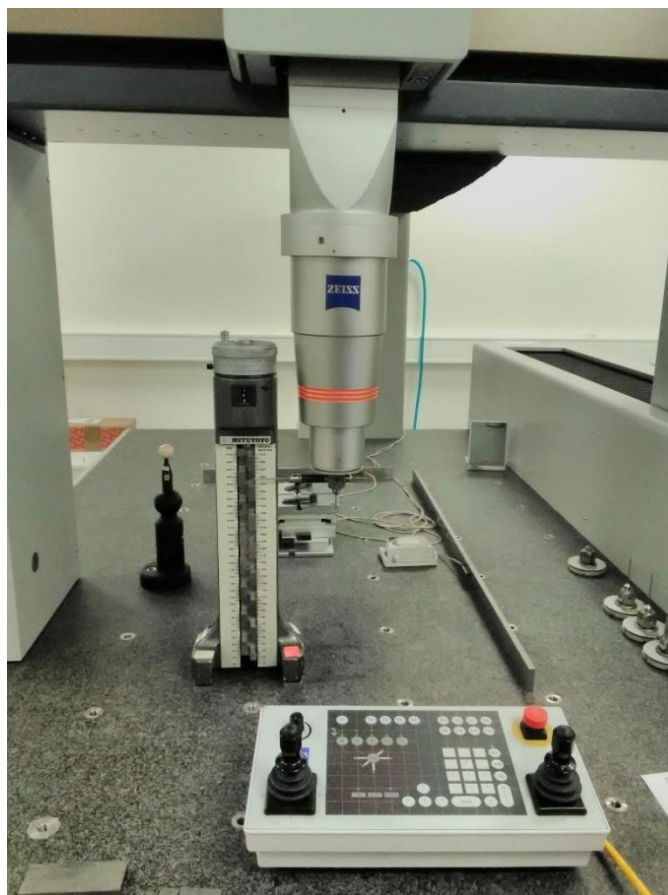
JMENOVI TÁ DÉLKA KM [MM]	999,99843	800,00113	500,00278	299,99988	199,99926	100,00012
ČÍSLO MĚŘENÍ	NAMĚŘENÉ HODNOTY (uhlopříčka XY)					
1.	999,99900	799,99600	499,99300	299,99500	199,99700	99,99800
2.	999,99880	799,99550	499,99660	299,99660	199,99770	99,99880
3.	999,99690	799,99630	499,99580	299,99770	199,99660	99,99770
4.	999,99730	799,99880	499,99440	299,99700	199,99880	99,99660
5.	999,99900	799,99895	499,99300	299,99730	199,99700	99,99645
6.	999,99775	799,99660	499,99390	299,99550	199,99775	99,99592
7.	999,99760	799,99861	499,99368	299,99691	199,99786	99,99690
8.	999,99745	799,99906	499,99346	299,99702	199,99797	99,99800
9.	999,99730	799,99952	499,99324	299,99713	199,99808	99,99880
10.	999,99700	799,99900	499,99700	299,99580	199,99819	99,99800



Obrázek 24: sada měřících dotyků Zeiss s rubínovými kuličkami vlevo. Aplikace rubínových kuliček jako etalonu délky pro přístroj nanoCT vpravo.



*Obrázek 25: měření v uhlopříčce horizontálních os X a Y.*



*Obrázek 26: měření ve vertikální ose z. V ose y umístěna KM o délce 1000 mm.*

## 6 IDENTIFIKACE A KVANTIFIKACE JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK NEJISTOT MĚŘENÍ PŘÍSTROJE

Cílem této kapitoly je souhrnně identifikovat a kvantifikovat relevantní zdroje nejistot, které přispívají k celkové nejistotě měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss Carat.

### 6.1 Identifikace zdrojů nejistot

Na základě předchozích zkušeností byly jako relevantní přispěvatelé k výsledné nejistotě měření vybrány následující zdroje:

- vliv rozptylu naměřených hodnot ( $u_A$ ),
- vliv nepřesnosti kalibrace měřicího stroje ( $u_{CMM}$ ),
- vliv použitého etalonu ( $u_E$ ),
- vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_R$ ),
- vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C ( $u_{\Delta 20^\circ\text{C}}$ ),
- vliv rozdílu teplot měřicího zařízení a měřeného objektu ( $u_{\Delta T}$ ).

#### Vliv rozptylu naměřených hodnot ( $u_A$ )

výpočet standardní nejistoty typu A byl již popsán v kapitole 3.2.5. Pro její kvantifikaci bude použit vztah (3.6) a hodnoty náměrů koncových měrek.

#### Vliv nepřesnosti kalibrace měřicího stroje ( $u_{CMM}$ )

tento příspěvek k výsledné nejistotě měření vychází z kalibračního listu pro Zeiss Carat včetně použitého koeficientu rozšíření (příloha A).

Hodnota nejistoty je uvedena dle vztahu (6.1):

$$U = a + b \cdot L, \quad (6.1)$$

kde koeficienty  $a$  a  $b$  byly určeny experimentálně a  $L$  je měřená délka v metrech.

Výsledný odhad hodnoty nejistoty vlivem nepřesnosti kalibrace měřicího stroje vychází ze vztahu (3.8) a po dosazení vypadá následovně (6.2):

$$u_{CMM} = A_j \frac{(a + b \cdot L)}{k}, \quad (6.2)$$

kde  $A_j$  je koeficient citlivosti ( $A_j = 1$ ) a jelikož je zde předpoklad normálního pravděpodobnostního rozdělení, které se používá v případech, kdy je pravděpodobnost malých odchylek značná, zatímco pravděpodobnost velkých odchylek mizivá je koeficient rozšíření  $k = 2$  [2].

### Vliv použitého etalonu ( $u_E$ )

v tomto případě byly použity tři druhy etalonů. Dva hmotné etalony – koncové měrky a kalibrační koule Renishaw a jeden optický – laserový interferometr. Každý z etalonů má svůj kalibrační list s definovaným odhadem hodnoty nejistoty. Hodnota standardní nejistoty  $u_E$  je vyjádřena dle vztahu (6.3). Předpokládá se zde normální rozdělení, koeficient  $k = 2$ . Koeficient citlivosti  $A_j = 1$  [25]:

$$u_E = A_j \frac{U_E}{k}. \quad (6.3)$$

V této práci budou řešeny pouze náměry hmotných etalonů, a to proto, že kalibrace za použití laserového interferometru je praxi používána spíše jen pro hrubé nastavení CMM v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . K přesnější a průkaznější kalibraci jsou zpravidla používány právě hmotné etalony (koncové měrky a kalibrační koule).

### Vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_R$ )

všechny měřicí přístroje, metody či i obsluha měřících strojů mají konečnou rozlišovací schopnost, např. u digitálního posuvného měřidla je tato schopnost rovna hodnotě jednoho digitu [25]. Vzorec pro výpočet odhadu příspěvku k výsledné nejistotě měření vyplývá ze vztahu (8) a má následující tvar (6.4) [13]:

$$u_R = A_j \frac{R_{CMM}}{k}, \quad (6.4)$$

kde  $R_{CMM}$  je rozlišovací schopnost měřícího stroje, koeficient citlivosti  $A_j = 1$  a  $k = \sqrt{3}$ , jelikož je zde předpoklad rovnoměrného rozdělení naměřených hodnot.

Rovnoměrné rozdělení se obecně volí tehdy, kdy je pravděpodobnost výskytu odchylky stejná v celém definovaném intervalu. Toto pravděpodobnostní rozdělení se v praxi volí nejčastěji, jelikož ve většině případů nejsou k dispozici dostatečné poznatky o pravděpodobnostním rozdělení výskytu odchylek, a není tudíž vhodné upřednostňovat některý druh odchylek definováním jiného typu rozdělení [13].

### Vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C ( $u_{\Delta 20^{\circ}\text{C}}$ )

jedním ze základů přesného měření na CMM je monitoring teploty prostředí, měřicího stroje i obrobku, a to po celou dobu měření. Je vysoce žádoucí, aby laboratoř, ve které měření probíhá, byla vybavena klimatizací a aby v průběhu měření nedocházelo k výkyvům teplot. Software Calypso, kterým je stroj Zeiss Carat vybaven, je schopen tyto výkyvy při vyhodnocování výsledků kompenzovat. Nejpřesnějších výsledků je dosaženo, pokud je teplota stabilně co nejbliže +20 °C [21].

