

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715P270003 – Strojírenství
Studijní specializace: Zabezpečování kvality

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv volby snímacího senzoru na přesnost měření při měření ve
větších hloubkách**

Autor: Martin HAURA
Vedoucí práce: Ing. Nikola SKŘIVANOVÁ

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin HAURA**
Osobní číslo: **S20B0336P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Analýza vlivu volby snímacího senzoru na přesnost měření při měření ve větších hloubkách**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

- Úvod
- Analýza současného stavu
- Experimentální část
- Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Terminologie z oblasti metrologie (2. vydání).
- Measurement Good Practise Guide No. 41
- TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2013.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Nikola Skřivanová**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval zejména vedoucí této práce **Ing. Nikole Skřivanové** za velmi vstřícný přístup ohledně konzultací a za pomoc s řešením otázek vzniklých při psaní této práce.

Dále bych poděkoval všem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na přípravě a realizaci experimentu uvedeném v této práci, konkrétně pak **Ing. Daně Kubátové, PhD.** za obsluhu souřadnicového měřicího přístroje a **Ing. Janu Kutlwašerovi, Ph.D.** za přípravu referenčních dat a obsluhu vysoce přesného kruhoměru.

Díky patří také **Ing. Dušanu Cibulkovi** za velmi cenný pohled z praxe a věcné připomínky k práci.

V neposlední řadě děkuji rodině a všem mým blízkým za stálou podporu v mém studiu na FST.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Haura	Jméno Martin	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Skřivanová	Jméno Nikola	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Analýza vlivu volby snímacího senzoru na přesnost měření při měření ve větších hloubkách		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	110	TEXTOVÁ ČÁST	45	GRAFICKÁ ČÁST	61
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zabývá problematikou měření s pomocí souřadnicových měřicích přístrojů, konkrétně nepřesností a chyb spojených s kontaktním měřením ve větších hloubkách, kdy může vznikat chyba zapříčiněná např. miniaturní pružnou deformací snímacích senzorů nebo vlivem příliš velkého kontaktního tělesa na konci snímacího senzoru. Tyto faktory pak mohou nepříznivě ovlivnit výsledek měřicího procesu.</p> <p>Práce hledá optimální volbu snímacího senzoru pro danou aplikaci a na základě výstupů její experimentální části navrhuje další možné postupy.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Snímací senzor, deformace, strategie měření, nejistota, odchylka, geometrie, CMM</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Haura	Name Martin	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Skřivanová	Name Nikola	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Analysis of the influence of the choice of sensing sensor on measurement accuracy when measuring at greater depths		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	110	TEXT PART	45	GRAPHICAL PART	61
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The bachelor's thesis deals with the issue of measurement using coordinate measuring machines, specifically inaccuracies and errors associated with contact measurement at greater depths, when an error may arise caused by, for example, miniature flexible deformation of sensing sensors or the effect of an excessively large contact body at the tip of the sensing sensor. These factors can then adversely affect the result of the measurement process.</p> <p>The thesis looks for the optimal choice of sensing sensor for the given application and, based on the outputs of its experimental part, suggests other possible procedures.</p>
KEY WORDS	Sensing sensor, deformation, measurement strategy, uncertainty, deviation, geometry, CMM

Obsah

Prohlášení o autorství	4
Poděkování	5
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek.....	11
1 Úvod.....	12
2 Cíle práce.....	13
3 Analýza současného stavu.....	13
3.1 Souřadnicový měřicí přístroj - CMM.....	14
3.1.1 Historie CMM na časové ose	15
3.1.2 Typy CMM dle konstrukce.....	16
3.2 Snímací senzor	17
3.2.1 Typy snímacích senzorů dle konstrukce.....	17
3.2.2 Stručný popis používaných materiálů kuličky	19
3.2.3 Stručný popis používaných materiálů dřívku	20
3.3 Vlivy snímacího senzoru na proces měření.....	21
3.3.1 Vliv materiálů kuličky snímacího senzoru na proces měření.....	22
3.3.2 Vliv velikosti kuličky snímacího senzoru na proces měření.....	23
3.3.3 Vliv teplotní stability dřívku na proces měření	23
3.3.4 Vliv tuhosti snímacího senzoru na proces měření.....	25
4 Experimentální část	29
4.1 Příprava experimentu	29
4.1.1 Souřadnicový měřicí přístroj využitý pro experiment.....	29
4.1.2 Kruhoměr využitý pro experiment	31
4.1.3 Měřené referenční součásti.....	32
4.1.4 Soubor snímacích senzorů pro účely experimentu.....	33
4.2 Podmínky experimentu	34
4.3 Průběh experimentu.....	34
4.4 Výsledky experimentu.....	42
4.4.1 Referenční součást s otvorem Ø 6,5 mm.....	42
4.4.2 Referenční součást s otvorem Ø 10,5 mm.....	45
4.5 Celkové zhodnocení výsledků experimentu.....	48
5 Závěr.....	49
6 Příloha	51

Přehled použitých zkratk a symbolů

CMM	Coordinate measuring machine
RTI	Regionální technologický institut
EWL	Effective working length

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma záznamu souřadnice bodu v prostoru pomocí CMM	13
Obr. 2: Stručný popis částí CMM [2]	14
Obr. 3: Stojanový typ CMM [4]	16
Obr. 4: Výložníkový typ CMM [4]	16
Obr. 5: Portálový typ CMM [4]	16
Obr. 6: Mostový typ CMM [4]	16
Obr. 7: Přímé snímací senzory [5]	17
Obr. 8: Hvězdicový snímací senzor [6]	17
Obr. 9: Diskový snímací senzor [6]	17
Obr. 10: Válcový snímací senzor [6]	18
Obr. 11: Snímací senzor s keramickou polokoulí [6]	18
Obr. 12: Kulička ze syntetického rubínu [7]	19
Obr. 13: Kulička z keramiky [7]	19
Obr. 14: Kulička z nitridu křemíku [7]	19
Obr. 15: Kulička z karbidu wolframu [7]	19
Obr. 16: Kulička s diamantovým povlakem [7]	20
Obr. 17: Kulička z diamantu [7]	20
Obr. 18: Ocelový dřík [6]	20
Obr. 19: Dřík z karbidu wolframu [6]	20
Obr. 20: Keramický dřík [6]	20
Obr. 21: Dřík ze slitiny hliníku [6]	20
Obr. 22: Dřík z uhlíkových vláken [6]	21
Obr. 23: Titanový dřík [6]	21
Obr. 24: Abraze kuličky [7]	22
Obr. 25: Nárůstek materiálu na kuličce [7]	22
Obr. 26: Velký průměr kuličky jako filtr hrubých chyb [5]	23
Obr. 27: Standartní trojúhelníkové uspořádání kinematicky odporové sondy [10]	25
Obr. 28: Pre-travel [11]	25
Obr. 29: Diagram závislosti odchylky pre-travel na nájezdovém úhlu [10]	26
Obr. 30: Rovnováha momentů na snímacím senzoru [10]	27
Obr. 31: Carl Zeiss PRISMO 7 navigator	30
Obr. 32: Přesný kruhoměr Talyrond 585 Lt	31
Obr. 33: Detail snímacího senzoru kruhoměru	31
Obr. 34: Referenční součást s otvorem Ø 6,5 mm	32

Obr. 35: Referenční součást s otvorem \varnothing 10,5 mm	32
Obr. 36 Soubor snímacích senzorů pro účely experimentu.....	33
Obr. 37: Kalibrace jednoho ze snímacích senzorů pomocí keramické kalibrační koule.....	35
Obr. 38: Nastavení procesu kalibrace.....	36
Obr. 39: Výsledek kalibrace - kulička \varnothing 1 mm	37
Obr. 40: Výsledek kalibrace - kulička \varnothing 1,5 mm	37
Obr. 41: Výsledek kalibrace - kulička \varnothing 2 mm	37
Obr. 42: Výsledek kalibrace - kulička \varnothing 3 mm	37
Obr. 43: Ustavení referenční součásti ve sklíčidle	38
Obr. 44: Ukázka měření v maximální programované hloubce vrtaného otvoru	39
Obr. 45: Ukázka měření největším (nejtužším) snímacím senzorem z vybraného souboru	40
Obr. 46: Měření druhé referenční součásti s vrtaným otvorem \varnothing 10,5 mm.....	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Parametry pro diagram pre-travel [10].....	26
Tab. 2: Moduly pružnosti materiálů dřívku [7]	28
Tab. 3: Přesnost CMM Carl Zeiss PRISMO 7 navigator [13].....	29
Tab. 4: Teplotní podmínky experimentálního měření	34
Tab. 5: Výsledky z kruhoměru (referenční hodnoty pro otvor \varnothing 6,5 mm)	42
Tab. 6: Výsledky měření otvoru \varnothing 6,5 mm na CMM	42
Tab. 7: Výsledky z kruhoměru (referenční hodnoty pro otvor \varnothing 10,5 mm)	45
Tab. 8: Výsledky měření otvoru \varnothing 10,5 mm na CMM	45

Seznam grafů

Graf 1: Hustota a teplotní roztažnost rozdílných materiálů dřívku snímacího senzoru [5]	24
Graf 2: Zobrazení rozdílu v naměřené kruhovitosti mezi referenčním měřením na kruhoměru a měřením jednotlivými snímacími senzory (pro součást s otvorem \varnothing 6,5 mm)	43
Graf 3: Rozdíl válcovitosti pro součást s otvorem \varnothing 6,5 mm	44
Graf 4: Zobrazení rozdílu v naměřené kruhovitosti mezi referenčním měřením na kruhoměru a měřením jednotlivými snímacími senzory (pro součást s otvorem \varnothing 10,5 mm)	46
Graf 5: Rozdíl válcovitosti pro součást s otvorem \varnothing 10,5 mm	47

1 Úvod

Požadavky na přesnost strojírenské výroby se stále zvyšují, a to nejen v kusové či malosériové výrobě. Lze zmínit letecký, kosmický, zdravotnický průmysl či (pro střední Evropu stále významný) průmysl automobilový. Všechna tato odvětví jsou v dnešní době producentem vysoce přesných výrobků. Tato přesnost je vyžadována principiálně z důvodu bezpečnosti koncových uživatelů.

Z toho si lze snadno odvodit, že je více než kdy dříve potřeba využívat vysoce přesných a efektivních strojů i metod.

Vysoká přesnost výroby je zároveň (ve většině případů) spojena s vyšší jakostí výrobků. Rozměrová a geometrická přesnost se promítá nejen do spolehlivosti, ale také může zlepšovat nebo přímo umožňovat některé funkce výrobku, prodlužovat jeho životnost a případně i zlepšovat estetické vlastnosti.

Pokud dnešní technologie umožňují velmi přesnou výrobu, je třeba také tuto přesnost ověřovat a případně dokládat zákazníkovi. V dnešní době probíhá kontrola přesných součástí nejčastěji na tzv. souřadnicovém měřicím přístroji, avšak komplexita těchto přístrojů je něčím, s čím je nutno pracovat a jejich vysoká přesnost je podmíněna mnoha vnějšími vlivy, jakými jsou kvalifikace obsluhy, metodika měření, použité příslušenství, technika prostředí apod.

Jednou z limitací těchto přístrojů může být specifická geometrie měřené součásti. Jinak řečeno komplikace mohou nastat tehdy, když měřicí prvek souřadnicového měřicího přístroje (tzv. snímací senzor) nemá dostatečné (nebo má ale nevhodně orientované) množství prostoru pro kontaktní měření, kdy je třeba zajistit mechanický kontakt mezi snímacím senzorem a měřenou součástí. Jeden z problémů z této oblasti je řešen právě v této práci.

První část práce obsahuje úvodní seznámení s tím, co to je souřadnicový měřicí přístroj a snímací senzor. Dále reflektuje současné pohledy na obecné problémy měření se zaměřením na vliv dvou hlavních částí snímacího senzoru – kuličky a dřívku.

Druhá část je věnována experimentálnímu měření. Nejprve je detailněji popsána jeho příprava, podmínky a veškeré pomůcky, včetně přístrojů využitých pro experiment. Následně je představen průběh a výsledky experimentu.

Závěrečná část shrnuje výsledky experimentální části. Popisuje možné problémy interpretace dat a pokouší se vybrat ze souboru testovaných snímacích senzorů ty, které se jeví jako vhodné pro dané podmínky. Současně upozorňuje na ty snímací senzory, které mohou vykazovat vyšší nepřesnost. Nakonec je zmíněn potenciál použití experimentu jako vhodného vstupu a základu pro další, komplexnější experimentální činnost např. v případné navazující kvalifikační práci.

2 Cíle práce

Tématem práce je v rámci experimentu porovnat odlišné konvenčně používané snímací senzory s vyšší efektivní pracovní délkou (EWL) vázanou na průměr koncového kontaktního tělesa (kuličky).

Práce bude sledovat měření s pomocí různě „robustních“ snímacích senzorů a vyhodnocovat vliv jejich konstrukce na výslednou přesnost.

Jedním z konkrétních cílů bude porovnat, zda větší chybu do procesu měření přináší elastická deformace snímacího senzoru (při použití doporučené velikosti kuličky snímacího senzoru pro danou velikost otvoru), nebo případný nevhodný kontakt kuličky se součástí (při použití většího průměru kuličky, než je doporučená pro daný otvor).

