



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## MANAGEMENT KALIBRACE SOUŘADNICOVÉHO MĚŘICÍHO STROJE (SMS)

CALIBRATION MANAGEMENT SYSTEM OF MEASURING MACHINE (CMM)

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ZBYNĚK LYSÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KOŠKA, Ph.D.

BRNO 2012





Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Zbyněk Lysý

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Metrologie a řízení jakosti (3911T032)**

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:

### **Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje (SMS)**

v anglickém jazyce:

### **Calibration management system of measuring machine (CMM)**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Souřadnicové měřicí stroje lze využívat k délkovým měřením různých geometrických parametrů. V případě použití souřadnicového měřicího stroje pro kalibrace jiných měřidel je třeba postupovat podle validovaného kalibračního postupu s vyjádřenou nejistotou.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je vytvoření kalibračního postupu, včetně postupu pro odhad nejistoty, pro měření souřadnicovým měřicím strojem s dotykovou sondou:

1. Analýza systému měření dotykovou sondou Renishaw.
2. Analýza nejistot při měření délkových veličin.
3. Stanovení postupu kalibrace pro měření souřadnicovým měřicím strojem s dotykovou hlavou Renishaw.
4. Kvantifikace nejistoty při měření souřadnicovým měřicím strojem s dotykovou sondou Renishaw.

Seznam odborné literatury:

1. Chudý, V., Palenčár, R., Kureková, E., Halaj, M.: Meranie technických veličin. Vydavateľstvo STU. Bratislava, 1999. ISBN 80-227-1275-2.
2. ČSN EN ISO 10 012:2003. Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení. ČSNI. Praha, 2003.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization. Geneva, 1993.
4. EA 4/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. Český normalizační institut. Praha, 2001. ISBN 80-7283-054-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Koška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 9.11.2011


L.S.

---

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

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ABSTRAKT

Diplomová práce na téma management kalibrace souřadnicového stroje má za úkol vypracovat podrobnou analýzu nejistot při měření na 3D souřadnicovém měřicím stroji Micro-Vu Excel v praxi, doplněnou o praktický příklad výpočtu nejistoty měření. Součástí práce je také zapracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení a vytvoření metodického kalibračního postupu pro kalibrování součástí právě na tomto stroji.

**Klíčová slova:** metrologie, nejistoty měření, doteková sonda, kalibrační postup

Počet stran: 61; počet obrázků: 23, počet příloh: 6

## ABSTRACT


This diploma thesis with title of „Management of Coordinate Measuring Machine Calibration“ aimed to develop detailed analysis of uncertainties when deploying 3D coordinate measuring machine MicroVu Excel in practice. The analysis was supported by an example of measuring uncertainty calculation. This thesis also discusses the integration of automatic assessment of uncertainties into programming equipment; and creation of methodical calibration process for this kind of machine.

**Keywords:** metrology, uncertainty of measurement, CMM probes, calibration procedure

Pages: 61; pictures: 23, Supplements: 6

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LYSÝ, Z. Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje (SMS). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a externího konzultanta a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně, dne 25. května

.....  
Zbyněk Lysý


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval mému odbornému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Koškovi, PhD. a konzultantovi Ing. Janu Šrámkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Českému metrologickému institutu za poskytnutí zázemí a prostoru k sepsání závěrečné práce.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1. SYSTÉM MĚŘENÍ DOTEKOVOU SONDOU RENISHAW</b> .....	<b>11</b>
1.1 Historické ohlédnutí .....	11
1.2 Dotekové sondy .....	11
1.3 Doteky.....	16
<b>2. VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT U DÉLKOVÝCH MĚŘENÍ</b> .....	<b>25</b>
2.1 Úvod do problematiky .....	25
2.2 Koncepce nejistot měření .....	25
2.3 Obecný postup výpočtu .....	26
2.4 Zdroje nejistot v systému měření .....	26
2.5 Typy standardních nejistot a způsob jejich vyhodnocení .....	28
2.6 Výpočet kombinované standardní nejistoty .....	31
2.7 Výpočet rozšířené nejistoty .....	32
<b>3. KVANTIFIKACE NEJISTOT MĚŘENÍ NA SMS</b> .....	<b>33</b>
3.1 Úvod do problematiky .....	33
3.2 Popis pracovního prostředí .....	33
3.3 Významné zdroje nejistot.....	37
3.4 Podrobná analýza nejistot.....	37
3.5 Metodika měření .....	40
3.6 Praktický výpočet.....	41
3.7 Zhodnocení praktického výpočtu .....	46
3.8 Zapracování automat. vyhodnocení nejistot do programového vybavení .....	49
<b>4. STANOVENÍ KALIBRAČNÍHO POSTUPU</b> .....	<b>51</b>
4.1 Spojitost nejistoty měření s kalibracemi .....	51
4.2 Náležitosti kalibračního postupu .....	51
4.3 Vlastní kalibrační postup s komentáři .....	51
<b>ZÁVĚR</b> .....	57
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	59
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	61

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ÚVOD

Činnost měření provázelo lidstvo už od nepaměti a ne jinak je tomu i v dnešní době. I když si to možná neuvědomujeme, s měřením se setkáváme téměř na každém kroku. Například když musíme uhradit cenu za spotřebovanou energii, když platíme za zvážené zboží v supermarketu nebo když si jen tak „kalibrujeme“ hodinky, aby ukazovaly správný čas. Ať chceme nebo ne, metrologie se tak stala přirozenou součástí našich životů.

Ovšem stále nesmíme zapomínat, že s měřením jde „ruku v ruce“ i pochybnost, zda naměřená hodnota odpovídá hodnotě skutečné. I přes velké pokroky v metodice měření, v technické úrovni měřidel, ve znalostech personálu a v možnostech zpracování dat, nejsme schopni určit skutečnou hodnotu měřeného znaku. S velkou pravděpodobností to možné ani nikdy nebude. Můžeme pouze odhadnout interval, v němž se s určitou pravděpodobností skutečná hodnota nachází. A právě touto problematikou se diplomová práce také zabývá.

V úvodní části nastiňuje práce čtenáři teorii systému měření na souřadnicovém měřicím stroji pomocí dotekových sond firmy Renishaw, předního světového producenta komplexních měřicích systémů pro tyto stroje. Jsou zde popsány základní informace poskytující prvotní orientaci v této problematice. Z důvodu lepší orientace je rozdělena na dvě podkapitoly: na dotekové sondy a doteky samotné, jež jsou jejich širokou podoblastí.

V následující kapitole je objasněna teorie vyhodnocování výsledků při měření pomocí tzv. nejistot. S ní úzce souvisí kapitola třetí, která by se mohla pokládat za stěžejní část celé práce. Jejím hlavním cílem je získání a aplikace poznatků při měření na souřadnicovém měřicím stroji. Jedná se zejména o vyhodnocení způsobilosti měření v praxi a určení a kvantifikace podstatných zdrojů nejistot při měření. Jednotlivé kroky jsou teoreticky popsány, rozebrány a ukázány na praktickém příkladu.

V závěru práce je - s využitím dat a informací z předešlých kapitol – sestaven návrh metodického kalibračního postupu, který je přímo aplikovatelný v praxi.

V práci se vzhledem k jejímu rozsahu předpokládá znalost základních definic a terminologie z oblasti měření. Současně, pokud není uvedeno jinak, předpokládá se vždy normální rozdělení pravděpodobnosti.



Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky


Str. 10



## DIPLOMOVÁ PRÁCE





	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

# 1 SYSTÉM MĚŘENÍ DOTEKOVOU SONDOU RENISHAW

## 1.1 Historické ohlédnutí

První spínací doteková sonda byla vynalezena už před 40 lety a ve svých prvopočátcích sloužila především pro měření obrobků na souřadnicových měřicích strojích. Později vedl její další vývoj k použití na obráběcích strojích a snímání se stalo přirozenou součástí automatizovaných výrobních procesů na CNC obráběcích centrech. Od té doby se tato technologie soustavně vyvíjí a nabízí stále se zvyšující úroveň přesnosti a stability...

## 1.2 Dotekové sondy

Zvýšení přesnosti, provozuschopnosti a konkurenceschopnosti, eliminace nákladných prostojů stroje atd. To mohou být například důvody, proč v dnešní době využívat k měření dotekových sond. Ruční nastavování nástrojů, ustavování obrobků a kontrola dílců jsou časově velmi náročné operace, které jsou náchylné na chyby obsluhy. Použití sond snižuje náklady na seřizovače nástrojů, drahé upínače a na ruční ustavení obrobku číselníkovými úchylkoměry. Snímání je rychlé a spolehlivé, přičemž odchylky stroje lze automaticky upravit.

### 1.2.1 Konstrukční řešení dotekových sond

V současné době nabízí firma Renishaw dvě různé konstrukční technologie sond. První technologie je založena na jednoduchém mechanismu využívajícím kinematického principu polohování spínače. Druhá, poměrně mladší technologie, je technologie tenzometrického snímače využívající vysoce citlivé snímače změny síly – tenzometry. Proto poskytuje řádově vyšší přesnost měření, která je nezbytná pro některé nové aplikace.

#### Kinematická sonda

Kontaktní spínací mechanismus je založen na kinematickém uspořádání trojice kinematických hnízd složených vždy z jedné válcové a dvou kulových ploch, které jsou k sobě přitlačovány tlakem pružiny. Každé kinematické hnízdo má kontakt ve dvou stykových bodech. Celý kinematický mechanismus je tedy definován celkem šesti body doteku, které zajišťují, že snímací dotek je po vychýlení vrácen na původní místo s vynikající opakovatelností.

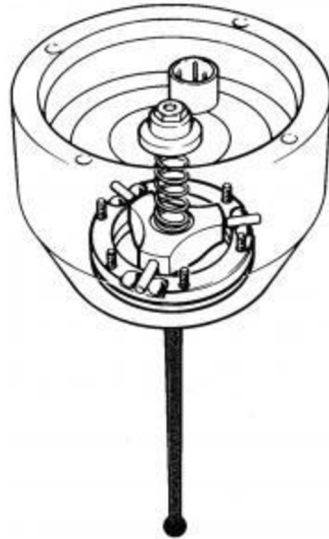
Mechanismus umožňuje vychýlení doteku sondy při kontaktu s měřeným dílcem, pružina vrací mechanismus do výchozí klidové polohy poté, kdy příčina vychýlení pomine. Definovaná a opakovatelná poloha doteku po návratu do klidové polohy je základem pro přesné měření.

Kontaktní elementy jsou vyrobeny z karbidu wolframu, který je dostatečně odolný proti působení plastických deformací, jež by mohla způsobit síla přitlačné pružiny na velmi malých stykových plochách těchto prvků. Kontakty jsou vzájemně elektricky propojeny a elektronické příslušenství sondy kontroluje velikost elektrického odporu v tomto okruhu. Při dosažení určité úrovně velikosti odporu se výstupní signál ze sondy přestaví na „rozpojeno“, to znamená „sonda je v kontaktu s obrobkem“. Vychýlení doteku nezbytné pro vznik spínacího signálu je tak malé, že kinematická



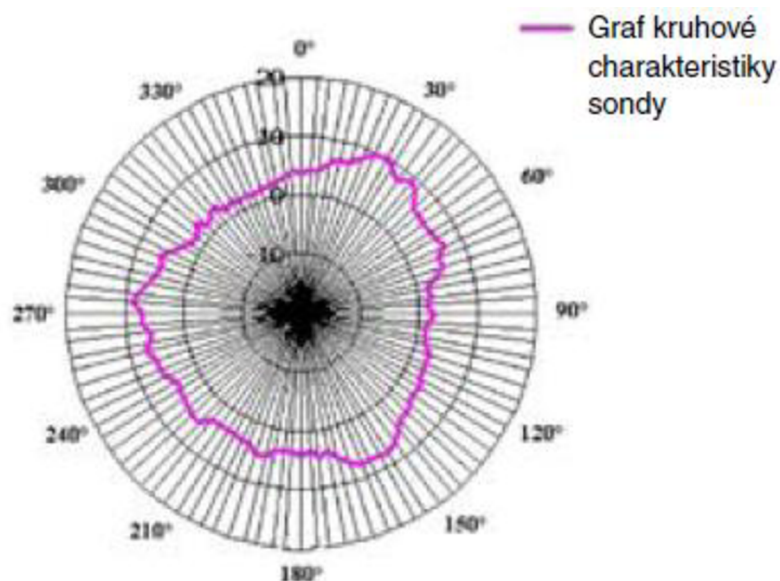
## DIPLOMOVÁ PRÁCE

hnízda jsou stále fyzicky v kontaktu. Díky tomu je dotek sondy stále v poloze, která umožňuje opakovatelné a spolehlivé měření.



Obrázek 1 – Kinematická sonda

Měřicí výkon kinematické sondy ovlivňuje řada faktorů. Asi nejvíce ovlivňujícím faktorem je elastická deformace dříku snímacího doteku při kontaktu s povrchem měřeného dílce. Důležité je, že až po tomto kontaktu dochází ke změně elektrického odporu v mechanismu sondy a k vygenerování spínacího signálu. Tento vliv je označován jako „přejezd pozice (pre - travel)“. Přejezd pozice závisí na délce a tuhosti dříku snímacího doteku a na velikosti síly přitlačné pružiny uvnitř sondy. Odchyłka přejezdu pozice (PTV), někdy označována i jako „lobing“ nebo „kruhová charakteristika sondy“ ovlivňuje (v důsledku zmiňované elastické deformace dříku) měřicí výkon sondy. Samotný přejezd není formou chyby, protože jej lze snadno kompenzovat kalibrací sondy.



Obrázek 2 – Graf kruhové charakteristiky sondy



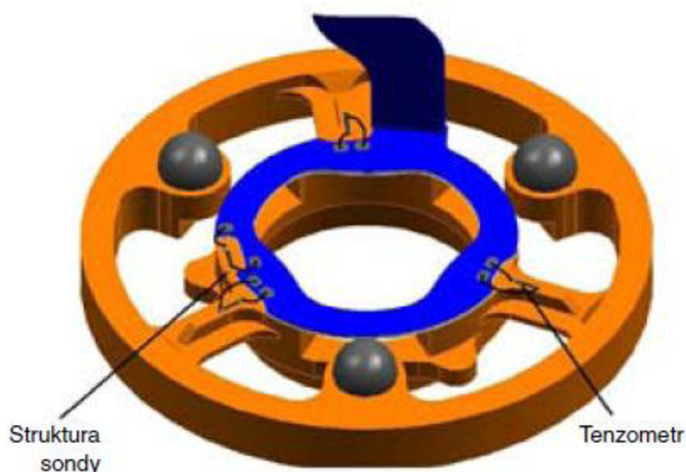
Podle směru, ve kterém působí kontaktní síla vůči mechanismu sondy, se liší vzdálenost mezi osou dříku doteku a pivotovacím bodem kinematického hnízda. Pivotovací bod je bod, kolem kterého se naklápí snímací mechanismus při kolizi s měřeným dílcem. Současně se změnou ramene působící síly dochází i ke změně velikosti síly (znázorněno graficky pomocí Obrázku 3). Důsledkem jsou pak rozdílné odchylky přejezdu pozice v různých směrech měření (viz. Obrázek 2). [1]



Obrázek 3 – Naklápění mechanismus při působení kontaktních sil

### Tenzometrická sonda

Tenzometrické sondy využívají částečně kinematický mechanismus. Nejedná se však o prostředek snímání, ale pouze bezpečnostní prvek, který zabraňuje poškození doteku při kolizi. Snímací signál generuje sada tenzometrů (čidel citlivých na mechanickou změnu povrchového napětí) umístěných na pečlivě navržená žebra ve struktuře sondy mimo kinematiku. Tato čidla měří kontaktní sílu vyvinutou na dotek sondy a generují spínací signál v okamžiku, kdy povrchové napětí překročí definovanou hodnotu. Tím je zajištěna nízká spínací síla, nízký přejezd pozice a také nízká odchylka přejezdu pozice.

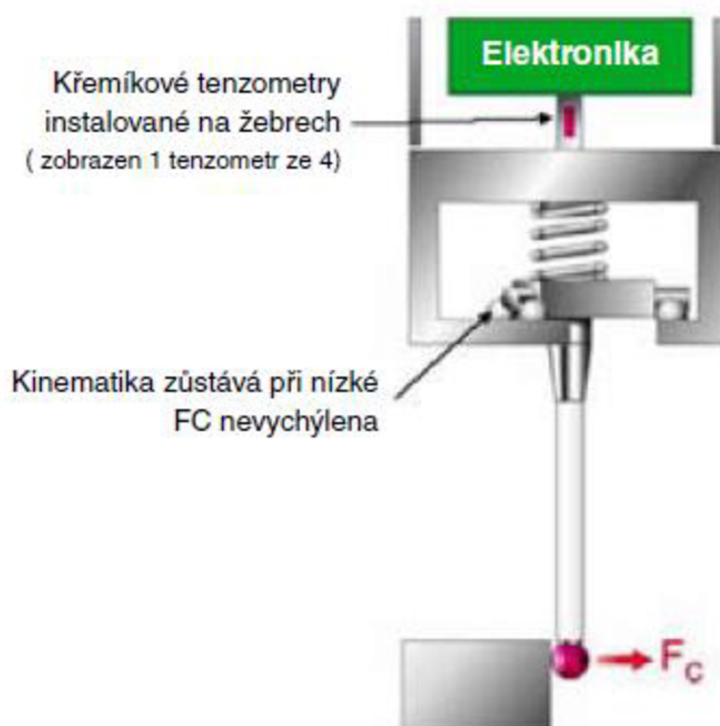


Obrázek 4 – Část mechanismu tenzometrické sondy

Na obrázcích 4 a 5 je schematicky zobrazeno uspořádání tenzometrické sondy. Při nízkých konstantních silách zůstane kinematika v klidu a konstantní síly se přenáší do struktury sondy. Tenzometrická čidla jsou umístěna na velmi přesně vyrobených žebrech navržených tak, aby maximalizovala citlivost sondy bez zhoršení její

odolnosti proti poškození. Snímače detekují síly ve struktuře sondy. Údaje ze snímačů vyhodnocuje elektrický obvod, který generuje spínací signál v okamžiku, kdy zjištěná velikost působící síly v kterémkoliv směru překročí stanovenou mez. Tato mez je stanovena standardně na několik gramů a je tedy mnohem nižší než spínací síla srovnatelné kinematické sondy.

Takto vysoká citlivost sondy může vést k náchylnosti k náhodnému sepnutí způsobenému vibracemi stroje nebo jiným silným vnějším vlivem. (V praxi je také obvyklým jevem sepnutí způsobené vlivem velmi dlouhého dřívku doteku při rychloposuvu.). K eliminaci těchto vlivů, které by nevhodně ovlivňovaly přesnost měření a tím způsobovaly ztrátu měřicího výkonu, se používá speciální elektronický filtrační obvod. Tento obvod porovná změny napětí snímaných tenzometrickými čidly a rozhoduje, zda jsou výsledkem skutečného vychýlení hrotu, nebo přechodového nárazu či vibrace. Spolehlivost tohoto kontrolního procesu zajišťuje krátké zpoždění vkládané do vyhodnocovacího obvodu. Pokud po celou dobu tohoto časového intervalu trvá napětí detekované tenzometry, na konci prodlevy je generován spínací signál.



Obrázek 5 – Schéma tenzometrické sondy

Tenzometrická technologie přináší výhodu až desetinásobného prodloužení provozní životnosti oproti tradičním kinematickým sondám. Zlepšená tenzometrická struktura zvyšuje odolnost sondy v nepříznivých pracovních podmínkách uvnitř pracovního prostoru. [1]

### 1.2.2 Snímací technologie dotekových sond

Mimo uváděné „konstrukční“ dělení, lze dotekové sondy rozdělit také podle technologie snímání měřeného povrchu. Vesměs existují dva typy sond: spínací a skenovací dotekové sondy.





### Spínací doteková sonda

Úkol spínací dotekové sondy je jednoduchý: fungovat jako vysoce opakovatelný spínač pod hranicí mikronů, který vyše signál, jakmile je detekován měřicí povrch. Spínací sondy tedy měří nespojité body a jsou ideální pro kontrolu trojrozměrných geometrických dílů, kde k určení každého prvku dílce postačí několik dotekových bodů. Příkladem jsou prizmatické součásti se snadno definovanými prvky, jako např. rovná čela, drážky, vývrty a výčnělky.

### Skenovací doteková sonda

Skenovací sondy jsou miniaturní měřicí stroje, které každou sekundu dokážou nasnímat obrovské množství bodů povrchu (standardně 2000 až 6000) a umožňují přesné určení tvaru, jakož i velikosti a polohy.

Skenovací sondy poskytují nepřerušovaný výstup výchylek doteku, jenž může být ve spojení s polohou stroje použit k odvození tvaru povrchu. Při skenování dojde ke kontaktu mezi dotekem sondy a měřeným dílcem. Sonda je pak přesouvána tak, aby dotek byl neustále v kontaktu s povrchem dílce. Během tohoto pohybu jsou snímána data. V průběhu měření je nezbytné udržet velikost výchylky doteku sondy v měřicím rozsahu sondy.