U tohoto příspěvatele k výsledné nejistotě je předpoklad rovnoměrného rozdělení  $k = \sqrt{3}$  a vzorec pro jeho výpočet je definován vztahem (6.5) [25]:

$$u_{\Delta 20^{\circ}\text{C}} = \frac{\alpha}{k} \cdot \frac{\Delta t_{20^{\circ}\text{C}}}{k} \cdot L, \quad (6.5)$$

kde  $\alpha$  je koeficient teplotní roztažnosti materiálu měřeného objektu,  $\Delta t_{20^{\circ}\text{C}}$  je odchylka teploty od 20 °C a koeficient citlivosti je roven  $L$ , což je měřená délka v metrech [25].

### Vliv rozdílu teplot měřicího zařízení a měřeného objektu ( $u_{\Delta T}$ )

v reálném světě nelze nikdy zaručit, aby teplota měřicího zařízení a měřeného objektu byla přesně stejná, proto je třeba i tento příspěvek zahrnout ve výpočtu výsledné nejistoty měření. Výsledný příspěvek k nejistotě se vypočítá dle vztahu (6.6):

$$u_{\Delta T} = \frac{L \cdot \alpha \cdot \Delta T}{k}, \quad (6.6)$$

kde  $\Delta t$  je rovno rozdílu teplot  $t_1$  a  $t_2$ ,  $k = \sqrt{3}$  jelikož je předpokládáno rovnoměrné rozdělení naměřených hodnot a koeficient citlivosti se rovná součinu délky  $L$  a koeficientu teplotní roztažnosti  $\alpha$  měřeného objektu. Koeficient teplotní roztažnosti CMM se zde nezapočítává, jelikož jeho případný vliv na výslednou nejistotu měření je odstraněn pomocí softwarové korekce, za použití teplotních čidel.



## 6.2 Kvantifikace zdrojů nejistot

V této kapitole budou kvantifikovány identifikované zdroje nejistot v předešlé kapitole 6.1. Data pro výpočet byla poskytnuta vedoucím této diplomové práce panem Ing. Janem Šrámkem, Ph.D. Jedná se o data naměřená na stroji Zeiss Carat v měřicí laboratoři ČMI OI Brno. Jako etalony byly použity koncové měrky o délce (100–1000) mm a kalibrační koule od firmy Renishaw o průměru 20 mm.

Pro potřeby ČMI byl vytvořen soubor v programu Microsoft Excel (příloha B), který v praxi akreditované kalibrační laboratoře poslouží pro usnadnění výpočtů. Úkolem zadavatele bude pouze vypsát do patřičných buněk vstupní hodnoty a soubor pak pomocí přednastavených funkcí sám vypočítá rozšířenou nejistotu měření. Návod pro práci v tomto souboru je zpracován v rámci kapitoly 7.5. V této kapitole bude demonstrována kvantifikace zdrojů nejistot pro koncovou měrku o délce  $L = 1000$  mm, jejíž náměry byly provedeny v uhlopříčce XY. Uvedené hodnoty jsou zaokrouhleny na tři platná desetinná místa, avšak při výpočtech se kalkulovalo s hodnotami nezaokrouhlenými.

### Vliv rozptylu naměřených hodnot ( $u_A$ )

Jelikož počet měření  $n$ , jenž byl proveden na KM je roven deseti, není nutné zavádět korekci pomocí koeficientu  $k_S$ . Tabulka 5 níže obsahuje naměřené hodnoty KM. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.5, standardní nejistota typu A se rovná výběrové směrodatné odchylce výběrového průměru naměřených hodnot. Vzorec pro výpočet  $u_A$  (6.7) vychází ze vztahu (3.6).

Tabulka 5: náměry KM o délce  $L = 1000$  mm.

ČÍSLO MĚŘENÍ	NAMĚŘENÉ HODNOTY (uhlopříčka XY)
1.	999,99900
2.	999,99880
3.	999,99690
4.	999,99730
5.	999,99900
6.	999,99775
7.	999,99760
8.	999,99745
9.	999,99730
10.	999,99700
$\bar{x}$	<b>999,99781</b>

$$\begin{aligned} u_A = s_{\bar{y}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(999,99900 - 999,99781)^2 + \dots + (999,99880 - 999,99700)^2}{10(10-1)}} = \quad (6.7) \\ &= 0,250 \mu\text{m}. \end{aligned}$$



### Vliv nepřesnosti kalibrace měřicího stroje ( $u_{CMM}$ )

hodnota rozšířené nejistoty vychází z kalibračního listu 81047504 (příloha A). Nejistota CMM Zeiss Carat je  $U_{CMM} = (0,11 + 0,4 \cdot L) \mu\text{m}$ . Koeficient rozšíření  $k = 2$  a koeficient citlivosti  $A_j = 1$ . Vzorec pro výpočet vychází ze vztahu (6.2) a je dán vzorcem (6.8):

$$u_{CMM} = 1 \frac{(0,11 + 0,4 \cdot 1)}{2} = 0,255 \mu\text{m}. \quad (6.8)$$

### Vliv použitého etalonu ( $u_{E1}$ )

pro tento modelový příklad byla jako měřený objekt použita koncová měrka o délce  $L = 1000 \text{ mm}$ . Odhad hodnoty nejistoty vychází z kalibračního listu pro danou koncovou měrku 8014-KL-L0010-18. Hodnota  $U_{E1} = 0,154 \mu\text{m}$ , koeficient rozšíření  $k = 2$  a koeficient rozšíření  $A_j = 1$ . Výpočet vychází ze vztahu (6.3) a je dán vzorcem (6.9):

$$u_{E1} = 1 \frac{0,154}{2} = 0,077 \mu\text{m}. \quad (6.9)$$

### Vliv použitého etalonu ( $u_{E2}$ )

druhým hmotným etalonem použitým při kalibraci byla kalibrační koule Renishaw o průměru  $20 \text{ mm}$ . Odhad hodnoty nejistoty vychází z kalibračního listu 6014-KL-H0521-20 a je vyjádřen následovně  $U_{E2} = (0,5 + 5 \cdot L) \mu\text{m}$ , kde  $L$  je v tomto případě průměr kalibrační koule. Tento vliv byl použit při výpočtu nejistoty měření kalibrační koule Renishaw, který je zpracován v příloze B.

### Vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_R$ )

Zeiss Carat pracuje s rozlišovací schopností  $R_{CMM} = 0,1 \mu\text{m}$ . Výpočet vlivu rozlišovací schopnosti stroje vychází ze vztahu (6.4), je předpokládáno rovnoměrné rozdělení naměřených hodnot  $k = \sqrt{3}$  a koeficient rozšíření  $A_j = 1$ . Výpočet je proveden dle vztahu (6.10):

$$u_R = 1 \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,058 \mu\text{m}. \quad (6.10)$$

### Vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C ( $u_{\Delta 20^{\circ}\text{C}}$ )

během měření byla zaznamenána odchylka od 20 °C,  $\Delta t_{20^{\circ}\text{C}} = 2,5$  °C. Pomocí softwarové kompenzace a za použití teplotních čidel (obrázek 19c) byl výsledný odhad odchylky snížen na 0,1 °C. Koeficient teplotní roztažnosti materiálu koncové měrky je roven 11,5  $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ . Koeficient citlivosti je roven jmenovité délce koncové měrky  $L = 1$  m a je zde předpokládáno rovnoměrné rozdělení naměřených hodnot  $k = \sqrt{3}$ . Výpočet  $u_{\Delta 20^{\circ}\text{C}}$  vychází se vztahu (6.6) a vypadá následovně (6.12):

$$u_{\Delta 20^{\circ}\text{C}} = \frac{11,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,1}{\sqrt{3}} \cdot 1 = 0,383 \mu\text{m}. \quad (6.12)$$

### Vliv rozdílu teplot měřícího zařízení a měřeného objektu ( $u_{\Delta T}$ )

zaznamenaný odhad hodnoty rozdílu teplot KM a CMM je  $\Delta T = 0,1$  °C. Koeficient teplotní roztažnosti KM  $\alpha$  je roven 11,5  $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ . Je zde předpokládáno rovnoměrné rozdělení naměřených hodnot  $k = \sqrt{3}$ . Hodnota příspěvku k celkové nejistotě  $u_{\Delta T}$  se vypočítá dle vztahu (6.7), koeficient citlivosti je roven součinu délky koncové délky  $L$  a hodnotě teplotní roztažnosti  $\alpha$ :

$$u_{\Delta T} = \frac{1 \cdot 11,5 \cdot 0,1}{\sqrt{3}} = 0,664 \mu\text{m}. \quad (6.13)$$

## 7 STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ PŘÍSTROJE

Cílem této kapitoly je stanovit výslednou nejistotu měření souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC. V minulé kapitole 6 byly identifikovány a kvantifikovány jednotlivé příspěvky k výsledné nejistotě měření. Níže bude demonstrována metodika stanovení rozšířené nejistoty měření, a to konkrétně pro náměry KM o délce  $L = 1000$  mm.

