

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenská technologie - technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Přesnost obrobkové sondy v závislosti na pracovním poloze
v pracovním prostoru obráběcího centra**

Autor: Vojtěch Kryštof
Vedoucí práce: Ing. Dana Kubátová Ph.D.
Konzultant: Ing. Jan Hnátík Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch KRYŠTOF**
Osobní číslo: **S20B0308P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Přesnost obrobkové sondy v závislosti na poloze v pracovním prostoru obráběcího centra**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod a definice cílů
2. Rešerše současného stavu
3. Návrh experimentu
4. Vyhodnocení provedeného experimentu
5. Zhodnocení poznatků a závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- MÁDL., Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. Technologie obrábění: 1. díl. Praha: ČVUT, 2000, 79 s. ISBN 80-010-2091-6.
- ZAHRADNÍK, Jiří, Luděk PISKAČ, Václav PFEIFER a Josef FORMÁNEK. Elektrická výzbroj obráběcích strojů. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006, 183 s. ISBN 80-704-3494-5.
- Staněk J., Němejc J.: Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací ZČU, Plzeň: 2005.
- ŠTULPA, Miloslav. CNC: programování obráběcích strojů. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2015. 240 stran. ISBN 978-80-247-5269-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, 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

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | |
|-------------------------|---|-------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Kryštof | Jméno Vojtěch | |
| STUDIJNÍ PROGRAM | B0715A270013 Strojní inženýrství | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubátová Ph.D. | Jméno Dana | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST – KKS | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Přesnost obrobkové sondy v závislosti na poloze v pracovním prostoru obráběcího centra | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KKS | ROK ODEVZD. | 2021 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| CELKEM | 43 | TEXTOVÁ ČÁST | 43 | GRAFICKÁ ČÁST | 0 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

| | |
|--|---|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Bakalářská práce obsahuje průzkum současných možností obrobkových sond, experiment měření za pomoci kalibračních trnů, koncových měrek a obrobkových sond. Vyhodnocení naměřených hodnot za pomoci tabulek a softwaru Excel a jejich vizualizace za pomoci vytvoření makety stolu v softwaru AUTODESK INVENTOR a 3D grafu v softwaru Excel. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | sondy, CNC, přesnost, metrologie, vizualizace, měrka, trn, stůl |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | | |
|--------------------------|--|-----------------|----------------------------|
| AUTHOR | Surname Kryštof | Name Vojtěch | |
| STUDY PROGRAMME | B0715A270013 Mechanical Engineering | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubátová Ph.D. | Name Dana | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KKS | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Accuracy of CMM probe according to its position inside the workplace of the machining centre | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KKS | SUBMITTED IN | 2021 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| TOTALLY | 43 | TEXT PART | 43 | GRAPHICAL PART | 0 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | This thesis disserts on research of actual possibilities in machine tool probes offers, experiment of measurement with calibration plugs, gauge blocks and machine tool probes. Interpretation of measured aberrations via MICROSOFT EXCEL tables and visualization of measured points via AUTODESK INVENTOR. |
| KEY WORDS | probes, CNC, accuracy, metrology, visualization, blocks, plug, table |