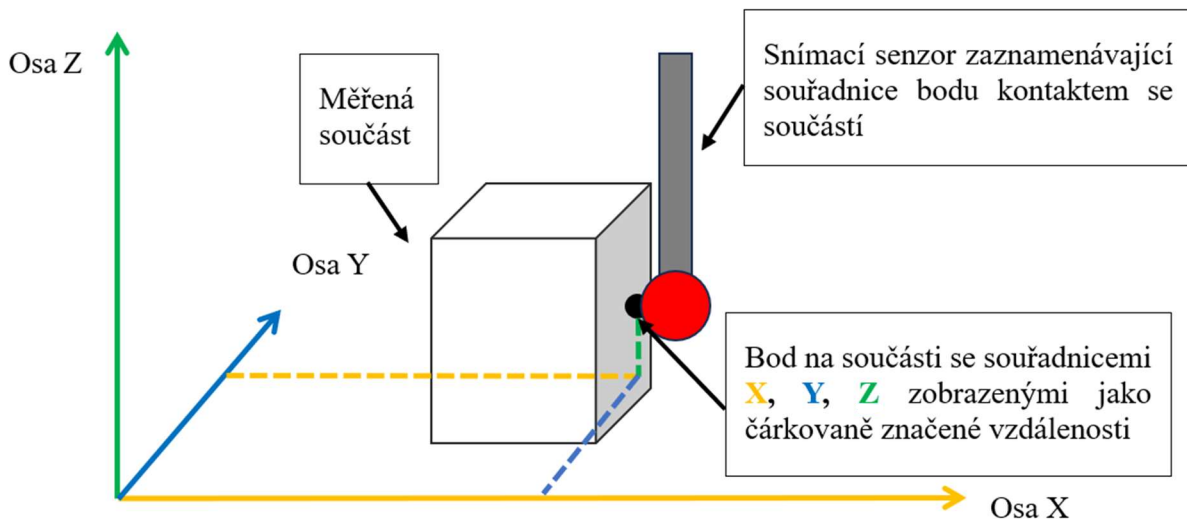
3 Analýza současného stavu

Na úvod této kapitoly je třeba se seznámit s **obecným principem měření na souřadnicovém měřicím přístroji**, často zkráceně nazývaném CMM (z anglického Coordinate Measuring Machine). Samotný souřadnicový měřicí přístroj a jeho historický vývoj pak bude popsán v další části, tak aby byly snáze pochopitelné některé další souvislosti.

Současně (jak bylo naznačeno v úvodu) se celá práce omezuje na **kontaktní měření na CMM**. V průmyslové metrologii se lze setkat i s bezkontaktním měřením pomocí optických 3D scanů. Avšak při opakovaných pokusech nahradit ve strojírenské praxi kontaktní měření optickým 3D scanem bylo dosaženo uspokojivých výsledků pouze u kontroly tvarových ploch. [1]

Z nejobecnější definice bodu v prostoru lze psát:

Poloha jednoho bodu v trojrozměrném prostoru je pevně dána právě třemi souřadnicemi. Pro Kartézský souřadnicový systém jsou to souřadnice X, Y a Z.

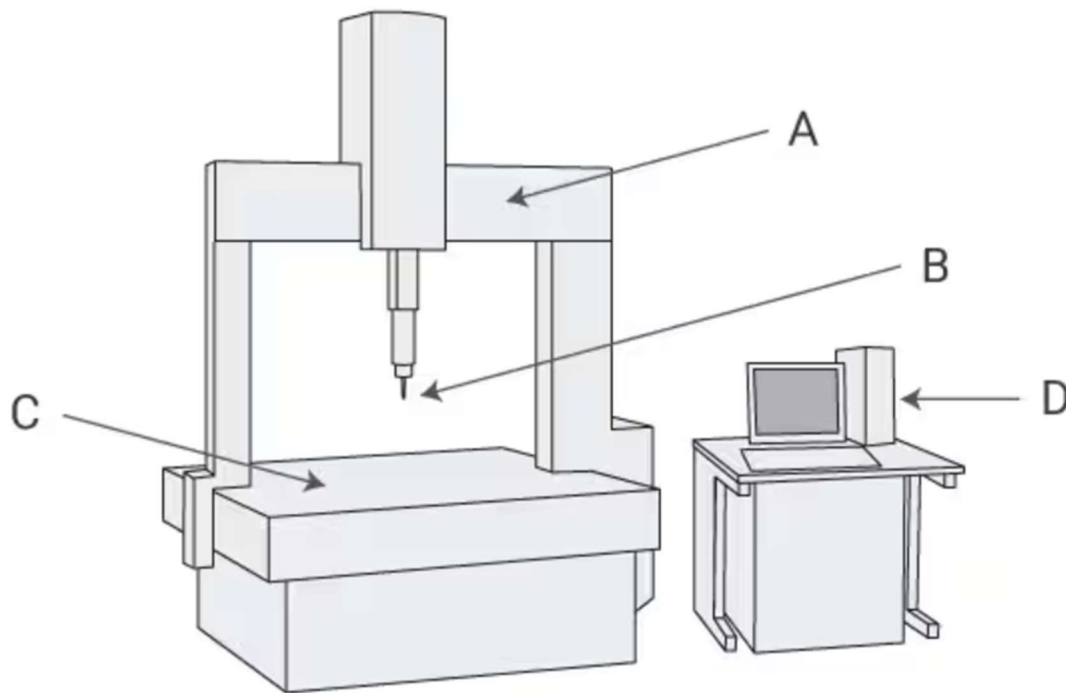


Obr. 1: Schéma záznamu souřadnice bodu v prostoru pomocí CMM

Souřadnicový měřicí přístroj dokáže tyto 3 souřadnice zaznamenat a nadefinovat tak body povrchu měřené součásti (viz. Obr. 1).

Záznam bodu přístrojem probíhá za pomoci tzv. **snímacího senzoru** pohybujícího se ve třech osách (souřadnicích) X, Y a Z. **Snímací senzor je zakončený kontaktním tělesem** (nejčastěji kuličkou) z vysoce stabilního a tvrdého materiálu (např. syntetického rubínu). Dotek kuličky o měřený prvek zaznamená tzv. snímací hlava a software přístroje zapíše hodnoty X, Y a Z daného bodu, ve kterém došlo ke kontaktu s měřeným prvkem. Větším počtem zaznamenaných bodů se pak definují prvky geometrie měřených součástí.

3.1 Souřadnicový měřicí přístroj - CMM



Obr. 2: Stručný popis částí CMM [2]

A – Pohyblivá mostová konstrukce

Zajišťuje pohyb snímacího senzoru ve směru osy Y. Od této části přístroje je požadována vysoká tuhost její konstrukce. Pohyb mostu je obvykle realizován vedením se vzduchovými ložisky.

B – Snímací senzor

Část přístroje zajišťující kontakt mezi měřenou součástí a soustavou přístroje. Snímací senzor svým dotykem se součástí aktivuje mechanismus v snímací hlavě, na které je upnut a snímací hlava pak vyšle signál pro zápis souřadnice.

C – Pracovní stůl (obvykle granitová deska)

Extrémně tuhá, rozměrově stálá a oteřuvzdorná deska sloužící ke stabilnímu umístění měřené součásti v pracovním prostoru přístroje.

D – Počítač s odpovídajícím softwarem pro zpracování dat

Počítač sbírá a případně rovnou statisticky zpracovává naměřená data. Software pro měření může současně kompenzovat odchylky způsobené systematickými chybami, jako je vliv okolní teploty, vlhkosti apod.

3.1.1 Historie CMM na časové ose

- 60. léta - První tříosý přístroj typu CMM spatřil světlo světa. Kdo jako první tento přístroj představil není známo, jelikož o prvenství se prou dvě firmy – DEA z Itálie a Ferrati ze Skotska.
- 1972 - Firma Zeiss představila svou první sondu. Sir David McMurtry z Rolls Royce Group (pozdější zakladatel společnosti Renishaw) vynalezl kinematickou odporovou sondu, která umožňovala přejetí po automatické detekci kontaktu. Tato technologie následně umožnila motorům Olympus letadel Concorde splnit specifické požadavky.
- 1973 - Zeiss představil svou 3D měřicí sondu. Tato sonda se skládala ze tří naskládaných os, z nichž každá je vybavena akčním členem pro vytváření snímací síly a indukčním senzorem pro měření dráhy.
- Poté, pod vedením McMurtryho, výrobce Renishaw dále pokročil v technologii CMM vyvinutím motorizované sondy.
- 1974 – Německá firma Wild Leitz G.m.b.H. vyrobila vůbec první počítačem řízený CMM.
- 80. léta – Pokrok pokračuje zejména v oblasti softwaru přístrojů. Společnost Metromec (nyní patřící společnosti Wenzel, hlavnímu světovému producentu CMM softwaru) přinesla uživatelsky přívětivé prostředí CMM.
- 1985 – První bezkontaktní snímací senzor.
- 1986 – První „Laser Tracker“. Zařízení pro vysoce přesné měření velkých rozměrů v řádech desítek metrů.
- 90. léta – Firma Wilcox Associates, Inc. vyvíjí software PC-DMIS. Ten se stává nejpopulárnějším softwarem pro CMM.
- Přelom tisíciletí – Vznik přenosných optických CMM. Vzniká nová úroveň přenositelnosti CMM.
- Současnost – Rozmach metod 3D skenování namísto sběru několika kontaktních bodů. Podobně pak bezkontaktní skenování. Důraz na časovou efektivitu a automatizaci. Neustálý vývoj používaných softwarů a zlepšování jejich uživatelské přívětivosti.

[3]

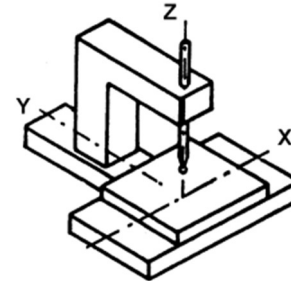
3.1.2 Typy CMM dle konstrukce

Historickým vývojem se vytvořilo několik typických konstrukcí CMM, které jsou v současnosti využívány v průmyslové praxi.

Důvodem rozdílnosti konstrukcí je zejména velikost pracovního prostoru a schopnost měřit různě velké součásti.

- **Stojanový CMM**

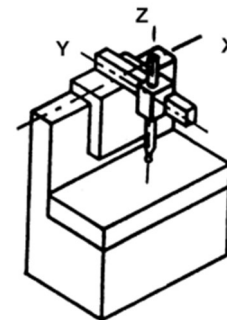
Tento typ je vhodný pro měření malých součástí. Prostorová náročnost tohoto přístroje je menší, a tak je obvykle používán v laboratořích. Při dobré přístupnosti měřeného objektu lze dosáhnout vysokých přesností. Bývá vybaven dělicím stolem, což umožňuje měření v polárních (válcových) souřadnicích. [4]



Obr. 3: Stojanový typ CMM [4]

- **Výložníkový CMM**

Hlavní výhodou je velmi dobrá přístupnost obsluhy k měřenému objektu. Naproti tomu konstrukční řešení osy Y neumožňuje (z hlediska její tuhosti) velký rozsah pohybu. Je vhodný pro měření dlouhých součástí. [4]



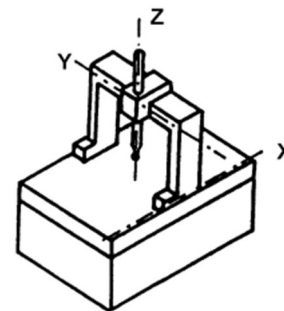
Obr. 4: Výložníkový typ CMM [4]

- **Portálový CMM**

Používá se pro měření středně velkých a velkých součástí. Vyznačuje se dobrou tuhostí, což zajišťuje relativně vysokou přesnost. Konstrukce portálu omezuje snadnou přístupnost k měřenému objektu.

Vyrábí se ve dvou variantách:

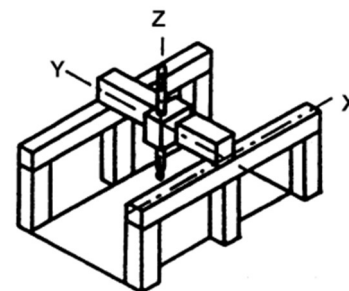
1. *s pevným portálem* (tužší konstrukce – nutný pohyblivý stůl)
 2. *s pohyblivým portálem*
- [4]



Obr. 5: Portálový typ CMM [4]

- **Mostový CMM**

Konstrukce pro největší rozsahy měření (např. v ose X až 24 m). Tuhost konstrukce je zaručena mohutně dimenzovanými nosníky a sloupy. Přístupnost k měřenému objektu je dobrá, přesnost měření je nižší (z důvodu velkého rozsahu pohybu jednotlivých členů). [4]



Obr. 6: Mostový typ CMM [4]

Experimenty této práce budou prováděny na **portálovém typu** přístroje s **pohyblivým portálem**. Tento SMS bude blíže specifikován v kapitole „Experimentální část“.

3.2 Snímací senzor

3.2.1 Typy snímacích senzorů dle konstrukce

Stejně jako neexistuje plně univerzální konstrukce CMM, tak neexistuje ani jeden typ snímacího senzoru, který by dokázal pokrýt veškeré možné aplikace v metrologii.

Hlavním důvodem je potřeba zajistit vhodný a stabilní kontakt mezi součástí a snímacím senzorem (ideálně bodový). Možnosti, jak toho docílit se však mohou pro různě složité součásti velmi lišit.

Jedním z typických příkladů může být měření přesných a úzkých drážek v povrchu součásti, kde nelze, vzhledem k rozdílné geometrii součásti a snímacího senzoru, dosáhnout kontaktu kuličky a dna drážky. Zde se s výhodou využívají snímací senzory s diskovým zakončením (viz. Obr. 9).



Obr 7: Přímé snímací senzory [5]

- **Přímý snímací senzor**

Přímý snímací senzor (viz. Obr. 7) je nejjednodušší a nejběžnější typ. K dispozici jsou jak stupňovité, tak kuželové dřívky případně dřívky s kónickou stopkou, které nabízejí lepší stabilitu. [5]

- **Hvězdicový snímací senzor**

Ve své podstatě se jedná o více přímých snímacích senzorů spojených dohromady a orientovaných v rozdílných směrech. Toto uspořádání umožňuje vyšší flexibilitu a může ušetřit častou výměnu snímacího senzoru (viz. Obr. 8).

Jejich konstrukce může být omezující v hůře přístupných místech měřených součástí.



Obr. 8: Hvězdicový snímací senzor [6]

- **Diskový snímací senzor**

Kulička na konci dřívku snímacího senzoru je nahrazena různě úzkým diskem, jehož osa se shoduje s osou dřívku (viz. Obr. 9).

Měření pomocí diskového snímacího senzoru je ekvivalentní měření ve středu nebo kolem středu velké kuličky. Pro kontakt je však k dispozici pouze malá část povrchu koule. Proto tenké disky vyžadují úhlové vyrovnání, aby byl zajištěn správný kontakt povrchu disku s měřeným prvkem. [5]



Obr. 9: Diskový snímací senzor [6]

- **Válcový snímací senzor**

Vyráběný z karbidu, syntetického rubínu nebo keramiky (viz. Obr. 10).