Tento typ systému je vhodný v případech, kdy jsou k definování formy prvků zapotřebí velké objemy dat, ale kdy maximální výkon není nejvyšší prioritou. Dobrým příkladem je odebírání vzorků listů vrtulí, profilů aerodynamických ploch nebo vrtání válců u automobilů. V těchto případech neposkytuje několik dotekových bodů dostatek informací k přesnému měření formy.

Skenovací sondy lze použít také ke snímání nespojitých bodů, podobně jako v případě spínacích dotekových sond. [2]



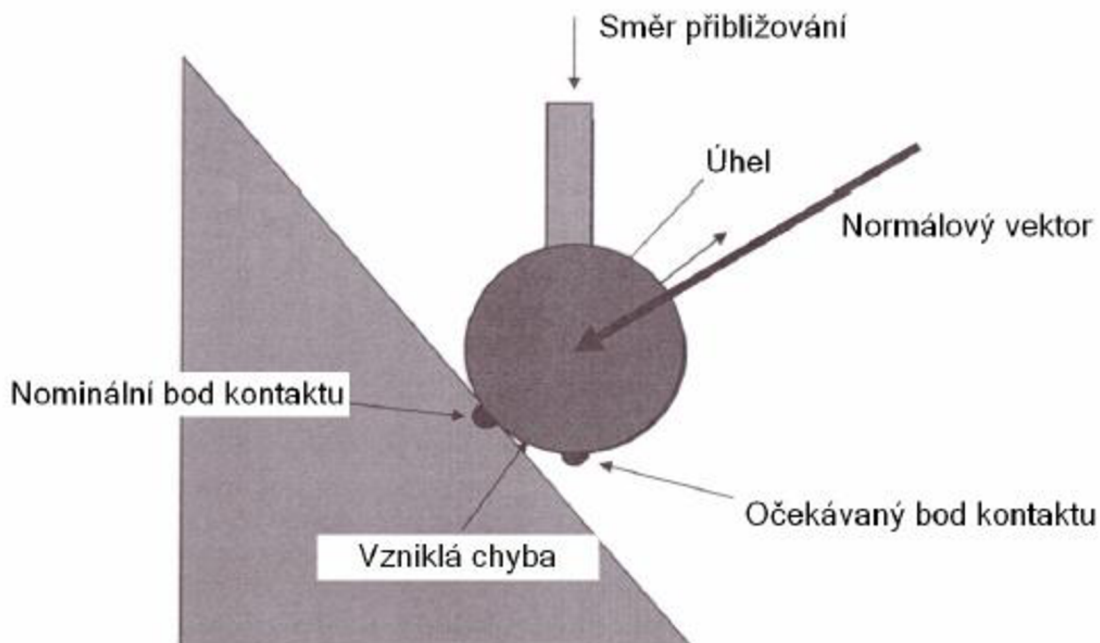
Obrázek 6 – Ukázka skenovací dotekové sondy



## 1.3 Doteky

### 1.3.1 Přesnost v bodě kontaktu

Úspěšnost měření je velmi závislá na schopnosti doteku sondy dosáhnout k měřenému prvku a na přesnosti zaznamenání bodu kontaktu. K nepřesnosti měření může dojít například se vznikem tzv. kosinové chyby při kontaktu doteku s měřeným dílcem, jak naznačuje obrázek níže.

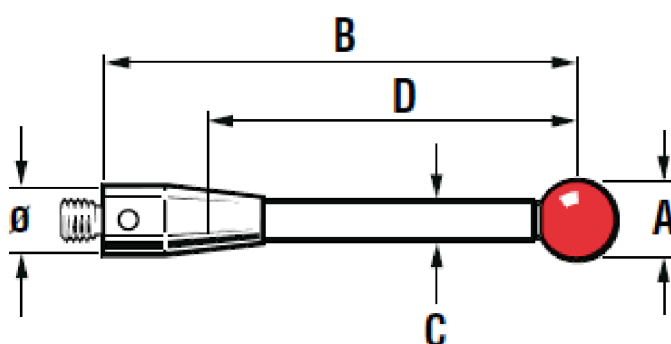


Obrázek 7 – Přesnost v bodě doteku

### 1.3.2 Terminologie


Celková délka – firma Renishaw definuje celkovou délku jako vzdálenost od čela závitu ke středu kuličky.

Efektivní činná délka – maximální hloubka měření, aniž dojde ke kolizi stopky doteku s měřeným dílem.



- A Průměr kuličky
- B Celková délka
- C Průměr dřívku
- D Efektivní činná délka
- Ø M2 = 3 mm
- Ø M3 = 4 mm
- Ø M4 = 7 mm
- Ø M5 = 10 mm

Obrázek 8 – Schéma doteku

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 17
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 1.3.3 Dotek a jeho vlastnosti

Dotek je součástí měřicího systému, který zprostředkovává kontakt mezi sondou a měřenou komponentou a způsobuje sepnutí v mechanismu sondy. Následkem tohoto sepnutí je vygenerován signál umožňující zápis souřadnic sejmutého bodu.

V dnešní době existuje nespočet doteků, lišících se od sebe jak tvarem, rozměry, tak i oblastmi použití. Aby se předešlo možným chybám měření (např. již zmiňovaná kosinová chyba), a tím ke snížení přesnosti měření, je nutné zvážit použití jednotlivých doteků v závislosti na typu (tvaru) snímaného prvku.

Dalšími, a patrně nejdůležitějšími faktory při výběru správného doteku, jsou také jeho maximální tuhost a dokonalá kulovitost hrotu. Z toho důvodu jsou stopky doteků a kuličky doteků Renishaw vyráběny na CNC obráběcích strojích v souladu s požadavky nejvyšších standardů. Kuličky jsou ke stopkám upevňovány způsobem, který zajišťuje maximální integritu spoje.

Při použití doteku s nepřesnou kulovitostí hrotu, s nesprávným umístěním kuličky, s nepřesným závitem či se slabou konstrukcí dochází během měření k přílišnému ohybu doteku a může být vážně ohrožena přesnost prováděného měření.

### 1.3.4 Typy doteků

#### Přímý dotek

Tyto nejjednodušší a zároveň nejvíce používané doteky, jsou používány pro většinu měřicích aplikací. Sestávají ze stopky a kuličky, které mohou být vyrobeny z různých materiálů dle oblastí použití. Volba správné kuličky a stopky (materiál a velikost) musí být volena s ohledem na rozměr a tvar měřeného dílce.

#### Hvězdicový dotek

Hvězdicové doteky jsou používány ke snímání složitých prvků či otvorů. Je to dáno díky většímu počtu hrotů umožňujících kontrolu např. různých dutin, stěn, drážek či otvorů.

Nesmírnou výhodou těchto doteků je díky většímu počtu snímacích hrotů (až pět) zkrácení dráhy pohybu sondy k měřeným bodům. S tím pochopitelně souvisí také zkrácení operační doby měření.

Hvězdicové doteky instalované na 5směrové sondě umožňují také snímání v záporném směru osy (6. směr – nahoru). To je možné pouze pokud konce doteků dosahují za průměr tělesa sondy. Každý hrot hvězdicového doteku vyžaduje kalibraci stejně jako doteky s jedinou kuličkou. Rozpětí hvězdicových doteků se měří mezi středy kuliček.

#### Diskový dotek

Tyto doteky se používají ke snímání zápichů a drážek v otvorech, kde nelze použít hvězdicový dotek. Diskový dotek je ve skutečnosti tenký plátek velké, velmi přesné koule. Doteky jsou k dispozici v mnoha průměrech a tloušťkách. Charakteristickými vlastnostmi, díky nimž jsou doteky velmi flexibilní a snadno použitelné, je možnost rotačního nastavení kolem osy doteku a dále možnost kombinace disku se středovým dotekem.

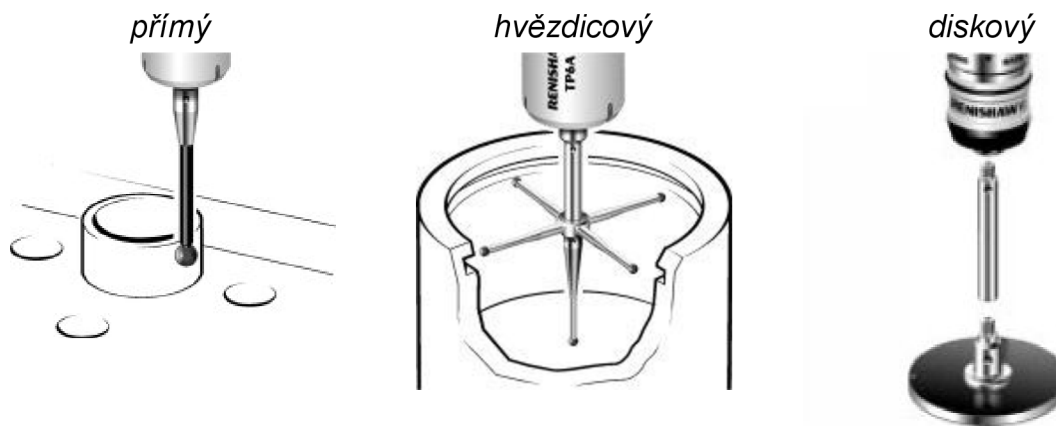


Snímání „sférickou plochou“ disku je v podstatě stejné jako snímání přes imaginární linii „rovníku“ velké kuličky doteku. Vzhledem k tomu, že pro kontakt s dílcem je k dispozici pouze nepatrná část povrchu koule, vyžadují slabší disky pečlivé úhlové nastavení, aby byl zajištěn správný kontakt s povrchem snímaného prvku.

U jednoduchého disku je nutná kalibrace pouze průměru, tím je však omezeno využití disku pro snímání pouze ve směrech X a Y.

Diskový doteky mohou být vybaveny malým válečkem se zaobleným koncem nebo polokoulí na každé straně disku. Tento upgrade umožňuje snímání v ose Z.

Disky mohou být vybaveny také středovým závitem, který umožňuje upevnění přímého doteku k diskovému. Tak lze konfiguraci využít i pro snímání dna hlubokých otvorů.



Obrázek 9 – Typy doteků

### 1.3.5 Doteky pro speciální účely

#### Válcový dotek

Válcové doteky slouží pro měření plechů, lisovaných komponentů a obrobků, kde není možné zaručit bezproblémový kontakt pomocí kuličkového doteku. Kromě toho je lze využít také pro snímání nejrůznějších prvků se závity a lokalizovat středy závitových otvorů. Válcové doteky zakončené kuličkou umožňují kompletní kalibraci a snímání povrchů v osách X, Y i Z.

#### Dotek s hrotem

Tyto doteky by neměly být užívány pro běžné snímání, jako je tomu například u přímého doteku. Jsou speciálně navrženy ke snímání tvarů závitů, definovaných bodů a rysek. Použití doteků se zaobleným hrotem umožňuje přesnější kalibraci a snímání výše zmíněných prvků. Dalším využitím je lokalizace velmi malých otvorů.

#### Dotek s dutou keramickou půlkoulí

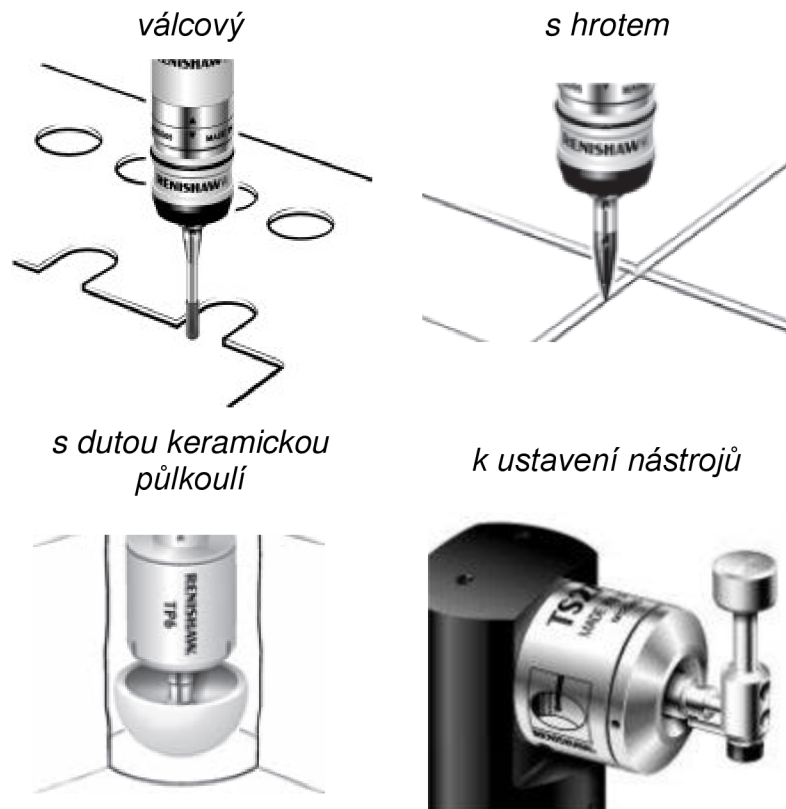
Výhodou těchto doteků je velký průměr kuličky při minimální hmotnosti. Kvůli tomu jsou ideálním řešením pro snímání hlubokých otvorů. Navíc, díky velkému průměru kuličky, umožňuje dotek zprůměrovat vliv nerovností velmi drsných povrchů.





### Dotek k ustavení nástrojů

Tyto produkty mají obvykle čtyřhranné zakončení a se sondou jsou spojeny závitem nebo pojistným šroubem. Plošky na kostce jsou zabroušeny, čímž je dosaženo přesné pravoúhlosti a rovnoběžnosti.



Obrázek 10 – Doteky pro speciální účely

Pokud uživateli (metrologovi) nevyhovuje žádný z uvedených doteků, je zde možnost požádat si o vytvoření unikátního doteku, jež vyhovuje potřebám daného měření.

#### 1.3.6 Příslušenství k dotekům

Při častém a opakovaném měření jsou k dispozici další nástroje zvyšující jeho flexibilitu.

##### Střížné kolíky

Kolíky jsou navrženy tak, aby v případě nárazu při snímání došlo k destrukci kolíku a nebyla poškozena sonda.

##### Středové díly doteků

Příslušenství, které poskytuje maximální snímací flexibilitu při použití jediné sondy. Ke stejnému závitu lze připojit až pět doteků a díky tomuto příslušenství můžete vytvářet konfigurace doteků podle sebe. Menší z těchto zařízení jsou vyráběny z oceli, větší pak z titanu.



### Kloubové adaptéry

Slouží uživateli k nastavení doteku do požadovaného úhlu. Touto konfigurací lze zajistit pružnost a umožnit navázání kontaktu s různými prvky dílce (především šikmé plochy a otvory), aniž by došlo ke změně doteku za jiný. Použití kloubového adaptéru je bezúčelné v případě používání měřicích hlavice s otáčecí a polohovací technologií – viz Obrázek 6.

### Prodlužovací nástavce


Prodlužovací nástavce zajišťují možnost proniknutí do dílce prostřednictvím doteku dále od sondy. Zatímco u středových dílů doteku vyrobených z titanu nebo oceli dochází k tepelné roztažnosti, u prodlužovacích nástavců vyrobených z uhlíkových vláken dochází k jevu opačnému - tepelné smrštivosti. Výsledkem této kombinace materiálů je minimální délková roztažnost jako celku a to i při extrémních změnách teploty mezi 15 až 40 stupni Celsia.

### Závitové adaptéry doteků

Umožňují integraci doteků s metrickými závity do většiny spínacích sond. Jako u většiny příslušenství k dotekům je i zde „svobodná“ volba výběru použitých materiálů, tvarů a velikostí v závislosti na parametrech snímání. [3]



Obrázek 11 – Příslušenství k dotekům

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 21
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 1.3.7 Zásady volby doteku

Vzhledem k požadavku zajištění maximální přesnosti sejmutí bodu kontaktu je firmou Renishaw doporučováno několik zásad:

- ❖ použití co nejkratší délky doteku (Čím více se dotek ohýbá nebo vychyluje, tím je přesnost měření nižší.),
- ❖ minimalizace počtu spojů (Každý spoj doteku a prodlužovacího nástavce se stává zdrojem možných deformací a bodů ohybu.),
- ❖ použití co největšího průměru kuličky (Prvním důvodem je maximalizace mezery mezi kuličkou a stopkou z důvodu snížení nebezpečí kolize stopky s měřeným dílcem. Druhým pak skutečnost, že větší kulička snižuje vliv jakosti na povrchu snímané součásti na měření.).

### 1.3.8 Materiál kuličky

Při kontaktním skenování se rozměry dílce zaznamenávají během klouzání tvrdých kuliček doteků po povrchu nejrůznějších materiálů. Není-li zajištěno přiměřené mazání, může v důsledku nanášení materiálu ze snímaného povrchu nebo opotřebením docházet k tvarovým změnám kuličky doteku. To může vést k chybám v naměřených datech.

Rozsah těchto změn závisí na vlastnostech materiálu kuličky doteku i snímaného povrchu, na přítlačné síle, snímané vzdálenosti a rozložení kontaktu na povrchu kuličky. Dosud nebyl pro kuličku doteku nalezen jednotný materiál, který by takovým účinkům u všech obvyklých strojírenských aplikací odolával. Přehled používaných materiálů kuliček je uveden níže.

#### Rubín

U převážné většiny měřicích aplikací vyhovuje průmyslovým požadavkům materiál zvaný rubín. Jedná se o oxid hlinitý s čistotou 99% a je to jeden z nejtvrdších materiálů. Díky tomu se minimalizuje opotřebení doteku. Také hustota tohoto materiálu je nízká, což umožňuje snížení hmotnosti hrotu na minimum. Dosahuje tvrdosti až 1800 HV.

Rubínové kuličky mají výjimečně hladký povrch, vynikající pevnost v tlaku a vysokou odolnost proti mechanickému poškození.

Je jen málo aplikací, u nichž rubín není upřednostňovaným materiálem kuličky. Existují však dva případy, kdy se doporučují kuličky vyrobené z jiných materiálů.

Prvním je použití výkonných skenovacích aplikací na hliníkové materiály. Zde může docházet k adhezivnímu otěru, kdy se na povrchu kuličky usazuje hliník. V takovém případě se volí vhodnější materiál, a to konkrétně nitrid křemíku.

Druhým jsou náročné aplikace při skenování litinových povrchů. Vzájemné působení obou materiálů může u rubínové kuličky způsobit opotřebení povrchu otěrem. U takových aplikací se doporučují kuličky z oxidu zirkoničitého.

#### Nitrid křemíku

Nitrid křemíku má mnoho společných vlastností s rubínem. Jedná se o velmi tvrdý materiál, odolný vůči opotřebení, který lze opracovat do velmi přesných kulovitých

tvare. Lze jej také leštit, čímž se dosahuje vysoce hladkého povrchu. Nitrid křemíku nelze použít pro kontakt s ocelovými povrchy z důvodu značné míry opotřebení otěrem. Ideální tedy zůstává jeho použití zejména pro hliníkové povrchy.

### Oxid zirkoničitý

Oxid zirkoničitý je velmi pevným keramickým materiálem, jehož charakteristiky tvrdosti a opotřebení se přibližují kvalitám prvně zmiňovaného materiálu. Díky vlastnostem povrchu je ideálním materiálem pro agresivní aplikace u litinových součástí.

Typ doteku	Materiál	Odchylka kulovitosti [μm]	Čistota [%]	Tvrdost [HV]	Pevnost v tlaku [MPa]
Rubínové kuličky	Monokrystalický syntetický rubín	0,13	99,9	1800	2100
Kuličky z nitridu křemíku	Nitrid křemíku	0,13	90	1600	2000
Duté keramické koule na bázi oxidu hlinitého	Sintrovaný oxid zirkoničitý	0,13	90-85	1200	2000

Tabulka 1 – Srovnání vybraných vlastností materiálů kuličky

### 1.3.9 Materiál dřívku

#### Ocel

Stopky doteků vyrobené z nemagnetické nerezové oceli jsou široce využívaným materiálem pro doteky s kuličkou či hrotem s průměrem 2 mm či větším a s délkou do 30 mm. V tomto rozmezí poskytují kompaktní ocelové stopky optimální poměr tuhosti a hmotnosti a také adekvátní průřez kuličky/stopky, aniž by byla snížena tuhost závitovým spojem.

#### Karbid wolframu

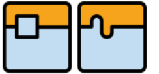
Stopky z karbidu wolframu jsou optimálním řešením pro maximální tuhost a minimální průměr stopky. Tyto parametry jsou vyžadovány u průměru kuličky pod 1 mm nebo pro délky do 50 mm. Problematická je vyšší hmotnost doteku z tohoto materiálu a tím i nebezpečí nižší tuhosti ve spoji u delších doteků.