Obsah

| | |
|---|----|
| Zadání BP | 2 |
| Seznam obrázků | 7 |
| Seznam tabulek | 9 |
| Seznam zkratk | 10 |
| 1 Úvod a definice cílů | 11 |
| 1.1 Cíl práce..... | 11 |
| 2 Rešerše současného stavu..... | 12 |
| 2.1 Oblast využití sond | 12 |
| 2.2 Princip dotykových sond | 12 |
| 2.3 Dělení sond dle principu měření:..... | 13 |
| 2.3.1 Princip Kinematických sond | 13 |
| 2.3.2 Princip Tenzometrických sond..... | 14 |
| 2.3.3 Princip bezkontaktních sond | 15 |
| 2.4 Systémy přenosu signálu | 15 |
| 2.4.1 Kabelový přenos signálu | 15 |
| 2.4.2 Optické systémy | 16 |
| 2.4.3 Indukční přenos signálu | 16 |
| 2.4.4 Radiový přenos signálu | 17 |
| 2.5 Doteky | 18 |
| 2.5.1 Typy doteků..... | 18 |
| 2.5.2 Materiály kuličky doteku | 19 |
| 2.5.3 Materiály dřívku doteku | 20 |
| 2.6 Kalibrace sond | 20 |
| 2.7 Postup kontroly strojů..... | 22 |
| 3 Návrh Experimentu | 24 |
| 3.1 Průběh experimentu | 24 |
| 4 Vyhodnocení provedeného experimentu..... | 26 |
| 4.1 DMG MORI DMU 40eVo linear-vyhodnocení naměřených dat..... | 26 |
| 4.2 MAS MCU 450V-5x-vyhodnocení naměřených dat..... | 31 |
| 4.3 DMG MORI DMU 65 mono BLOCK-vyhodnocení naměřených dat | 35 |
| 5 Zhodnocení poznatků a závěr..... | 41 |
| Seznam použitých zdrojů | 42 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 2.1: Části dotykové měřicí sondy [2] | 12 |
| Obr. 2.2: Nájezd, dotyk a odjezd kinematické sondy [3] | 13 |
| Obr. 2.3: Detail kinematického mechanismu [12] | 14 |
| Obr. 2.4: Detail tenzometrického mechanismu [12] | 14 |
| Obr. 2.5: Příklad bezdotykové sondy- Renishaw NC 4 [12]..... | 15 |
| Obr. 2.6: Kabelový přenos signálu [6] | 16 |
| Obr. 2.7: Optický přenos signálu [6]..... | 16 |
| Obr. 2.8: Indukční přenos signálu [4] | 17 |
| Obr. 2.9: Rádiový přenos signálu [4] | 17 |
| Obr. 2.10: Popis doteku sondy [5]..... | 18 |
| Obr. 2.11: Rubínová kulička doteku | 19 |
| Obr. 2.12: Kulička doteku z nitridu křemíku | 19 |
| Obr. 2.13: Kulička doteku z oxidu zirkoničitého | 19 |
| Obr. 2.14: Kalibrace sondy s dotykovým elementem [11] | 21 |
| Obr. 2.15: Snímací hlava REVO Renscan [5]..... | 21 |
| Obr. 2.16: Měření vodorovnosti ustavení stroje pomocí libely [14]..... | 22 |
| Obr. 2.17: Sada Renishaw axi-set [17]..... | 23 |
| Obr. 4.1: Stůl stroje DMG MORI DMU 40eVo linear spolu s kalibračním trnem a koncovou měrkou..... | 27 |
| Obr. 4.2: Maketa stolu stroje DMG MORI DMU 40eVo linear s proměřenými souřadnicemi | 27 |
| Obr. 4.3: Kalibrační trn HSK A63xØ8x80 | 28 |
| Obr. 4.4: Graf průměrných hodnot z měření trnem na stroje DMG MORI DMU 40eVo linear trnem..... | 30 |
| Obr. 4.5: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 40eVo linear sondou | 31 |
| Obr. 4.6: Stůl stroje MAS MCU 450V-5x | 32 |
| Obr. 4.7: Maketa stolu stroje MAS MCU 450V-5x s proměřenými souřadnicemi | 32 |
| Obr. 4.8: Graf průměrných hodnot z měření na stroji MAS MCU 450V-5x trnem..... | 34 |
| Obr. 4.9: graf průměrných hodnot z měření na stroji MAS MCU 450V-5x sondou | 35 |
| Obr. 4.10: Stůl stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK | 36 |
| Obr. 4.11: Maketa stolu stroje DMG MORI DMU 40 eVo linear s proměřenými souřadnicemi | 37 |
| Obr. 4.12: Kalibrační trn HSK A63xØ12x80x110 | 37 |
| Obr. 4.13: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 65 mono BLOCK trnem..... | 38 |

Obr. 4.14: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 65 mono BLOCK
sondou 39