### 7.1 Výpočet standardní nejistoty typu A

Hodnota standardní nejistoty typu A byla již kvantifikována v kapitole 6.2 a její hodnota je následující (7.1):

$$u_A = 0,250 \mu m. \quad (7.1)$$

### 7.2 Výpočet standardní nejistoty typu B

V kapitole 6.2 byla popsána metodika kvantifikace příspěvků k výsledné standardní nejistotě typu B. Vztah (7.2) zobrazuje aplikaci již nadefinovaného vztahu (3.10) pro výpočet nejistoty typu B, a to včetně dosazení všech hodnot:

$$\begin{aligned} u_B &= \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{z_j}^2} = \sqrt{u_{CMM}^2 + u_{E1}^2 + u_R^2 + u_{\Delta 20^\circ C}^2 + u_{\Delta T}^2} = \\ &= \sqrt{0,255^2 + 0,077^2 + 0,058^2 + 0,664^2 + 0,383^2} = \\ &= 0,814 \mu m. \end{aligned} \quad (7.2)$$

### 7.3 Výpočet kombinované standardní nejistoty měření

Kombinovaná standardní nejistota  $u_C$  vychází ze vztahu (3.11) a její kvantifikace vypadá následovně (7.2):

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,250^2 + 0,814^2} = 0,851 \mu m. \quad (7.3)$$

## 7.4 Výpočet rozšířené nejistoty měření a posouzení shody se specifikací

Poslední krokem dle metodiky GUM [12], je výpočet rozšířené nejistoty měření přístroje Zeiss Carat, který kvantifikuje jeho přesnost. Pro připomenutí je níže zopakován poznatek z kapitoly 3.2.5.

Důvod, proč k finální interpretaci nejistoty měření není hodnota kombinované nejistoty dostačující je následující, hodnota  $u_C$  sama o sobě pokrývá pouze 68,27 % pravých hodnot měřené veličiny. Vynásobením kombinované nejistoty koeficientem rozšíření  $k$  zajistíme, že do intervalu pokrytí padne značně větší podíl naměřených hodnot. V této práci je použit koeficient rozšíření  $k = 2$ , u kterého lze s vysokou pravděpodobností předpokládat, že do výsledného intervalu pokrytí padne zhruba 95,45 % neměřených hodnot [2].

Výpočet rozšířené nejistoty měření dle vzorce (3.12):

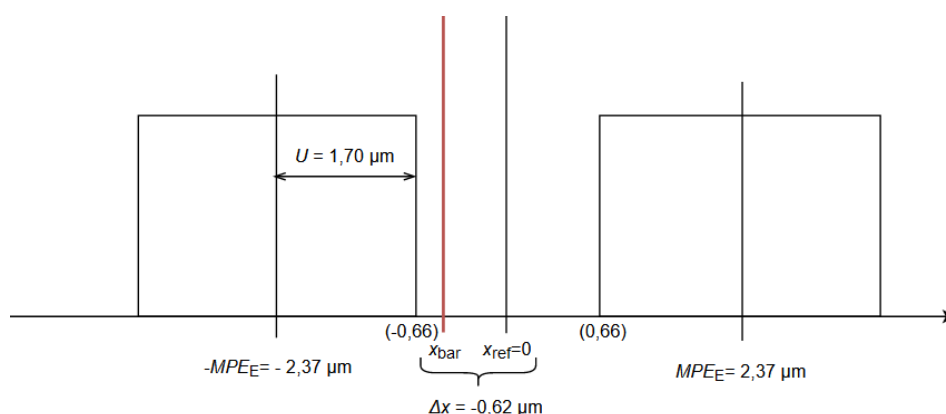
$$U = k \cdot u_C = 2 \cdot 0,851 = 1,702 = \mathbf{1,7 \mu m}. \quad (7.4)$$

Pro výslednou hodnotu rozšířené nejistoty  $U$  je v tabulce 6 zpracováno posouzení shody se specifikací. Specifikace je v tomto případě definována pomocí maximální dovolené chyby při měření délky  $MPE_E$ . Jak je z tabulky patrné, rozdíl průměrné a referenční hodnoty KM  $\Delta x$  leží v intervalu vytyčeném pásmy nejistot. Výsledky měření této konkrétní koncové měřky je tedy možné označit za vyhovující dané specifikaci.

Tabulka 6: posouzení shody hodnoty rozšířené nejistoty se specifikací definovanou  $MPE_E$ .

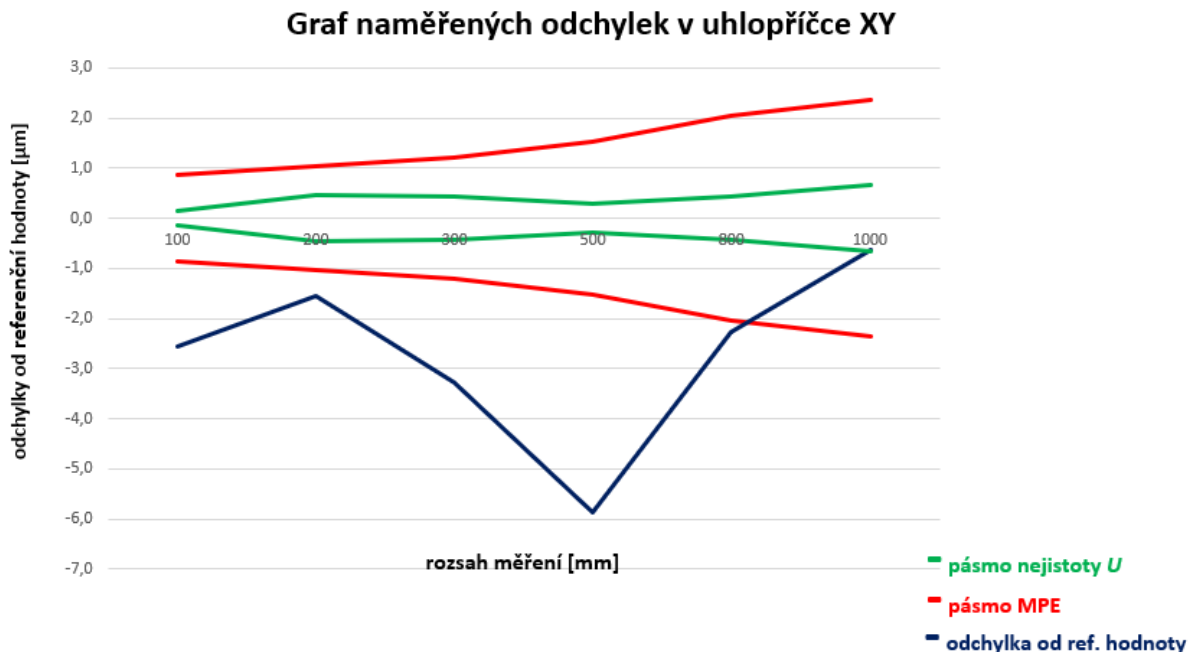
VÝLEDEK MĚŘENÍ [mm]		999,99781 ± 0,00170
$MPE_E = (0,7 + 1000/600) \mu m$	+ MPE [mm]	0,00237
	- MPE [mm]	-0,00237
$\bar{x} - x_{ref}$	$\Delta x$ [mm]	<b>-0,00062</b>
pásma nejistoty [mm]	+	0,00066
	-	-0,00066

Obrázek 27 zobrazuje grafické zpracování posouzení shody se specifikací, horizontální osa představuje průměrnou odchylku naměřených hodnot od referenční délky KM.



Obrázek 27: grafické zpracování posouzení shody se specifikací.

Po zpracování celého souboru naměřených hodnot v příloze B bylo zjištěno, že shoda se specifikacemi, jež byla prokázána výše, byla ojedinělá. Obrázek 28 zobrazuje graf naměřených odchylek v uhlopříčce XY a prokazuje, že náměry koncových měrek v rozsahu (100–800) mm překročily danou specifikaci. Stejně výsledky zaznamenaly i zbylé náměry v souboru.



Obrázek 28: graf naměřených odchylek v uhlopříčce XY.