Využívá se pro měření plechů, lisovaných dílů a tenkých obrobků, kde nelze zaručit dobrý kontakt s kulovými snímacími senzory. Kromě toho s nimi lze měřit různé vlastnosti závitu a určit osy závitových otvorů. [5]

- **Snímací senzor s dutou polokoulí**

Dutá polokoule je keramická. Tento typ snímacího senzoru vyniká poměrem efektivního průměru a hmotnosti jeho špičky (viz. Obr. 11).

Využívá se pro měření hlubokých otvorů nebo jiných prvků vyžadujících vysokou EWL. S výhodou měří dílce s drsnými povrchy, protože jejich drsnost je mechanicky odfiltrována principem, který bude vysvětlen v další části práce. [5]



Obr. 10: Válcový snímací senzor [6]



Obr. 11: Snímací senzor s keramickou polokoulí [6]

- **Snímací senzory na zakázku**

V případech, kdy pro danou aplikaci nevyhovuje žádný ze sériově vyráběných druhů snímacích senzorů, je možno využít zakázkově vyráběných snímacích senzorů.

Velcí výrobci nabízejí tvorbu snímacích senzorů přímo podle specifických požadavků zákazníka. Zákazník nejprve zašle výrobci detailní popis požadavků jeho měřicího procesu a výrobce následně navrhne možnou konstrukci snímacího senzoru společně s metodikou měření.

3.2.2 Stručný popis používaných materiálu kuličky

Existuje řada materiálů, ze kterých může být kulička vyrobena. Důvodem variability je široká oblast materiálů měřených součástí a různá snášenlivost kontaktu mezi materiálem kuličky a materiálem součásti. Následující část představí materiály kuličky používané v dnešní průmyslové metrologii, osvětlí klíčové negativní vlivy na kuličku a jejich důsledky pro proces měření.

- **Syntetický rubín**

Jedná se o nejpoužívanější materiál pro kuličky v průmyslové metrologii. Je vhodný pro většinu běžných aplikací. Z chemického hlediska se jedná téměř čistý oxid hlinitý (Al_2O_3). (viz. Obr. 12)

Přírodní rubín je vzácným nerostem, a proto se pro průmyslové aplikace vyrábí rubín syntetický.

Mezi jeho klíčové vlastnosti pro aplikaci v metrologii patří vysoká otěruvzdornost a korozní stabilita. Tento materiál umožňuje také výrobu velmi malých kuliček o průměru až 0,12mm. [6]



Obr. 12: Kulička ze syntetického rubínu [7]

- **Keramika**

Keramické kuličky mají velmi nízkou poréznost. Jsou k dispozici jako vysoce přesné varianty, ve velkých průměrech koulí a jako (duté) polokoule. [6] [7] (viz. Obr. 13)



Obr. 13: Kulička z keramiky [7]

- **Nitrid křemíku**

Jedná se o velmi tvrdý a otěruvzdorný druh keramiky. Může být opracován do velmi přesných kuliček a také být vyleštěn do extrémně jemných drsností povrchu. [7] (viz. Obr. 14)

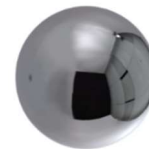
Hlavní využití tohoto materiálu kuličky je při skenování součástí ze slitin hliníku. Na rozdíl od běžné rubínové kuličky nemá nitrid křemíku vůči hliníku afinitu (viz. kap. 3.3.1).



Obr. 14: Kulička z nitridu křemíku [7]

- **Karbid wolframu**

Kuličky z karbidu wolframu mohou být vyrobeny podle specifikace odběratele. Mají vysokou hmotnost, ale umožňují speciální průměry, například pro měření ozubených kol. [6] (viz. Obr. 15)



Obr. 15: Kulička z karbidu wolframu [7]

- **Diamantový povlak**

Keramická kulička je potažena diamantovou vrstvou o tloušťce přibližně 0,03 mm. Kuličky se následně leští ve velmi složitém procesu. Takto povrchově upravené kuličky si zachovávají svoji kulovitost a nedochází u nich k depozici materiálu součásti (k tvorbě nárůstku). [7] (viz. Obr. 16)



Obr 16: Kulička s diamantovým povlakem [7]

- **Diamant**

Použití tohoto materiálu kuličky je opodstatněné při měření velmi tvrdých a velmi abrazivních povrchů. Stejně tak při skenování součástí, kde dochází ke kontaktu povrchu kuličky s povrchem součásti pouze v jednom bodě (např. při měření na rotačních stolech). [6] (viz. Obr. 17)



Obr 17: Kulička z diamantu [7]

3.2.3 Stručný popis používaných materiálu dříku

Stejně jako u kuličky i u dříku snímacího senzoru je důležitým parametrem jeho materiál. Na jeho volbě z části závisí celková tuhost snímacího senzoru. Současně různé materiály dříku mají různou teplotní stabilitu, jsou tak vhodné do odlišných podmínek. [7]

- **Ocel**

Jedná se základní materiál dříku s velmi dobrou tuhostí. Vhodný pro aplikace, kde není problém vyšší hmotnost dříku. [7] (viz. Obr. 18)



Obr. 18: Ocelový dřík [6]

- **Karbid wolframu**

Dříky z karbidu wolframu vynikají odolností vůči průhybu. Primárně jsou vhodné do laboratorních podmínek. [7] (viz. Obr. 19)



Obr. 19. Dřík z karbidu wolframu [6]

- **Keramika**

Lehký a pevný materiál s velmi dobrou teplotní stabilitou. Dříky z tohoto materiálu jsou vhodné do produkčně zaměřených provozů. [7] (viz. Obr. 20)



Obr. 20: Keramický dřík [6]

- **Hliníková slitina**

Velmi lehký materiál, avšak vhodný pouze do teplotně stabilního prostředí, jelikož z porovnávaných materiálů (viz. Graf 1) má nejvyšší koeficient roztažnosti. [7] (viz. Obr. 21)



Obr. 21: Dřík ze slitiny hliníku [6]

- **Kompozit z uhlíkových vláken**

Jedná se o extrémně lehký materiál s prakticky nulovou tepelnou roztažností. Z toho důvodu je zvláště vhodný pro teplotně méně stabilní podmínky. [7] (viz. Obr. 22)



Obr. 22: Dřík z uhlíkových vláken [6]

- **Titan**

Velmi lehký s dobrou tuhostí. V porovnání s hliníkovou slitinou má mnohem lepší teplotní stabilitu. [7] (viz. Obr. 23)



Obr. 23: Titanový dřík [6]

3.3 Vlivy snímacího senzoru na proces měření

V běžné průmyslové praxi vstupuje do procesu měření mnoho vlivů. Tyto vlivy výsledky měření ovlivňují, ne všechny z nich lze regulovat, a i ty které regulovat lze často nelze plně odstranit. Z toho důvodu je třeba se s těmito vlivy seznámit, dokázat je popsat a výsledky měření pak v rámci těchto vědomostí interpretovat.

Při hledání nejlepšího možného způsobu, jak měřit danou součást na souřadnicovém měřicím přístroji, se mnoho specifikací navolí z předem známého výchozího nastavení přístroje, jednoduše proto, že tyto specifikace vychází z mnoha předchozích zkušeností a byly už mnohokrát ověřeny.

Daná přesnost CMM, typ měření, který je možné pro danou součást použít (dotykový nebo skenovací) a optimální strategie měření. To jsou specifikace, které jsou často považované za samozřejmost a následně nejsou nijak zpochybňovány. [8]

Správně zvolené specifikace jsou základem dobrého měření s vypovídajícími výsledky, nicméně toto může být **narušeno neuváženou volbou snímacího senzoru**. [8]

Následující část kapitoly shrne několik základních parametrů snímacího senzoru, které se podílí na výsledné přesnosti.

Těmito parametry jsou:

- ***Materiál kuličky***
- ***Materiál dříku***
- ***Velikost kuličky***
- ***Celková tuhost snímacího senzoru***

Variabilita ***prvních dvou parametrů*** (materiály použité na části snímacího senzoru) byla představena v předchozí kapitole. V této části budou představeny problémy, které mohou při procesu měření vzniknout a kterým lze správnou volbou těchto materiálů předcházet.

Pro tuto práci jsou však klíčové zbylé dva parametry – ***velikost kuličky a celková tuhost snímacího senzoru***. Především materiálové parametry (přestože mohou ovlivnit proces měření) nejsou v experimentální části zohledňovány, jejich vliv je hůře kvantifikovatelný a vyžadoval by větší soubor dat a celkově náročnější experiment. V případě návaznosti na tuto práci je tak otevřena možnost se zabývat detailněji i těmito parametry.

3.3.1 Vliv materiálu kuličky snímacího senzoru na proces měření

Materiál měřené součásti a metoda měření. To jsou jedny z hlavních faktorů, které mají vliv na životnost kuličky a ovlivňují tak volbu samotného materiálu kuličky. V případě zmíněné metody měření jde konkrétně o to, zda se jedná o pouhé měření v několika určených kontaktních bodech či skenování.

Při skenování totiž dochází k relativně dlouhodobému kontaktu kuličky se součástí. Tento pohyb má formu smýkání kuličky po povrchu a v extrémních případech může dojít k abrazivnímu otěru kuličky, nebo k depozici materiálu součásti na kuličku ve formě nárůstku. Problém se pak zvyrazňuje v případech, kdy se kontakt kuličky s materiálem soustředí do jednoho bodu na povrchu kuličky. Oba zmíněné efekty, jak abraze, tak vznik nárůstku, mají za následek zhoršení kulovitosti kuličky a tím snižují kvalitu měření. [8]

- Abraze (viz. Obr. 24) vzniká při skenování materiálů jako je například litina, kde mikroskopické částice nečistot způsobují miniaturní škrábance na povrchu kuličky, což má za následek vznik plošky na kuličce v místě kontaktu se součástí. V tomto případě jsou doporučované velmi tvrdé kuličky ze zirkonové keramiky. [8]
- Nárůstek (viz. Obr. 25) vzniká v případech skenování materiálů s afinitou vůči materiálu kuličky. Tato afinita vzniká například při skenování součástí z hliníkových slitin za použití rubínové kuličky (rubín – oxid hliníku). Materiál přechází z relativně měkké součásti na povrch kuličky a narušuje její tvar. V případech jako je tento, je doporučeno používat kuličky z nitridu křemíku, jelikož má dobrou odolnost a nevykazuje afinitu vůči hliníku. [8]

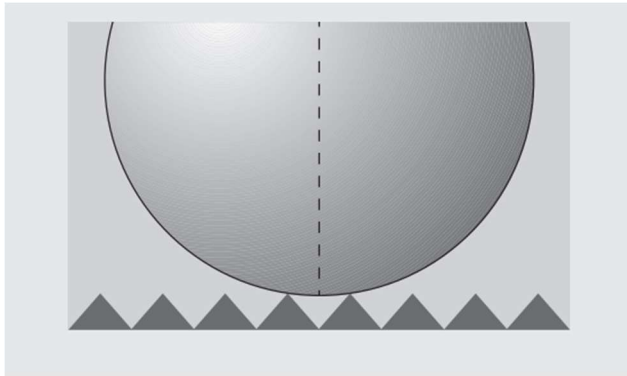


Obr. 24: Abraze kuličky [7]



Obr. 25: Nárůstek materiálu na kuličce [7]

3.3.2 Vliv velikosti kuličky snímacího senzoru na proces měření



Obr. 26: Velký průměr kuličky jako filtr hrubých chyb [5]

Průměr kuličky snímacího senzoru má zásadní vliv na přesnost měření. Malé průměry dokážou kopírovat konturu součásti přesněji, ale současně s tím jsou citlivější vůči drobným povrchovým defektům, které často nemají význam z hlediska funkce součásti, ale způsobují hrubé odchylky v naměřených datech.

Naopak při použití velkých průměrů kulička funguje jako tzv. filtr hrubých chyb (viz. Obr. 19). Velký rádius konce snímacího senzoru (kuličky) neumožní kontakt s malými prohlubněmi v povrchu součásti. Nerovnosti způsobené drsností povrchu jsou tímto principem jednoduše mechanicky odfiltrovány. [7] Jinak řečeno, větší průměry kuliček snižují vliv drsnosti povrchu součásti na přesnost měření. [9]

Volba vhodné velikosti kuličky závisí na více činitelích – drsnost povrchu, velikost měřených prvků, předepsaná přesnost apod.

V případě měření kruhovitých otvorů a rádiusů je stěžejní zejména **poměr mezi jmenovitým průměrem otvoru (rádiusem prvku) a průměrem kuličky**.