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 3.1: Tabulka měřidel použitých u jednotlivých strojů | 24 |
| Tab. 4.1 Charakteristiky stroje DMG MORI DMU 40eVo linear | 26 |
| Tab. 4.2: Souřadnice měřených bodů u stolu stroje DMG MORI DMU 40eVo linear | 26 |
| Tab. 4.3: Kontrola referenčního bodu v osách XY | 28 |
| Tab. 4.4: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | 29 |
| Tab. 4.5: Tabulka průměrných hodnot měření trnem, stroj DMG MORI DMU 40eVo linear | 29 |
| Tab. 4.6: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí dotykové sondy | 30 |
| Tab. 4.7: Charakteristiky stroje MAS MCU 450V-5x | 31 |
| Tab. 4.8: Souřadnice měřených bodů u stolu stroje MAS MCU 450V-5x | 32 |
| Tab. 4.9: Kontrola referenčního bodu v osách XY | 33 |
| Tab. 4.10: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | 33 |
| Tab. 4.11: Průměrné naměřené hodnoty použité k vytvoření 3D grafu | 33 |
| Tab. 4.12: Měření nulové hodnoty v ose za pomocí dotykové sondy | 34 |
| Tab. 4.13: Charakteristiky stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK | 35 |
| Tab. 4.14 Souřadnice měřených bodů u stolu stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK .. | 36 |
| Tab. 4.15: Kontrola referenčního bodu v osách XY | 36 |
| Tab. 4.16: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | 38 |
| Tab. 4.17: Průměrné naměřené hodnoty použité k vytvoření 3D grafu | 38 |
| Tab. 4.18: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí dotykové sondy | 39 |

Seznam zkratk

| | |
|---------|---|
| RTI | Regionální technologický institut |
| ZČU | Západočeská univerzita |
| mm | Jednotka délky, milimetr |
| MAS | Název společnosti |
| DMG | Název společnosti |
| CNC | Počítačem řízený obráběcí stroj |
| 3D graf | Graf zakreslen ve třech osách souřadnic |

1 Úvod a definice cílů

Metrologie v obecném významu je vědní a technická disciplína, která zahrnuje všechny poznatky a činnosti v oblasti měření. Jako integrální součást výrobního procesu je jedním z objektivních činitelů při hodnocení kvality výroby. Cílem metrologie je zabezpečení jednotnosti a správnosti měření v celosvětovém měřítku, tedy i v České republice. Význam metrologie stále roste v souladu se zvyšováním požadavků na jakost, s rozvojem vědy a techniky, zaváděním nových dokonalejších technologií výroby, které vyžadují větší přesnost měření ve všech oblastech metrologie. S ohledem na neustále se zpřesňující výrobu a důraz kladený na rychlost výroby je kladen i velký nárok právě na provádění měření přímo ve výrobním stroji. [18], [12]

Na základě požadavků neustále se zpřesňující výroby roste i požadavek znát co nejpodrobněji informace o kinematice výrobního stroje na kterém se výroba vykonává. Pro tyto účely bývají výrobní stroje osazeny obrobkovými sondami. Za pomoci těchto sond lze rychle a efektivně zjistit (s přesností garantovanou výrobcem sond) přesné rozměry obrobků, informace o nástroji, kvalitu povrchu a další nepřeberné množství informací. Obrobkové sondy jsou nedílnou součástí současné výroby ve strojírenství a neustále se jejich technologie zdokonaluje.