Neshoda se specifikacemi byla zapříčiněna zejména nestandardními podmínkami při instalaci stroje do měřicí laboratoře, jelikož laboratoř, ve které je stroj provozován, se nachází v suterénu budovy ČMI OI Brno a podmínky pro jeho přenos a instalaci byly značně ztíženy. Před samotným přenosem stroje, které proběhlo v březnu roku 2020, bylo nezbytné jej demontovat na jednotlivé komponenty a následně opět sestavit. S tímto postupem se v praxi není možné setkat často, protože standardem je po sestavení stroje výrobcem jej již znovu nedemontovat.

Po instalaci stroje Zeiss Carat na půdě ČMI bylo předpokládáno, že jeho zaběhnutí bude trvat minimálně dva roky. V době, kdy bylo měření provedeno (dle postupu popsáno v kapitole 3.7.2) byl stroj v provozu teprve 14 měsíců a výsledky měření prokazují, že v současné době stroj nevyhovuje specifikaci  $MPE_E$ , a tudíž není možné stroj plnohodnotně využívat pro účely akreditované kalibrační laboratoře v rámci ČMI. Pro uvedení stroje Zeiss Carat do vyhovujícího stavu bude třeba provést servisní zásah dodavatelem a aktualizovat korekční mapu softwaru Zeiss Calypso.

## 7.5 Návod pro výpočet rozšířené nejistoty pomocí přílohy B

Příloha B v této práci představuje soubor vytvořený autorem v programu Microsoft Excel pro výpočet rozšířené nejistoty měření. Cílem této kapitoly je čtenáři popsat, jak se souborem pracovat. Jako příklad budou opět zpracovány náměry KM o délce  $L = 1000$  mm.

Po otevření souboru se zobrazí hlavní tabulka (obrázek 29 vlevo), prvním krokem je zadání jmenovité délky KM a naměřených hodnot do žlutě vybarvených buněk. Jak lze na obrázku 29 vidět, buňky se zapsanými daty následně ztratí své žluté zbarvení.

Výpočet rozšířené nejistoty měření přístroje Zeiss UPCM 850 CARAT S-ACC			Výpočet rozšířené nejistoty měření přístroje Zeiss UPCM 850 CARAT S-ACC		
Etalon: Koncové měřky (KM) o jmenovité hodnotě [mm]		$x_{ref}$	999,99843		
ČÍSLO MĚŘENÍ		NAMĚŘENÉ HODNOTY (uhlopříčka XY)		ČÍSLO MĚŘENÍ	
1.				999,99900	
2.				999,99880	
3.				999,99690	
4.				999,99730	
5.				999,99900	
6.				999,99775	
7.				999,99760	
8.				999,99745	
9.				999,99730	
10.				999,99700	
aritmetický průměr	$x_{bar}$	#DĚLENÍ_NULOU!		aritmetický průměr	$x_{bar}$
výběrová směrodatná odchylka	$s_x$	#DĚLENÍ_NULOU!		výběrová směrodatná odchylka	$s_x$
standardní nejistota typu A	$u_A$	#DĚLENÍ_NULOU!		standardní nejistota typu A	$u_A$
standardní nejistota typu B	$u_B$			standardní nejistota typu B	$u_B$
kombinovaná nejistota	$u_C$	#DĚLENÍ_NULOU!		kombinovaná nejistota	$u_C$
ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA [mm]	$U$	#DĚLENÍ_NULOU!		ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA [mm]	$U$
ÚPLNÝ VÝLEDEK MĚŘENÍ [mm]	–	#DĚLENÍ_NULOU! ± #DĚLENÍ_NULOU!		ÚPLNÝ VÝLEDEK MĚŘENÍ [mm]	–
maximální dovolená chyba při měření délky ( $0,7 + L/600$ ), L v mm	+MPE	0,00237		maximální dovolená chyba při měření délky ( $0,7 + L/600$ ), L v mm	+MPE
	-MPE	-0,00237			-MPE
$x_{bar} - x_{ref}$	$\Delta x$	#DĚLENÍ_NULOU!		$x_{bar} - x_{ref}$	$\Delta x$
pásma nejistoty	+	#DĚLENÍ_NULOU!		pásma nejistoty	+
	-	#DĚLENÍ_NULOU!			-

Obrázek 29: návod pro práci v příloze B, část.1 – hlavní tabulka před/po zadání hodnot.

Jak je patrné z obrázku 29 vpravo, hned po zadání naměřených hodnot jsou v dolní části tabulky zobrazeny výsledky, avšak tyto nejsou konečné. Zbývá ještě doplnit hodnotu standardní nejistoty typu B. Pro její výpočet je třeba přejít do listu „Výpočet stand. nejistoty typu B“ na tuto skutečnost upozorňuje i do buňky vložený komentář (viz obrázek 30).

standardní nejistota typu B	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="background-color: #4a4a4a; color: white; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin-right: 5px;">RK</div> <div> <p>Roman Kiska A17 ...</p> <p>Nutno doplnit hodnotu z listu "Výpočet stand. nejistoty typu B" pro konkrétní KM. POZOR V MILIMETRECH</p> <p>06.05.2021 18:30</p> <p>Odpovědět</p> </div> </div>
kombinovaná nejistota	
ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA [mm]	
ÚPLNÝ VÝLEDEK MĚŘENÍ [mm]	
maximální dovolená chyba při měření délky ( $0,7 + L/600$ ), L v mm	

Obrázek 30: návod pro práci v příloze B, část.2 – ukázka komentáře.

Obrázek 31 zobrazuje tabulku pro výpočet  $u_B$ . Zde je opět nutné vyplnit žlutě zbarvené buňky jako v předešlém případě.

Výpočet standardní nejistoty typu B						
Zadejte následující hodnoty			Koláčový graf zobrazující procentuální podíl příspěvků k celkové nejistotě			
délka KM, pro kterou má být vypočtena $u_B$	$L$		[m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>vliv nepřesnosti kalibrace měřícího stroje</li> <li>vliv použitého etalonu – koncová měřka</li> <li>vliv rozlišovací schopnosti stroje</li> <li>vliv rozdílu teplot měřícího zařízení a měřeného objektu</li> <li>vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C</li> </ul>		
parametry pro výpočet vlivu nepřesnosti kalibrace měřícího stroje ( $U = a_{CMM} + b_{CMM} \cdot L$ )	$a_{CMM}$		[-]			
	$b_{CMM}$		[-]			
parametry pro výpočet vlivu použitého etalonu ( $U = a_{E1} + b_{E1} \cdot L$ )	$a_{E1}$		[-]			
	$b_{E1}$		[-]			
rozlišovací schopnost přístroje	$R_{CMM}$		[ $\mu$ m]			
rozdílné teplot měřeného objektu a měřícího zařízení	$\Delta t$		[°C]			
odchylka teploty měřeného objektu od 20°C	$\Delta t_{20°C}$		[°C]			
koeficient teplotní roztažnosti materiálu měřeného	$\alpha$		$\cdot 10^{-6}$ [1/°C]			
Zdroje nejistoty	Odhad hodnoty		Standardní nejistota	Rozdělení pravděpodobnosti	Koeficient citlivosti $A_j$	příspěvek k nejistotě $u_B$ [ $\mu$ m]
vliv nepřesnosti kalibrace měřícího stroje	0	[ $\mu$ m]	$u_{CMM} = [\mu$ m]	Normální (Gaussovo)	1	0,000
			0	2		
vliv použitého etalonu – koncová měřka	0	[ $\mu$ m]	$u_{E1} = [\mu$ m]	Normální (Gaussovo)	1	0,000
			0	2		
vliv rozlišovací schopnosti stroje	0	[ $\mu$ m]	$u_R = [\mu$ m]	Rovnoměrné	1	0,000
			0	1,732050808		
vliv rozdílu teplot měřícího zařízení a měřeného objektu	0	[°C]	$u_{\Delta t} = [°C]$	Rovnoměrné	$L \cdot \alpha = [\mu$ m/°C]	0
			0	1,732050808		
vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C	0	[°C]	$u_{\Delta 20°C} = [\mu$ m/m]	Rovnoměrné	$L = [m]$	0
			0	1,732050808		
<b>Výsledná nejistota – <math>u_B</math> [<math>\mu</math>m]</b>						<b>0,000</b>

Obrázek 31: návod pro práci v příloze B, část.3 – prázdná tabulka pro výpočet  $u_B$ .

Po zadání všech požadovaných dat se v pravé dolní části tabulky zobrazí výsledná hodnota  $u_B$  v mikrometrech, jak lze vidět na obrázku 32. (metodika výpočtu a přednastavené výpočtové vzorce jsou stejné jako ty, které již byly detailně popsány v kapitolách 7.1 a 7.2).