3.3.3 Vliv teplotní stability dřívku na proces měření

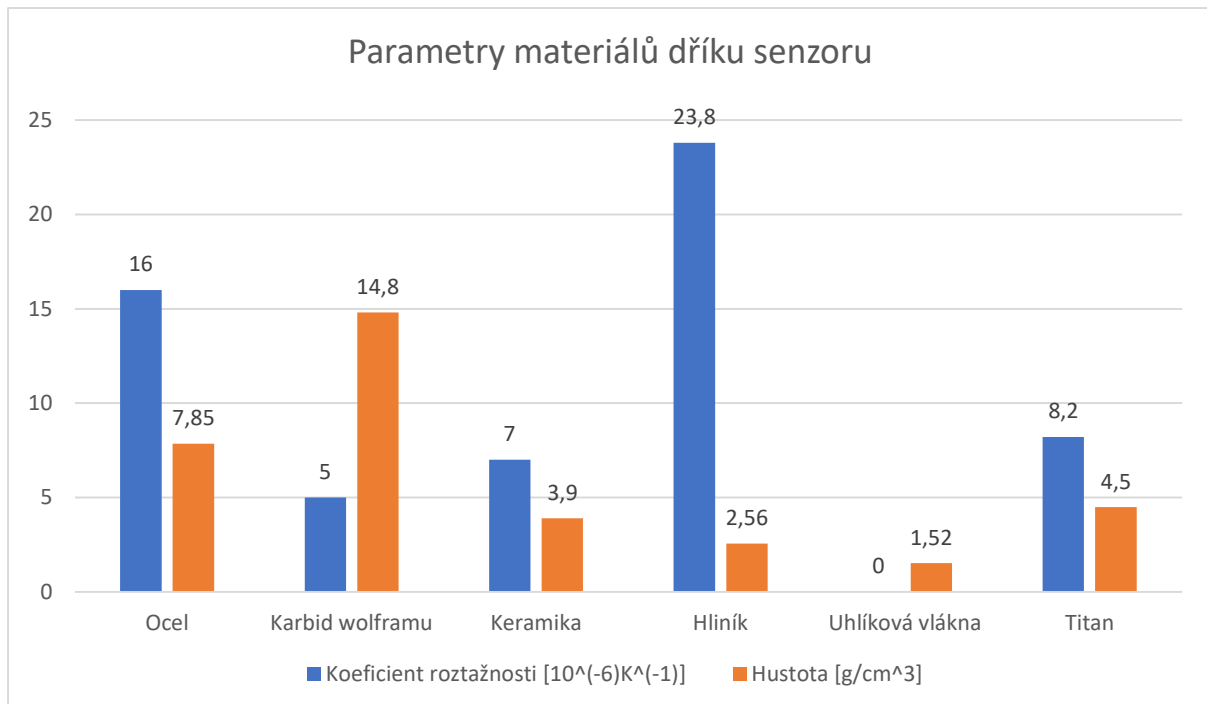
Teplotní roztažnost materiálů hraje v průmyslové praxi velkou roli. Kolísání teploty může způsobit vážné chyby měření z důvodu prodloužení dřívku snímacího senzoru. Správná volba materiálu dřívku pro danou aplikaci může zajistit vyšší stabilitu procesu i za měnících se podmínek. Obecně jsou preferované materiály s nízkým koeficientem roztažnosti, a to speciálně v případech, kdy je používáno dlouhých snímacích senzorů, což je například při měření ve větších hloubkách častou nutností.

Nejčastěji používaným materiálem pro tyto případy je kompozit z uhlíkových vláken jakožto materiál s dobrou tuhostí, nízkou hmotností a nízkým koeficientem roztažnosti. V případech, kdy je nutno využít kovu, je nejlepší volbou titanová slitina, která poskytuje vhodnou kombinaci pevnosti, stability a hustoty. [8]

Jednou z informací, kterou je třeba zmínit v kontextu měření ve větších hloubkách společně s problematikou teplotní stability je, že velikost teplotní dilatace dřívku přímou úměrou závisí na délce dřívku snímacího senzoru. Jinými slovy při měření ve větších hloubkách pomocí dlouhých snímacích senzorů je chyba způsobená teplotní dilatací zásadnější než při měření krátkými snímacími senzory.

Tento typ chyby však více ovlivňuje měření rozměrů ve směru osy dříku, a to z důvodu výrazného osového prodloužení, příčné prodloužení je v porovnání s ním zanedbatelné. Lze tedy předpokládat, že chyba způsobená teplotní dilatací neovlivní tolik výsledky měření například kruhovitosti hluboké díry, jednoduše proto, že tvarová změna dříku snímacího senzoru nebude ve směru kolmém na osu díry významná.

Z tohoto důvodu mají tyto poznatky spíše informativní charakter a nebudou dále zohledňovány v dalších částech práce.



Graf 1: Hustota a teplotní roztažnost rozdílných materiálů dříku snímacího senzoru [5]

Z grafu 1 lze vypožorovat několik faktů:

- Kompozit z uhlíkových vláken je jedním z nejlepších materiálů pro dřík snímacího senzoru, a to díky prakticky nulové tepelné roztažnosti a minimální hmotnosti.
- Hliníková slitina může být z hlediska hustoty vhodnou alternativou k uhlíkovým vláknům, avšak má nejvyšší tepelnou roztažnost ze všech porovnávaných materiálů.
- Ocel v obou parametrech nikterak nevyniká, jedná se však o relativně snadno zpracovatelný a levný materiál.
- Karbid Wolframu je nejtěžším z porovnávaných materiálů.
- Kromě kompozitu z uhlíkových vláken taktéž keramika společně s titanem nabízí solidní poměr mezi hmotností a teplotní stabilitou.

3.3.4 Vliv tuhosti snímacího senzoru na proces měření

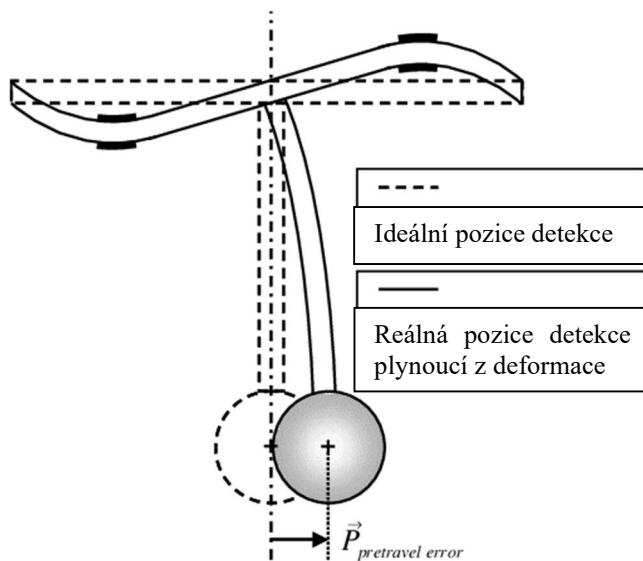
Samotný problém vychází z potřeby zajistit určitou kontaktní sílu mezi součástí a kuličkou senzoru. Většina snímacích senzorů totiž není schopna detekovat kontakt se součástí okamžitě, ale potřebuje přenést přes dřík různě velkou sílu, tak aby mechanismus snímače kontakt zaznamenal a převedl jej na elektrický signál.

Tato síla elasticky deformuje snímací senzor. Elastická deformace umožňuje sondě urazit navíc krátkou vzdálenost i po samotném kontaktu kuličky se součástí do doby, než jej mechanismus zaznamená. Tento pohyb „navíc“ se nazývá **pre-travel**. [8]

Trojúhelníkové kinematické uspořádání (viz. Obr. 27) většiny sond má za následek rozdílnost sil potřebných k zaznamenání kontaktu. Tato rozdílnost se odvíjí od směru kontaktu. Ve směrech, kde má sestava (přesněji spínací mechanismus) snímacího senzoru větší tuhost, bude potřeba vyšší síly na to, aby snímací senzor kontakt zaznamenal. Tím dojde k většímu ohybu dříku snímacího senzoru. To znamená, že sonda urazí delší vzdálenost a pre-travel bude větší. [10]



Obr. 27: Standardní trojúhelníkové uspořádání kinematicky odporové sondy [10]

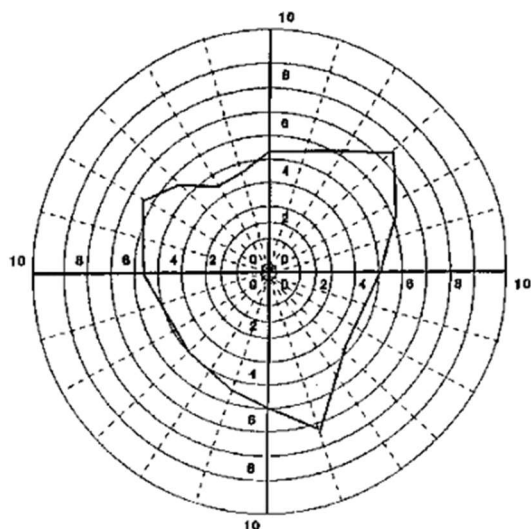


Obr. 28: Pre-travel [11]

Na Obr. 28 je pro lepší názornost vyobrazena odchylka pre-travel. Dále na Obr. 29 je zobrazen diagram závislosti kontaktní síly na nájezdovém úhlu snímacího senzoru. Tato závislost se pak dále komplikuje, pokud senzor najíždí ve více osách zároveň. [8] [11]

Pozn. Diagram je zobrazením roviny X, Y

Číslování os je v μm



Tab. 1: Parametry pro diagram pre-travel [10]

Sonda	TP6
Délka snímacího senzoru	50 mm
Variace pre-travel	3,28 μm
Kontaktní síla	15 g
Opakovatelnost (2σ)	0.5 μm

Obr. 29: Diagram závislosti odchyly pre-travel na nájezdovém úhlu [10]

Kromě zmíněné odchyly pre-travel vzniká ještě tzv. **over-travel** odchyly. Princip této odchyly je analogický. Zatímco pre-travel je nežádoucí pohyb snímacího senzoru **před** samotným zaznamenáním kontaktu se součástí, over-travel vzniká **po** záznamu kontaktu kuličky s povrchem a je způsoben setrvačností hmoty přístroje. Pohon přístroje totiž potřebuje určitou časovou prodlevu na úplné zastavení pohybu snímací hlavy se snímacím senzorem, Over-travel jde tedy zjednodušeně označit za jakousi „brzdou dráhu“ snímací hlavy. [12]

Jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují velikost odchyly over-travel, je způsob měření, a to konkrétně zda se jedná o měření určitým počtem kontaktních bodů nebo měření způsobem skenování. V případě skenování jsou dynamické vlivy pohonů přístroje mnohem znatelnější a tím se zvětšuje i odchyly over-travel.

Over-travel je tedy nutností pro to, aby se snímací senzor zastavil a velikost této odchyly je přímo závislá na velikosti měřeného povrchu. [12]

Jelikož odchyly over-travel je těžko ovlivnitelná z pozice snímacího senzoru, nebude jí dále věnována velká pozornost. Ta se přesune na faktory ovlivňující tuhost snímacího senzoru.

Je vhodné se blíže seznámit se standartním snímacím senzorem na bázi kinematicky odporové sondy a matematicky popsat situaci, která vede k samotnému sepnutí mechanismu a zaznamenání naměřené souřadnice. Jednoduchý vztah vycházející z rovnováhy momentů na snímacím senzoru ukazuje, jak konstrukční rozměry samotného senzoru ovlivňují přesnost zaznamenané souřadnice čili jak konstrukce snímacího senzoru souvisí s odchyly pre-travel. Fakt, že je možno tento vliv matematicky popsat, ukazuje na možnost softwarové kompenzace odchyly pre-travel při kalibraci snímacího senzoru.

Situaci lze popsat takto – V případě že moment síly vytvářený kontaktní silou F_C na rameni o délce L vyrovná/překoná moment generovaný silou v pružině F_S na rameni R tak dojde k sepnutí kinematicky odporového mechanismu a zápisu naměřené souřadnice. (viz. Obr. 30)

$$F_C \cdot L = F_S \cdot R$$

L a F_S jsou v rámci jednoho snímacího senzoru konstantami.

F_C je závislá na poloměru R , kde hodnota R se mění dle úhlu nájezdu.

Tento vztah však pracuje s jedním významným zjednodušením. Jedná se o teoretický vztah klasické mechaniky uvažující dokonale tuhá tělesa. Jednoduše řečeno neuvažuje jakoukoliv elastickou deformaci komponent snímacího senzoru, a tedy ani samotný průhyb dřívku.

V reálných podmínkách je chyba způsobená přejezdem sondy od skutečného kontaktu kuličky s povrchem součásti závislá na *odchylce pre-travel, over-travel a na k tomu připočtené míře ohybu dřívku snímacího senzoru.*

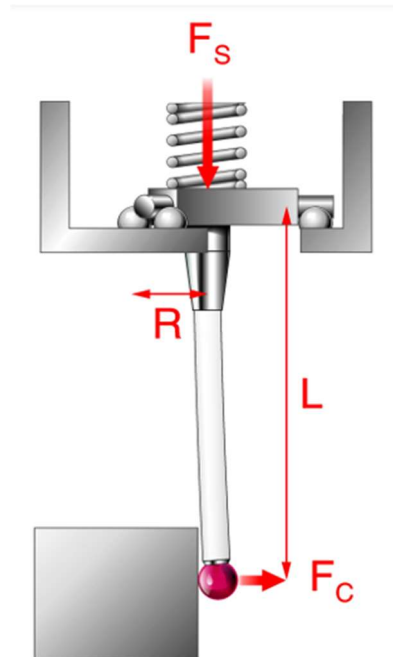
Celkovou tuhost soustavy snímacího senzoru nejvíce ovlivňuje dřívku. Profil dřívku jakožto štíhlé a dlouhé součásti je z hlediska tuhosti velmi nevýhodný, a tak jak již bylo zmíněno, dochází k elastickým deformacím. Tyto deformace, jakkoliv jsou malé, vnášejí chybu do procesu měření.

Velikost elastické deformace obecně se dá ovlivnit tužším profilem součásti (zvětšení plochy průřezu, dutý průřez, I-profil apod.) zde ale není mnoho prostoru pro úpravy. Další možností je změna působíště zatěžující síly (na Obr. 30 změna parametru L). Dřívku snímacího senzoru musí mít (z principu jeho použití) plochu průřezu velmi malou a při měření ve větších hloubkách musí být navíc dostatečně dlouhý.

Posledním faktorem je **materiálová tuhost dřívku.** Již bylo nastíněno, které z materiálů se používají v průmyslové metrologii pro výrobu dřívků snímacích senzorů a tyto materiály byly porovnány z hlediska jejich měrné hmotnosti a teplotní stability.

Každý materiál má určitou mikroskopickou (v případě kompozitu i makroskopickou) vnitřní skladbu, která udává jeho mechanické vlastnosti, a to včetně jeho tuhosti.

Fyzikální veličinou popisující tuhost daného materiálu je **tzv. modul pružnosti v tahu E** jinak také zvaný Youngův modul – Veličina zobrazující odolnost materiálu vůči deformaci.



Obr. 30: Rovnováha momentů na snímacím senzoru [10]

Následující tabulka ukazuje moduly pružnosti pro materiály dříků, které byly představeny výše.

<i>Materiál dříku</i>	<i>Modul pružnosti E [MPa]</i>
<i>Karbid wolframu</i>	620
<i>Ocel</i>	200
<i>Hliníková slitina</i>	70
<i>Titan</i>	150
<i>Keramika</i>	300 - 400
<i>Kompozit z uhlíkových vláken</i>	≥ 450

Tab. 2: Moduly pružnosti materiálů dříku [7]

Z tabulky 2 lze vyčíst, že karbid wolframu, jakožto materiál s nejvyšší měrnou hmotností (viz. Graf. 1), vyvažuje tuto nevýhodu nejvyšším modulem pružnosti. Naopak hliníková slitina je deformaci nejméně odolná. Uhlíková vlákna pak vynikají poměrem hmotnosti a odolnosti vůči deformaci.