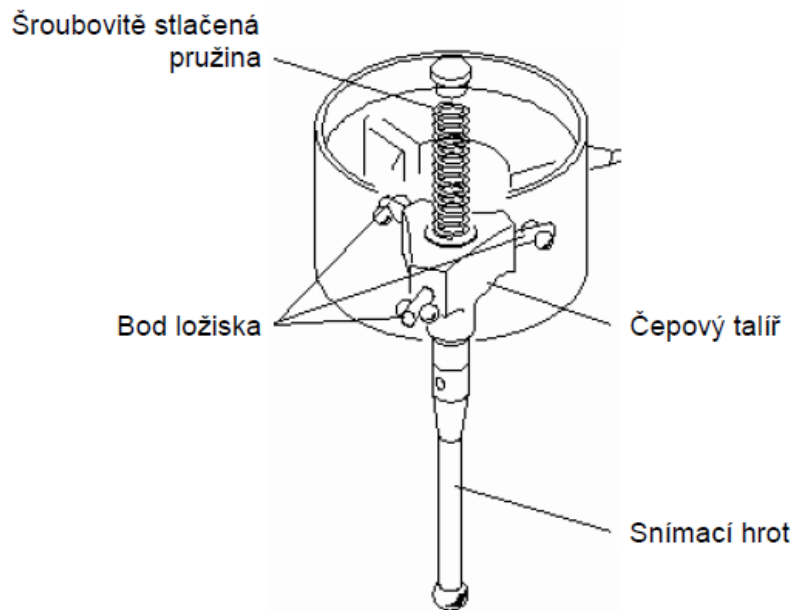
1.1 Cíl práce

Cílem práce je provedení porovnání přesnosti obrobkové sondy s ohledem na pozici vůči pracovnímu prostoru stroje, kde se provádí měření a probíhá výroba. Experiment byl prováděn na hale ZČU a detašovaném pracovišti za účelem zpřesnění výroby na daných strojích na základě měřených odchylek v ose Z. Na základě naměřených dat a jejich vyhodnocení získá obsluha stroje představu o skutečném tvaru výrobního stolu, jeho naklopení v ose Z a tím dojde i ke zvýšení produktivity a přesnosti výroby a dále také ke zlepšení po stránce ekonomické.

2 Rešerše současného stavu

První spínací dotykovou sondu se podařilo vynalézt v roce 1973. Způsobilo to revoluci v možnostech měření a umožnilo posunout standard měření a kontroly. Od poloviny 70. let se tato technologie uplatňuje i v prostředí obráběcích strojů. [2]

Obrobková sonda (Obr. 2.1), která byla představena v roce 1975, je přístroj mechanického typu obsahující mechanismus zajišťující přesnou pozici sondy za účelem jejího opětovného vrácení do původní polohy. Sondy jsou většinou složeny z těchto částí viz. Obr. 2.1 [2]



Obr. 2.1: Části dotykové měřicí sondy [2]

2.1 Oblast využití sond

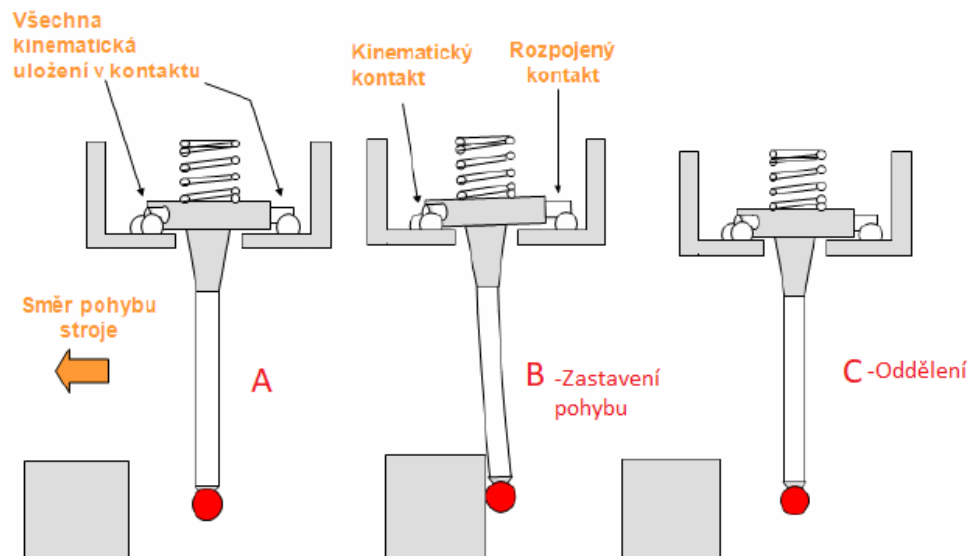
V současné době se technologie měření pomocí sond uplatňuje téměř ve všech oblastech, kde chceme zvýšit produktivitu, kvalitu a přesnost obrábění. Moderní CNC systémy jsou běžně připraveny na propojení s měřicí sondou. Díky tomu můžeme zkrátit měřicí cykly pomocí jejich integrace do procesu obrábění. Nejvíce se dnes využívají v odvětvích leteckého a automobilového průmyslu, komunikace, konstrukce, obráběcích strojů, důlního průmyslu, energetiky, elektroniky, obrany, vzdělávání, sportu, zdravotnictví a jiných. [2]