#### Keramika

U průměrů kuličky nad 3 mm a při délkách přes 30 mm poskytují keramické stopky tuhost porovnatelnou s ocelí. Jsou však výrazně lehčí než karbid wolframu. Keramické stopky doteků zajišťují také dostatečnou ochranu sondy proti havárii, neboť se v případě kolize roztříští.

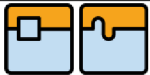
#### Uhlíková vlákna (Renishaw GF)

Existuje mnoho druhů materiálů z uhlíkových vláken. Materiál Renishaw GF však vykazuje optimální charakteristiky tuhosti v podélném směru i v krutu (důležité při hvězdicovém uspořádání) při neobyčejně nízké hmotnosti. Materiály z uhlíkových

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 23
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

vláken jsou inertní a v kombinaci se speciálními pryskyřicovými matricemi poskytují vynikající ochranu i v nejméně příznivém prostředí pracovního prostoru obráběcího stroje.

Materiál Renishaw GF je ideálním řešením přinášejícím maximální tuhost a velmi nízkou hmotnost u doteků s délkou nad 50 mm. Jedná se o optimální materiál stopky pro vysoce přesné sondy založené na tenzometrickém principu. Vykazuje vynikající charakteristiku tlumení vibrací a zanedbatelný koeficient teplotní roztažnosti. [3]




Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Str. 24



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the majority of the page below the header. It is intended for the main content of the diploma thesis.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 25
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 2 VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT U DÉLKOVÝCH MĚŘENÍ

### 2.1 Úvod do problematiky

V současné době se lze stále častěji setkat v souvislosti s měřením a jeho vyhodnocováním s pojmem nejistoty v měření. Pojem a celá problematika již téměř zdomácněly v oblasti kalibrace a vrcholové metrologie, zatímco do běžné každodenní praxe průmyslových měření se teprve začínají postupně prosazovat.

Donedávna se výsledek měření doplňoval údajem o chybě měření (koncepte chyb měření), který vycházel z určení směrodatné odchylky z opakovaných měření a ze stanovení pravděpodobnostního intervalu jejím vhodným násobkem. Nevýhodou tohoto vyjádření variability byl fakt, že:

- ❖ za zdroj variability se braly pouze náhodné vlivy působící v okamžiku měření,
- ❖ systematické vlivy se považovaly za konstantní a sloužily ke stanovení korekce parametru polohy,
- ❖ výsledek měření bylo nutné vztahovat k okolnostem platným v době měření (povětrnostní podmínky, vlastnosti měřidla a operátora atd.)

Vývoj názorů na vyjádření variability v systému měření vyústil v v 80. letech minulého století v doporučení BIPM (International Bureau of Weights and Measures) využívat jako kvantitativní ukazatel přesnosti vedle chyb i tzv. nejistotu (koncepte nejistot měření). Vydáním základního dokumentu pro stanovení nejistot měření - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) byly položeny potřebné teoretické základy. [4]

### 2.2 Koncepte nejistot měření

Dle [5] je nejistota měření definována jako parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které mohou být důvodně přisuzovány k měřené veličině.

Pokud je nahlédnuto na definici podrobněji, lze ji dále rozebrat:

- ❖ přidružený k výsledku měření znamená, že nejistota je parametrem, jenž nemá sám o sobě velký význam a je „pouze“ intervalem kolem výsledku měření,
- ❖ rozptyl hodnot dává nejistotě statistickou podobu,
- ❖ důvodné přisouzení dává povinnost určit a zdůvodnit zdroje nejistot a jejich příspěvky k výsledné hodnotě.

Nejistota měření:

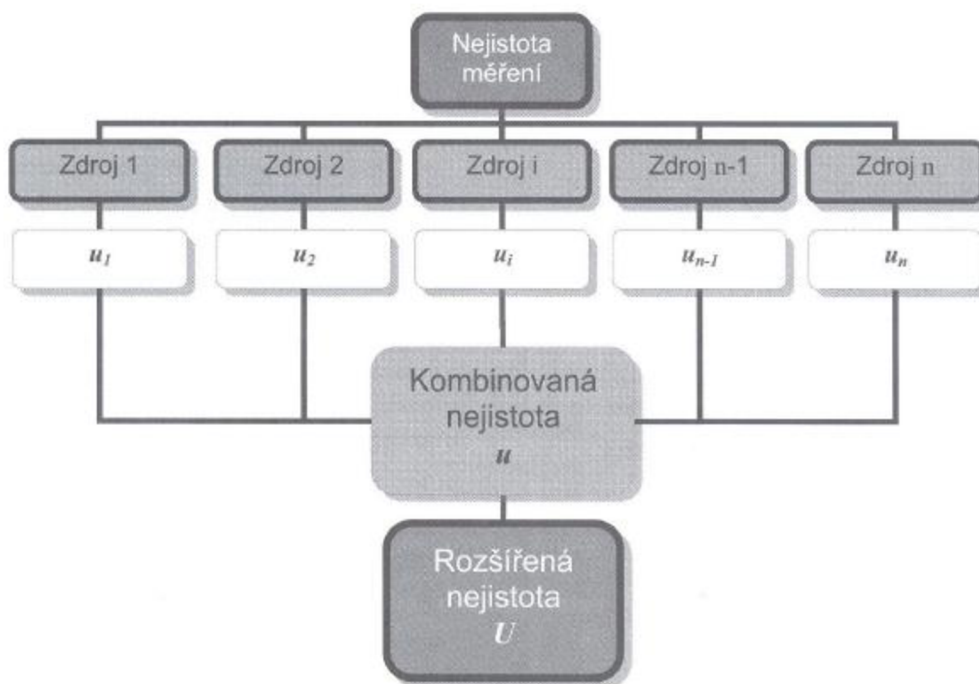
- ❖ má statistický význam směrodatné odchylky,
- ❖ je složena z jednotlivých komponentů (podle zákona šíření nejistot), kterými jsou směrodatné odchylky zdrojů
- ❖ je stanovena na základě definované metodiky,
- ❖ je obecně uznávaným, a v některých případech také povinným vyjádřením variability (např. dle [6] nebo [7])





## 2.3 Obecný postup výpočtu

Ryze statistickým pohledem lze nejistotu měření určit ve čtyřech základních krocích, jak naznačuje obrázek níže. Nejprve je nutné identifikovat zdroje nejistot. Po identifikaci následuje statistický popis nalezených zdrojů pomocí směrodatných odchylek, tzv. standardních nejistot. V dalším kroku se stanoví pomocí zákona šíření nejistot výsledná, kombinovaná standardní nejistota a na závěr je určena rozšířená nejistota, tedy interval, v němž lze s určitou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty měřené veličiny.



Obrázek 12 – Obecné schéma nejistot měření

## 2.4 Zdroje nejistot v systému měření

Jak bylo uvedeno výše, prvním krokem je identifikování zdrojů nejistot. Jako zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které nějakým způsobem mohou ovlivnit stanovení výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Značnou roli zde sehrává také skutečnost, zda jde o měřicí metody přímé nebo nepřímé.

V obecném slova smyslu jsou nejistoty dány variabilitou měřicího systému, ve kterém proces měření probíhá. Hlavní zdroje variability pak vycházejí z pěti oblastí, kterými je systém měření tvořen (viz. Obrázek 13).

### 2.4.1 Operátor

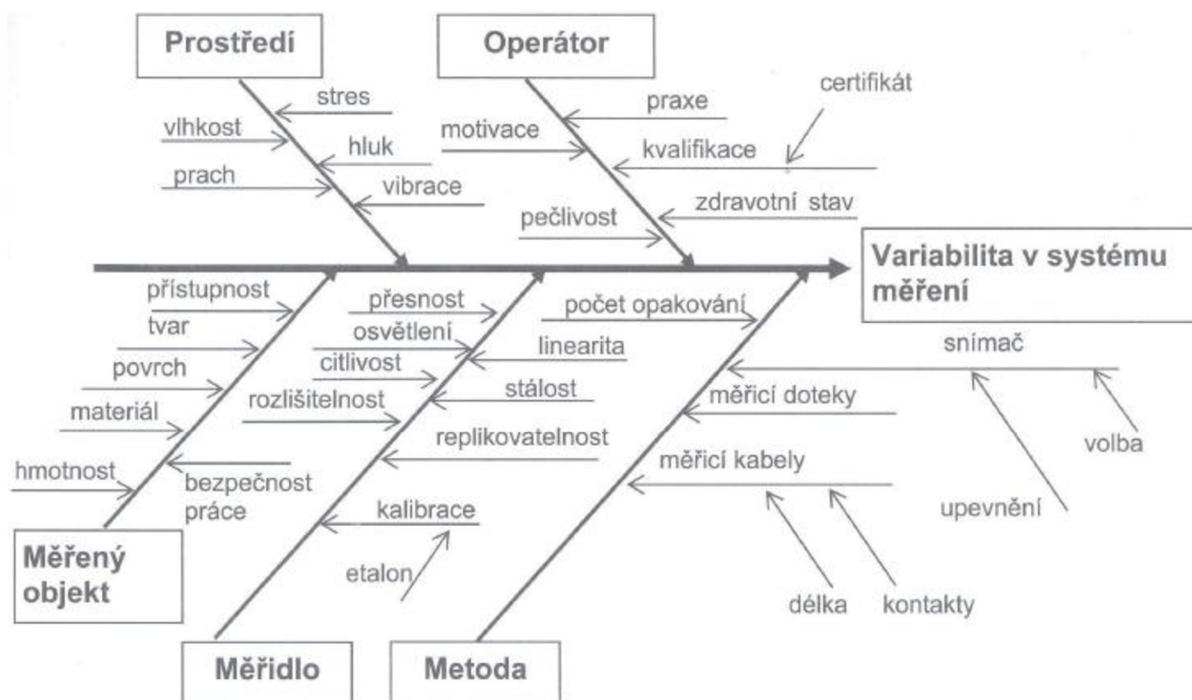
Člověk je jedním z nejslabších článků v řetězci systému měření. V něm může vystupovat buď jako zadavatel (osoba, která definuje cíl, určuje měřený objekt, ovlivňuje výběr měřidla a metody a pravděpodobně i výsledky měření dále využije), anebo jako řešitel (osoba, která měření konkrétně provádí).

Aby se minimalizoval vliv operátora, je zapotřebí splňovat mnoho předpokladů, např. proškolení operátora a neustálé jej vzdělávat v problematice měření, dokonale jej





naučit ovládat měřidlo nebo počítačový systém, atd. Samozřejmostí by pak měla být svědomitost, poctivost, čestnost, trénovanost a fyzická zdatnost (pokud je potřebná), jak je uváděno např. v [8].



Obrázek 13 – Ishikawův diagram pro variabilitu v systému měření

#### 2.4.2 Metoda


Metoda měření zahrnutá do postupu se do variability v systému měření promítne především nastavením měřidla a sestavením měřicího řetězce. Dalším zásadním vlivem je metrologická confirmace spočívající především v řádné kalibraci, pravidelném justování a údržbě měřidla. Konkrétně je třeba dbát např. na to, aby bylo měřidlo nastaveno v souladu s cíli měření, byly řádně očištěny a udržovány všechny kontaktní body atd. Aplikace metody a dodržení popsaných zásad je zcela v rukou operátora, jeho způsobilosti a momentální kondici.

#### 2.4.3 Prostředí

Prostředí představované především povětrnostními podmínkami je základním zdrojem variability. Jeho výhodou je jasný, jednoznačný a teoreticky popsáný vliv na měřenou hodnotu. Aby tak mohlo být učiněno, je třeba například dodržovat rozsah teplot, které jsou doporučeny pro měřidlo a snímač, omezit prudké změny podmínek vlhkosti, dále omezit hluk a vibrace atd.

#### 2.4.4 Měřený objekt

Měřený objekt (znak) může zpětně působit na systém měření a ovlivňovat naměřenou hodnotu. Jedná se především o extrémní tepelné nebo elektrické působení. Dalšími zdroji variability jsou velikost a tvar plochy, ve kterých dochází ke kontaktu se snímačem. Aby byl vliv znaku co nejvíce omezen, je nutné především před měřením zjistit důležité vlastnosti měřeného objektu, očistit plochu před aplikací

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 28
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

snímače atd. V potaz je nutné vzít také vlastnosti jako stárnutí, vnitřní pnutí, deformace, vodivost, váhu, magnetismus,...

#### 2.4.5 Měřidlo

Posledním zdrojem variabilit v systému je měřidlo, a to konkrétně jeho metrologické vlastnosti a konstrukce. Patří sem termíny běžně známé jako stabilita měřidla, rozlišitelnost měřidla, přesnost, citlivost. V úvahu je opět nutné vzít také např. snímací systém, teplotní roztažnosti, paralaxu, geometrické nepřesnosti a další. [4], [8]

### 2.5 Typy standardních nejistot a způsob jejich vyhodnocení

V návaznosti na obecný postup výpočtu celkové nejistoty měření je potřebné po určení všech nalezených zdrojů nejistot způsobených variabilitou systému měření jejich statistický popis, a to pomocí tzv. standardních nejistot. Ke stanovení jejich velikosti jsou principiálně k dispozici tyto dvě metody:

- ❖ statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu A)
- ❖ jiné než statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu B)

Někdy se nejistoty získané metodou A také stručně označují jako nejistoty typu A, obdobně nejistoty získané metodou B jsou nejistoty typu B. Z těchto základních typů nejistot se pak dále určí výsledná kombinovaná nejistota a nakonec rozšířená nejistota.

Metodika určení je dosti komplikovaná, vzhledem k rozsahu práce (a také k cílům praktické části diplomové práce) bude v dalším výkladu přiblížena jen základní metodika pro přímá (jednoduchá) měření. Metodiku pro nepřímá měření lze nalézt např. v [9], pro určování nejistot při kalibracích a ověřování pak například v [10].

#### 2.5.1 Výpočet standardní nejistoty typu A

Výpočet standardní nejistoty typu A je založen na statistické analýze naměřených údajů. U opakovaných měření jde o běžné statistické zpracování hodnot měřené veličiny získaných opakovanými přímými měřeními, jichž by mělo být alespoň deset. Předpokládá se přitom, že měření jsou navzájem nezávislá a uskutečněná za stejných podmínek.

Je tedy k dispozici  $n$  naměřených údajů  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ , které jsou výsledkem realizace  $n$  nezávislých a stejně přesných měření veličiny. Příkladem může být například opakované měření délky součásti na stejném místě, stejným měřidlem a stejnou osobou za nezměněných okolních podmínek.

Potom je základní výsledek měření (odhad hodnoty měřené veličiny) představován aritmetickým průměrem:

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

Standardní nejistota typu A tohoto výsledku, která se značí  $u_A(x)$ , se rovná směrodatné odchylce aritmetického průměru  $s_{\bar{x}}$ , tedy:

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

Vztah (2) lze k výpočtu nejistoty použít jen tehdy, byl-li vykonán dostatečný počet měření ( $n \geq 10$ ). Není-li možné dodržet tuto podmínku, je nutno provést doplňkovou korekci pro zohlednění malého počtu opakovaných měření danou vztahem (3) nebo nejistotu vyhodnotit metodou typu B.

$$u_A(x) = k_s s_{\bar{x}} \quad (3)$$

kde  $k_s$  je koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření  $n$ , jak ukazuje následující tabulka. Tyto koeficienty platí při použití koeficientu  $k=2$  (při výpočtu rozšířené nejistoty měření) a vycházejí ze Studentova normálního rozdělení.

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

Tabulka 2 – Hodnoty korekčních koeficientů pro menší počet opakování

### 2.5.2 Výpočet standardní nejistoty typu B

Vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny metodou typu B je, jak již bylo uvedeno, založeno na jiných než statistických přístupech k analýze série pozorování.

Nejistoty zjišťované metodou B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet vychází z kvalifikovaného úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině  $X$  a jejích možných změnách. Jako zdroje informací k určení nejistoty typu B mohou posloužit:

- ❖ zkušenosti z předcházejících měření a jejich výsledků,
- ❖ zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřicích metodách, měřicích prostředcích a podmínkách měření,
- ❖ informace o měřicích prostředcích a podmínkách jejich použití získané od výrobců,
- ❖ údaje z certifikátů, kalibračních listů, ověřovacích listů apod.,
- ❖ nejistoty referenčních údajů převzatých z různých pramenů.

Do jaké míry budou tyto informace oceněny a využity, závisí na zkušenostech obsluhy, na hloubce všeobecných znalostí i rutinně a praxi experimentátora, protože charakter problému neumožňuje detailně specifikovat jednotný postup.

Při určování nejistoty metodou typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů  $u_{Bz_j}$ . Je-li známa maximální odchylka  $j$ -tého zdroje nejistoty  $Z_{j \max}$ , určí se nejistota  $u_{Bz_j}$  podle následujícího vztahu:



$$u_{Bzj} = \frac{Z_{jmax}}{k} \quad (4)$$

kde  $k$  je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí. Takže např. pro normální rozdělení je  $k=2$ , popř. 3, pro rovnoměrné  $k=1,73$  atd.

Není-li známa přímo standardní nejistota vlivem příslušného zdroje, mohou nastat různé situace, z nichž některé jsou uvedeny níže.

### Známa rozšířená nejistota a koeficient rozšíření

V některých případech však může být známa již přímo hodnota standardní nejistoty  $u_{Bzj}$  např. z kalibračního listu měřidla. V tomto případě se vychází ze vztahu:

$$u_{Bzj} = \frac{U}{k} \quad (5)$$

kde  $k$  je opět součinitel vycházející ze zákona daného rozdělení a  $U$  je hodnota standardní rozšířené nejistoty vyčtená z dokumentace.

### Známé rozpětí normálního rozdělení

Je-li známo rozpětí, v němž se může nacházet většina naměřených hodnot (např. 95%, 99% nebo 99,73%), a je oprávněný předpoklad, že při určování tohoto intervalu bylo uvažováno normální rozdělení, lze standardní nejistotu  $u_{Bzj}$  vlivem daného zdroje  $Z_j$  určit ze vztahu:

$$u_{Bzj} = \frac{U}{k_p} \quad (6)$$

kde  $k_p$  je koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného normálního rozdělení pro pravděpodobnost  $P$  ( $k_p=1,96$  pro  $P=95\%$ ,  $k_p=2,58$  pro  $P=99\%$ ,  $k_p=3$  pro  $P=99,73\%$  atd.).

Dalšími situacemi mohou být například: známé hranice vlivu zdroje, rozlišitelnost posledních platných číslic při použití číslicového měřicího přístroje, atd.

Výsledná nejistota se určí metodou B pro  $p$  zdrojů  $Z_1, Z_2, \dots, Z_f, \dots, Z_p$  následovně:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}^2} \quad (7)$$

kde  $u_{Bzj}$  jsou nejistoty jednotlivých zdrojů a  $A_j$  jsou jejich součinitele citlivosti, které jsou známy, popř. se určí výpočtem (viz dále).

Takto se nejistota vyhodnocovaná metodou B převede do zcela nové podoby a oproti předchozím představám získávají i tyto nejistoty charakter směrodatné odchylky. Jako s takovými, popř. ve druhých mocninách jako s rozptylem, se s nimi i nadále pracuje.

## 2.6 Výpočet kombinované standardní nejistoty

V praxi je obvykle třeba společně jediným číslem vyjádřit nejistoty typu A (označované  $u_A$ ) a nejistoty typu B ( $u_B$ ). K tomu se používá celková nejistota, obvykle nazývaná kombinovaná nejistota a označována  $u_C$ . Její výpočet je dán tzv. kovariačním zákonem pro šíření nejistot.

### Zákon pro šíření nejistot

Pro případ jednoduchého přímého měření jedné veličiny  $Y$  (výstupní veličina), které je funkcí  $m$  veličin (vstupní veličiny), lze popsat model měření vztahem:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m) \quad (8)$$

kde  $f$  je známá funkce. Odhad  $y$  hodnoty výstupní veličiny  $Y$  lze stanovit ze vztahu:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m) \quad (9)$$

kde  $x_1, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m$  jsou odhady vstupních veličin  $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$ . Nejistota odhadu  $y$  veličiny  $Y$  je dána vztahem:

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{x_j}^2 + \sum_{j=1; k < j}^m A_j A_k u_{x_j} u_{x_k} r_{x_j k} \quad (10)$$

kde  $A_j, A_k$  jsou koeficienty citlivosti (převodové koeficienty) a určí se jako:

$$A_j = \frac{\partial f(X)}{\partial X_j}; A_k = \frac{\partial f(X)}{\partial X_k} \quad (11)$$

a  $r_{x_j k}$  je korelační koeficient, který udává statistickou závislost (korelaci) mezi oběma veličinami  $X_j$  a  $X_k$ .