Na závěr teoretické části práce lze poznamenat, že volba materiálu dříku je navíc odvislá od požadavků na 3 již představené parametry – **měrná hmotnost, tepelná roztažnost, požadovaná tuhost.**

Měrná hmotnost (hustota) je obvykle požadována co nejnižší, a to zejména u delších dříků snímacích senzorů, kde množství materiálu zvýrazňuje problém deformace důsledkem vlastní hmotnosti dříku snímacího senzoru.

Požadavky na tepelnou stabilitu se odvíjí od prostředí, ve kterém probíhá měření. Laboratorní podmínky se stabilní a kontrolovanou teplotou jsou vhodné i pro použití méně teplotně stabilních dříků. Naproti tomu dílenské měření ve výrobě vyžaduje materiály s vysokou teplotní stabilitou.

Celková tuhost snímacího senzoru nejvíce závisí na délce dříku snímacího senzoru, **čím delší a užší dřík je použit, tím jsou nároky na jeho materiálovou tuhost vyšší.**

4 Experimentální část

Jak již bylo zmíněno, hlavním cílem experimentu je porovnat několik snímacích senzorů lišících se velikostí, tzn. těmito parametry: *průměr kuličky, průměr dřívku, délka dřívku*. V návaznosti na poznatky z teoretické části z toho plyne, že porovnávané snímací senzory se liší svojí *celkovou tuhostí* a mírou efektu *filtru hrubých chyb*.

Celý experiment je zaměřen na problematické *měření kruhovitosti a válcovitosti hlubokého otvoru*, který svými rozměry nebo pozicí na součásti znemožňuje použití krátkých a tužších snímacích senzorů.

4.1 Příprava experimentu

Pro provedení experimentu je zásadní připravit vhodné podmínky, veškeré potřebné strojní zařízení a v návaznosti i další příslušenství k přístrojům.

V rámci přípravy bylo třeba zajistit:

- *CMM na kterém bude prováděno experimentální měření.*
- *Kruhoměr umožňující změřit měřené součásti přesněji než CMM – data z tohoto měření poslouží jako referenční hodnoty.*
- *Měřené součásti – reference které budou mít známé rozměry – změřené na kruhoměru.*
- *Soubor snímacích senzorů – Odlišné snímací senzory testované v rámci experimentu.*
- *Kalibrační koule – pro kalibraci CMM před měřením.*

Celý experiment probíhal v ustálených podmínkách metrologické laboratoře.

4.1.1 Souřadnicový měřicí přístroj využitý pro experiment

Experimentální měření proběhlo na přístroji **Carl Zeiss PRISMO 7 navigator** (viz. Obr. 31 na následující straně)

Jedná se o portálovou konstrukci renomovaného německého výrobce Carl Zeiss.

Přístroj je osazen měřicí hlavou **VAST XXT**. V této koncepci dosahuje CMM přesnosti měření popsané v tabulce 3.

<i>Oblast měření X × Y × Z [mm]</i>	<i>Chyba měření daná délkou úseku [μm]</i>
700 × 900 × 500	1,6 + L/350
900 × 1200 - 4200 × Z 650	1,6 + L/350
1200 × 1800 - 4200 × 1000	2,2 + L/300
1600 × 2400 - 4200 × 1000	3,2 + L/250

Tab. 3: Přesnost CMM Carl Zeiss PRISMO 7 navigator [13]

Oblast měření pro tento experiment je velmi malá. Bude tedy platná **první uvedená přesnost v tabulce výše**.

Po vyčíslení pro maximální úsek (hloubku měření) je pak konkrétní hodnota přípustné chyby:

$$1,6 + 18,5/350 \approx \mathbf{1,653 \mu m}$$



Obr. 31: Carl Zeiss PRISMO 7 navigator

4.1.2 Kruhoměr využitý pro experiment

Pro porovnání přesnosti vybraných snímacích senzorů bylo zapotřebí znát předem parametry součástí, které budou sloužit jako referenční (jmenovité) pro měření na CMM.

Tyto parametry (zmiňovaná kruhovitost a válcovitost) byly změřeny na vysoce přesném zařízení – kruhoměru Taylor Hobson Talyrond 585 Lt (viz. Obr. 32 a 33), který disponuje nejistotou $\pm 0,01 \mu\text{m}$ při měření kruhovitosti, [14] což je více než *stonásobně vyšší přesnost* oproti CMM použitým v experimentu.



Obr. 32: Přesný kruhoměr Talyrond 585 Lt



Obr. 33: Detail snímacího senzoru kruhoměru

Právě díky řádově vyšší přesnosti měření (v porovnání s CMM) lze výstup z kruhoměru použít v rámci experimentální části jako *jmenovitou hodnotu pro výpočet odchylky (chyby) porovnávaných snímacích senzorů* a následně zhodnotit vhodnost každého z nich pro daný proces měření.

4.1.3 Měřené referenční součásti

Pro účely práce byly na pracovišti RTI vyrobeny **dvě referenční součásti**. Jedná se o dvě válcové součásti (přířezy z hlazených tyčí) s hlubokými otvory v ose (viz. Obr. 34 a Obr. 35).

Otvory jsou přesně vrtané, první referenční součást má otvor **Ø 6,5 mm** a druhá **Ø 10,5 mm**.



Obr. 34: Referenční součást s otvorem Ø 6,5 mm



Obr. 35: Referenční součást s otvorem Ø 10,5 mm

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.2, hodnoty kruhovitosti a válcovitosti obou vrtaných otvorů byly změřeny na vysoce přesném kruhoměru a budou sloužit jako **jmenovitá hodnota**, se kterou se porovnají výsledky naměřené jednotlivými snímacími senzory. Nakonec na základě velikosti odchylky od těchto hodnot bude zhodnocena přesnost jednotlivých snímacích senzorů.

Hodnoty kruhovitosti byly měřeny v několika řezech (hloubkách) vrtaných otvorů, a to jak na kruhoměru, tak na CMM. Bylo tak naměřeno větší množství hodnot, aby data byla vypovídající. Současně se měření vícekrát opakovalo, kvůli snížení celkové nejistoty měření.

Přesný plán měření je představen v kapitole 4.3.

4.1.4 Soubor snímacích senzorů pro účely experimentu

Jedna z nejpodstatnějších částí přípravy byla volba snímacích senzorů pro účely experimentu.

Jakýmsi „odrazovým můstkem“ je **empirický vzorec**, dle kterého lze na základě znalosti **průměru měřeného otvoru – d** vypočítat **maximální doporučený průměr kuličky – D_{max}** snímacího senzoru.

$$D_{max} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d}{24} \text{ [mm]} \text{ [15]}$$

Pro již představené referenční součásti je tak výpočet následující:

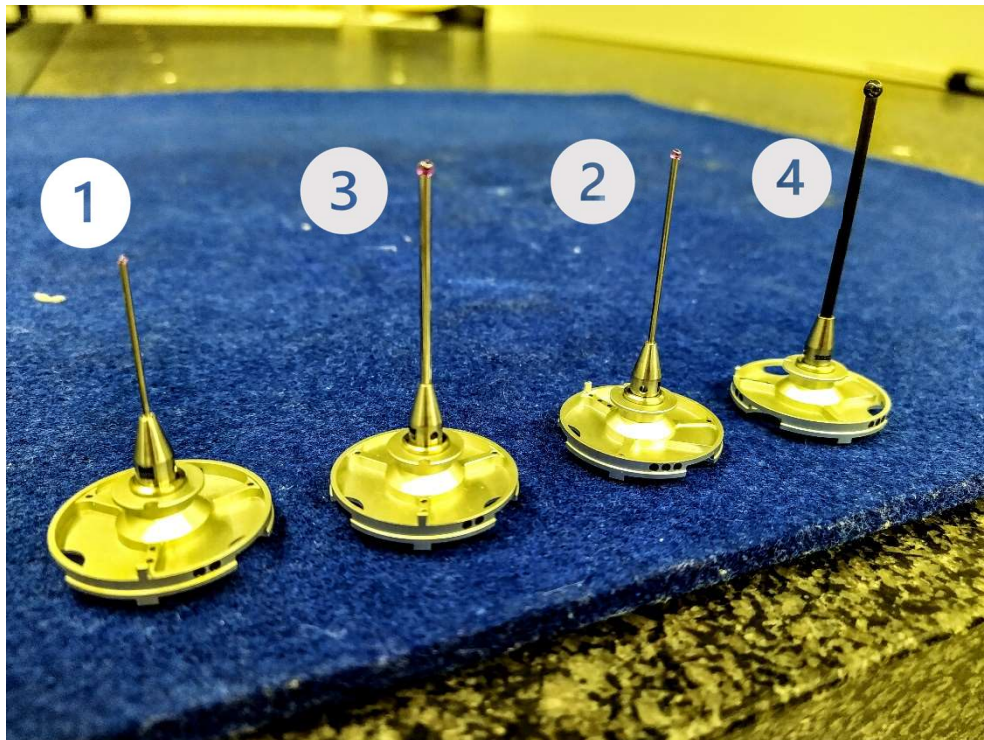
1. Pro referenční součást s otvorem $\varnothing 6,5 \text{ mm}$

$$D_{max} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d}{24} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 6,5}{24} = 1,7 \text{ mm}$$

2. Pro referenční součást s otvorem $\varnothing 10,5 \text{ mm}$

$$D_{max} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d}{24} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 10,5}{24} = 2,75 \text{ mm}$$

Snímací senzory pro účely experimentu byly zvoleny 4 (viz. Obr. 36) tak, **aby pokrývaly okolí vypočítaných hodnot.**



Obr. 36 Soubor snímacích senzorů pro účely experimentu

Snímací senzory pro experiment:

- 1) Kulička ze syntetického rubínu \varnothing 1 mm, dřík ocel, **délka 25 mm**
- 2) Kulička ze syntetického rubínu \varnothing 1,5 mm, dřík ocel, **délka 40 mm**
- 3) Kulička ze syntetického rubínu \varnothing 2 mm, dřík ocel, **délka 40 mm**
- 4) Kulička z nitridu křemíku \varnothing 3 mm, dřík kompozit z uhlíkových vláken, **délka 50 mm**

Rozptyl průměru kuličky byl nastaven tak, aby bylo použito *málo tuhých* snímacích senzorů (\varnothing 1 mm) a zároveň i snímacích senzorů *výrazně tužších* (\varnothing 3 mm s dříkem z uhlíkových vláken) a *překračujících tak výše vypočítaný doporučený průměr kuličky*.

4.2 Podmínky experimentu

Jak již bylo zmíněno, celý proces kalibrace i následného měření probíhal *v řízeném prostředí metrologické laboratoře*. Teplotní podmínky jsou uvedené v Tab. 4.

<i>Místo</i>	<i>Teplota [°C]</i>
Prostor laboratoře	20,2
CMM	19,8

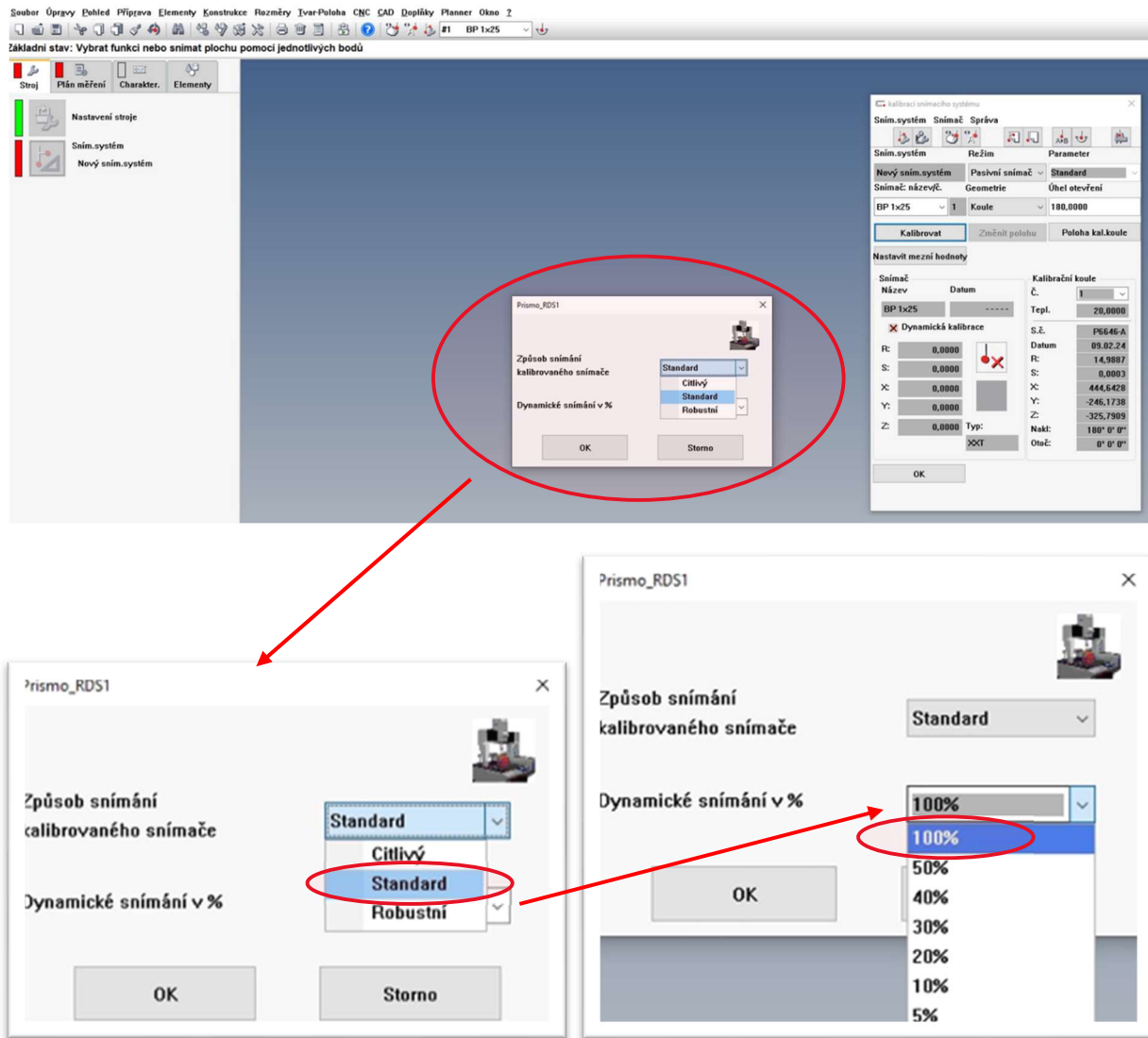
Tab. 4: Teplotní podmínky experimentálního měření

4.3 Průběh experimentu

V první řadě proběhla standartní kalibrace každého ze snímacích senzorů pomocí kalibrační koule (viz. Obr. 37). Tento proces slouží k softwarové korekci nepřesností z hlediska pozice a průměru kuličky snímacího senzoru a zajišťuje tak požadovanou přesnost měřicího procesu.