Nedílnou součástí procesu obrábění je přímé měření obrobku a nástroje přímo na stroji. Měření obrobku provádíme již před samotným obráběním, a to pro kontrolu ustavení obrobku tak, aby byl zajištěn vztah mezi nulovým bodem na obrobku a souřadným systémem stroje. Dále jako vyhodnocení rozměrů surového polotovaru, zda je dostatečný pro obrábění a konečné měření hotového obrobku, u kterého se kontroluje, zda bylo dosaženo požadovaných výrobních přesností. [4]

2.2 Princip dotykových sond

Před měřením je dotek sondy v klidové poloze. Když se zahájí měření, navede se dotek sondy pohybem (Obr. 2.2, část A) stroje tak, aby došlo ke kontaktu s měřeným povrchem. Tím vznikne mezi povrchem obrobku a dotekem tlaková síla, která způsobí pružnou deformaci doteku a tím dojde k vychýlení kinematického mechanismu z klidové polohy

(Obr. 2.2, část B). Při kolizi dojde k rozpojení elektrických kontaktů a vyšle se signál, který zastaví pohyb. Poté upínací hlava se sondou odjede (Obr. 2.2, část C) od měřeného povrchu a celý mechanismus se vrátí do klidové polohy, která je určena a přesně definována dle obrobku, rozměru stroje a nastavení programu. [2]



Obr. 2.2: Nájezd, dotyk a odjezd kinematické sondy [3]

Některé z principů dotyku snímací sondy jsou standardní snímací rutiny, které definují cestu sondy. V případě doteku s povrchem součásti je generován snímací signál, který zaznamenává polohu, kde je dotyk umístěn během rozpojení kontaktu. Data se ukládají v parametrech řídicího systému. Uložená data se používají k výpočtu velikosti nebo polohy prvku obrobku. [2]

V technické praxi se můžeme setkat s několika druhy sond. Každá má své výhody, nevýhody a oblast použití. Na následujících řádcích se práce pokusí provést stručný popis těchto sond.

2.3 Dělení sond dle principu měření:

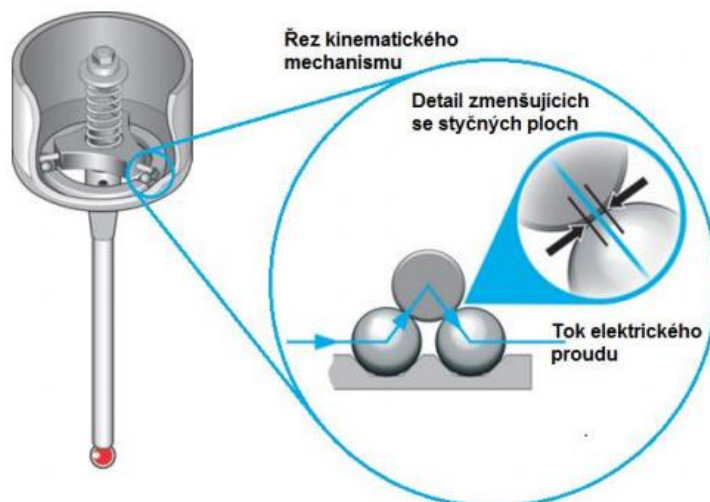
- a) Kinematické
- b) Tenzorové
- c) Bezkontaktní

2.3.1 Princip Kinematických sond

Tři válečky rovnoměrně rozmístěné, namontované na šesti kuličkách z karbidu wolframu, zajišťují šestibodový kontakt v kinematickém uložení (Obr. 2.3). Mezi tyto kontakty patří elektrický obvod. Mechanismus je tlačěn pružinou do kinematického ložiska. To způsobí, že se mechanismus vychýlí, jakmile se sonda vychýlí při kolizi s obrobkem. Po posunutí sondy od obrobku se mechanismus vrátí do své původní polohy s tolerancí 1 μm . [1]

Pod tlakem pružiny se v kinematickém uložení vytvářejí styčné plochy, přes které protéká elektrický proud. Síly v mechanismu sondy způsobují zmenšení některých kontaktních ploch, což zvyšuje elektrický odpor těchto prvků. [1]