Pokud jsou vstupní veličiny nekorelované, tzn., že vstupní proměnné veličiny jsou vzájemně nezávislé (koeficient korelace se blíží nule), potom se rovnice dá upravit na tzv. Gaussův zákon pro šíření nejistot:

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{x_j}^2 \quad (12)$$

Protože je uvažováno pouze přímé měření (měření, kde neexistují vzájemné závislosti mezi vstupními veličinami, případně je lze zanedbat vzhledem k jejich velikostem), lze si vystačit právě s posledně uvedeným vztahem. Pak vztah pro výpočet kombinované standardní nejistoty bude vypadat následovně:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (13)$$



Standardní kombinovaná nejistota určená dle vztahu (13) je určená s pravděpodobností zhruba 68%, tj. pro koeficient rozšíření  $k=1$ . Pro jinou pravděpodobnost se nejistota měření upraví vynásobením koeficientem rozšíření vhodného rozdělení.

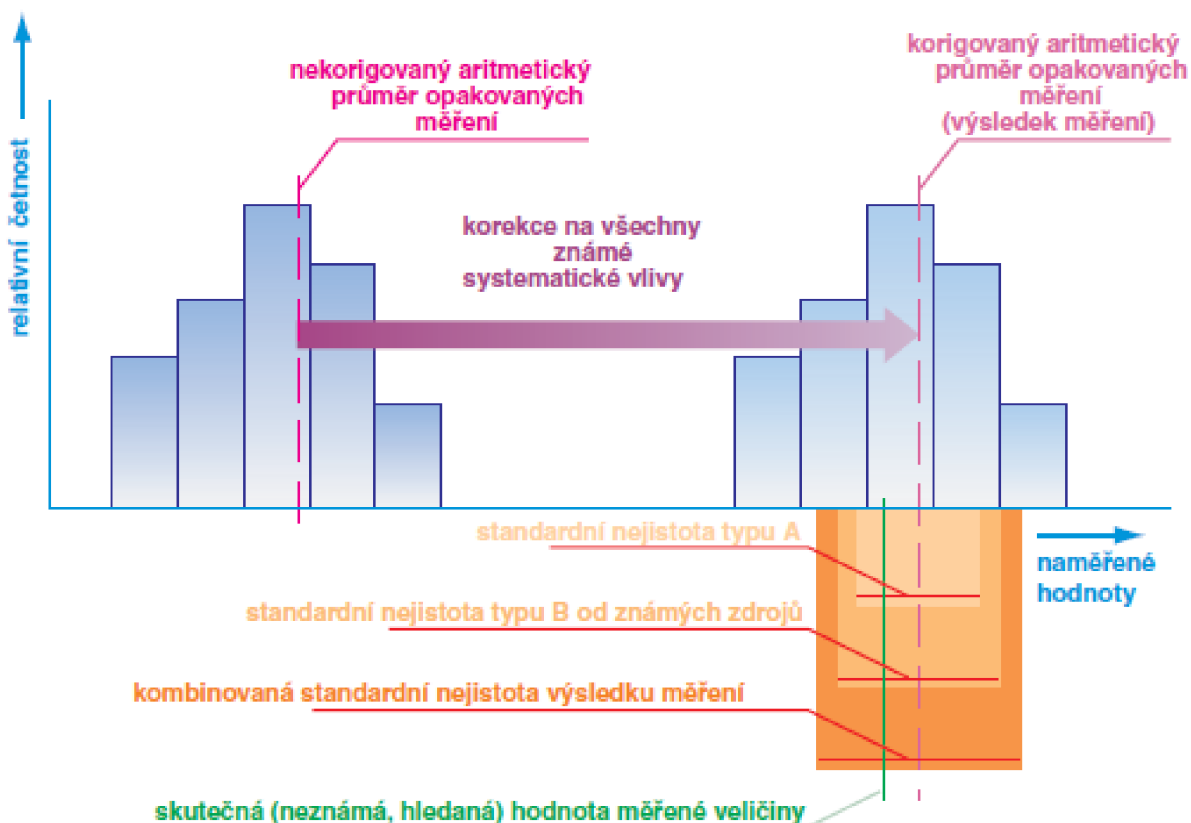
## 2.7 Výpočet rozšířené nejistoty

Výsledek měření ve tvaru  $y \pm u_c$  definuje skutečnou hodnotu měřené veličiny s poměrně malou pravděpodobností. Tato pravděpodobnost je většinou nedostatečná, proto je snaha stanovit interval, ve kterém se hodnota nachází s pravděpodobností blíží se 100%. Do praxe se tudíž zavádí tzv. rozšířená nejistota. Ta je definována vztahem:


$$U = k_t u_c \quad (14)$$

kde  $k_t$  je koeficient rozšíření. Hodnota  $k_t$  závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výsledku měření. V praxi se používají různé hodnoty koeficientů rozšíření podle typu rozdělení a požadované hodnoty pravděpodobnosti. Velmi častým případem je 95% pravděpodobnost (tzv. konfidenční), že skutečná hodnota se nachází v intervalu  $y \pm U$ . Vychází-li se z teorie matematické statistiky, je možné předpokládat normální rozdělení velmi často. Proto se v praxi také nejčastěji pracuje s  $k_t=2$ .

Pro lepší představu je na závěr této problematiky uveden obrázek, kde je graficky znázorněn vztah mezi výsledky opakovaných měření a jednotlivými nejistotami měření.



Obrázek 14 – Grafické znázornění nejistot

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 33
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 3 ANALÝZA A KVANTIFIKACE NEJISTOT MĚŘENÍ NA SOUŘADNICOVÉM MĚŘICÍM STROJI

### 3.1 Úvod do problematiky

Při analýze nejistot měření na SMS je nutné vždy zvažovat faktory uvedené v předešlé kapitole: lidský faktor, podmínky prostředí, v němž se měření realizuje, znalost používaných měřicích metod a parametrů, detailní informace týkající se používaného měřicího vybavení, veškeré podstatné informace týkající se metrologických konfirmací tohoto měřicího vybavení (včetně nejistot jeho kalibrací a informací o návaznosti měřidel a výsledků měření), detailní informace o postupech výběru vzorků, které jsou předmětem měření, a v neposlední řadě všechny podstatné informace o zacházení a manipulaci s měřicím vybavením.

Je třeba vycházet z dlouhodobých zkušeností s příslušnými procesy měření, z archivovaných záznamů o měření, odborné literatury a dalších zdrojů informací a pokusit se o identifikaci všech složek nejistot měření. Z daného poznání poté sestavit odpovídající odhad nejistoty měření tak, aby výsledky měření nebyly udávány s utopickými odhady těchto nejistot měření.

### 3.2 Popis pracovního prostředí

#### 3.2.1 Profil organizace

Diplomová práce byla realizována ve spolupráci s Českým metrologickým institutem (ČMI), příspěvkovou organizací přímo spravovanou svým zřizovatelem – Ministerstvem průmyslu a obchodu. Spolu s Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (UNMZ) a dalšími útvary je klíčovým a nedílným prvkem národního metrologického systému naší země.

ČMI je z hlediska organizační struktury rozdělen do několika dílčích útvarů, které jsou dislokovány v regionálních centrech ČR. Těmi jsou oblastní inspektoráty a dvě specializovaná pracoviště, Laboratoře primární metrologie a Inspektorát pro ionizující záření. Oblastní inspektoráty mají vymezenou územní působnost. Poskytují svoje služby tak, aby byly co nejlépe dostupné pro všechny zákazníky. Ovšem ne vždy je to možné, proto některé výkony poskytují laboratoře pro větší území, a to až celostátně.

Hlavní činností institutu je zejména plnění funkcí náležejících do působnosti státní správy, jež mu byly svěřeny prostřednictvím zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. Další činností je plnění funkce národního metrologického institutu v oblasti vědy, výzkumu a aplikace poznatků metrologie do praktického užití, jakož i zabezpečování funkcí výkonného metrologického orgánu metrologie jak pro podnikatelské i nepodnikatelské subjekty a občany ČR, tak i prezentace ČR v rámci mezinárodní spolupráce.

ČMI zajišťuje služby ve všech základních oblastech metrologie. V oblasti vědecké/fundamentální metrologie se zabývá organizací a vývojem etalonů a jejich uchováváním, v průmyslové metrologii zajišťuje náležité fungování měřidel používaných v průmyslu a ve výrobních a zkušebních procesech. V poslední oblasti, legální, se zabývá přesností tam, kde tato měření mohou ovlivnit ekonomické transakce z hlediska jejich transparentnosti, dále zdraví a bezpečnost osob, životní prostředí a jiné obecné zájmy. [11]



### 3.2.2 Souřadnicový měřicí stroj Excel

V případě zařízení Excel 4520 (výrobce Micro-Vu, viz Obrázek 15) se jedná o obzvláště výkonný a hospodárný měřicí systém. Je určen pro velmi rychlou a snadnou kontrolu součástí. Díky unikátnímu systému jednokolejového vedení portálu je velmi rychlý, spolehlivý a relativně přesný.



Obrázek 15 – Souřadnicový měřicí stroj Excel od firmy Micro-Vu

Excel je stroj portálové konstrukce. Základem je masivní žulová deska. Počítačem ovládaný posuv v osách  $x$ ,  $y$  je schopen rychlosti až 500 mm/s. Stroj je vybaven automatickým kamerovým systémem. [12]

XY	Měřicí rozsah	mm	600x600
	Základ		žulová deska
	Rozlišení snímačů	$\mu\text{m}$	0,5
	Přesnost E2xy	$\mu\text{m}$	1,5+7L
	Rychlost pojezdů	mm/s	500
	Zrychlení	$\text{mm/s}^2$	1000
	Vedení		jednokolejový samoustavovací typ
Z	Rozsah	mm	300
	Přesnost E1z	$\mu\text{m}$	1,7+5L (optické snímání)
		$\mu\text{m}$	1+5L (dotekové snímání)
	Rychlost	mm/s	150mm/s
	Zrychlení	$\text{mm/s}^2$	500mm/s <sup>2</sup>
	Vedení		lineární



Motor		stejnoseměrný servomotor doplněný rotačním snímačem
Napájení		110-220V/50-60 Hz
Video	CCD, vysoké rozlišení	černobílé
	Zoom	12:1 se zvětšením 0,6x až 7x (1,2x až 14x s čočkou 2x)
Osvětlení	spodní	100% kolimované
	osové osvětlení	Objektivem pomocí LED diody
	prstencové	Prstenec 2 kruhy/ 8 výsečí / 16 buněk
	volitelné	Prstenec 5 kruhů / 8 výsečí / 40 buněk

Tabulka 3 – Vybrané technické informace stroje Excel 4520

### 3.2.3 Doteková sonda a doteky

Stroj Excel je osazen systémem se snímací hlavou spínacího typu. Použitou sondou je doteková sonda s označením TP20 od firmy Renishaw. TP20 přináší uživateli možnost snadné změny konfigurace doteku automaticky, bez nutnosti nového seřízení. Skládá se ze dvou částí, tělesa a oddělitelného snímacího modulu sondy, který je osazen kinematickým senzorem zaručujícím vysokou opakovatelnost připojení modulu s příslušným dotekem.

Systém TP20 je navíc rozšířen o šestimístný držák automatické výměny snímacích modulů s doteky, se kterým dochází k maximálnímu využití sondy. Je zkonstruován tak, aby bezpečně udržel až šest modulů s doteky připravenými k výměně a zároveň je také chránil od ulpění případných nečistot ze vzduchu.

Excel je v současné době vybaven dvěma typy doteků – přímým a hvězdicovým. Pro požadavky měření dostačující. V případě potřeby je možnost dokoupení požadovaného typu, kalibrace a následného užívání. Materiál použitých doteků sond je rubín.

Na následujícím obrázku je znázorněn systém TP20 spolu se zásobníkem doteků:



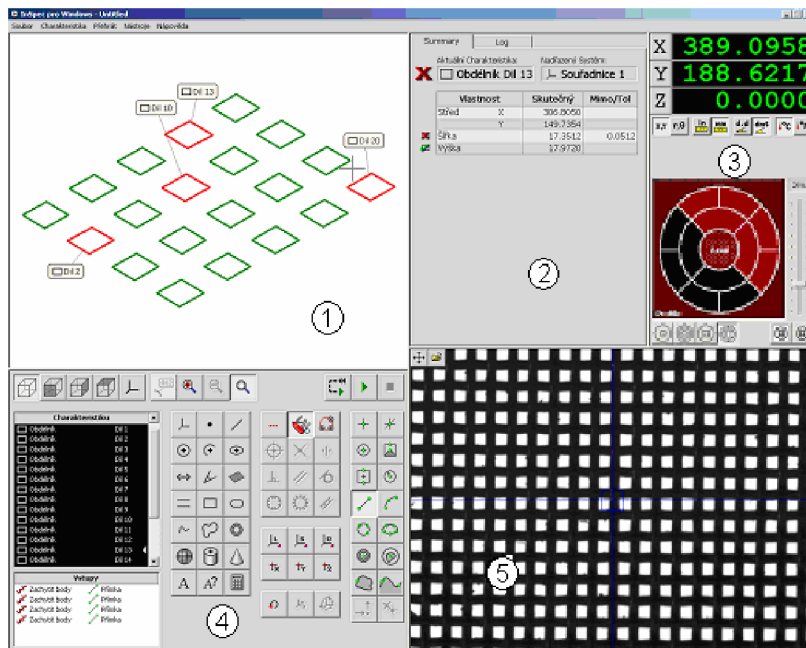
Obrázek 16 – Dotekový systém TP20 se zásobníkem pro výměnu doteků



### 3.2.4 Programové vybavení

K měření se využívá programu InSpec Vision, který pracuje na bázi zpracování digitálního obrazu. Jeho jednoduché uživatelské prostředí umožňuje měření všech základních geometrických prvků (vzdálenost, poloměr, obrys, koule, kužel, válec...)

InSpec Vision je koncipovaný podle vývojových standardů společnosti Microsoft. Díky tomu je stejně snadno a intuitivně ovladatelný.



1. interaktivní grafické okno pro zobrazení programu měření pro danou součástku

2. charakteristiky měření součásti

3. okno parametrů

4. interface pro vytváření programu

5. okno videa pro zobrazení měřené součástky

Obrázek 17 – Uživatelského prostředí InSpec Vision s popiskem

### 3.2.5 Měřený objekt

K měření hodnot (pro vyhodnocení standardní nejistoty typu A – viz dále) byla jako měřidlo použita hřebenová měřka od firmy Mitutoyo. Jedná se o pevně sevřený blok koncových měrek, který může sloužit pro kontrolu os souřadnicových měřicích strojů. Největší hmotný rozměr etalonu je 300 mm a je odstupňován po 50 mm.

Každý blok je vyroben z vysoce kvalitní keramiky na bázi zirkonu. Výhodou tohoto materiálu je, že má podobný součinitel tepelné roztažnosti jako ocel, což redukuje chybu v měření. Etalon může být používán jak v horizontální, tak vertikální poloze.



Obrázek 18 - Mitutoyo hřebenová měřka

### 3.3 Významné zdroje nejistot

Vzhledem k tomu, že ČMI (myšleno celorepublikově) je již vlastníkem několika souřadnicových měřicích strojů, byl upřen zrak zejména sem, co se týče odhadu významných zdrojů nejistot. Dále bylo využito zkušeností z měření na jiných strojích, kde byl velmi podobný princip měření. Nebyla opomenuta ani norma ISO TS 23165-2006, kde je uveden návod pro vyhodnocení nejistoty zkoušek souřadnicových měřicích strojů. Výsledkem pak byl výčet (významných) zdrojů nejistot, které se musí brát v úvahu, a které ovlivní výslednou nejistotu. Jedná se o:

- ❖ vliv rozptylu naměřených hodnot ( $u_A$ )
- ❖ vliv použitého etalonu ( $u_E$ )
- ❖ vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_P$ )
- ❖ vliv rozdílu teploty při měření od 20°C ( $u_{\Delta 20}$ )
- ❖ vliv rozdílu teplot souřadnicového stroje a měřeného předmětu ( $u_{\Delta T}$ )
- ❖ vliv nekulovitosti snímače ( $u_S$ )
- ❖ vliv kalibrace doteku ( $u_D$ )
- ❖ vliv nejistoty kalibrace teploměru vzduchu ( $u_{TC}$ )

### 3.4 Podrobná analýza nejistot

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

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu (2) uvedeného v předchozí kapitole. K výpočtu lze použít kalkulátor se statistickými funkcemi, případně nějaký tabulkový procesor.

Pokud se při měření provede menší počet měření (ať už z jakéhokoliv důvodu), nedojde k získání kvantitativně plnohodnotného souboru dat. Potom je nutné stanovit stupeň volnosti a z tabulky pro Studentovo rozdělení určit koeficient (kvantil), kterým se výsledná hodnota rozšíří.

#### 3.4.2 Vliv použitého etalonu ( $u_E$ )


Každý etalon by měl mít svůj kalibrační list, ve kterém je uvedena jeho rozšířená nejistota  $U$  současně s koeficientem rozšíření  $k$ . Někdy bývá nejistota  $U$  uvedena ve tvaru:

$$U = a + bL \quad (15)$$

kde  $a$ ,  $b$  jsou experimentálně zjištěné koeficienty a  $L$  je měřená délka. Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu (5). Předpokládá se zde normální rozdělení. To se použije tehdy, kdy je pravděpodobnost malých odchylek značná, zatímco pravděpodobnost velkých odchylek rovných mezím, velmi malá či zanedbatelná.

#### 3.4.3 Vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_P$ )

Měřicí přístroje, měřicí metody i obsluha měřicích přístrojů má konečnou rozlišovací schopnost. Někdy může být pro daný účel záměrně snížena například z důvodu

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 38
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

chvění měřené soustavy. U přístrojů se stupnicí se bere podle schopnosti obsluhy (použití lupy) a velikosti nejmenšího dílku stupnice obvykle v rozmezí (0,1 až 1) dílku. U digitálních může být přepínatelná a je rovna přinejmenším poslednímu digitu. Pro hodnotu příspěvku vlivem rozlišení se předpokládá rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typický pro daný typ rozdělení  $k = \sqrt{3}$  a vztah pro určení standardní nejistoty rozdílu teploty má tento tvar:

$$u_p = \frac{R}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

kde R je rozlišovací schopnost.

Rovnoměrné rozdělení se použije v případě, kdy je stejná pravděpodobnost výskytu kterékoliv odchylky v celém daném intervalu. Tato aproximace se v běžné praxi využívá nejčastěji, především proto, že většinou nejsou k dispozici dostatečné poznatky o rozdělení pravděpodobnosti výskytu odchylek, a tudíž není důvod dávat některým odchylkám přednost tím, že se použije jiný typ rozdělení.

#### 3.4.4 Vliv rozdílu teploty při měření od 20°C ( $u_{\Delta t_{20}}$ )

Základním předpokladem pro kvalitní přesná délková měření je odpovídající monitoring teploty. Je tedy nutné dbát na vhodný a dostačující způsob měření teploty materiálu a okolí.

Během měření se obvykle zaznamená určitá odchylka od stanovené teploty, např.  $\Delta t_{20} = \pm 1^\circ\text{C}$ . Pro tuto hodnotu se předpokládá rovnoměrné rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení  $k = \sqrt{3}$ .

Vztah pro určení standardní nejistoty rozdílu teploty má tvar:

$$u_{\Delta t_{20}} = \alpha \frac{\Delta t_{20}}{k} L \quad (17)$$

kde  $\alpha$  je koeficient délkové roztažnosti daného měřeného materiálu a L je měřená délka.

#### 3.4.5 Vliv rozdílu teplot souřadnicového stroje a měřeného předmětu ( $u_{\Delta T}$ )

V reálných podmínkách měření nelze vždy zaručit ideální stav a průběh teplotních charakteristik. Z toho důvodu je vhodné pro celkovou (kombinovanou) nejistotu měření při kalibraci počítat s vlivem rozdílu teplot etalonu a měřicího stroje.

Souřadnicový stroj a měřený předmět mají různou teplotu  $t_1$  a  $t_2$ . Dále mají různé koeficienty teplotní roztažnosti  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ . Průměrná hodnota koeficientu bude:

$$\alpha_A = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \quad (18)$$

kde  $\alpha_1$  koeficient teplotní roztažnosti stroje a  $\alpha_2$  koeficient teplotní roztažnosti měřeného předmětu. Rozdíl délky způsobený teplotní roztažností je dán vztahem:

$$\Delta L = L\alpha_A(t_1 - t_2) \quad (19)$$

kde  $t_1$  je teplota souřadnicového stroje a  $t_2$  teplota měřeného předmětu. Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu:

$$u_{\Delta T} = \frac{L\alpha_A(t_1 - t_2)}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

kde  $L$  je měřená délka,  $\alpha$  průměrná hodnota koeficientu roztažnosti,  $(t_1 - t_2)$  maximální hodnota rozdílu teplot souřadnicového stroje a měřeného předmětu a  $\sqrt{3}$  je koeficient plynoucí z předpokladu rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti. [14]

### 3.4.6 Vliv nekulovitosti snímače ( $u_s$ )

Kulovitost doteku může zásadně ovlivnit měření. Obecně jsou kulovité doteky rozděleny do 45 tříd přesnosti v rozsahu od 48 (nejnižší třída přesnosti) až po 3 (nejvyšší třída přesnosti). Níže uvedená tabulka ukazuje tolerance pro vybrané stupně přesnosti:

třída přesnosti	odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]
20	$\pm 0,50$	0,50
16	$\pm 0,40$	0,40
10	$\pm 0,25$	0,25
5	$\pm 0,13$	0,13
3	$\pm 0,08$	0,08

Tabulka 4 – Třídy přesnosti doteků

Odchylkou je zde myšlen rozdíl mezi největší a nejmenší radiální vzdáleností na kouli a kruhovitostí největší radiální vzdálenost (v libovolném řezu koulí) mezi koulí opsanou doteku libovolným bodem povrchu doteku.