Obr. 37: Kalibrace jednoho ze snímacích senzorů pomocí keramické kalibrační koule



Obr. 38: Nastavení procesu kalibrace

Obr. 38 popisuje nastavení kalibrace před jejím zahájením. Software CMM umožňuje volbu jednoho ze 3 předdefinovaných režimů měření „Citlivý“, „Standard“ a „Robustní“. Pro experiment byl zvolen režim „Standard“.

Dalším krokem je nastavení kalibrační rychlosti (pohyb snímací hlavy při procesu kalibrace). *Rychlost měření byla nastavena na 100% její hodnoty, konkrétně 40 mm/s.*

Výstupem z kalibrace jsou rozměrové parametry každého snímacího senzoru korigované o montážní, případně výrobní nepřesnosti (viz. Obr. 39 – Obr. 42).

Obr. 39: Výsledek kalibrace - kulička Ø 1 mm

Obr. 40: Výsledek kalibrace - kulička Ø 1,5 mm

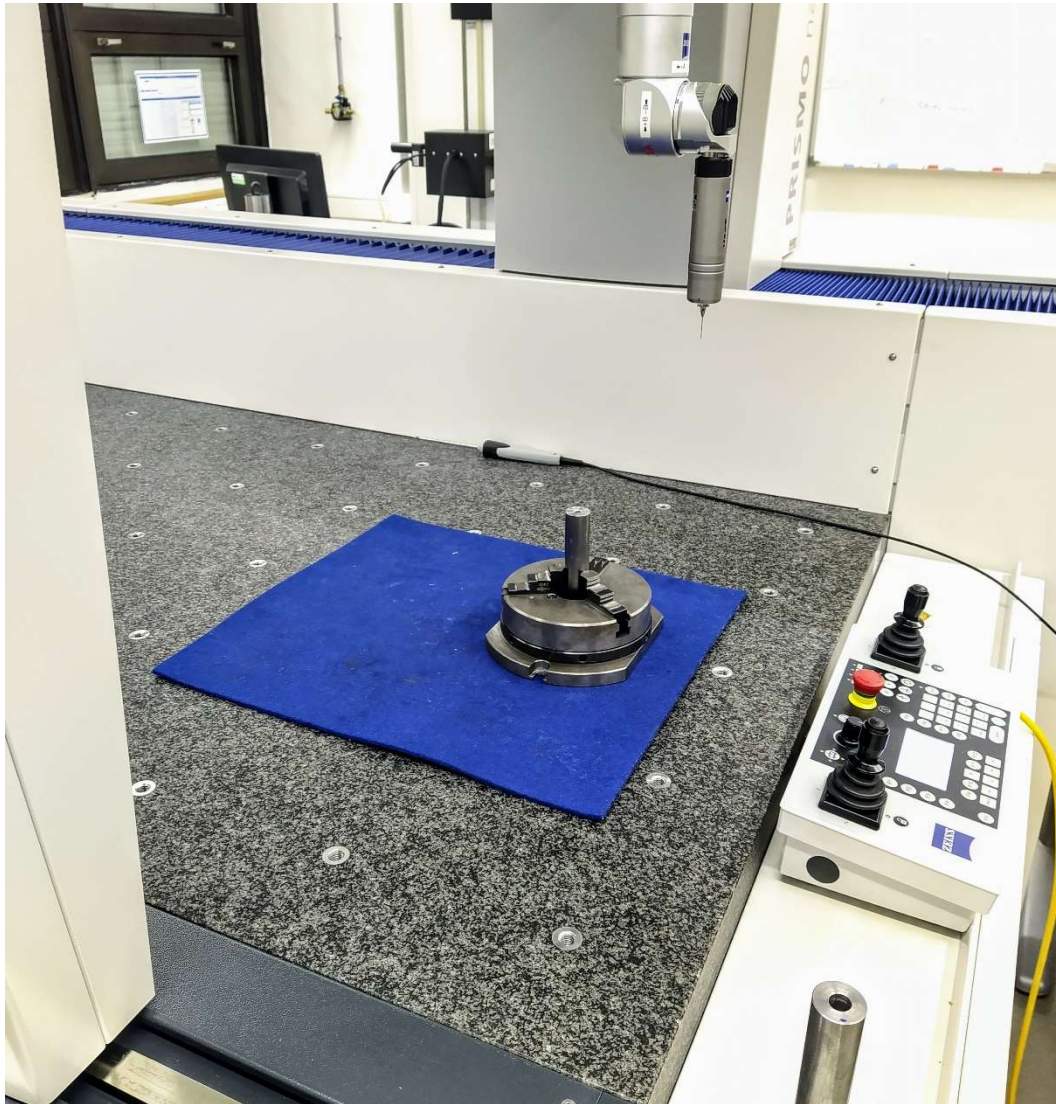
Obr. 41: Výsledek kalibrace - kulička Ø 2 mm

Obr. 42: Výsledek kalibrace - kulička Ø 3 mm

Po kalibraci následoval samotný měřicí proces.

Referenční součást (první s otvorem $\varnothing 6,5$ mm) byla ustavena do sklíčidla umístěného na měkký filcový podklad, který brání granitovou desku před poškozením (viz. Obr. 43). Celý komplet pak drží stabilní polohu díky své hmotnosti.

Snímací hlava byla osazena prvním snímacím senzorem z vybrané čtveřice a následně byl spuštěn měřicí program.



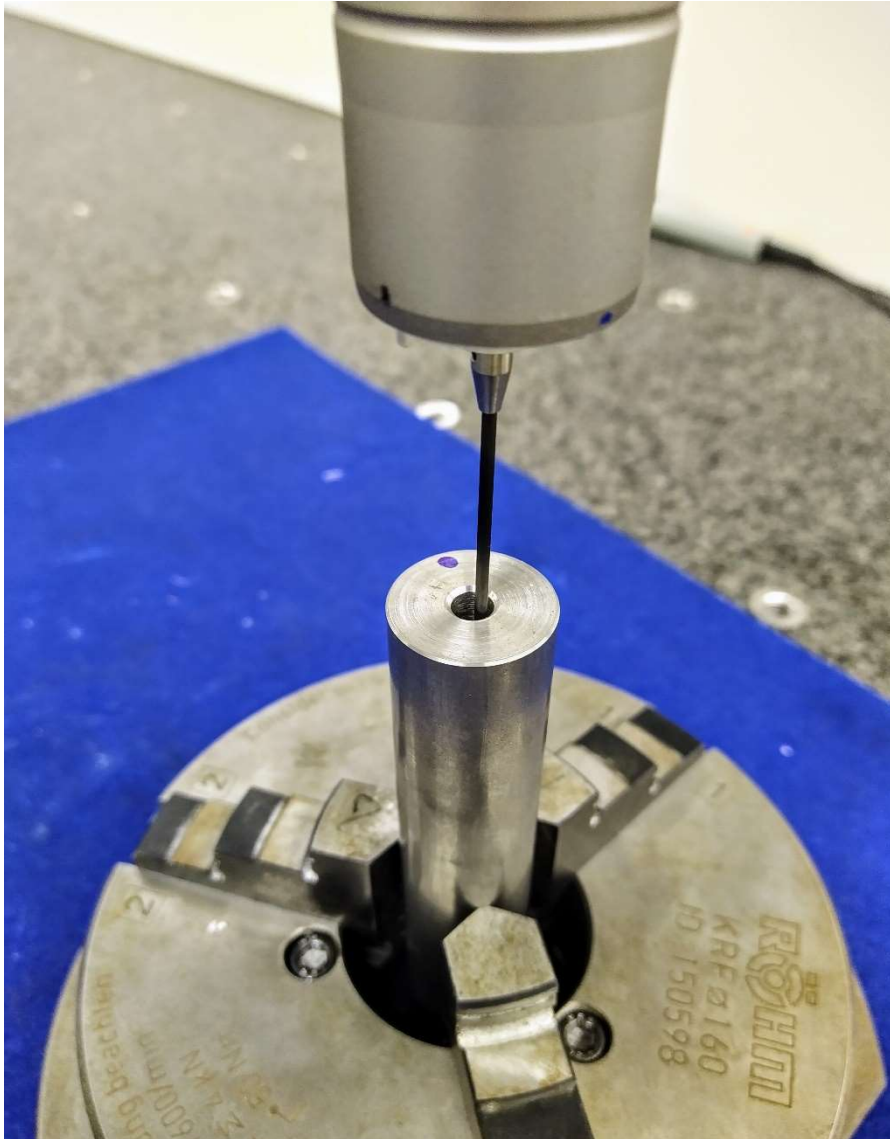
Obr. 43: Ustavení referenční součásti ve sklíčidle

Strategie měření byla navržena následovně:

1. Ruční najetí pozice součásti – **Start programu.**
2. Změření vnějšího průměru hlazené tyče deseti kontaktními body ve vzdálenosti **přibližně 2 mm od čela** (slouží pouze pro určení pozice součásti pro program).
3. Změření průměru vrtaného otvoru **deseti kontaktními body** postupně v následujících vzdálenostech od čela:
 - 1) **18,5 mm**
 - 2) **14 mm**
 - 3) **10 mm**
 - 4) **6 mm**
 - 5) **2 mm**
4. Pro stejný snímací senzor opakovat kroky 1. – 3. celkem 3×.
5. Posloupnost činností 1. – 4. (celý měřicí proces) se opakovat **pro každý ze čtyř vybraných snímacích senzorů.**



Obr. 44: Ukázka měření v maximální programované hloubce vrtaného otvoru
 $\varnothing 6,5 \text{ mm}$



Obr. 45: Ukázka měření největším (nejtužším) snímacím senzorem z vybraného souboru

Po změření první referenční součásti (vrtaný otvor \varnothing 6,5 mm) všemi snímacími senzory následovala výměna součásti za druhou s průměrem vrtaného otvoru 10,5 mm.

Po výměně součásti se zopakoval celý postup měření - kroky 1. – 5. (viz. Obr. 46) a zaznamenala se další série výsledků, tentokrát pro zmíněnou druhou referenční součást.



Obr. 46: Měření druhé referenční součásti s vrtaným otvorem $\varnothing 10,5$ mm

4.4 Výsledky experimentu

Jak již bylo zmíněno, hlavním kritériem pro hodnocení testovaných snímacích senzorů bude kruhovitost a válcovitost vrtaných otvorů referenčních součástí. Přesněji **odchylka mezi hodnotami naměřenými kruhoměrem a těmi naměřenými daným snímacím senzorem**.

Jelikož se měření každým snímacím senzorem opakovalo vždy 3× (viz. kap. 4.3) tak byl pro zjednodušení zpracování dat vypočten vždy **průměr těchto tří hodnot** (průměrná hodnota kruhovitosti/válcovitosti pro danou kombinaci snímací senzor/referenční součást/hloubka měření).

Tyto výsledné hodnoty byly porovnávány s výstupy z kruhoměru.

4.4.1 Referenční součást s otvorem Ø 6,5 mm

V Tab. 5 jsou zobrazeny hodnoty naměřené kruhoměrem *v pořadí od řezu v největší hloubce vrtaného otvoru po řez nejbližše čela součásti*.

KRUHOVITOST [mm]					VÁLCOVITOST [mm]
0,01349	0,01025	0,00907	0,00594	0,01441	0,0705

Tab. 5: Výsledky z kruhoměru (referenční hodnoty pro otvor Ø 6,5 mm)

Dále Tab. 6 pracuje s výsledky měření první referenční součásti (otvor Ø 6,5 mm) na CMM.