Výpočet standardní nejistoty typu B						
Zadejte následující hodnoty			Koláčový graf zobrazující procentuální podíl příspěvků k celkové nejistotě			
délka KM, pro kterou má být vypočtena $u_B$	$L$	1	[m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>vliv nepřesnosti kalibrace měřícího stroje</li> <li>vliv použitého etalonu – koncová měřka</li> <li>vliv rozlišovací schopnosti stroje</li> <li>vliv rozdílu teplot měřícího zařízení a měřeného objektu</li> <li>vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C</li> </ul>		
parametry pro výpočet vlivu nepřesnosti kalibrace měřícího stroje ( $U = a_{CMM} + b_{CMM} \cdot L$ )	$a_{CMM}$	0,11	[-]			
	$b_{CMM}$	0,4	[-]			
parametry pro výpočet vlivu použitého etalonu ( $U = a_{E1} + b_{E1} \cdot L$ )	$a_{E1}$	-	[-]			
	$b_{E1}$	-	[-]			
rozlišovací schopnost přístroje	$R_{CMM}$	0,1	[ $\mu$ m]			
rozdílné teplot měřeného objektu a měřícího zařízení	$\Delta t$	0,1	[°C]			
odchylka teploty měřeného objektu od 20°C	$\Delta t_{20°C}$	0,1	[°C]			
koeficient teplotní roztažnosti materiálu měřeného	$\alpha$	11,5	$\cdot 10^{-6}$ [1/°C]			
Zdroje nejistoty	Odhad hodnoty		Standardní nejistota	Rozdělení pravděpodobnosti	Koeficient citlivosti $A_j$	příspěvek k nejistotě $u_B$ [ $\mu$ m]
vliv nepřesnosti kalibrace měřícího stroje	0,51	[ $\mu$ m]	$u_{CMM} = [\mu$ m]	Normální (Gaussovo)	1	0,255
			0,255	2		
vliv použitého etalonu – koncová měřka	0,154	[ $\mu$ m]	$u_{E1} = [\mu$ m]	Normální (Gaussovo)	1	0,077
			0,077	2		
vliv rozlišovací schopnosti stroje	0,1	[ $\mu$ m]	$u_R = [\mu$ m]	Rovnoměrné	1	0,058
			0,057735027	1,732050808		
vliv rozdílu teplot měřícího zařízení a měřeného objektu	0,1	[°C]	$u_{\Delta t} = [°C]$	Rovnoměrné	$L \cdot \alpha = [\mu$ m/°C]	11,5
			0,057735027	1,732050808		
vliv odchylky teploty materiálu při měření od 20 °C	0,1	[°C]	$u_{\Delta 20°C} = [\mu$ m/m]	Rovnoměrné	$L = [m]$	1
			0,383333333	1,732050808		
<b>Výsledná nejistota – <math>u_B</math> [<math>\mu</math>m]</b>						<b>0,814</b>

Obrázek 32: návod pro práci v příloze B, část.4 – vyplněná tabulka pro výpočet  $u_B$ .

Vliv použitého etalonu koncové měřky byl v tomto případě kvantifikován celým číslem (vycházejícím z kalibračního listu dané KM –  $u_{E1} = 0,154 \mu\text{m}$ ) rovnou ve sloupci „Odhad hodnoty“. Proto jsou buňky pro parametry  $a_{E1}$  a  $b_{E1}$  proškrtnuty. Obrázek 32 dále v horní pravé části zobrazuje koláčový graf, který demonstruje procentuální příspěvek každého identifikovaného vlivu k výsledné nejistotě.

Posledním krokem je již zmíněný přepis výsledné nejistoty  $u_B$  do hlavní tabulky, jak je zobrazeno na obrázku 33. Hodnotu  $u_B$  je nutno do hlavní tabulky zadat v milimetrech, poté je výsledná hodnota finální.

<b>Výpočet rozšířené nejistoty měření přístroje Zeiss UPCM 850 CARAT S-ACC</b>		
<b>Etalon: Koncové měřky (KM) o jmenovité hodnotě [mm]</b>	<b><math>x_{ref}</math></b>	<b>999,99843</b>
<b>ČÍSLO MĚŘENÍ</b>	<b>NAMĚŘENÉ HODNOTY (uhlopříčka XY)</b>	
1.	999,99900	
2.	999,99880	
3.	999,99690	
4.	999,99730	
5.	999,99900	
6.	999,99775	
7.	999,99760	
8.	999,99745	
9.	999,99730	
10.	999,99700	
<b>aritmetický průměr</b>	<b><math>x_{bar}</math></b>	<b>999,99781</b>
<b>výběrová směrodatná odchylka</b>	<b><math>s_x</math></b>	<b>0,00079</b>
<b>standardní nejistota typu A</b>	<b><math>u_A</math></b>	<b>0,00025</b>
<b>standardní nejistota typu B</b>	<b><math>u_B</math></b>	<b>0,00081</b>
<b>kombinovaná nejistota</b>	<b><math>u_C</math></b>	<b>0,00085</b>
<b>ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA [mm]</b>	<b>U</b>	<b>0,00170</b>
<b>ÚPLNÝ VÝLEDEK MĚŘENÍ [mm]</b>	<b>–</b>	<b>999,99781 ± 0,00170</b>
<b>maximální dovolená chyba při měření délky (<math>0,7 + L/600</math>), L v mm</b>	<b>+MPE</b>	<b>0,00237</b>
	<b>-MPE</b>	<b>-0,00237</b>
<b><math>x_{bar} - x_{ref}</math></b>	<b><math>\Delta x</math></b>	<b>-0,00062</b>
<b>pásma nejistoty</b>	<b>+</b>	<b>0,00066</b>
	<b>–</b>	<b>-0,00066</b>

Obrázek 33: návod pro práci v příloze B, část.5 – hlavní tabulka se zadanou  $u_B$  a úplný výsledek měření.

Poslední část hlavní tabulky popisuje vyhodnocení shody se specifikací. Je žádoucí, aby výsledná průměrná hodnota náměrů  $x_{bar}$  padla do rozmezí ( $-MPE + U$ ) a ( $MPE - U$ ), pokud hodnota  $x_{bar}$  do rozmezí padne, je prokázána shoda se specifikací a buňka je zeleně zbarvena, jak je zobrazeno na obrázku 33. V případě, že hodnota  $x_{bar}$  leží mimo danou specifikaci, buňka se zbarví červeně.

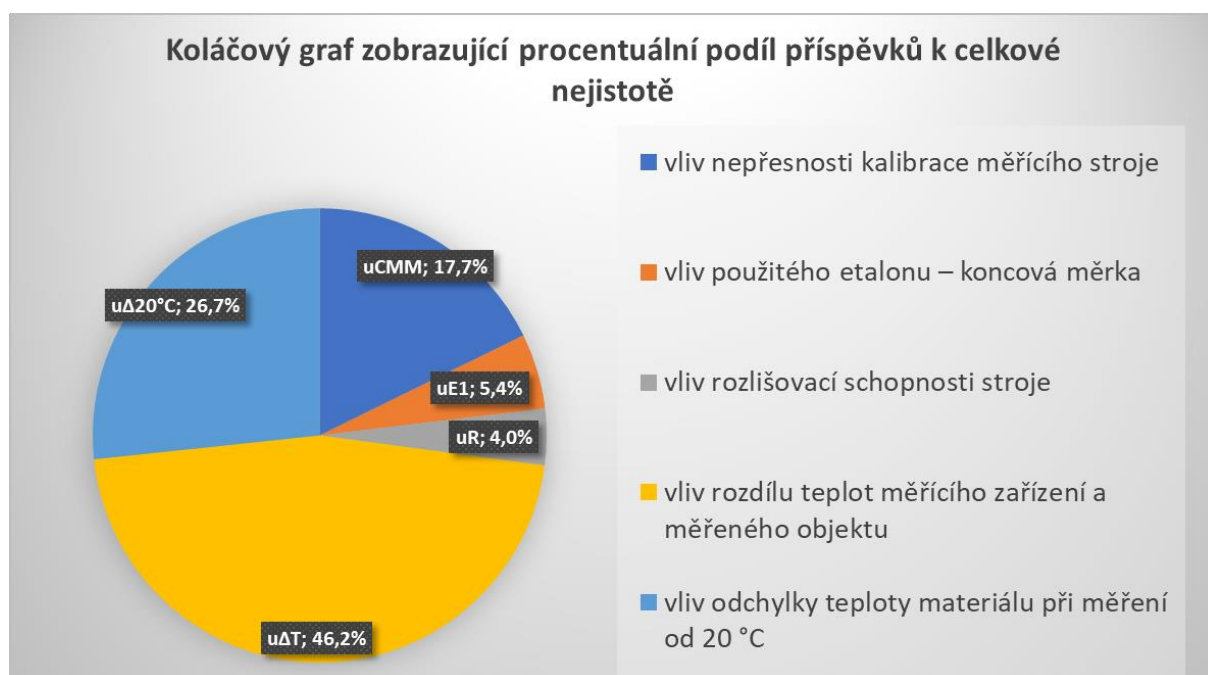
Funkčnost souboru lze označit za ověřenou, jelikož výsledná hodnota rozšířené nejistoty v tabulce se rovná, hodnotě kvantifikované v kapitole 7.4.