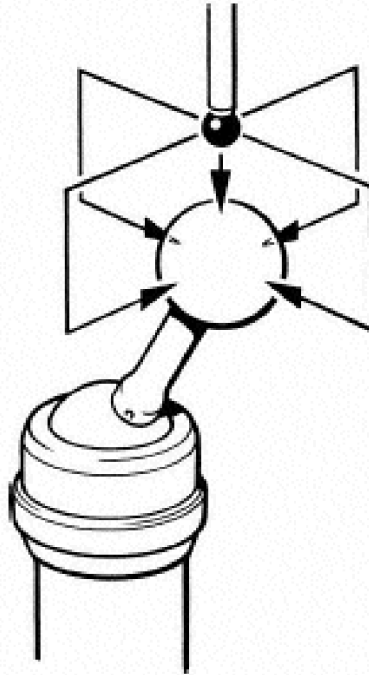
### 3.4.7 Vliv kalibrace doteku ( $u_D$ )

Před započítáním měření je vždy vhodné pro případ získání správných výsledků provést kalibraci doteku. V případě souřadnicových měřicích strojů to znamená kalibraci i několika doteků (v závislosti na složitosti měření), často ve více směrech.

Pozice jednotlivých doteků a jejich průměrů jsou stanoveny na základě speciálního kalibračního programu dle výrobce tohoto zařízení. Princip spočívá v najetí nejčastěji na tzv. kalibrační kouli, která je velmi přesná. Právě rozměry kalibrované koule jsou vstupem pro měřicí software.

Pokud jsou doteky určeny pro měření samostatných bodů, je dotek kalibrován sejmutím 5-6 bodů na kalibrační kouli. Mnohem více bodů je pak používáno při skenování (spojité snímání – viz kapitola 4.3.2). Kalibrace doteku je v praxi také nazývána jako tzv. malá kalibrace.





Obrázek 19 – Kalibrace doteku pomocí kalibrační koule

### 3.4.8 Vliv nejistoty kalibrace teploměru vzduchu ( $u_{TC}$ )

Kalibrační list teploměru (viz příloha č. 3) uvádí rozlišitelnost teploměru  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ . Kalibrační list teploměru uvádí také hodnotu rozšířené nejistoty s normálním (Gaussovým) rozdělením a pro pravděpodobnostní pokrytí 95% ( $P=0,95$ ) s koeficientem rozšíření  $k = 2$ . Příspěvek k nejistotě se vypočítá pomocí tohoto vztahu:

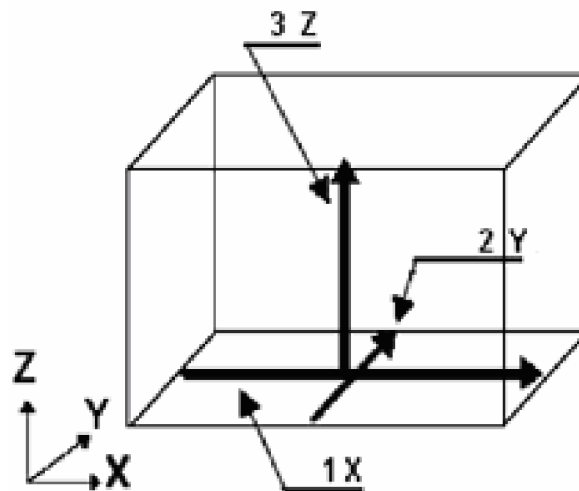
$$u_{TC} = \frac{U}{k} \cdot L \quad (21)$$

kde  $U$  je hodnota rozšířené nejistoty z kalibračního listu,  $k$  je koeficient rozšíření pro daný typ rozdělení a  $L$  je jmenovitá délka měřky v mm.

## 3.5 Metodika měření

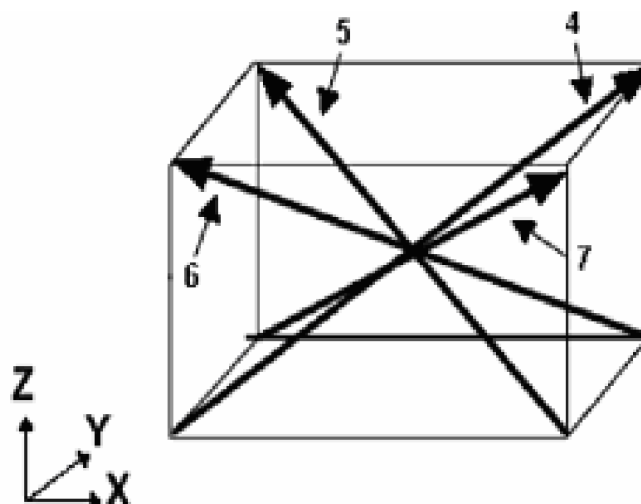
Vzhledem k tomu, že doposud není zcela jasné, co bude předmětem budoucích kalibrací na souřadnicovém měřicím stroji, provede se měření ve více směrech vůči osám stroje. Touto metodikou se „pokryje“ převážná část měřicího rozsahu stroje, což povede k objektivnímu zhodnocení.

Měřený předmět byl nejprve umístěn vodorovně na ploše stolu v ose  $x$  a  $y$ . Následně byl umístěn kolmo v ose  $z$ . Polohy umístění jsou schematicky znázorněny. Čísla ve schématu určují polohu etalonu a šipky směr měření. Souřadný systém XYZ je souřadným systémem stroje.



Obrázek 20 – Schéma měření v osách souřadnicového stroje

Po proměření v osách stroje byl etalon umístěn ještě ve čtyřech prostorových úhlopříčkách, jak naznačuje další schéma.



Obrázek 21 – Schéma měření v prostorových úhlopříčkách stroje

### 3.6 Praktický výpočet

#### 3.6.1 Zadání

Pro praktickou ukázkou stanovení nejistoty bylo použito hodnot naměřených dle metodiky vysvětlené v předcházející kapitole. K samotné analýze byla vybrána „nejdelší“ varianta, která odpovídala měřenému jmenovitému rozměru 300 mm. Tento rozměr vykazoval (z výsledků měření) největší kolísání naměřených hodnot.

Bylo by správné domnívat se, že nejdelší měřený rozměr bude mít logicky nejhorší výsledky (dle nejistoty měření etalonu – viz dále). Ovšem v tomto případě nejhorší výsledky měření vykazovaly rozměry 20 mm a 50 mm. To bylo způsobeno pravděpodobně větším opotřebením ploch měrek, a proto byly autorem pro další postup vyřazeny. Naměřené hodnoty ve všech polohách jsou součástí diplomové práce (viz Příloha 1).



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

Celkem bylo provedeno sedm měření. Výsledky pro nejhorší variantu interpretuje Tabulka 5, která uvádí hodnoty středových odchylek od jmenovité hodnoty 300 mm.

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7
Naměřená hodnota [mm]	-0,0010	-0,0017	-0,0011	-0,0094	-0,0103	-0,0081	-0,0092

Tabulka 5 – Naměřené hodnoty

Aritmetický průměr dle vztahu (1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 299,99417 \text{ mm} \quad (22)$$

Výběrová směrodatná odchylka pak bude s využitím vzorce (2):

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,001633 \text{ mm} \quad (23)$$

Standardní nejistota typu A je přibližně 1,633  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k tomu, že počet opakovaných měření byl menší než deset a není možné učinit kvalifikovaný odhad na základě zkušeností, lze standardní nejistotu typu A stanovit dle vzorce (3) a s použitím hodnot z Tabulky 2 (koeficienty rozšíření):

$$u_A(x) = k_s s_{\bar{x}} = (1,3 \cdot 1,633) \mu\text{m} = 2,123 \mu\text{m} \quad (24)$$

### 3.6.3 Vliv použitého etalonu ( $u_E$ )

Měřidla tohoto typu (SMS) musí být obecně metrologicky navázána prostřednictvím nepřerušenoého řetězce kalibrací nebo porovnání až k státním nebo mezinárodním etalonům.

Etalonem pro souřadnicový měřicí stroj Excel je: helio-neonový laser Renishaw XL80, sady koncových měrek a nastavný kroužek. Podrobnosti o etalonu uvádí kalibrační list (viz Příloha 2).

Nejistota měření etalonu je dle kalibračního listu rozdělena do tří souřadnicových os měřicího stroje. Interpretuje ji následující tabulka.

osa	nejistota měření U
x	(0,6+2,7L) $\mu m$
y	(1,6+1,8L) $\mu m$
z	(0,8+1,6L) $\mu m$

Tabulka 6 – Nejistoty měření v jednotlivých osách stroje

Aby se předešlo neobjektivnímu zhodnocení celkové rozšířené nejistoty měření, uvažuje se dále nejhorší varianta (osa y) a s ní se provádí další výpočet.

Pro jmenovitý rozměr měřené měrky 300 mm bude s využitím vztahů (5) a (15) platit:

$$U = (1,6 + 1,8 \cdot 0,3) \mu m = 2,14 \mu m \quad (25)$$

Uvedená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , který je uveden ve zmiňovaném kalibračním listu a je roven dvěma.

$$u_E = \frac{U}{k} = \left(\frac{2,14}{2}\right) \mu m = 1,07 \mu m \quad (26)$$

### 3.6.4 Vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_p$ )

Výrobce souřadnicového měřicího stroje uvádí ve svých materiálech pro tento typ rozlišovací schopnost rovnou 0,5  $\mu m$ . Pro předpoklad rovnoměrného rozdělení bude platit:

$$u_p = \frac{U}{k} = \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right) \mu m = 0,288 \mu m \quad (27)$$


kde  $\sqrt{3}$  je koeficient plynoucí z rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

### 3.6.5 Vliv rozdílu teploty při měření od 20°C ( $u_{\Delta 20}$ )

Teplota v laboratoři je regulována pomocí klimatizačního zařízení. Regulační prvek tohoto zařízení má přirozené zpoždění vlivem vyhodnocování, proto teplota v laboratoři mírně kolísá. Během měření bylo pozorováno, že teploměr ukazoval odchylku od teploty 20°C zhruba  $\pm 0,3^\circ C$ . Hřebenová měrka, resp. její funkční plochy jsou z materiálu keramiky na bázi zirkonu. Pro tento typ materiálu je součinitel teplotní roztažnosti roven  $\alpha = 9,3 \cdot 10^{-6}/^\circ C$ . Potom při využití vztahu (17) a úpravě jednotek bude platit:

$$u_{\Delta 20} = \left(9,3 \cdot \frac{0,3}{\sqrt{3}}\right) \mu m = 0,483 \mu m \quad (28)$$

kde  $\sqrt{3}$  je koeficient plynoucí z rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 44
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 3.6.6 Vliv rozdílu teplot souřadnicového stroje a měřeného předmětu ( $u_{\Delta T}$ )

Jako reprezentativní část souřadnicového stroje pro porovnání teplot s měřeným předmětem byl zvolen materiál, na kterém je odměřovací pravítka (systém odměřování délky). Stroj značky Excel používá dva různé materiály pro tyto pravítka: pro osy x a z materiál ocel a pro osu y materiál granit. Koeficienty teplotní roztažnosti jsou pro ocel zhruba  $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  a pro granit  $\alpha_2 = 7,9 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . Pro měřený předmět byl zvolen již uváděný materiál zirkonová keramika.

Pro další výpočet se při volbě materiálu souřadnicového stroje bere v úvahu opět nejhorší varianta. Tou je materiál granit. Má nižší součinitel teplotní vodivosti, a proto bude hůře odvádět teplo z odměřovacích pravítek, než v případě oceli. Po průměrnou hodnotu teplotního koeficientu bude platit s využitím vzorce (17):

$$\alpha_A = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} = \frac{9,3 \cdot 10^{-6} + 7,9 \cdot 10^{-6}}{2} = 8,6 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C} \quad (29)$$

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu (20). Pro  $L = 0,3\text{m}$ ,  $\alpha_A = 8,6 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  a  $(t_1 - t_2) = 0,3^\circ\text{C}$  bude po úpravě jednotek příspěvek vypadat:

$$u_{\Delta T} = \left( \frac{0,3 \cdot 8,6 \cdot 0,3}{\sqrt{3}} \right) \mu\text{m} = 0,447 \mu\text{m} \quad (30)$$

kde  $\sqrt{3}$  je koeficient plynoucí z rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

### 3.6.7 Vliv nekulovitosti snímače ( $u_s$ )

Měření bylo prováděno přímým dotekem o jmenovitém průměru rubínové kuličky 3 mm. Dotek spadá do třídy přesnosti 5, jemuž odpovídá dle Tabulky 4 hodnota kruhovitosti 0,13  $\mu\text{m}$ . Proto:

$$u_s = \left( \frac{0,130}{\sqrt{3}} \right) \mu\text{m} = 0,075 \mu\text{m} \quad (31)$$

kde  $\sqrt{3}$  je koeficient plynoucí z rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

### 3.6.8 Vliv kalibrace doteku ( $u_D$ )

Etalonem určeným pro kalibraci doteku je kalibrační koule. Ta je vyrobena z tvrdého karbidu wolframu a je dodávána se zvláštním certifikátem udávajícím průměr kuličky a její kulovitost. Veškerá měření kulovitých ploch jsou prováděna na zařízení sledovaném podle standardů britského ústavu NPL.

Firma Renishaw nabízí celkem pět variant kalibračních koulí rozdělených podle velikostí:  $\varnothing 12\text{ mm}$ ,  $\varnothing 20\text{ mm}$ ,  $\varnothing 25\text{ mm}$ ,  $\varnothing 3/4''$  a  $\varnothing 1''$ .

Na půdě Českého metrologického institutu je používána kalibrační koule s průměrem  $\varnothing 20\text{ mm}$ . Její kalibrační list, resp. kopie je přiložena k závěrečné práci jako

Příloha 4. V kalibračním listu je mimo jiné uvedena i nejistota měření ve tvaru, který odpovídá vztahu (15), konkrétně:

$$U = (0,5 + 5L)\mu m \quad (32)$$

Pro konkrétní průměr koule 20 mm se příspěvek k nejistotě vypočítá následovně:

$$u_D = \left( \frac{0,5 + 5 \cdot 0,2}{2} \right) \mu m = 0,750 \mu m \quad (33)$$

kde jmenovatel zlomku je koeficient plynoucí z normálního rozdělení pravděpodobnosti.

### 3.6.9 Vliv nejistoty kalibrace teploměru vzduchu ( $u_{TC}$ )

Při využití vztahu (21) a upravení jednotek pro výpočet bude platit dle kalibračního listu:

$$u_{TC} = \left( \frac{0,1}{2} \cdot 0,3 \right) \mu m = 0,015 \mu m \quad (34)$$

kde jmenovatel zlomku je koeficient plynoucí z normálního rozdělení pravděpodobnosti.

### 3.6.10 Výsledná rozšířená nejistota měření

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti	Příspěvek ke standardní nejistotě [ $\mu m$ ]
$u_A$	2 $\mu m$	2,123 $\mu m$	normální	1	2,123
$u_E$	1 $\mu m$	1,070 $\mu m$	normální	1	1,070
$u_P$	0,2 $\mu m$	0,288 $\mu m$	rovnoměrné	1	0,288
$u_{\Delta 20}$	0,5 $\mu m$	1,611 $\mu m$	rovnoměrné	$L = 0,3 \text{ m}$	0,483
$u_{\Delta T}$	0,5 $\mu m$	0,173 $\mu m$	rovnoměrné	$\alpha L = 2,58 \mu m/^\circ C$	0,447
$u_S$	0,1 $\mu m$	0,075 $\mu m$	rovnoměrné	1	0,075
$u_D$	1 $\mu m$	0,750 $\mu m$	normální	1	0,750
$u_{TC}$	0,02 $\mu m$	0,015 $\mu m$	normální	1	0,015

Tabulka 7 – Bilanční tabulka



Pro výpočet kombinované standardní nejistoty se použije vztah (13). Kombinovaná standardní nejistota bude:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} = 2,595 \mu m \quad (35)$$

Výsledná rozšířená nejistota měření vypočtená ze vztahu (14) je:

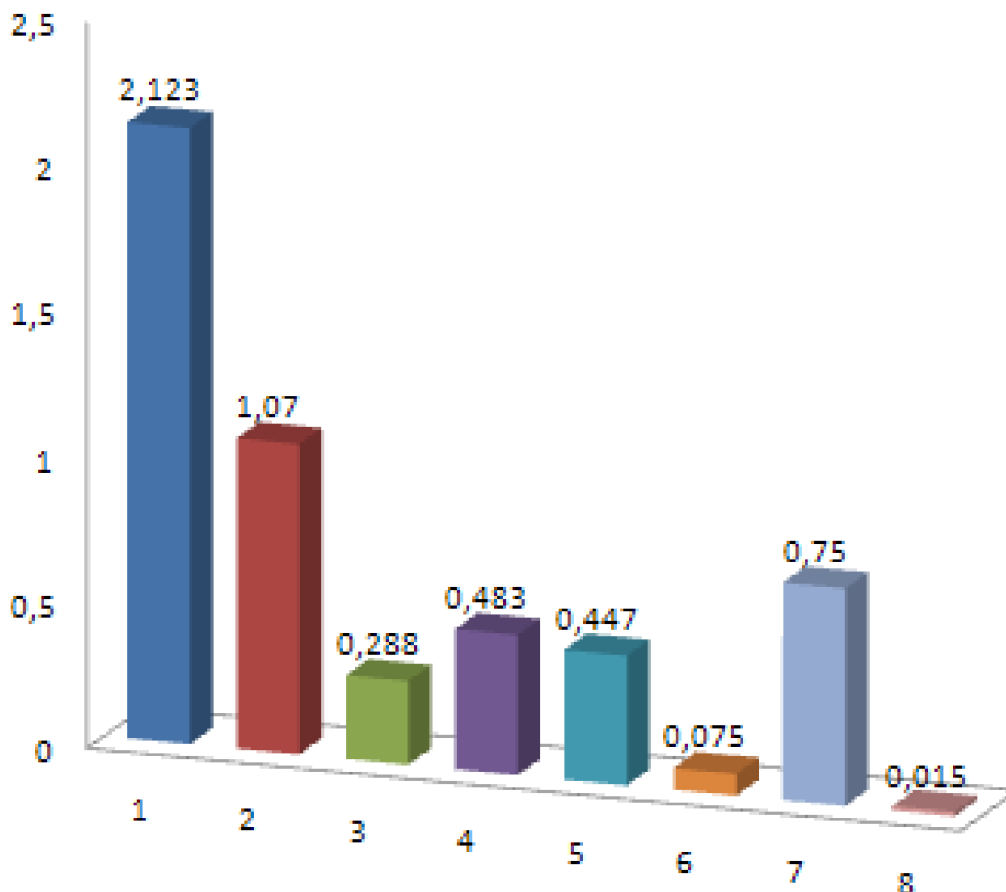
$$U = k_t u_c = (2 \cdot 2,595) \mu m = 5,19 \mu m \quad (36)$$

Uvedená výsledná hodnota rozšířené nejistoty byla a byla zaokrouhlena na dvě platná místa. Větší počet platných míst se ponechá, následuje-li další zpracování.


Velikost koeficientu rozšíření  $k=2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%.

### 3.7 Zhodnocení praktického příkladu

#### 3.7.1 Srovnání příspěvků k výsledné nejistotě



Obrázek 22 – Graf výsledků příspěvků k nejistotě

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 47
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Na obrázku výše je graficky vyobrazeno srovnání příspěvků k výsledné nejistotě. Vertikální osa udává velikost vlivů v mikrometrech, horizontální osa uvádí jednotlivé vlivy, kde:

- 1 ..... vliv rozptylu naměřených hodnot ( $u_A$ )
- 2 ..... vliv použitého etalonu ( $u_E$ )
- 3 ..... vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_P$ )
- 4 ..... vliv rozdílu teploty při měření od 20°C ( $u_{\Delta 20}$ )
- 5 ..... vliv rozdílu teplot souřadnicového stroje a měřeného předmětu ( $u_{\Delta T}$ )
- 6 ..... vliv nekulovitosti snímače ( $u_S$ )
- 7 ..... vliv kalibrace doteku ( $u_D$ )
- 8 ..... vliv nejistoty kalibrace teploměru vzduchu ( $u_{TC}$ )

Hodnoty nad každým sloupcem uvádí velikosti příspěvků ke standardní nejistotě.