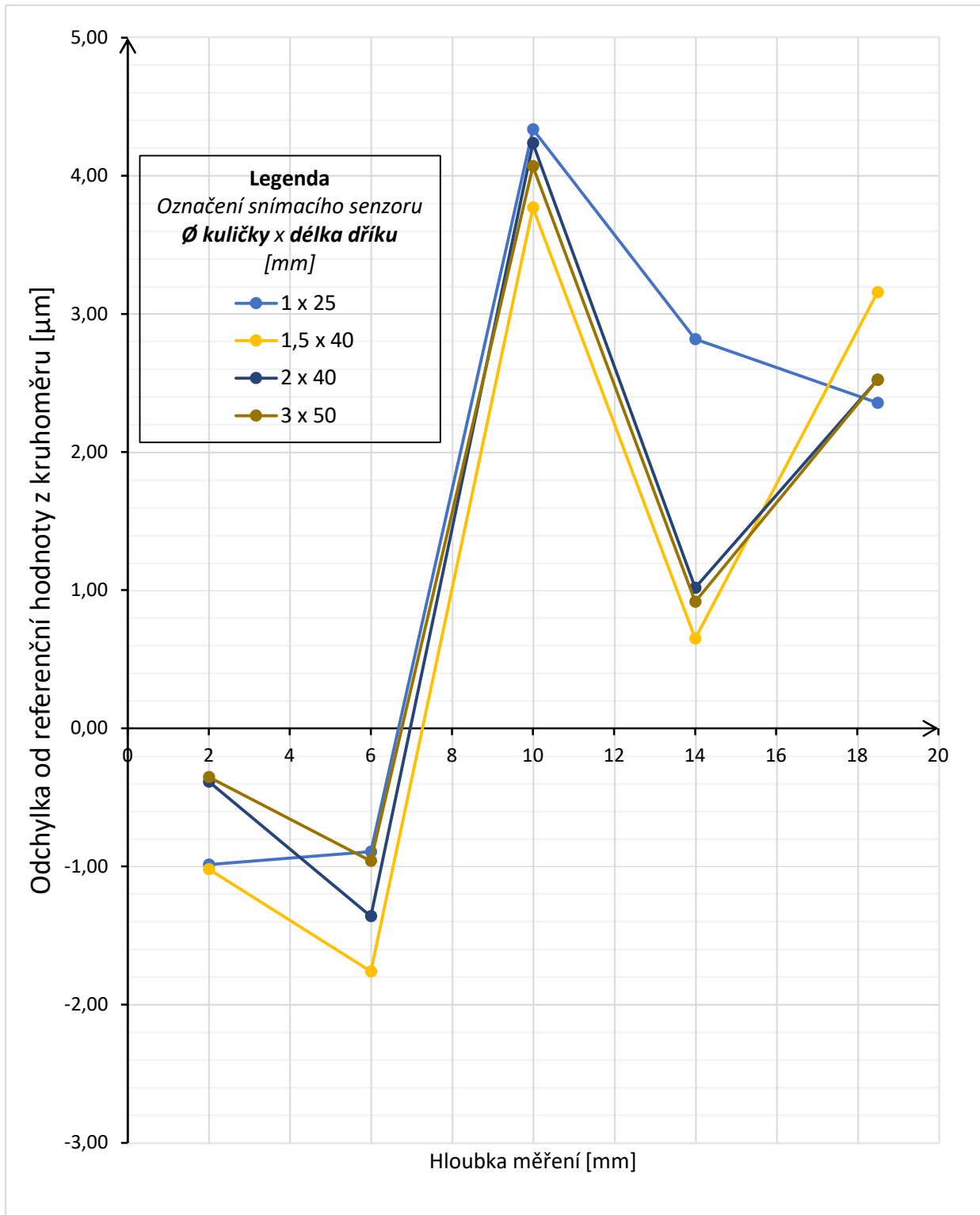
Každý ze zbarvených řádků zobrazuje měření jedním ze čtveřice vybraných snímacích senzorů. V prostřední části tabulky jsou zapsány **průměrné hodnoty kruhovitosti v daných řezech** vypočtené ze tří náměrů (opakovaných měření). V posledním sloupci je pak analogicky vypočtená **průměrná hodnota válcovitosti otvoru**.

	KRUHOVITOST (průměr tří náměrů) [mm]					VÁLCOVITOST [mm]	
	Snímací senzor	Hloubka měření [mm]					
		18,5	14	10	6		2
Otvor Ø 6,5 mm	1 mm	0,0111	0,0074	0,0047	0,0068	0,0099	0,0622
	1,5 mm	0,0103	0,0096	0,0053	0,0077	0,0099	0,0626
	2 mm	0,0110	0,0092	0,0048	0,0073	0,0093	0,0627
	3 mm	0,0110	0,0093	0,0050	0,0069	0,0092	0,0633

Tab. 6: Výsledky měření otvoru Ø 6,5 mm na CMM

Rozdíl referenčních hodnot naměřených na kruhoměru (Tab. 5) s hodnotami naměřenými na CMM (Tab. 6) bude tvořit odchylku která by měla být **nejnižší u nevyhodnějšiho snímacího senzoru**, jelikož to poukazuje na výsledek nejbližší přesnější hodnotám z kruhoměru.

Pro názorné porovnání slouží následující Graf 2.



Graf 2: Zobrazení rozdílu v naměřené kruhovitosti mezi referenčním měřením na kruhoměru a měřením jednotlivými snímacími senzory (pro součást s otvorem Ø 6,5 mm)

Svislá osa popisuje **velikost rozdílu** mezi kruhovitostí z kruhoměru (referenční) a kruhovitostí měřenou daným snímacím senzorem. Vodorovná osa je zobrazením hloubky měření od čela součásti.

První, co lze z grafu vyčíst je výrazná **nestabilita snímání nejmenšího ze snímacích senzorů** (\varnothing kuličky 1 mm, délka 25 mm) jehož výsledky zobrazuje světle modrá spojnice. Konkrétně v hloubce měření 14 mm došlo k výraznému vychýlení měřené hodnoty a současně trend mezi řezy v hloubce 2 mm a 6 mm se viditelně liší od ostatních porovnávaných snímacích senzorů.

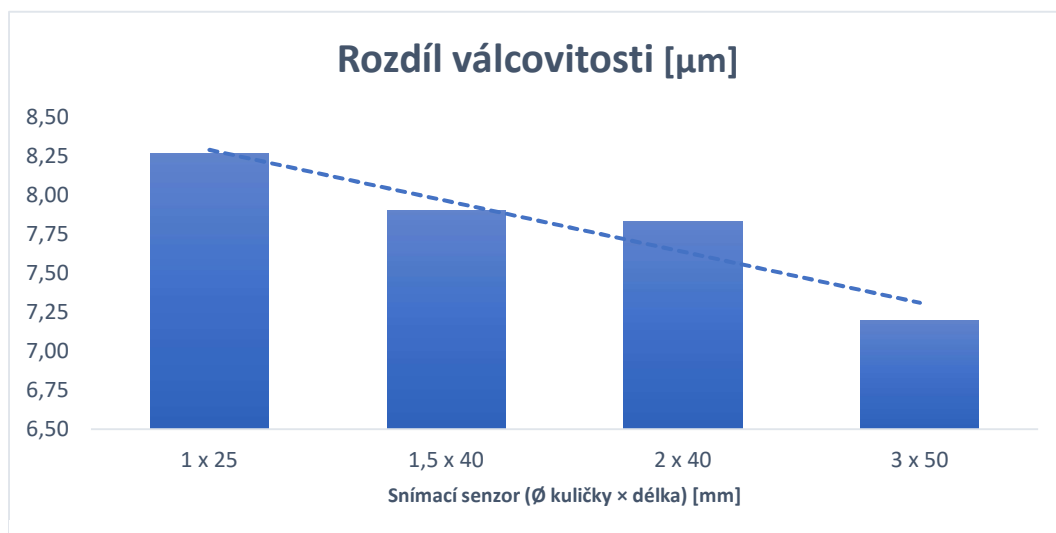
Dalším testovaným snímacím senzorem je $\varnothing 1,5 \times 40$ mm, jehož výsledky zobrazuje žlutá spojnice. Celá tato spojnice (s výjimkou posledního bodu) se jeví lehce posunutá do záporného směru svislé osy čili k zápornějším odchylkám kruhovitosti. Trend mezi hloubkou 14 mm a 18,5 mm opět poukazuje na zvýšenou nestabilitu a zde i nepřesnost.

Poslední dva snímací senzory, $\varnothing 2 \times 40$ mm a $\varnothing 3 \times 50$ mm, vykazují vzájemně velmi podobné hodnoty, které se téměř kryjí. Po detailnějším zhodnocení je zřejmé, že snímací senzor $\varnothing 3 \times 50$ mm (hnědá spojnice) vykazuje **mírně nižší odchylky** (v řádech setin až desetiny mikrometru) od referencí z kruhoměru **oproti snímacímu senzoru $\varnothing 2 \times 40$ mm (tmavě modrá spojnice)**. Největší rozdíl je pozorovatelný v hloubce měření 6 mm, kde snímací senzor $\varnothing 3 \times 50$ mm vykazuje hodnotu výrazněji bližší referenci z kruhoměru.

Ačkoliv některé odchylky u snímacích senzorů $\varnothing 1 \times 25$ mm a $\varnothing 1,5 \times 40$ mm jsou v určitých řezech nejnižší (hloubka 6 mm a 18,5 mm pro snímací senzor $\varnothing 1 \times 25$ mm a hloubka 10 mm a 14 mm pro snímací senzor $\varnothing 1,5 \times 40$ mm) vykazují tyto senzory (zejm. pak snímací senzor $\varnothing 1 \times 25$ mm) **vyšší nekonzistentnost výsledků**.

Dalším ukazatelem vhodnosti použití daného snímacího senzoru je **rozdíl hodnot válcovitosti otvoru naměřené na kruhoměru a naměřené hodnoceným snímacím senzorem na CMM**.

Porovnání těchto odchylek zobrazuje sloupcový graf – Graf 3.



Graf 3: Rozdíl válcovitosti pro součást s otvorem $\varnothing 6,5$ mm

Tento ukazatel je již jednoznačnější, jelikož rozdíl hodnot naměřené válcovitosti na CMM a té referenční z kruhoměru je pokaždé nižší s použitím „robustnějšího“ snímacího senzoru z porovnávané čtveřice.

4.4.2 Referenční součást s otvorem Ø 10,5 mm

Analogickým způsobem jako v předchozí podkapitole je v této části zobrazeno vyhodnocení dat pro druhou referenční součást s otvorem o průměru 10,5 mm.

V Tab. 7 jsou zobrazeny hodnoty naměřené kruhoměrem *v pořadí od řezu v největší hloubce vrtaného otvoru po řez nejbližše čela součásti*.

KRUHOVITOST [mm]					VÁLCOVITOST [mm]
0,00672	0,00992	0,00992	0,00875	0,01652	0,0347

Tab. 7: Výsledky z kruhoměru (referenční hodnoty pro otvor Ø 10,5 mm)

Dále Tab. 8 pracuje s výsledky měření druhé referenční součásti (otvor Ø 10,5 mm) na CMM.

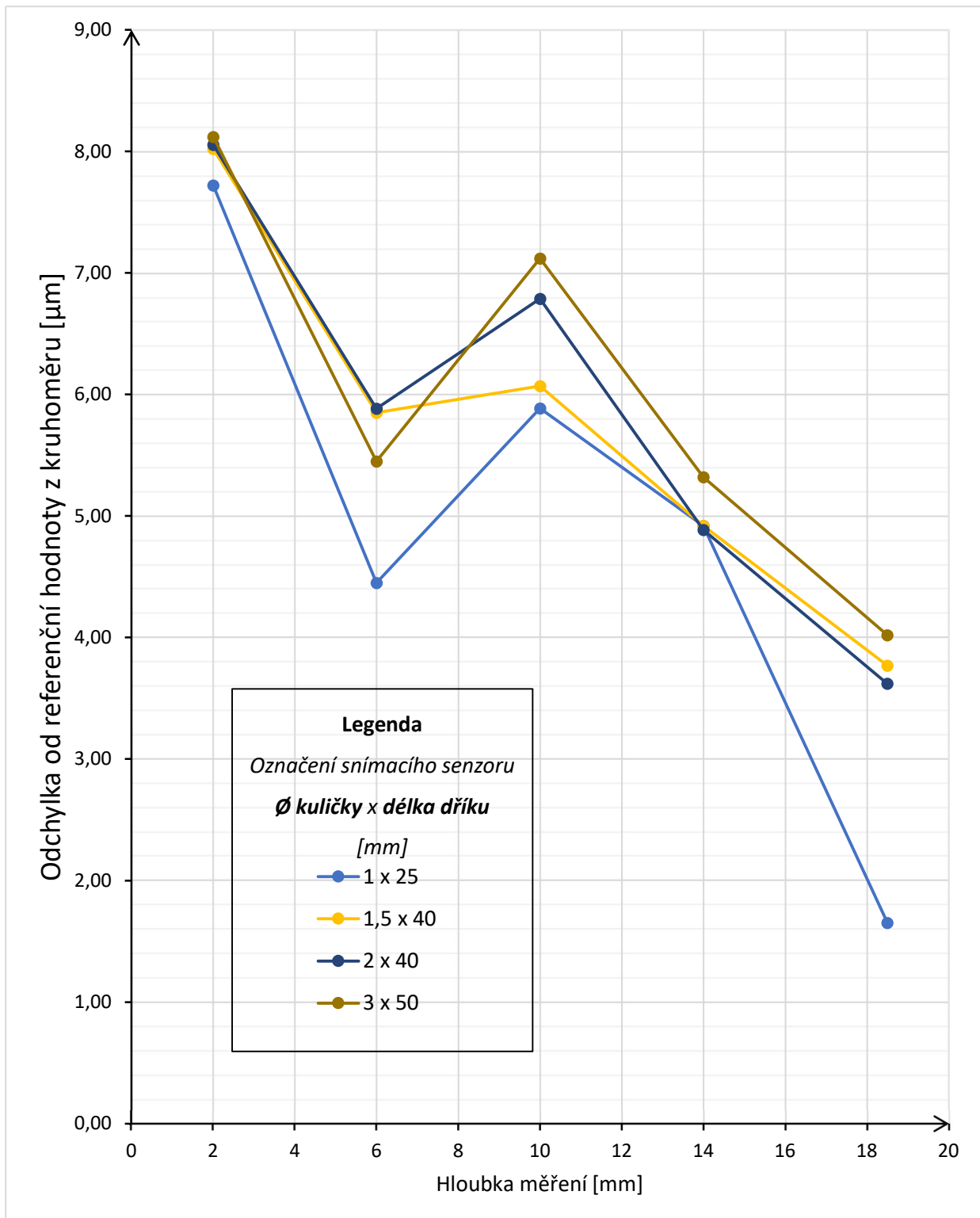
Každý ze zabarvených řádků zobrazuje měření jedním ze čtveřice vybraných snímacích senzorů. V první části tabulky jsou zapsány **průměrné hodnoty kruhovitosti v daných řezech** vypočtené ze tří náměrů (opakovaných měření). V posledním sloupci je pak analogicky vypočtená **průměrná hodnota válcovitosti otvoru**.

	KRUHOVITOST (průměr tří náměrů) [mm]					VÁLCOVITOST [mm]	
	Snímací senzor	Hloubka měření [mm]					
		18,5	14	10	6		2
Otvor Ø 10,5mm	1 mm	0,0051	0,0050	0,0040	0,0043	0,0088	0,0174
	1,5 mm	0,0030	0,0050	0,0039	0,0029	0,0085	0,0174
	2 mm	0,0031	0,0050	0,0031	0,0029	0,0085	0,0174
	3 mm	0,0027	0,0046	0,0028	0,0033	0,0084	0,0169

Tab. 8: Výsledky měření otvoru Ø 10,5 mm na CMM

Rozdíl referenčních hodnot naměřených na kruhoměru (Tab. 7) s hodnotami naměřenými na CMM (Tab. 8) bude stejně jako u předchozí referenční součásti tvořit odchylku, která by měla být nejnižší u nevyhodněnějšího snímacího senzoru.