## 8 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Modelový příklad výpočtu rozšířené nejistoty pro náměry KM o délce 1000 mm, jenž byl popsán v kapitolách 6 a 7, byl ve shodě se specifikací, avšak ostatní náměry zpracované v příloze B často překročili hranici pole přijetí. Cílem této kapitoly je vyhodnotit, do jaké míry jednotlivé zdroje nejistot přispívají k výsledné hodnotě nejistoty měření a jakým způsobem je možno tyto signifikantní zdroje eliminovat, aby byly v budoucnu zajištěny přesnější výsledky měření.

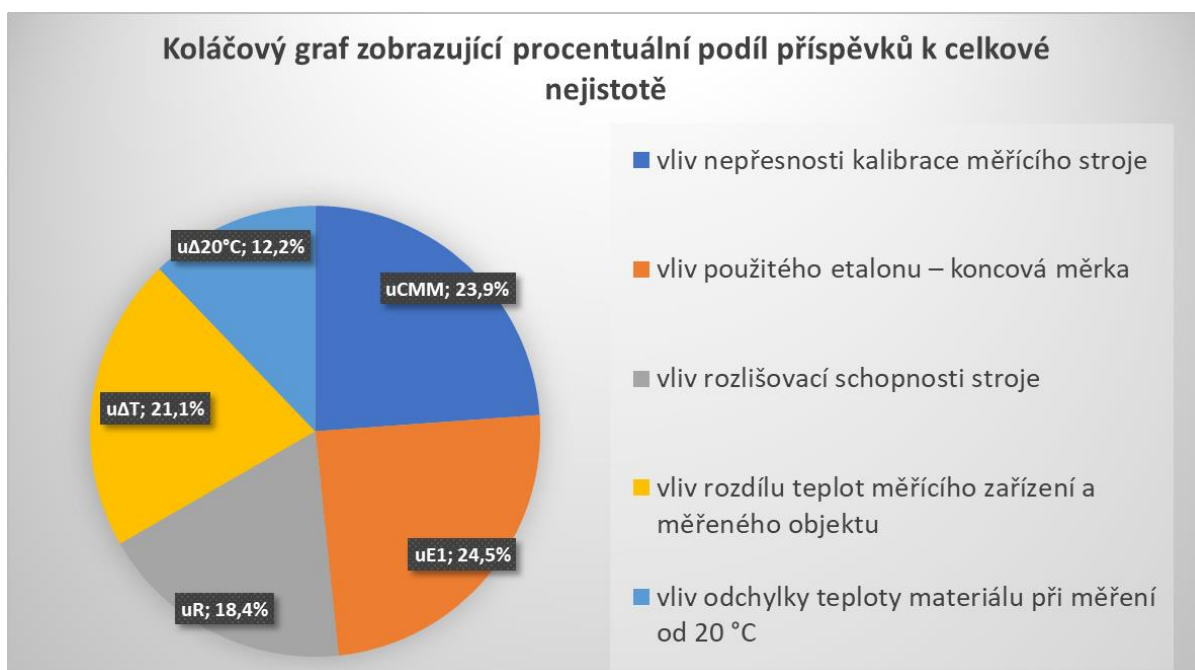
Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, součástí výpočtového souboru je i koláčový graf znázorňující procentuální příspěvek každého z identifikovaných vlivů k výsledné nejistotě. Pro koncovou měрку o délce  $L = 1000$  mm, která byla zpracována jako ukázkový příklad, vypadá graf následovně (obrázek 34).



Obrázek 34: koláčový graf zobrazující podíl jednotlivých vlivů k výsledné nejistotě.

Nejsignifikantnější vliv na výslednou nejistotu měření mají vlivy spojené s teplotními podmínkami při měření, a sice  $u_{\Delta T}$  (46,2 %) a je  $u_{\Delta 20^\circ\text{C}}$  (26,7 %). Poměrně významně pak přispívá vliv  $u_{\text{CMM}}$  (17,7 %). Zbývající dva vlivy  $u_A$  a  $u_R$  ovlivňují výslednou nejistotu jen minimálně (>10 %).

Pro představu, do jaké míry ovlivňuje délka měřeného objektu hodnotu výsledné nejistoty měření, byly výpočty zopakovány, ale tentokrát byla hodnota délky měřeného objektu snížena na 100 mm. Obrázek 35 zobrazuje procentuální podíly příspěvků k výsledné nejistotě po změně délky  $L$ .



Obrázek 35: koláčový graf zobrazující podíl jednotlivých vlivů k výsledné nejistotě. Snížena délka na  $L=100$  mm.

Obrázek 35 prokazuje, že se změnou délky  $L$  došlo skutečně k podstatným změnám. Zajímavým poznatkem je, že žádný ze zdrojů nejistoty nyní nepřispívá hodnotou menší než 10 %, což potvrzuje správnost volby jednotlivých zdrojů nejistoty měření v kapitole 6. Prvenství se ujal vliv  $u_{E1}$  (24,5 %) následován  $u_{CMM}$  (23,9 %). Největší pokles zaznamenaly vlivy závislé na teplotních podmínkách při měření  $u_{\Delta T}$  (z 46,2 na 21,1 %) a  $u_{\Delta 20^\circ C}$  (z 26,7 na 12,2 %). Tato skutečnost je zapříčiněna tím, že oba tyto vlivy jsou přímo závislé na délce měřeného objektu, jak dokazují vztahy pro jejich kvantifikaci (6.5) a (6.6).

Jelikož vlivy k výsledné nejistotě spojené s teplotními podmínkami při měření se projeví jako nejvíce signifikantní (obrázek 34) je vhodné zabývat se eliminací těchto zdrojů na prvním místě. Přestože měřící laboratoř, ve které bylo měření provedeno, je standardně vybavena klimatizací a vyhodnocovací software přístroje Zeiss Carat je schopen díky důslednému monitorování teploty v průběhu měření kompenzovat mnohé teplotní odchylky, autor doporučuje důsledné dodržování konstantní teploty v měřící laboratoři (co nejbližší 20 °C), minimalizování počtu pracovníků v laboratoři a omezení větrání, aby se co nejvíce snížilo proudění vzduchu v místnosti.

## 9 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo zpracovat komplexní studii přesnosti souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC pro potřeby národního metrologického orgánu ČMI Brno v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Přesnost měření byla kvantifikována pomocí rozšířené nejistoty měření a byl vytvořen návod pro její výpočet, který bude sloužit operátorům CMM v praxi akreditované kalibrační laboratoře ČMI, která má nezastupitelnou roli v systému metrologické návaznosti, který je využíván v ČR.

Prvním cílem byl popis současného stavu poznání v oblasti metrologie a přesného měření na CMM. Tento cíl byl zpracován v kapitole 3. V úvodní části kapitoly byly definovány základní pojmy spojené s problematikou této práce, zejména pak pojmy jako chyba a nejistota měření, dále byl definován princip metrologické návaznosti a byl popsán národní metrologický systém ČR, ve kterém má laboratoř ČMI se svými stroji CMM Zeiss UPMC a Xenos důležitou úlohu v oblasti kalibrací etalonů a měřidel.

Druhá část kapitoly byla věnována problematice přesného měření na CMM, byly vyjmenovány základní mechanické prvky CMM, byl popsán obecný postup kalibrace portálového CMM a byla přiblížena norma ČSN EN ISO 10 360-2, která specifikuje postupy pro přijímací a periodické zkoušky měřících zařízení. Pro své velmi podrobné zpracování poslouží tato kapitola zejména čtenářům, kteří se dané problematice dosud blíže nevěnovali.