Z podílu jednotlivých vlivů má na výslednou nejistotu významný vliv především vliv rozptylu naměřených hodnot, vliv použitého etalonu a vliv kalibrace doteku. Naopak nejmenší vlivy jsou způsobeny nejistotou kalibrace teploměru vzduchu a nekulovitostí snímače. Jak je dále patrné z grafického srovnání příspěvků k nejistotám, kalibrace doteku je relativně vlivný faktor pro přesnost měření. Z toho důvodu proto autor (i z vlastní zkušenosti) doporučuje provádět malou kalibraci v častějších intervalech nebo nejlépe před každým měřením.

### 3.7.2 Zanedbávání dílčích zdrojů nejistot


Ne všechny složky musí mít/mají výrazný vliv na standardní nejistotu měřené veličiny. Příspěvky z jednotlivých zdrojů se člení dle své velikosti na příspěvky významné (dominantní) a příspěvky nevýznamné (zanedbatelné). Významné příspěvky/složky se převážně podílejí velkou mírou na nejistotě výsledku měření a musí se vyhodnocovat samostatně. Nevýznamné složky lze vynechat nebo je vyhodnocovat kumulovaně.

Všeobecně jsou známa dvě kritéria pro rozdělení na složky významné a nevýznamné. Podle organizace EURACHEM zaměřené na podporu kvality analytických měření a jejich metrologické návaznosti se jako složka nevýznamná bere složka, která není větší než jedna třetina složky největší. Dalším známým kritériem je tvrzení, že jako složka nevýznamná se bere složka, která není větší než jedna pětina složky největší. „Autorem“ tohoto kritéria je pro změnu asociace Evropská akreditace.

Obdobným způsobem se k této problematice staví literatura [15], která navíc podotýká, že při měření s vysokými nároky na přesnost, jako jsou kalibrace a práce s etalony vyšších řádů je tento poměr 1:5 nedostatečný. U těchto měření je potřeba postupovat při případném zanedbávání dílčích složek citlivě. A je vhodné některý dílčí zdroj zanedbávat až od poměrů 1:10.

Možnost zanedbání jednotlivých dílčích zdrojů nejistot je značně omezená, protože veškeré operace prováděné s nejistotami jsou prováděny ve čtvercích – v jejich druhých mocninách.



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 48
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Nejdříve by měly být vyšetřeny příslušné koeficienty citlivosti, protože právě koeficienty citlivosti (jsou dány dříve zmíněnými parciálními derivacemi popisující model měření) mohou způsobit, že z malých složek se stanou velké a naopak.

Zanedbávat by se tedy nemělo z pohledu stanovených nejistot měření do modelu měření vstupujících veličin, ale až na základě přepočtu těchto vlivů vstupních veličin na veličinu výslednou. [16]

S ohledem na výše uvedená tvrzení, je možné označit příspěvky nejistot od vlivů nejistoty kalibrace teploměru vzduchu a nekulovitosti snímače z praktického příkladu za nevýznamné. Zda dále uvažovat tyto vlivy nebo je zanedbat je pak na rozhodnutí operátora (metrologa).

### 3.7.3 Porovnání výsledku s daty uváděnými výrobcem SMS

Výrobce souřadnicového měřicího stroje uvádí pro každý stroj prostorovou neurčitost. Pro typ Excel 4520 je tato prostorová neurčitost dána vztahem:

$$U_S = (1,5 + 7L)\mu m \quad (37)$$

kde L je měřená délka v metrech. Po dosazení jmenovitého rozměru měřky z příkladu - 0,3m bude nejistota měření:

$$U_S = 3,60 \mu m \quad (38)$$

Tato hodnota bude porovnána s výslednou rozšířenou nejistotou z praktického příkladu rovnou  $U = 5,19 \mu m$ :

$$U_S \leq U$$

$$3,60 \mu m \leq 5,19 \mu m \quad (39)$$

Výsledná rozšířená nejistota z praktického příkladu není menší než neurčitost, kterou uvádí výrobce. Důvody, proč tomu tak je, mohou být různé. Jedním z nich může být například ten, že autor práce nemá informace o tom, jakým způsobem (metodou) nejistotu měření na souřadnicovém stroji stanovoval výrobce, jinými slovy - jaké vlivy (zdroje nejistot) bral při uvádění nejistoty měření v úvahu. Dalším důvodem může být například silné konkurenční prostředí při prodeji měřicích zařízení a s tím související marketingové tahy výrobců či obchodníků. (Uvádění někdy až nereálných informací za záminkou prodeje a zisku).

### 3.7.4 Doporučení pro budoucí měření/kalibrace

V praktickém příkladu byla standardní nejistota typu A získávána prostřednictvím proměření součásti v celém měřicím prostoru stroje. To se však pro budoucí kalibrování nepředpokládá, proto pro přesnější měření autor práce doporučuje měřit/kalibrovat (pokud to proces měření dovolí) přednostně v ose x souřadnicového stroje. Dle kalibračního listu stroje je pro tuto osu uváděna nejmenší nejistota měření. Tímto dojde ke snížení vlivu etalonu a v konečné fázi i k menší hodnotě rozšířené nejistoty měření.



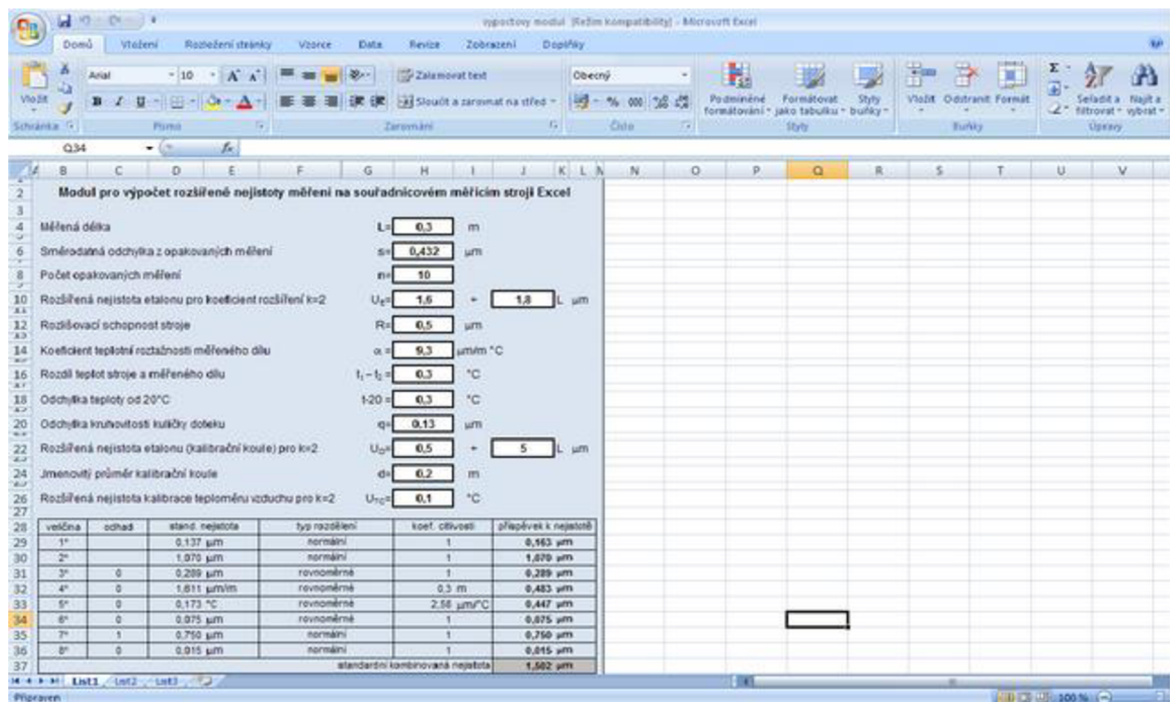
### 3.8 Zapracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení

Automatické vyhodnocování nejistot měření navazuje na ukázkový příklad výpočtu nejistot a dává si za cíl splňovat tyto podmínky:

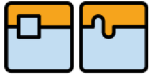
- ❖ jednoduchá uživatelská obsluha,
- ❖ možnost úprav dle aktuálních požadavků,
- ❖ univerzálnost použití (pro případ, že ČMI by byla vlastníkem více těchto souřadnicových měřicích strojů v České republice),
- ❖ možnost přenosu naměřených dat z měřicího softwaru InSpec Vision,
- ❖ možnost přenosu výsledků nejistot do kalibračních protokolů.

Samotný výpočtový modul je vypracován v souboru aplikace Excel od společnosti Microsoft. Tento produkt byl vybrán z důvodu jeho masivního rozšíření ve všech oblastních inspektorátech ČMI a jeho všeobecnou znalost použití.

Umožňuje díky použití řetězce funkcí rychlé a přesné zjištění hodnoty nejistoty daného měření. Po určitých úpravách je možné využít modul i pro jiná měření délky.



Obrázek 23 – Náhled výpočtového modulu




Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Str. 50



## DIPLOMOVÁ PRÁCE



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 51
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 4 STANOVENÍ KALIBRAČNÍHO POSTUPU

### 4.1 Spojitost nejistoty měření s kalibracemi

Cílem předchozí kapitoly bylo kvantifikovat nejistotu měření při použití stroje Excel. Tato kvantifikace má pochopitelně své opodstatnění. Totiž záměrem ČMI při koupi souřadnicového měřicího stroje bylo provádění kalibrací určitých typů měřidel. Po provedení kalibrace je však nutné tuto činnost (soubor činností) něčím doložit. Tím něčím je tzv. kalibrační list. A právě v tomto listu je dle normativu ČSN EN ISO/IEC 17025 požadováno uvedení nejistoty měření, s jakou je kalibrace provedena.

### 4.2 Náležitosti kalibračního postupu

Kalibrační postupy jsou důležitým předpokladem pro kalibraci měřidel. A k jeho vypracování je potřeba znát vše, co bude nutné k realizaci kalibrace daného etalonu (měřidla).

V kalibračním postupu musí být obecně stanovena zařízení a pomůcky ke kalibraci. Dále musí být uvedeno, za jakých podmínek se bude kalibrace provádět. Popsán musí být pochopitelně samotný postup kalibrace – v jakém rozsahu bude úkon prováděn. Do postupu se také doporučuje zařadit vzorový příklad na výpočet nejistot měření a vytýčit předpisy související s danou kalibrací. Většina dnešních postupů obsahuje mnohem více náležitostí.

V dalším je vytvořen kalibrační postup určený pro kalibrace na souřadnicovém měřicím stroji Excel v podobě, ve které by mohl být využíván v praxi. Upravený do podnikové kultury ČMI je k dohledání jako Příloha č. 5 této práce.

### 4.3 Vlastní kalibrační postup s komentářem

#### 4.3.1 Úvod

V úvodu je popsáno, co je předmětem kalibrace. Dle autora by úvod mohl v tomto konkrétním případě vypadat následovně:


Tento postup se použije pro kalibraci:

- zkušebních sít,
- clonových kotoučů pro měřicí tratě na průtok,
- hřebenové měrky nižších řádů,
- kuželové závitové kalibry,
- speciální kalibry a měřidla.

Metodický postup může být využit také pro:

- ověřování geometrických parametrů stanovených měřidel

Tato metoda je obecně aplikovatelná na celou řadu běžně používaných etalonů, např. válce, koule, kroužky, úhelníky, tvarově složitá tělesa.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 52
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

#### 4.3.2 Princip kalibrace

Popsání principu kalibrace by mělo být uvedeno v každém kalibračním postupu. Níže je opět znázorněn možný způsob:

Kalibrace s použitím souřadnicového měřicího stroje Excel 4520 se provádí snímáním měřicích bodů na povrchu měřeného objektu. Toto snímání je prováděno dotekovým snímacím systémem osazeným dotekovou sondou s kulovým hrotem. Souřadnice (polární nebo pravouhlé) jednotlivých naměřených bodů jsou přenášeny do výpočetního software, který je dále zpracovává. Výstupem ze software je pro uživatele seznam charakteristik, jež jsou předmětem kalibrace.

#### 4.3.3 Metrologická návaznost

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 [17]. Pro stroj Excel platí:

Metrologická návaznost je zajištěna kalibrací stroje pomocí koncových měrek. Tyto měrky jsou přímo navázány na státní etalon délky s použitím laserového interferometru Renishaw XL80.

#### 4.3.4 Oprávnění

V části Oprávnění se stanoví buď konkrétně (seznam lidí) nebo obecně (obvyklý způsob), které osoby mají možnost provádět kalibrace. Např.:

Tuto kalibraci mohou provádět pracovníci akreditované laboratoře za dodržení podmínek daných akreditací.

#### 4.3.5 Související předpisy

Rozhodně není na škodu uvést v kalibračním postupu předpisy, které se týkají kalibrace. Důležité také je, aby konkrétní strategie při měření byla vytvářena v souladu s technickou dokumentací předanou zákazníkem a dle jeho individuálních požadavků. Názorná ukázka např. pro zkušební síta:

ČSN ISO 3310-1	Zkušební síta – Technické požadavky a zkoušení Část 1: Zkušební síta kovové tkaniny
ČSN ISO 3310-2	Zkušební síta – Technické požadavky a zkoušení Část 2: Zkušební síta z děrovaného plechu
ČSN ISO 5223 + Amd.1	Zkušební síta pro obiloviny
ČSN ISO 2395	Zkušební síta a prosévání. Terminologie
ČSN EN 933-3	Zkoušení geometrických vlastností kameniva
EA 4/02	Vyjadřování nejistot při kalibracích
ČSN ISO 565	Zkušební síta. Kovová tkanina, děrovaný plech a elektroformovaná folie. Jmenovité velikosti otvorů

#### 4.3.6 Zařízení a pomůcky

Zde se nachází výčet všech zařízení a pomůcek potřebných při úkonu kalibraci:

Souřadnicový měřicí stroj Excel + software InSpec, sada měřicích sond, kalibrační koule případně jiné referenční etalony, posuvné měřítko, rukavice, čisticí prostředky.

#### 4.3.7 Vlastní pracovní postup


Metodika měření je závislá na druhu měřeného objektu. Obecně ji lze formulovat v následujících krocích:

- očištění měřených povrchů,
- upnutí měřeného objektu,
- teplotní stabilizace měřeného objektu (vytemperování),
- sestavení a zkalibrování vhodné sestavy měřicích doteků,
- definování výchozího souřadnicového systému (musí být provedeno v souladu s výkresovou dokumentací nebo s požadavky zákazníka),
- měření požadovaných metrologických parametrů (vždy takovým množstvím měřicích bodů, které rovnoměrně pokryje měřený element a zároveň minimalizuje případný vliv kvality povrchu na výsledek měření),
- výpočet vzájemných geometrických závislostí naměřených elementů definovaných výkresovou dokumentací,
- vynesení naměřených hodnot do grafického zobrazení výsledku měření, nebo export textových dat pro přípravu kalibračního listu,
- vyhotovení kalibračního listu.

#### 4.3.8 Požadavky na prostředí během měření

Se stoupajícím nároky na přesnost měření rostou nároky nejen na měřidla, přístrojové vybavení, měřicí metody, ale také na prostory, kde se má měřit. Metrologické laboratoře musí splňovat řadu požadavků.



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 54
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ČMI splňuje tyto požadavky, proto je dostačující se v postupu zmínit jen o teplotě – nejvýznamnější veličině ovlivňující měření:

Pro provádění kalibrací etalonů je třeba dodržet teplotu prostředí  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  s teplotním gradientem v čase nejvíce  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ .

#### 4.3.9 Požadavky na stabilizaci kalibrovaných měřidel před měřením

Jak již bylo uvedeno v odstavci 4.3.7 Vlastní pracovní postup, je vhodné převzaté měřidlo teplotně stabilizovat:

Měřidla (etalony) určené ke kalibraci je nutné temperovat v prostředí laboratoře po tak dlouhou dobu, aby byl vyloučen významný vliv teploty na měření. Doporučená doba je cca 24 hodin.

#### 4.3.10 Zpracování naměřených údajů a vystavení kalibračního listu

Na tomto místě je popsán přesný průběh zpracování dat:

Naměřené hodnoty se přenesou do šablony vzorového kalibračního listu vytvořeného v programu Microsoft Excel. Při automatickém měření pomocí exportu dat (přednostně), při alternativním měření ručně.

Dále se doplní údaje jako: zákazník, metoda měření, podmínky měření, použitý etalon, jmenovitý rozměr, výrobce měřidla a jeho evidenční číslo.

Kalibrační list se vygeneruje po zadání hodnot. Poté se vytiskne pro zákazníka a současně se také archivuje v elektronické podobě.

#### 4.3.11 Způsob označení měřidla kalibrační značkou

Kalibrační značky se používají pro označování doby platnosti kalibrace měřidel a přístrojů v podnikové metrologii nebo pro záznamy o provedené revizi zařízení a doby její platnosti:

Provedení kalibrace se vyznačí na etalonu vylepením nálepky ČMI s letopočtem kalibrace. Nálepka se vylepuje na viditelném místě tak, aby neomezovala funkčnost etalonu.

#### 4.3.12 Nejistoty měření

Vhodné je v postupu uvést výčet jednotlivých složek nejistot, které vedou k rozšířené nejistotě měření. Pracovník má pak lepší přehled o zdrojích chyb, jež ovlivňují jeho měření:



Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti	Příspěvek ke standardní nejistotě [ $\mu\text{m}$ ]
1	2 $\mu\text{m}$	2,123 $\mu\text{m}$	normální	1	2,123
2	1 $\mu\text{m}$	1,070 $\mu\text{m}$	normální	1	1,070
3	0,2 $\mu\text{m}$	0,288 $\mu\text{m}$	rovnoměrné	1	0,288
4	0,5 $\mu\text{m}$	1,611 $\mu\text{m}$	rovnoměrné	L = 0,3 m	0,483
5	0,5 $\mu\text{m}$	0,173 $\mu\text{m}$	rovnoměrné	$\alpha L = 2,58$ $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	0,447
6	0,1 $\mu\text{m}$	0,075 $\mu\text{m}$	rovnoměrné	1	0,075
7	1 $\mu\text{m}$	0,750 $\mu\text{m}$	normální	1	0,750
8	0,02 $\mu\text{m}$	0,015 $\mu\text{m}$	normální	1	0,015
výsledná rozšířená nejistota					5,19 $\mu\text{m}$

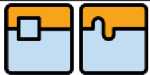
- 1 .....vliv rozptylu naměřených hodnot ( $u_A$ )
- 2 .....vliv použitého etalonu ( $u_E$ )
- 3 .....vliv rozlišovací schopnosti stroje ( $u_P$ )
- 4 .....vliv rozdílu teploty při měření od 20°C ( $u_{\Delta 20}$ )
- 5 .....vliv rozdílu teplot souřadnicového stroje a měřeného předmětu ( $u_{\Delta T}$ )
- 6 .....vliv nekulovitosti snímače ( $u_S$ )
- 7 .....vliv kalibrace doteku ( $u_D$ )
- 8 .....vliv nejistoty kalibrace teploměru vzduchu ( $u_{TC}$ )

#### 4.3.13 Závěrečná ustanovení

V závěrečném ustanovení se vymezí, pro koho je postup určen:

Tento pracovní postup je závazný pro všechny pracovníky příslušných laboratoří. Vedoucí každé laboratoře je povinen prokazatelně seznámit se zněním tohoto pracovního postupu všechny současné i nově nastupující pracovníky.

Tento pracovní postup musí být neustále k dispozici každému pracovníkovi laboratoří.