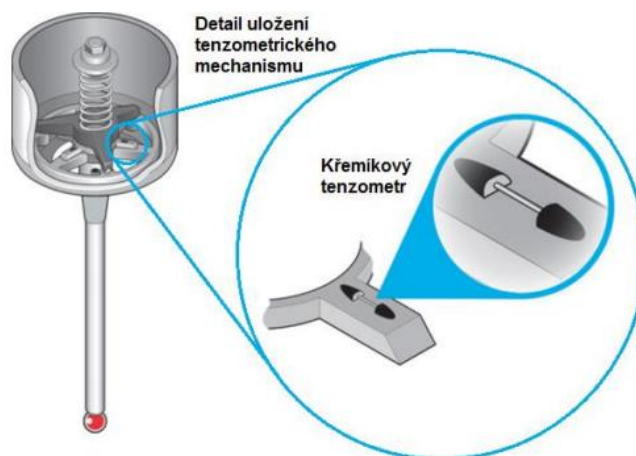
Při kontaktu s obrobkem se výsledná tlaková síla mechanismu měří jako změna elektrického odporu na kontaktní ploše. Když je dosažena nastavená prahová hodnota elektrického odporu, sondy hlásí výstupní signál „otevřený kontakt“.[1]



Obr. 2.3: Detail kinematického mechanismu [12]

2.3.2 Princip Tenzometrických sond

Tenzometrické sondy využívají technologii křemíkových tenzometrů s ultrakompaktní elektronikou. Tenzometry jsou upevněny na žebrech, které drží na konstrukci sondy a zároveň jsou odděleny od kinematického mechanismu (Obr. 2.4). Díky jejich uspořádání jsou schopny snímat všechny síly působící na dotek v jakémkoliv směru. Jakmile se dosáhne krajní hodnoty v určitém směru, vyšle se spínací signál. Potřebné síly jsou zde mnohem menší než síly potřebné k vytvoření signálu u konvenčních sond. Návrat doteku do původní polohy zajišťuje opět kinematický mechanismus, který umožňuje zpětné usazení a předpokládané další měření. [1]



Obr. 2.4: Detail tenzometrického mechanismu [12]

2.3.3 Princip Bezkontaktních sond

Bezkontaktní sondy (Obr. 2.5) se skládají z jednoho nebo více těles. Jednodílné sondy se používají především pro měření zlomení osového nástroje, např. vrtáku, závitníku, výstružníku aj. Dvoudílné sondy nabízejí širší využití. Můžeme s nimi měřit ustavení nástroje a jeho vlastnosti (průměr, profil aj.) „Princip funkce bezkontaktního systému měření nástroje je následující. Laserový paprsek prochází mezi vysílačem a přijímačem. Nástroj se pohybuje kolmo k paprsku a v určitém bodu paprsek přeruší. Přijímač registruje intenzitu záření paprsku a při přerušení detekuje změnu intenzity. Při přerušení je zaznamenána poloha a data jsou využita pro výpočet rozměrů nástroje“. [14]



Obr. 2.5: Příklad bezdotykové sondy Renishaw NC 4 [12]

2.4 Systémy přenosu signálu

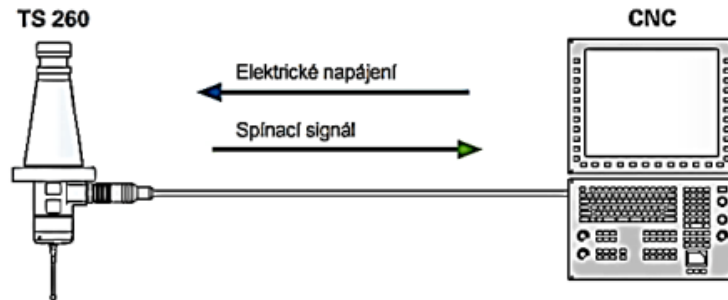
Přenos signálu a jeho další zpracování zajišťuje komunikační modul. Výběr modulu je závislý na typu sondy, druhu stroje a způsobu využití sondy. Většinou se jedná o bezdrátové systémy. Nejčastěji systémy optické nebo rádiové.