Druhým cílem byla charakteristika přístroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC. Tento cíl byl zpracován v kapitole 4. V úvodu kapitoly byly detailně popsány technické parametry stroje Zeiss Carat, byly vysvětleny pojmy jako S-ACC či Carat figurující v názvu stroje a bylo přidáno několik snímků z měřicí laboratoře, kde je stroj umístěn a provozován. Dále byly uvedeny požadavky na environmentální pracovní podmínky stroje a maximální dovolené chyby měření. Závěrem byl představen software Zeiss Calypso, který je využíván pro vyhodnocování výsledků měření.

Třetím cílem bylo provedení souboru experimentálních měření. Tento cíl byl zpracován v kapitole 5. Soubor experimentálních měření byl proveden a poskytnut vedoucím této diplomové práce panem Ing. Janem Šrámkem, Ph.D. V době, kdy bylo měření naplánováno, nebylo možné zajistit, aby autor práce prošel školením, které je pro měření na stroji Zeiss Carat nezbytné, a to z důvodu platnosti mnoha vládních nařízení a restrikcí. V kapitole je představena tabulka obsahující soubor náměrů koncových měrek naměřených v uhlopříčce XY přístroje Zeiss Carat. Kapitola byla dále doplněna obrázky, které byly pořízeny během měření.

Čtvrtým cílem byla identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření přístroje. Tento cíl byl zpracován v kapitole 6. V první části byly identifikovány relevantní zdroje nejistoty přispívající k výsledné nejistotě měření, pro každý zdroj nejistoty byla popsána metodika kvantifikace, která byla následně provedena v druhé části této kapitoly. Modelový příklad výpočtu nejistot byl proveden pro náměry nejdelší koncové měrky  $L = 1000$  mm. Vliv rozptylu naměřených hodnot čili nejistota typu A byla stanovena na základě statistického zpracování naměřených hodnot. Vlivy nepřesnosti kalibrace měřicího stroje, použitých etalonů

a konečné rozlišovací schopnosti měřícího přístroje byly kvantifikovány pomocí údajů doložených v jejich kalibračních listech. Vliv odchylky teploty materiálu od 20 °C a vliv rozdílu teplot měřeného objektu a CMM byly vypočítány na základně teplotních podmínek během měření.

Pátým cílem bylo stanovení nejistoty měření přístroje. Tento cíl byl zpracován v kapitole 7. Úvodem byla určena výsledná hodnota nejistoty typu B, která byla následně spolu s hodnotou nejistoty typu A použita pro kvantifikaci kombinované standardní nejistoty. Dalším krokem bylo vynásobení kombinované nejistoty koeficientem rozšíření  $k$ . Pro zabezpečení, že interval pokrytí bude obsahovat zhruba 95,45 % pravých hodnot, byl zvolen koeficient rozšíření  $k = 2$ . Pro výslednou hodnotu rozšířené nejistoty měření byla posouzena shoda se specifikací, definovanou maximální dovolenou chybou při měření délky  $MPE_E$ , a to jak výpočtově, tak graficky. Shoda se specifikacemi pro danou KM byla prokázána, ale jednalo se pouze o ojedinělý případ. Po zpracování celého souboru naměřených hodnot bylo zjištěno, že ostatní hodnoty ve shodě se specifikací nejsou. Tento fakt zapříčinily nestandardní podmínky instalace a přenosu stroje do měřící laboratoře, která se nachází v suterénu budovy ČMI. Autor na tomto místě doporučuje podrobit stroj autorizovanému servisu a provést aktualizaci korekční mapy softwaru Calypso, jelikož v současné době není možné stroj plnohodnotně využívat pro účely akreditované kalibrační laboratoře, tj. kalibrace etalonů a pracovních měřidel v rámci ČMI. V poslední části kapitoly je popsán výpočtový soubor, vytvořený v programu Microsoft Excel, který obsahuje předdefinované vzorce pro výpočet nejistoty měření a může se stát vítaným pomocníkem při každodenní praxi metrologů z řad ČMI.

Šestým cílem bylo vyhodnocení dosažených výsledků. Tento cíl byl zpracován v rámci kapitoly 8. Jelikož mnoho z náměrů zpracovaných v příloze B nevyhovovalo specifikaci, byly v této kapitole posouzeny vlivy jednotlivých zdrojů nejistot na výslednou nejistotu měření. V první části kapitoly byl představen koláčový graf zobrazující procentuální podíly jednotlivých přispěvatelů k výsledné nejistotě měření. Výchozí hodnoty byly již zpracovány v rámci kapitoly 6 a bylo zjištěno, že největšími podíly k výsledné nejistotě měření přispívají zdroje spojené s teplotními podmínkami během měření (v součtu necelých 73 %). Pro demonstraci toho, do jaké míry ovlivňuje výsledné hodnoty nejistot délka měřeného objektu, byl zpracován další koláčový graf, tentokrát však byla délka měřeného objektu zmenšena na desetinu původní hodnoty (z 1000 na 100 mm). Výsledkem byl značný nárůst vlivu použitého etalonu, konečné rozlišovací schopnosti i nejistoty kalibrace CMM. Zdroje nejistot spojené s teplotními podmínkami naproti tomu zaznamenaly pokles, v součtu na polovinu původní hodnoty, což prokázalo jejich značnou závislost na délce měřeného objektu. Z těchto poznatků vyplývá, že pro zajištění vyšší přesnosti měření v budoucnu je nutné v prvé řadě eliminovat právě zdroje nejistot spojené s teplotními podmínkami během měření. Autor doporučuje důsledné dodržování konstantní teploty v měřící laboratoři, minimalizování počtu pracovníků v laboratoři a omezení větrání, aby se co nejvíce snížilo proudění vzduchu v místnosti.

Pro kompletní přehled byla diplomová práce doplněna o přílohy A a B obsahující kalibrační list a soubor pro výpočet nejistoty měření. Kalibrační listy použitých etalonů, na jejichž údaje je v této práci odkazováno, nebyly přiloženy na žádost ČMI.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. 2011. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [2] JANKOVÝCH, Róbert. *Statistické nástroje v metrologii*. Brno 2020. Poznámky z přednášek do předmětu XPT – Praktická metrologie pořizené autorem, Vysoké učení v Brně – Fakulta strojního inženýrství
- [3] *Metrologie v kostce (třetí upravené a doplněné vydání)* [online]. Praha. [vid. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3389797-Metrologie-v-kostce-treti-upravene-a-doplnene-vydani.html>
- [4] TNI 01 0115:2009. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 90 stran. Třídící znak 83031.
- [5] *Terminologie z oblasti metrologie. (2. vydání)* [online]. [vid. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://adoc.pub/terminologie-z-oblasti-metrologie-2-vydani.html>
- [6] Zákon č. 505/1990 Sb.: Zákon o metrologii. In: Sbírka zákonů. 16. listopad 1990. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/>
- [7] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav POSPÍŠIL. Stanovení přesnosti měření v inženýrské praxi. *Metrologie*. 2015. ISBN 1210-3543.
- [8] ČSN ISO 5725-1. *Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 1: Obecné zásady a definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997. 28 s. Třídící znak 010251.
- [9] HOQUE, Jawad Mahmud a Gregory D. ERHARDT. The changing accuracy of traffic forecasts [online]. 2021 [vid. 2021-05-03]. ISSN 1572-9435. Dostupné z: doi:10.1007/s11116-021-10182-8
- [10] SKOPAL, Miroslav a Alois FIALA. *Kalibrace a přesnost měření* [online]. [vid. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni.html>
- [11] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Strojírenská metrologie: studijní opora „Strojírenská metrologie“*. 2011. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2723-0.
- [12] TNI 01 4109-3.1. *Nejistota měření - Část 3: Pokyn k vyjádření nejistoty měření (GUM 1995) Doplněk 1: Šíření rozdělení užitím metod Monte Carlo (Pokyn ISO/IEC 98-3/Doplněk 1)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 118 s. Třídící znak 01 4109.
- [13] EA 4/02:2013. *Vyjádřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2), DEC 1999)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 74 stran.