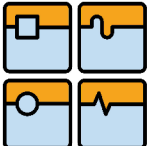
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Str. 56



## DIPLOMOVÁ PRÁCE



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 57
	<b>DIPLOMOVÁ PRÁCE</b>	

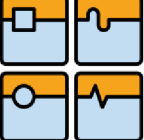
## ZÁVĚR

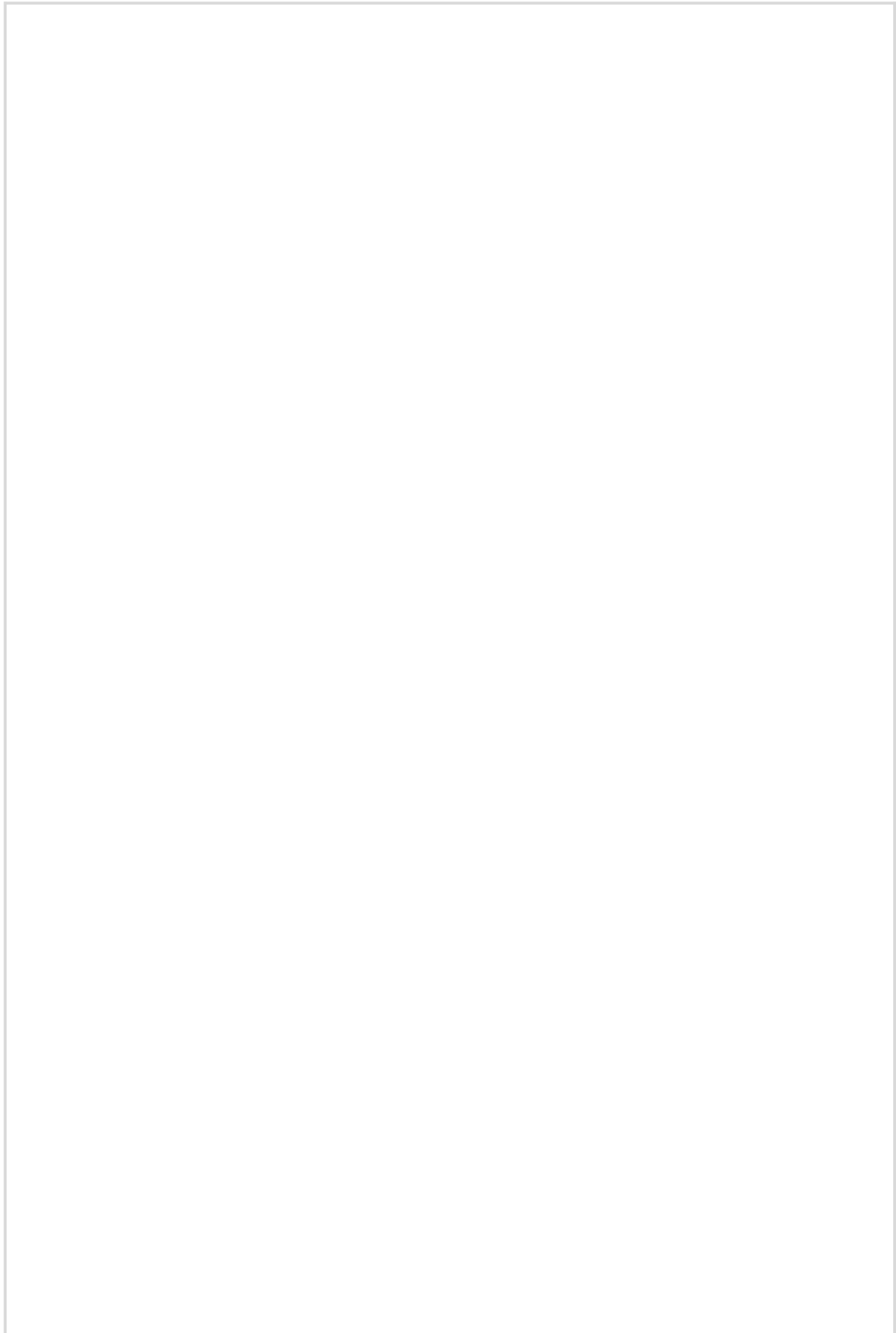
V současné době je běžné, že postupy pro odhad a stanovení nejistot měření jsou dokumentovány. Stále je ale třeba si uvědomit, že i přes řadu velmi dobře propracovaných dokumentů a dokonce i příkladů, kde je matematická teorie související s odhady a stanovováním bezesporně aplikována, existují oblasti měření a zkoušení, kde není možno tyto formálně správné a statisticky a metrologicky odůvodněné postupy pro stanovení nejistot jednoduše aplikovat. Pak je třeba vycházet z dlouhodobých zkušeností s příslušnými procesy měření, z archivovaných záznamů o měření, odborné literatury a dalších zdrojů informací a pokusit se o identifikaci všech složek nejistot měření tak, aby výsledky měření nebyly udávány s utopickými odhady nejistot měření.


A právě o odhad nejistoty měření se v této práci pokusil autor, kdy stanovil nejistotu měření při kalibracích prováděných na souřadnicovém měřicím stroji. V návaznosti na kvantifikaci nejistoty byl sestaven kalibrační postup tak, aby se zajistily podmínky správného a přesného měření. Dále byl vytvořen výpočtový modul usnadňující práci při provádění kalibrací a tvorbě kalibračního listu.

S velkou pravděpodobností se vytvořený výpočtový modul a kalibrační postup stanou vítaným pomocníkem v každodenní metrologické praxi při práci na pracovišti ČMI v Brně. Uspora času, tedy i finančních prostředků bude určitě kladně hodnocena, stejně jako možnost použití na ostatních oblastních inspektorátech.

Diplomová práce může sloužit jako cenný zdroj informací pro zájemce metrologie nebo také jako školicí materiál pro nové pracovníky v oddělení délky Českého metrologického institutu v Brně.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 58
	<b>DIPLOMOVÁ PRÁCE</b>	




	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 59
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Snímací technologie a nová sonda OMP400 společnosti Renishaw s tenzometrickou technologií v ultra kompaktním provedení. [online]. s. 4 [cit. 2012-01-06]. Dostupné z: [resources.renishaw.com](http://resources.renishaw.com)
- [2] Průvodce technologií souřadnicového měřicího stroje: Průvodce snímací technologií – srdce každého souřadnicového měřicího stroje. [online]. s. 24 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: [resources.renishaw.com](http://resources.renishaw.com)
- [3] Precision styli. [online]. Německo: Renishaw plc, 2008, s. 60 [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: [resources.renishaw.com](http://resources.renishaw.com)
- [4] NĚMEČEK, Pavel. Nejistoty měření. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008, 96 s. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [5] Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization. 1993, zapracovaný do CSN P ENV 13005 Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM) (01 4105);
- [6] EA 4/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of The Uncertainty of Measurement in Calibration
- [7] CSN EN ISO 17025. Všeobecné požadavky na činnost zkušebních a kalibračních laboratoří. Praha: Český normalizační institut, 2001
- [8] ČECH, J.; PERNIKÁŘ, J.; PODANÝ, K.: Strojírenská metrologie I, Strojírenská metrologie I, ISBN 978-80-214-4010-4, (2009), Akademické nakladatelství CERM, skripta
- [9] PALENČÁR, R. – VDOLEČEK, F. – HALAJ, M.: Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. Automa, 7, 2001, č. 12, s. 28-33.
- [10] PALENČÁR, R. – VDOLEČEK, F. – HALAJ, M.: Nejistoty v měření IV: nejistoty při kalibraci a ověřování. Automa, 8, 2002, č. 3, s. 41-47.
- [11] Metrologie v kostce III: Třetí upravené a doplněné vydání. Praha: ÚNMZ, 2009. 141 s. Dostupné z: [ww.cmi.cz](http://ww.cmi.cz)
- [12] Excel Complet Brochure: Excel measuring center. [online]. s. 2 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: [microvu.com](http://microvu.com)
- [13] ISO TS 23165-2006 Geometrical product specifications (GPS) - Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty
- [14] ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření při kalibraci 1 a 2 osých měřicích přístrojů. Metrologie. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, roč. 2011, č. 4, s. 5. ISSN 1210-3543.
- [15] VDOLEČEK, F.: Úvahy o možnostech zanedbávání dílčích zdrojů nejistot. In.: Sborník přednášek 27. Konference ČKS. Hodonín 22. – 23. 10. 2003. České kalibrační sdružení Hodonín 2003. s. 3 – 8.
- [16] Ludvík V. NEJISTOTY MĚŘENÍ, PŘESNOST MĚŘENÍ, SPRÁVNOST MĚŘENÍ A OTÁZKY SPOJENÉ SE VZÁJEMNOU POROVNATELNOSTÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A S PROHLÁŠENÍM O SHODĚ S TECHNICKÝMI SPECIFIKACEMI, Dostupné z: [www.unmz.cz](http://www.unmz.cz)



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 60
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

- [17] TNI 01 0115:2009 Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM).

## SEZNAM PŘÍLOH

- |              |  |
|--------------|--|
| Příloha č. 1 | Protokol o měření                                    |
| Příloha č. 2 | Kalibrační list souřadnicového měřicího stroje Excel |
| Příloha č. 3 | Kalibrační list teploměru vzduchu                    |
| Příloha č. 4 | Kalibrační list kalibrační koule                     |
| Příloha č. 5 | Návrh kalibračního metodického postupu v praxi       |
| Příloha č. 6 | CD s výpočtovým modulem                              |





**Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.**

**Pracoviště:** Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno  
Oddělení délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

## KALIBRAČNÍ LIST

### č. 6033-KL-F0226-12

**Datum vystavení** : 7.května 2012 List 1 z 9 listů

**Zákazník** : Český metrologický institut, OI Brno, odd.6033  
Okružní 31, 638 00 Brno

**Měřidlo** : Souřadnicový měřicí stroj EXCEL 4520

**Výrobce** : MicoVu

**Identifikační číslo** : EC 4520 1016

**Rozsah** : (600 x 600 x 300) mm

**Místo měření** : odd. 6033 - lab. č.21

**Etalon** :

Název	Identif. č.	Číslo KL
helio-neonový laser Renishaw XL80	10R987	8014-KL-L005-09
sada koncových měrek (0,5 ÷ 100) mm	Frank 1286	6033-KL-S0239-10
sada koncových měrek (125 ÷ 500) mm	CEJ26	6033-KL-P533-09
nástavný kroužek SIP 40 mm	42324	6033-KL-D0215-11

**Podmínky prostředí** : Teplota vzduchu (20,0 ± 0,3) °C

Výsledky kalibrace uvedené v tomto kalibračním listě byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě.

**Metoda měření** : Měření se uskutečnilo podle kalibračního postupu č. 633-MP-C006.

**Nejistota měření** :  
osa  $x$   $U = (0,6+2,7L)$   $\mu\text{m}$   $L$  je měřená délka v metrech  
osa  $y$   $U = (1,6+1,8L)$   $\mu\text{m}$   $L$  je měřená délka v metrech  
osa  $z$   $U = (0,8+1,6L)$   $\mu\text{m}$   $L$  je měřená délka v metrech

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

**Datum kalibrace** : 5.-7.5. 2012

**Kalibraci provedl:**

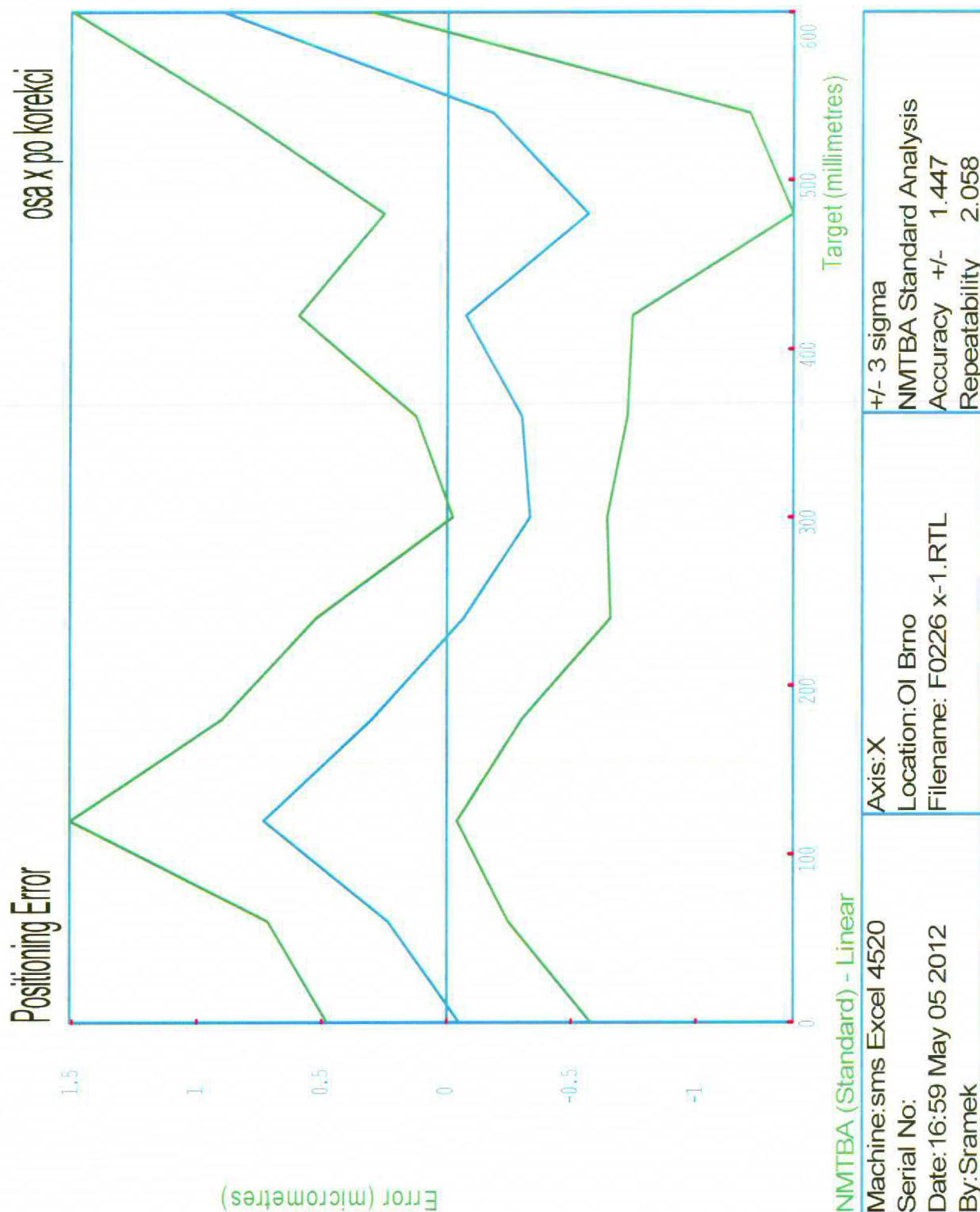
Ing. Jan Šrámek



**Vedoucí oddělení :**

Ing. Václav Duchoň

Výsledky měření osy x :



Pozn. :

Error - chyba (indikace) přístroje; údaj přístroje minus konvenčně pravá hodnota

modrá křivka - aritmetický průměr všech hodnot

zelené křivky - dvojnásobek směrodatné odchylky

Repeatability - opakovatelnost

Český metrologický institut  
 Oblastní inspektorát Brno  
 Okružní 31  
 638 00 Brno  
 -3-



## Výsledky měření osy x :

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM  
CAPTURED DATA TABLE

Machine:sms Excel 4520  
Date:16:59 May 05 2012  
Axis:X  
TITLE:osa x po korekci

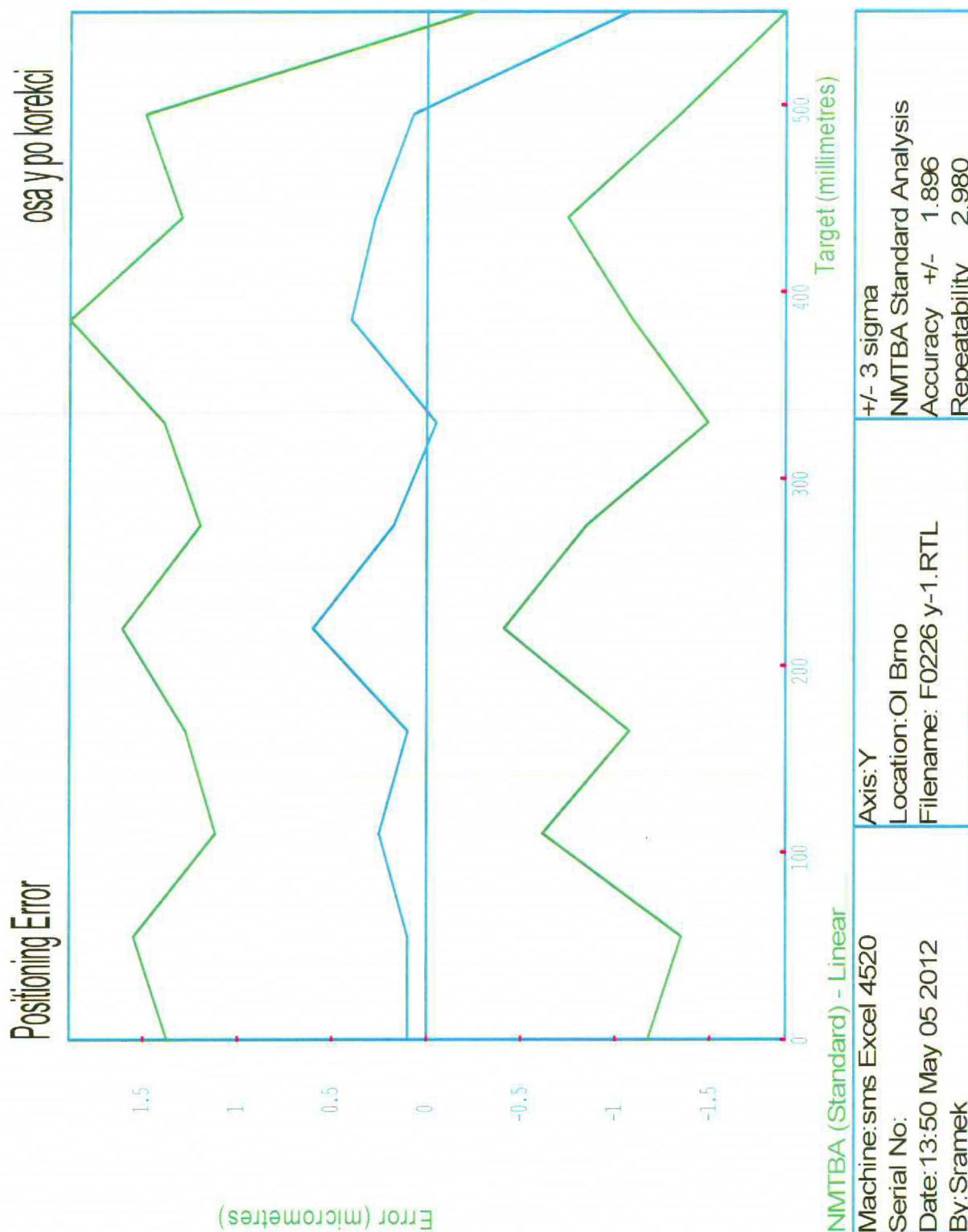
Serial No:  
By:Sramek  
Location:OI Brno  
Filename: F0226 x-1.RTL

Run	Dir	Target	Target value mm	Actual reading mm	Error µm
1	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
1	(+)	2	60.0000	60.0003	0.3000
1	(+)	3	120.0000	120.0005	0.5000
1	(+)	4	180.0000	180.0002	0.2000
1	(+)	5	240.0000	239.9999	-0.1000
1	(+)	6	300.0000	299.9997	-0.3000
1	(+)	7	360.0000	359.9997	-0.3000
1	(+)	8	420.0000	419.9998	-0.2000
1	(+)	9	480.0000	479.9994	-0.6000
1	(+)	10	540.0000	539.9995	-0.5000
1	(+)	11	600.0000	600.0008	0.8000
2	(-)	11	600.0000	600.0009	0.9000
2	(-)	10	540.0000	540.0002	0.2000
2	(-)	9	480.0000	479.9997	-0.3000
2	(-)	8	420.0000	420.0001	0.1000
2	(-)	7	360.0000	359.9999	-0.1000
2	(-)	6	300.0000	299.9998	-0.2000
2	(-)	5	240.0000	240.0002	0.2000
2	(-)	4	180.0000	180.0006	0.6000
2	(-)	3	120.0000	120.0008	0.8000
2	(-)	2	60.0000	60.0004	0.4000
2	(-)	1	0.0000	-0.0002	-0.2000
3	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
3	(+)	2	60.0000	60.0001	0.1000
3	(+)	3	120.0000	120.0004	0.4000
3	(+)	4	180.0000	180.0002	0.2000
3	(+)	5	240.0000	240.0000	0.0000
3	(+)	6	300.0000	299.9997	-0.3000
3	(+)	7	360.0000	359.9996	-0.4000
3	(+)	8	420.0000	419.9998	-0.2000
3	(+)	9	480.0000	479.9994	-0.6000
3	(+)	10	540.0000	539.9999	-0.1000
3	(+)	11	600.0000	600.0010	1.0000
4	(-)	11	600.0000	600.0012	1.2000
4	(-)	10	540.0000	539.9994	-0.6000
4	(-)	9	480.0000	479.9992	-0.8000
4	(-)	8	420.0000	420.0001	0.1000
4	(-)	7	360.0000	359.9997	-0.3000
4	(-)	6	300.0000	299.9996	-0.4000
4	(-)	5	240.0000	239.9999	-0.1000
4	(-)	4	180.0000	180.0005	0.5000
4	(-)	3	120.0000	120.0007	0.7000
4	(-)	2	60.0000	60.0000	0.0100
4	(-)	1	0.0000	-0.0003	-0.3000
5	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
5	(+)	2	60.0000	60.0004	0.4000
5	(+)	3	120.0000	120.0009	0.9000
5	(+)	4	180.0000	180.0001	0.1000
5	(+)	5	240.0000	239.9996	-0.4000
5	(+)	6	300.0000	299.9995	-0.5000
5	(+)	7	360.0000	359.9995	-0.5000