Systémy přenosu signálu můžeme rozdělit následovně:

- a) Kabelový přenos signálu
- b) Optické systémy
- c) Indukční přenos signálu
- d) Rádiový přenos signálu

2.4.1 Kabelový přenos signálu

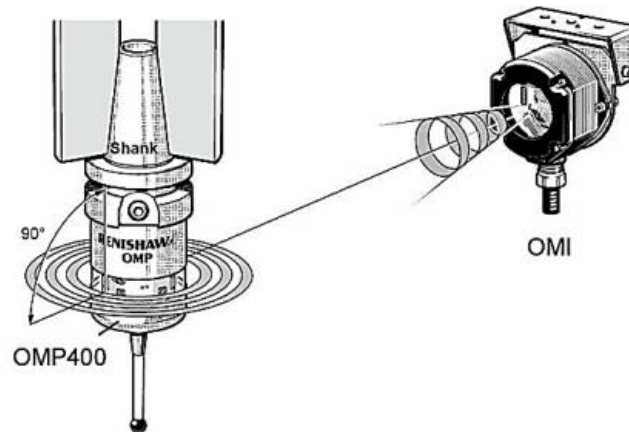
Přenos signálu ze sondy do řídicího systému obráběcího stroje pomocí kabelu (Obr. 2.6) je nejjednodušším i nejlevnějším řešením. Kabel slouží jak k přenosu signálu, tak k napájení. Tento typ komunikace je vhodný pro nástrojové sondy, které jsou pevně spojeny se stolem stroje. Pokud se používají k ručnímu upínání do vřetene stroje, které musí být před upnutím zpevněno polohovou vazbou (stop vřetena), snižuje se přesnost měření a omezuje pohyb sondy v pracovním prostoru stroje. [4]



Obr. 2.6: Kabelový přenos signálu [6]

2.4.2 Optické systémy

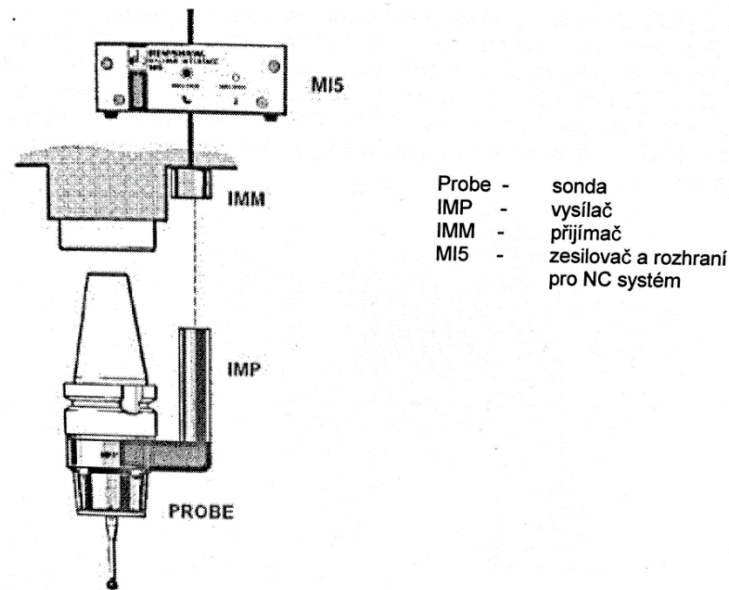
Jedná se o systém, který ke komunikaci využívá infračervenou technologii. Systém se skládá ze sondy a komunikačního modulu (Obr. 2.7). Přenos signálu je zajištěn za pomoci modulovaného infračerveného světla. Vhodný i pro větší vzdálenosti, ale je nutno zajistit viditelnost mezi sondou a přijímačem. [4]



Obr. 2.7: Optický přenos signálu [6]