- [14] Oficiální výukové stránky University Tartu, Estonsko. Dostupné z: <https://sisu.ut.ee/measurement/7-precision-trueness-accuracy>
- [15] *A Brief History Of CMM Technology* [online]. [vid. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://status-cmm.co.uk/blog/a-brief-history-of-cmm-technology/>
- [16] *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. [vid. 2021-02-07]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [17] Oficiální firemní stránky Renishaw, s.r.o. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/>
- [18] ZACHOVAL, Luboš a František KOPŘIVA. *Kalibrační postup KP 1.1.3/02/13 souřadnicový měřicí stroj (CMC) portálový* [online]. 3. květen 2021. Dostupné z: [http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/kp\\_1130213\\_merici\\_stroj\\_portalovy.pdf](http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/kp_1130213_merici_stroj_portalovy.pdf)
- [19] ČSN EN ISO 10360-2. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 32 s. Třídící znak 252011.
- [20] BERÁNEK, Libor, Luděk VOLF a Petr MIKEŠ. *Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů* [online]. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Katedra technologie obrábění, 2011 [vid. 2021-03-13]. ISBN 978-80-7043-934-0. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/16361>
- [21] *UPMC.pdf* [online]. [vid. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.hitop.com.tw/TSK/UPMC.pdf>
- [22] *UPMC-Specs.pdf* [online]. [vid. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.atechauthority.com/pdf/UPMC-Specs.pdf>
- [23] Oficiální stránky firmy Carl Zeiss AG. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/software/zeiss-calypso/zeiss-calypso.html>
- [24] Oficiální stránky Českého metrologického institutu. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/>
- [25] LYSÝ, Z. *Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje (SMS)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 61s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.

## SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Význam
$\alpha$	koeficient teplotní roztažnosti
$\Delta T$	rozdíl teplot měřeného objektu a měřícího zařízení
$\Delta t_{20^{\circ}\text{C}}$	odchylka teploty měřeného objektu od 20 °C
$\chi$	koeficient plynoucí z pravděpodobnostního rozdělení
$A_j$	koeficient citlivosti
$E_L$	chyba měření délky
$E_{L,MPE}$	maximální dovolená chyba při měření délky
$k$	koeficient rozšíření
$L$	měřená délka
$MPE_E$	maximální dovolená chyba při měření délky
$MPE_P$	maximální dovolená chyba snímání
$MPE_{RONt}$	maximální dovolená chyba při měření kruhovitosti
$MPE_{THP}$	maximální dovolená chyba dotykového snímání
$n$	počet měření
$R_0$	opakovaný rozsah chyby při měření délky
$R_{0,MPL}$	maximální dovolená mez opakovaného rozpětí
$R$	rozptyl
$s_y$	směrodatná odchylka
$s_{\bar{y}}$	směrodatná odchylka výběrového průměru
$u_A$	standardní nejistota typu A
$u_B$	standardní nejistota typu B
$u_C$	kombinovaná standardní nejistota
$u_1$	mezní hodnota pro chybu měření délky v jedné ose
$u_3$	mezní hodnota pro chybu měření délky v prostoru
$u_{CMM}$	nejistota vlivu měření na CMM
$u_E$	nejistota vlivu měřeného etalonu
$u_R$	nejistota vlivu konečné rozlišovací schopnosti stroje
$u_{\Delta 20^{\circ}\text{C}}$	nejistota vlivu odchylky teploty od 20 °C
$u_{\Delta T}$	nejistota vlivu rozdílu teplot měřeného objektu a měřidla
$U$	rozšířená nejistota
$U_{CMM}$	nejistota CMM z kalibračního listu
$U_E$	nejistota etalonu z kalibračního listu
$U_R$	rozlišovací schopnost přístroje
$y_i$	i-tá hodnota měřené veličiny Y
$\bar{y}$	aritmetický průměr naměřených hodnot
$Z_j$	zdroj nejistoty

## SEZNAM ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
AMS	Autorizovaná metrologická střediska
BIPM	Mezinárodní úřad pro míry a váhy
CAD	Computer aided design
Carat	Coated aging resistant alloy technology
CMM	Coordinate measuring machine
CNC	Computer numeric control
ČIA	Český institut pro akreditaci
ČMI	Český metrologický institut
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
ISO	International Organization for Standardization
KM	Koncová měrka
LPM	Laboratoř primární metrologie
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NMS	Národní metrologický systém
OI	Oblastní inspektorát
PMI	Product and manufacturing information
S-ACC	Super accuracy
SMS	Souřadnicový měřicí stroj
TNI	Transnational institute
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: princip přesného měření: horizontální osa – preciznost měření, vertikální osa – správnost měření [9].....	20
Obrázek 2: schéma stanovení rozšířené nejistoty měření [11]. ....	23
Obrázek 3: tabulka definující součinitele $\chi$ [11]. ....	25
Obrázek 4: návaznost mezi přesností a nejistotou měření [14]. ....	28
Obrázek 5: schéma řetězce metrologické návaznosti [3].....	29
Obrázek 6: schéma NMS České republiky [2].....	31
Obrázek 7: vývoj trendu celkové přesnosti výroby v čase [1].....	34
Obrázek 8: typy konstrukce CMM [1]. ....	36
Obrázek 9: typy konstrukce portálových CMM [1].....	37
Obrázek 10: typy snímacích hlavic [1]. ....	38
Obrázek 11: schéma a rozměry měřicího dotyku [1]. ....	38
Obrázek 12: materiály kuliček: a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý [1]. ....	39
Obrázek 13: materiály dřívků: a) ocel, b) karbid wolframu, c)keramika, d) uhlíková vlákna, e) hliník, f) titan [17].....	40
Obrázek 14: zdroje chyb při měření na CMM [20]. ....	44
Obrázek 15: a) deformace pružných součástí, b) deformace pružného povrchu součásti, c) tvarová odchylka měřeného povrchu [1]. ....	44
Obrázek 16: opotřebení měřicí kuličky: a) otěrem, b) usazování hliníku na povrchu [1]. ....	45
Obrázek 17: schéma přepočtu souřadnic ze snímaného bodu [1]. ....	45
Obrázek 18: příklady odsazení hrotu snímacího dotyku od osy pinoly [19]. ....	48
Obrázek 19: a) souřadnicový měřicí stroj Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC v laboratoři ČMI, b) snímací hlavice HSS, c) teplotní senzor umístěný na měřeném objektu. ....	51
Obrázek 20: snímací hlava Zeiss VAST Gold. Vlevo fotka z katalogu [23]. Vpravo fotka z laboratoře LPM ČMI.....	52
Obrázek 21: základní parametry Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC [22]. ....	53
Obrázek 22: a) $MPE_E$ , b) $MPE_P$ , c) $MPE_{THP}$ , d) $MPE_{RONt}$ [22]. ....	54
Obrázek 23: uživatelské prostředí softwaru Zeiss Calypso [23].....	55
Obrázek 24: sada měřících dotyků Zeiss s rubínovými kuličkami vlevo. Aplikace rubínových kuliček jako etalonu délky pro přístroj nanoCT vpravo. ....	57
Obrázek 25: měření v uhlopříčce horizontálních os X a Y.....	58
Obrázek 26: měření ve vertikální ose z. V ose y umístěna KM o délce 1000 mm. ....	58
Obrázek 27: grafické zpracování posouzení shody se specifikací. ....	66
Obrázek 28: graf naměřených odchylek v uhlopříčce XY.....	67
Obrázek 29: návod pro práci v příloze B, část.1 – hlavní tabulka před/po zadání hodnot. ....	68
Obrázek 30: návod pro práci v příloze B, část.2 – ukázka komentáře.....	68
Obrázek 31: návod pro práci v příloze B, část.3 – prázdná tabulka pro výpočet $u_B$ .....	69
Obrázek 32: návod pro práci v příloze B, část.4 – vyplněná tabulka pro výpočet $u_B$ .....	69
Obrázek 33: návod pro práci v příloze B, část.5 – hlavní tabulka se zadanou $u_B$ a úplný výsledek měření.....	70
Obrázek 34: koláčový graf zobrazující podíl jednotlivých vlivů k výsledné nejistotě.....	71

Obrázek 35: koláčový graf zobrazující podíl jednotlivých vlivů k výsledné nejistotě. Snížena délka na  $L=100$  mm. .... 72

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: závislost hodnoty koeficientu $k_S$ na počtu měření [2]. ....	24
Tabulka 2: základní doporučené koeficienty rozšíření [2]. ....	27
Tabulka 3: maximální dovolené chyby stroje Zeiss UPMC 850 Carat S-ACC [22]. ....	53
Tabulka 4: náměry KM v uhlopříčce XY. ....	57
Tabulka 5: náměry KM o délce $L = 1000$ mm. ....	62
Tabulka 6: posouzení shody hodnoty rozšířené nejistoty se specifikací definovanou $MPE_E$ . ....	66

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Kalibrační list souřadnicového měřicího stroje Zeiss UPMC Carat

Příloha B – Microsoft Excel program pro výpočet rozšířené nejistoty měření

- B1 – soubor s daty naměřenými 8. května 2021, pro účely této práce
- B2 – prázdná šablona