Pro názorné porovnání slouží následující graf – Graf 4.



Graf 4: Zobrazení rozdílů v naměřené kruhovitosti mezi referenčním měřením na kruhoměru a měřením jednotlivými snímacími senzory (pro součást s otvorem \varnothing 10,5 mm)

Svislá osa popisuje **velikost rozdílu** mezi kruhovitostí z kruhoměru (referenční) a kruhovitostí měřenou daným snímacím senzorem. Vodorovná osa je zobrazením hloubky měření od čela součásti.

Graf tentokrát zobrazuje snímací senzor s \varnothing kuličky 1 mm a délkou 25 mm (světle modrá spojnice) jako **v podstatě nejpřesnější**, jelikož téměř ve všech řezech (s výjimkou řezu v hloubce 14 mm) byla pomocí tohoto senzoru naměřena hodnota kruhovitosti nejbližší hodnotě z kruhoměru.

Snímací senzor $\varnothing 1,5 \times 40$ mm jehož výsledky zobrazuje žlutá spojnice je již méně přesný, a to zejména v řezech v hloubce 6 mm a 18,5 mm. Oproti snímacím senzorům $\varnothing 2 \times 40$ mm si však udržuje vyšší přesnost s výjimkou řezů v hloubkách 14 mm a 18,5 mm, kde je však rozdíl naměřených hodnot velmi malý. Větší rozdíl je pak viditelný v porovnání se snímacím senzorem $\varnothing 3 \times 50$ mm kde je snímací senzor $\varnothing 1,5 \times 40$ mm také přesnější s výjimkou řezu v hloubce 6 mm.

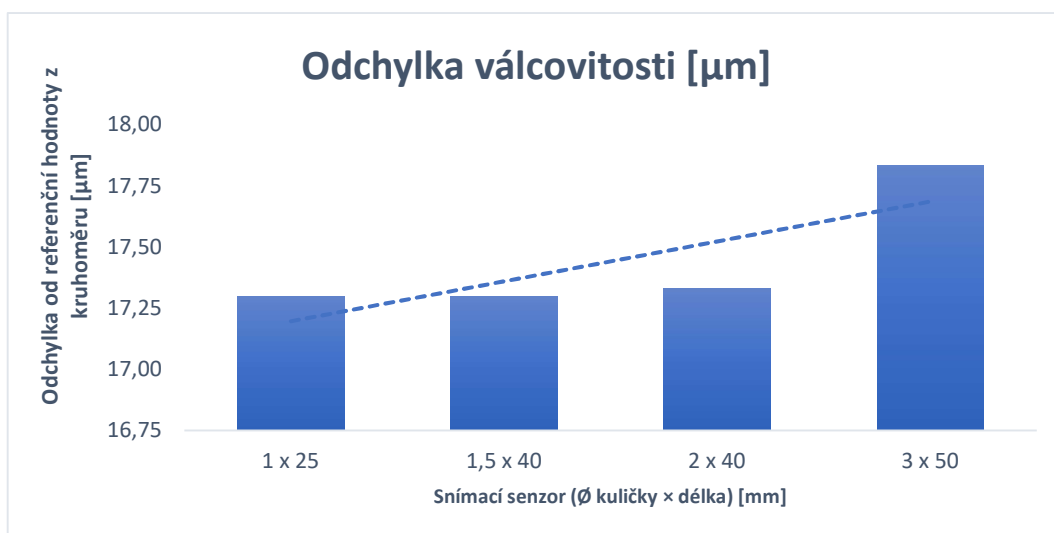
Snímací senzor $\varnothing 2 \times 40$ mm svými naměřenými hodnotami kolísá mezi přesností snímacího senzoru $\varnothing 1,5 \times 40$ mm a $\varnothing 3 \times 50$ mm, což je zřejmé z předchozího popisu snímacího senzoru $\varnothing 1,5 \times 40$ mm.

Poslední ze čtveřice snímacích senzorů $\varnothing 3 \times 50$ mm zaznamenal (s výjimkou řezu v hloubce 6mm) v porovnání s ostatními senzory **nejhorší výsledky**. Což se zdá být trochu paradoxní, jelikož by se v případě druhé referenční součásti s větším otvorem dalo předpokládat, že bude tento snímací senzor ještě přesnější, než tomu bylo u předchozí 1. referenční součásti s menším otvorem.

Přestože lze u snímacího senzoru $\varnothing 1 \times 25$ mm znovu pozorovat **jistou nekonzistentnost** a výraznější odchylování se od naměřených hodnot ostatních snímacích senzorů, tak jsou tyto odchylky v případě měření druhé referenční součásti vždy směrem blíže k hodnotám naměřeným na kruhoměru a snímací senzor tak vychází z hlediska tohoto měření jako **nejvíce přesný**.

Druhým ukazatelem vhodnosti použití daného snímacího senzoru je **rozdíl hodnot válcovitosti otvoru naměřené na kruhoměru a naměřené hodnoceným snímacím senzorem na CMM**.

Porovnání těchto odchylek zobrazuje následující graf – Graf 5.



Graf 5: Rozdíl válcovitosti pro součást s otvorem $\varnothing 10,5$ mm

Tento ukazatel jen potvrzuje výraznější nepřesnost snímacího senzoru $\varnothing 3 \times 50$ mm při měření druhé referenční součásti. **Zbylé tři** snímací senzory vykresluje jako **podobně přesné**.

4.5 Celkové zhodnocení výsledků experimentu

V první řadě je třeba zmínit **několik nedostatků který provedený experiment má**, tak aby bylo možno se jim v případě návaznosti na tuto práci vyvarovat a vytvořit tak celkově hodnotnější experimentální vyhodnocení.

Prvním nedostatkem je omezenost dat, jelikož bylo zvoleno kontaktní měření izolovaných bodů namísto dnes progresivnějšího skenování s výrazně větším záznamem měřených bodů.

Další prvkem vnášející nejistotu do interpretace výsledků je (zejm. pak v případě druhé měřené součásti) horší překrytí řezů měřených na CMM a na kruhoměru. To je způsobeno náročnějším nastavením přesné hloubky měření na kruhoměru. V experimentu pak byla např. pro vyhodnocení řezu měřeného na CMM v hloubce 10 mm a 14 mm použita stejná referenční hodnota kruhovitosti. Tato hodnota byla naměřena na kruhoměru v hloubce přibližně 12,2 mm (viz. přílohy).

Posledním nedostatkem, který je důležité zmínit je použití filtru výsledků na kruhoměru (1-15 pro referenční součást s otvorem o průměru 6,5 mm a 1-50 pro referenční součást s otvorem o průměru 10,5 mm). Tento filtr následně nebyl využit při měření na CMM.

Při vědomí výše zmíněných nejistot lze data určitým způsobem celkově zhodnotit. Toto hodnocení snímacích senzorů je shrnuto v následujících bodech.

1. Snímací senzory na krajích vybraného vzorku (**$\varnothing 1 \times 25 \text{ mm}$ a $\varnothing 3 \times 50 \text{ mm}$**) vykazují při zhodnocení experimentálního měření jako celku **výraznější výkyvy ve výsledné přesnosti**.
2. V rámci optimální volby vychází výhodněji snímací senzor **$\varnothing 2 \times 40 \text{ mm}$** případně pak **$\varnothing 1,5 \times 40 \text{ mm}$** z hlediska vyšší konzistentnosti vzniklých odchylek.
3. S přihlédnutím ke grafům zobrazeným v kapitole 4.4 lze považovat 1. referenční součást s menším otvorem ($\varnothing 6,5 \text{ mm}$) za **více problematickou** z hlediska výkyvů nejvíce viditelných na spojnicovém grafu 2. Tento jev může být způsoben **stopou nástroje** (vrtáku) jejíž tvar (šroubovice) byl dobře zachycen měřením na kruhoměru (viz. příloha). Zde je možno hledat příčinu proč snímací senzor **$\varnothing 3 \times 50 \text{ mm}$ u této součásti dosáhl přesnějších výsledků než snímací senzory s menším průměrem kuličky**. V tomto případě mohl **větší průměr kuličky odfiltrovat stopu nástroje** (viz. kap. 3.3.2, Obr. 26).
4. **Maximální rozdíly** mezi porovnávanými hodnotami kruhovitosti u jednotlivých snímacích senzorů **nepřesahují $2,5 \mu\text{m}$** . Více jak polovinu této chyby lze přisoudit maximální přípustné chybě daného CMM, která je dána výrobcem ($1,6 + L/350 \mu\text{m}$). Z toho vyplývá, že pro běžnou průmyslovou praxi lze tento rozdíl mezi snímacími senzory považovat za téměř zanedbatelný.

5 Závěr

Celá práce cílí na nalezení určitých souvislostí mezi výslednou nejistotou/chybou měření problematických hlubokých otvorů v závislosti na zvoleném snímacím senzoru, zejména pak na jeho tuhosti a velikosti kuličky.

Rešerší současných technologických možností v oblasti snímacích senzorů, jednotlivých ovlivňujících faktorů snímacího senzoru a možných problémů při procesu měření byl vytvořen teoretický základ pro experimentální část práce.

V rámci přípravy experimentu byly na pracovišti RTI vyrobeny dvě referenční součásti s hlubokými vrtanými otvory dvou různých průměrů, které byly změřeny na vysoce přesném kruhoměru. Naměřená data z kruhoměru pak posloužila jako referenční hodnota pro testování přesnosti snímacích senzorů na CMM.

Byl vybrán vzorek čtyř snímacích senzorů, kde se volba konkrétních zástupců opírala o empirický vzorec (viz. kap. 4.1.4), který na základě průměru měřeného otvoru doporučí maximální průměr kuličky snímacího senzoru. Snímací senzory pro experiment byly zvoleny jak v doporučených mezích dle vzorce, tak i mimo tyto hodnoty, aby se otestovaly i velikosti kuličky, které tento vzorec nespĺňují.

Experimentální měření na CMM bylo provedeno dle strategie popsané v kapitole 4.3 a výstup byl pak následně zpracován a zhodnocen v kapitolách 4.4 a 4.5.

Bylo nastíněno, že ze samotného experimentu nelze vyvodit jednoznačný výsledek, vybrat jednoho ze čtyř testovaných zástupců a prohlásit jej za nejlepší možnost pro měření podobných otvorů jako v experimentu. Jakýkoliv pokus o to by zbytečně vedl ke zkreslení. Zmíněna byla pouze vyšší pozorovaná nekonzistentnost výsledků zejm. u nejméně tuhého snímacího senzoru a relativní stabilita „středně tuhých“ snímacích senzorů z testovaného vzorku, které splňují zmiňovaný empirický vzorec. Rozdíly naměřených hodnot mezi jednotlivými snímacími senzory pak nepřesáhly 2,5 μm , což ukazuje na velmi dobrou zaměnitelnost těchto senzorů.

Výstup z experimentální části je z důvodu zmíněné nejednoznačnosti více vhodný jako vstupní základ pro další, detailnější a rozsáhlejší experimentální práci.

V následující příloze jsou vloženy použité výstupy experimentálního měření na jednotlivých přístrojích – kruhoměru *Taylor Hobson Talyrond 585 Lt* a CMM *Carl Zeiss PRISMO 7 navigator*.

Citovaná literatura

- [1] Ing. Dušan Cibulka, „Let Kunovice, Evektor Kunovice, Altech Uh. hradiště, škoda MB - nástrojárna, nástrojárna Hoffmann“, 12. květen 2024.
- [2] „Parts of CMM“, www.keyence.co.in. [Online]. Dostupné z: <https://www.keyence.co.in/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp>
- [3] „the-history-of-coordinate-measuring-machines-cmmxyz“, www.cmmxyz.com. Viděno: 31. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.cmmxyz.com/blog/the-history-of-coordinate-measuring-machines-cmmxyz/>
- [4] Š. Tichá, *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE*, 2004. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [5] „Renishaw Styli“, www.thome-precision.com. Viděno: 8. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.thome-precision.com/Renishaw-styli.html#Tastereinsatztypen>
- [6] „ZEISS snímače pro souřadnicové měřicí stroje“, zeiss.cz. Viděno: 23. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/prislusenstvi/stylus-systems/styli.html>
- [7] „Precision styli“. Renishaw plc. Viděno: 5. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/7bf72a983e954195a8ca36745739ee32.pdf>
- [8] „white_paper_a_guide_to_stylus_selection“. Renishaw plc. Viděno: 20. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/cz/details/white-paper-at-the-sharp-end-a-guide-to-stylus-selection--124617>
- [9] D. Flack, „Measurement Good Practise Guide No. 41“. Viděno: 2. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.npl.co.uk/gpgs/cmm-measurement-strategies>
- [10] „Renishaw touch-trigger probing technology“, Viděno: 24. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/media/ppt/en/d71600a754a742b886799f56e03e514c.pptx>
- [11] J. Park, K. Kwon, a N. Cho, „Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor“, *Meas. Sci. Technol.*, roč. 17, č. 9, s. 2380–2386, zář. 2006, doi: 10.1088/0957-0233/17/9/002.
- [12] „the-probing-system-of-tactile-cmm-important-aspects-to-consider-for-probing-system“, wasresearch.com. Viděno: 19. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.wasresearch.com/the-probing-system-of-tactile-cmm-important-aspects-to-consider-for-probing-system/>
- [13] „Zeiss PRISMO navigator specifikations“. Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH. Viděno: 9. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.asset-trade.de/sites/default/files/media/document/asset-trade-zeiss-prismo-navigator-brochure-english.pdf>
- [14] „TALYROND® 565/585 PRO“. Taylor Hobson Ltd. Viděno: 22. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/product-downloads/high-precision-roundness/talyrond-565-585-h-pro_lowres_en.pdf?la=en&revision=1a5fe5a5-abb1-4b25-82d8-6cfaf0cbdbf9
- [15] J. Čása, „Analýza procesu měření tvarových prvků na 3D měřicím stroji“, Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň. Viděno: 8. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/52857/1/Bakalarska%20prace.pdf>

6 Příloha