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Brno  
Okružní 31  
638 00 Brno  
-3-



## Výsledky měření osy y :



## Pozn. :

Error - chyba (indikace) přístroje; údaj přístroje minus konvenčně pravá hodnota

modrá křivka - aritmetický průměr všech hodnot

zelené křivky - dvojnásobek směrodatné odchylky

Repeatability - opakovatelnost

Český metrologický institut

Oblastní inspektorát Brno

Okružní 31

638 00 Brno

-3-

## Výsledky měření osy y :

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM  
CAPTURED DATA TABLE

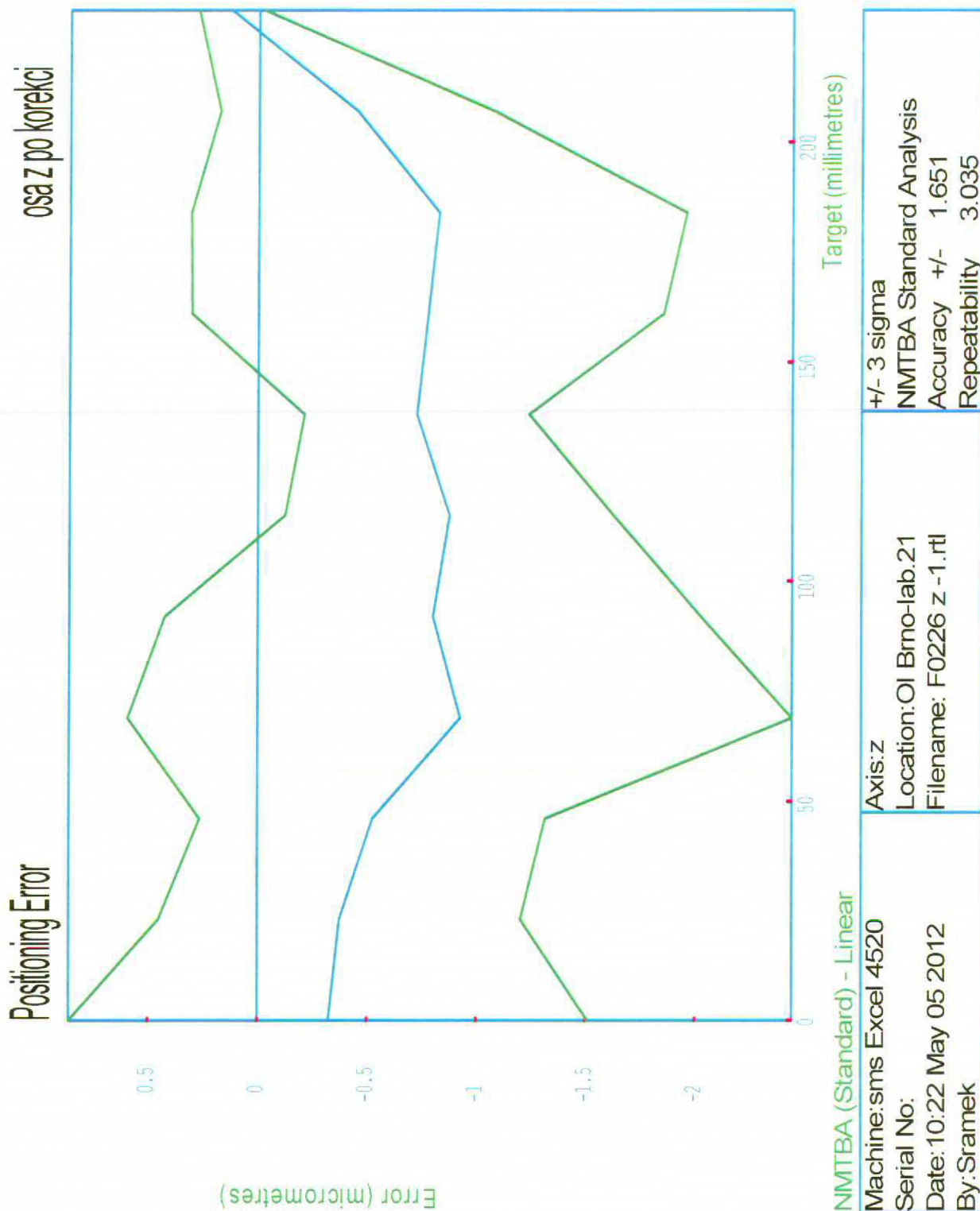
Machine:sms Excel 4520  
Date:13:50 May 05 2012  
Axis:Y  
TITLE:osa y po korekci

Serial No:  
By:Sramek  
Location:OI Brno  
Filename: F0226 y-1.RTL

Run	Dir	Target	Target value mm	Actual reading mm	Error µm
1	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
1	(+)	2	55.0000	55.0002	0.2000
1	(+)	3	110.0000	110.0000	0.0000
1	(+)	4	165.0000	165.0000	0.0000
1	(+)	5	220.0000	220.0007	0.7000
1	(+)	6	275.0000	275.0003	0.3000
1	(+)	7	330.0000	329.9999	-0.1000
1	(+)	8	385.0000	385.0008	0.8000
1	(+)	9	440.0000	440.0003	0.3000
1	(+)	10	495.0000	495.0004	0.4000
1	(+)	11	550.0000	549.9988	-1.2000
2	(-)	11	550.0000	549.9986	-1.4000
2	(-)	10	495.0000	494.9994	-0.6000
2	(-)	9	440.0000	439.9998	-0.2000
2	(-)	8	385.0000	384.9997	-0.3000
2	(-)	7	330.0000	329.9993	-0.7000
2	(-)	6	275.0000	274.9997	-0.3000
2	(-)	5	220.0000	220.0001	0.1000
2	(-)	4	165.0000	164.9996	-0.4000
2	(-)	3	110.0000	110.0000	0.0000
2	(-)	2	55.0000	54.9994	-0.6000
2	(-)	1	0.0000	-0.0003	-0.3000
3	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
3	(+)	2	55.0000	55.0003	0.3000
3	(+)	3	110.0000	110.0005	0.5000
3	(+)	4	165.0000	165.0003	0.3000
3	(+)	5	220.0000	220.0008	0.8000
3	(+)	6	275.0000	275.0002	0.2000
3	(+)	7	330.0000	330.0002	0.2000
3	(+)	8	385.0000	385.0004	0.4000
3	(+)	9	440.0000	440.0006	0.6000
3	(+)	10	495.0000	495.0004	0.4000
3	(+)	11	550.0000	549.9992	-0.8000
4	(-)	11	550.0000	549.9991	-0.9000
4	(-)	10	495.0000	495.0001	0.1000
4	(-)	9	440.0000	440.0004	0.4000
4	(-)	8	385.0000	385.0007	0.7000
4	(-)	7	330.0000	330.0004	0.4000
4	(-)	6	275.0000	275.0005	0.5000
4	(-)	5	220.0000	220.0008	0.8000
4	(-)	4	165.0000	165.0005	0.5000
4	(-)	3	110.0000	110.0005	0.5000
4	(-)	2	55.0000	55.0005	0.5000
4	(-)	1	0.0000	0.0007	0.7000

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Brno  
Okružní 31  
638 00 Brno  
-3-

Výsledky měření osy z :



## Pozn. :

Error - chyba (indikace) přístroje; údaj přístroje minus konvenčně pravá hodnota

modrá křivka - aritmetický průměr všech hodnot

zelené křivky - dvojnásobek směrodatné odchylky

Repeatability - opakovatelnost

Český metrologický institut

Oblastní inspektorát Brno

Okružní 31

638 00 Brno

2



## Výsledky měření osy z :

RENISHAW CALIBRATION INTERFEROMETER SYSTEM  
CAPTURED DATA TABLE

Machine:sms Excel 4520  
Date:10:22 May 05 2012  
Axis:z  
TITLE:osa z po korekci

Serial No:  
By:Sramek  
Location:OI Brno-lab.21  
Filename: F0226 z -1.rtl

Run	Dir	Target	Target value mm	Actual reading mm	Error µm
1	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
1	(+)	2	23.0000	22.9999	-0.1000
1	(+)	3	46.0000	45.9997	-0.3000
1	(+)	4	69.0000	68.9995	-0.5000
1	(+)	5	92.0000	91.9996	-0.4000
1	(+)	6	115.0000	114.9992	-0.8000
1	(+)	7	138.0000	137.9993	-0.7000
1	(+)	8	161.0000	160.9995	-0.5000
1	(+)	9	184.0000	183.9996	-0.4000
1	(+)	10	207.0000	206.9998	-0.2000
1	(+)	11	230.0000	230.0001	0.1000
2	(-)	11	230.0000	230.0001	0.1000
2	(-)	10	207.0000	206.9995	-0.5000
2	(-)	9	184.0000	183.9991	-0.9000
2	(-)	8	161.0000	160.9987	-1.3000
2	(-)	7	138.0000	137.9991	-0.9000
2	(-)	6	115.0000	114.9988	-1.2000
2	(-)	5	92.0000	91.9989	-1.1000
2	(-)	4	69.0000	68.9988	-1.2000
2	(-)	3	46.0000	45.9995	-0.5000
2	(-)	2	23.0000	22.9993	-0.7000
2	(-)	1	0.0000	-0.0005	-0.5000
3	(+)	1	0.0000	0.0000	0.0000
3	(+)	2	23.0000	22.9998	-0.2000
3	(+)	3	46.0000	45.9996	-0.4000
3	(+)	4	69.0000	68.9995	-0.5000
3	(+)	5	92.0000	91.9995	-0.5000
3	(+)	6	115.0000	114.9994	-0.6000
3	(+)	7	138.0000	137.9995	-0.5000
3	(+)	8	161.0000	160.9994	-0.6000
3	(+)	9	184.0000	183.9993	-0.7000
3	(+)	10	207.0000	206.9996	-0.4000
3	(+)	11	230.0000	230.0002	0.2000
4	(-)	11	230.0000	230.0001	0.1000
4	(-)	10	207.0000	206.9993	-0.7000
4	(-)	9	184.0000	183.9987	-1.3000
4	(-)	8	161.0000	160.9993	-0.7000
4	(-)	7	138.0000	137.9992	-0.8000
4	(-)	6	115.0000	114.9991	-0.9000
4	(-)	5	92.0000	91.9988	-1.2000
4	(-)	4	69.0000	68.9985	-1.5000
4	(-)	3	46.0000	45.9991	-0.9000
4	(-)	2	23.0000	22.9995	-0.5000
4	(-)	1	0.0000	-0.0008	-0.8000

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Brno  
Okružní 31  
638 00 Brno

-3-

## Výsledky kalibrace dotykové sondy :

**osa x :**

Jmenovitá hodnota konc. měrky [ mm ]	Naměřená chyba [ $\mu\text{m}$ ]	Nejistota měření $U$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	-0,2	0,5
50	-0,6	0,7
100	0,5	0,7
150	-0,7	1,0
200	-2,7	1,0
250	-1,5	1,4
300	-1,0	1,4
400	-0,8	1,8
500	-0,6	1,8

**osa y :**

Jmenovitá hodnota [ mm ]	Naměřená chyba [ $\mu\text{m}$ ]	Nejistota měření $U$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	-0,6	0,5
50	-0,2	0,7
100	0,5	0,7
150	1,0	1,0
200	2,7	1,0
250	-1,5	1,4
300	1,5	1,4
400	-1,7	1,8
500	-2,7	1,8

**osa z :**

Jmenovitá hodnota [ mm ]	Naměřená chyba [ $\mu\text{m}$ ]	Nejistota měření $U$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	-0,5	0,5
50	-0,8	0,8
100	-1,0	1,0
150	-1,5	1,5
200	-2,5	2,2
250	-3,0	2,7
300	-4,0	3,3

Výsledky kalibrace dotykové sondy :

**Měření koncové měrky 500,000 mm**

Uhlopříčka yx - naměřené hodnoty:

499,9958 mm	Nejistota $U = 2,5 \mu\text{m}$
499,9968 mm	
499,9962 mm	

Uhlopříčka xy - naměřené hodnoty:

499,9948 mm	Nejistota $U = 2,5 \mu\text{m}$
499,9948 mm	
499,9960 mm	

**Měření kroužku SIP 40,000 mm**

Průměr	Kruhovitost	Nejistota $U$
40,0101	0,0027 mm	5,0 $\mu\text{m}$
40,0108	0,0030 mm	
40,0150	0,0015 mm	

Pozn.: Kalibrace pomocí kroužku a koncových měrek je mimo rámec akreditace

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Brno  
Okružní 31  
638 00 Brno  
-3-

Konec kalibračního listu.



**Český metrologický institut**

Okružní 31, 638 00 Brno



K 2202

tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.emi.cz

**Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.****Pracoviště:** Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno  
Oddělení teploty a vlhkosti, tel. +420 545 555 314, fax. +420 545 555 183

## KALIBRAČNÍ LIST

**6036-KL-E217-09****Datum vystavení:** 19. června 2009

List 1 ze 2 listů

**Zákazník:** ČMI OI Brno, odd. 6033  
Okružní 31  
638 00 Brno**Uživatel:** -**Měřidlo:** Digitální elektronický teploměr**Výrobce:** Testo, Německo**Typ:** Saveris PtE**Výrobní číslo:** 01551334**Evid. číslo:** -**Popis:** Rozlišovací schopnost 0,01 °C  
Sonda prostorová, výrobce Testo, typ 0609 1773, ozn. 1334/1

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

**Datum kalibrace:** 19. června 2009**Kalibraci provedl(a):****Vedoucí oddělení:**

Petr Mihula



Ing. Jan Otych

**Použité etalony:** El. teploměr jako součást kalibrační pícky Venus 2140S, v.č. 221151/1, kalibrováno ČMI OI Brno, kalibrační list č. 6036-KL-E106-07  
Odporový snímač teploty ASL, v.č. 421718, kalibrováno ČMI OI Brno, kalibrační list č. 6036-KL-O015-07  
Odporový most ASL F250 MKII, v.č. 7953 022 2075, kalibrováno ČMI OI Brno, kalibrační list č. 6011-KL-J405-07

**Kalibrační postup:** 133-MP-C004-08

**Podmínky prostředí:** Teplota:  $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$

**Podmínky kalibrace:** Měřidlo bylo kalibrováno dle interního kalibračního postupu při ponoru 100 mm na etalonázním zařízení ČMI OI Brno. Během kalibrace bylo měřidlo napájeno z adaptéru.

**Výsledky kalibrace:**

Údaj etalonu $t_{90}$ $^\circ\text{C}$	Údaj měřidla $t_m$ $^\circ\text{C}$	Nejistota $U$ $^\circ\text{C}$
20,00	20,09	0,10

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

Konec kalibračního listu.

**Český metrologický institut**  
Oblastní inspektorát Brno  
Okružní 31  
638 00 Brno

-4-





Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.

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

Oddělení délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

## KALIBRAČNÍ LIST

### č. 6033-KL-F0225-12

Datum vystavení : 5.května 2012

list č.1 ze 2 listů

Zákazník : ČMI OI Brno  
Okružní 31, 638 00 Brno

Měřidlo : Kalibrační koule a válec (příslušenství SMS Excel 4520)

Výrobce : neuveden

Identifikační číslo : 243

Rozsah : koule: 20 mm; válec: 12 mm

Etalon :

Název	Identif. č.	Číslo KL
Délkoměr SIP 1002M	1103	6033-KL-D140-09
Talyronď 3	LE 3867	6033-KL-D0301-10

Podmínky prostředí : Teplota vzduchu (20,0 ± 0,3) °C

Metoda měření : Měření se uskutečnilo podle kalibračního postupu č. 633-MP-C103 a 633-MP-C029.

Nejistota měření : průměr:  $U = (0,5 + 5L) \mu\text{m}$ ,  $L$  je měřený rozměr v metrech  
kruhovitost:  $U = (0,1 + 0,01R) \mu\text{m}$ ,  $R$  je naměřená kruhovitosť v  $\mu\text{m}$

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

Naměřený průměr v rovníku koule: 20,000 6 mm

Naměřená kruhovitosť v rovníku koule: 0,19  $\mu\text{m}$

Naměřený průměr válce: 11,999 7 mm

Výsledky kalibrace uvedené v tomto kalibračním listě byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě.

Datum kalibrace : 5.5. 2012

Kalibraci provedli:

Jan Hloušek ; Ing. Jan Šrámek

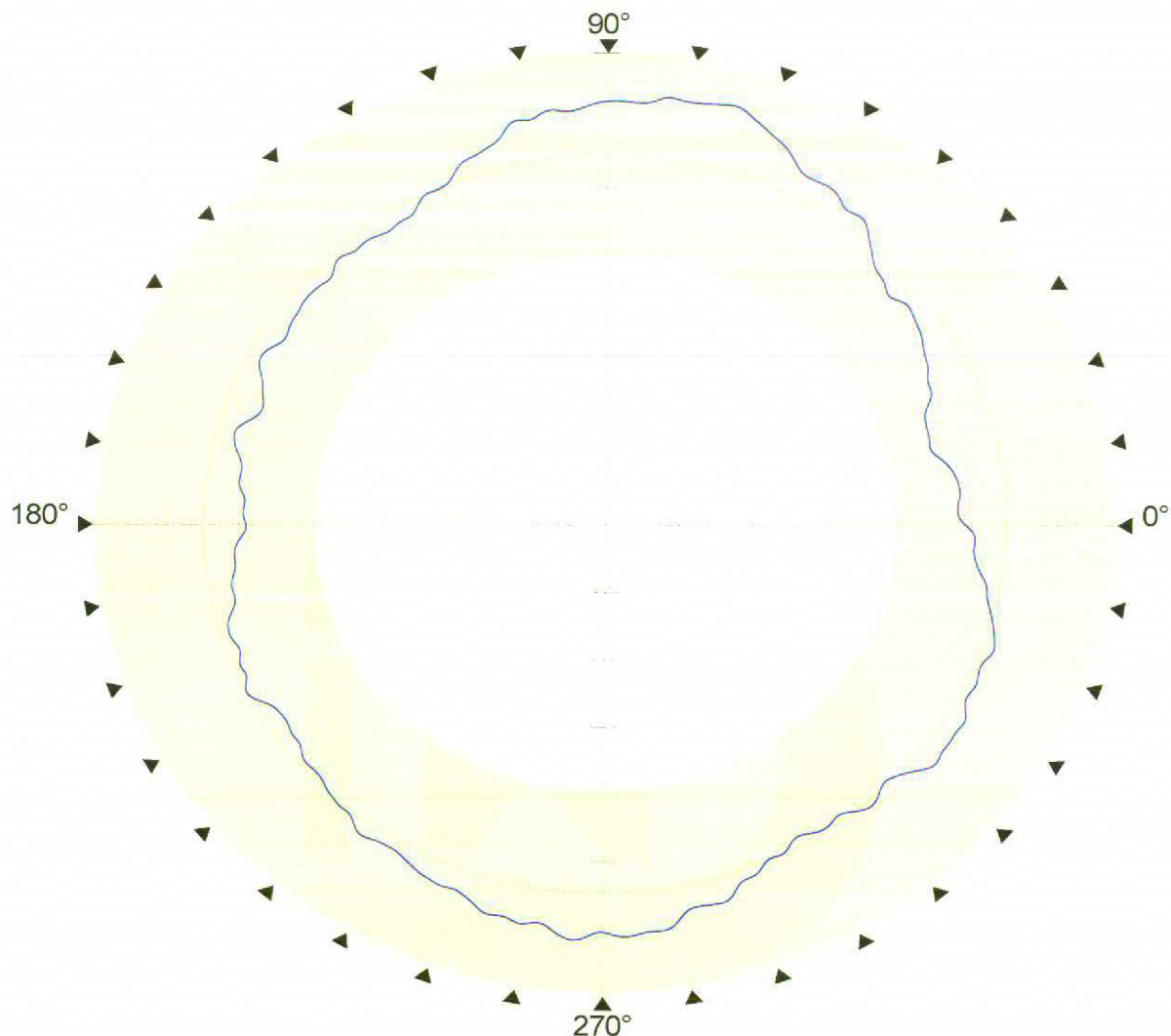


Vedoucí oddělení:

Ing. Václav Duchoň

## Výsledky měření:

## Graf kruhovitosti

Stupnice 0,1 $\mu$ m/díl.

ČMI OI Brno

Název

CMI brno koule 20 243

RONt (kruhovitost)

0,19 $\mu$ m

Typ reference

LS kružnice

Typ filtru

Gauss

Rozsah filtru

1 - 50 v/o

Český metrologický institut

Oblastní inspektorát Brno

Okružní 31

638 00 Brno

-3-

Konec kalibračního listu.

*Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.*