2.4.3 Indukční přenos signálu

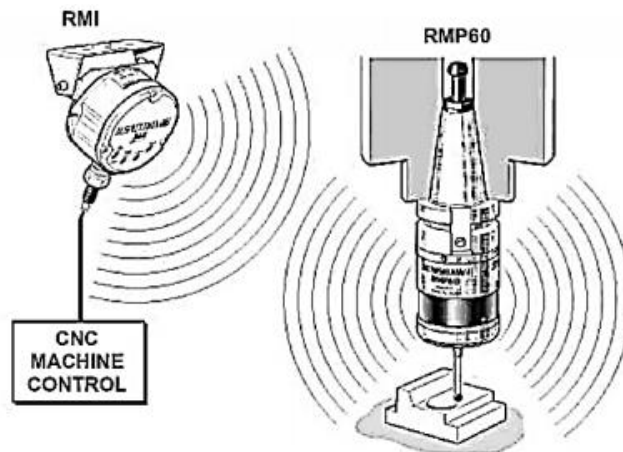
Uskutečňuje se na krátké vzdálenosti do cca 5 mm a v definované poloze vřetena. „Indukční přenos pracuje na principu předání energie přes malou vzduchovou mezeru mezi dvěma indukčními moduly (Obr. 2.8). Typická sonda s indukčním přenosem se skládá ze sondy s induktivním modulem, přijímacího modulu a rozhraní. Induktivní modul namontovaný na dřívku stroje předává signály do přijímacího modulu, který je připevněný na vřetenu stroje. Přijímací modul je připojený na rozhraní, které komunikuje s řídicím systémem“. [14]



Obr. 2.8: Indukční přenos signálu [4]

2.4.4 Rádiový přenos signálu

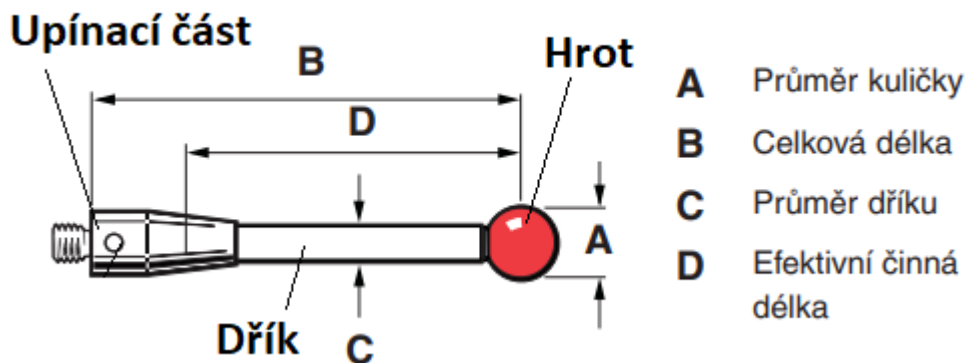
Jedná se o univerzální systém (Obr. 2.9). Není nutné zajistit přímou viditelnost mezi sondou a přijímačem. Např. při používání úhlových frézovacích hlav. K zabezpečení kvalitního a bezproblémového přenosu dat je nutné používat systémy s možností modulace a to v případech, kdy je v okolí daného stroje stejný typ sondy. Renishaw používá u sondy RMP 60 přenosovou frekvenci 2,4 GHz a systém „Frequency Hopping“ díky které elektronika přenosu automaticky vyhledá nejvhodnější kanál v daném pásmu. [6], [10]



Obr. 2.9: Rádiový přenos signálu [4]

2.5 Doteky

Základní části doteků tvoří dřík a kulička doteku (Obr. 2.10). Úspěšné měření do značné míry závisí především na schopnosti doteku sondy dosáhnout k měřenému prvku a na přesnosti zaznamenání bodu kontaktu. Dotek je součástí měřicího systému, který zprostředkovává dotyk mezi komponentou a sondou a spouští mechanismus sondy. Generovaný signál umožňuje záznam souřadnice snímaného bodu. Měřený prvek určuje typ a velikost použitého doteku. Největší pozornost se ovšem stále věnuje co největší tuhosti doteku a kulovitosti hrotu. [5]



Obr. 2.10: Popis doteku sondy [5]

2.5.1 Typy doteků

- **Přímé doteky**

Jedná se o nejpoužívanější typ doteku a zároveň i ten nejjednodušší. Vhodný pro širokou škálu aplikací.

- **Hvězdicové doteky**

Jedná se o několik doteků uchycených na středovém doteku napevno. Toto uspořádání napomáhá měření různých prvků bez nutné výměny doteků. Primárně využíváno na měření povrchů či otvorů, u kterých můžeme dosáhnout přímého kontaktu. [5]

- **Diskové doteky**

Jedná se o doteky, které jsou tvarově řezy velmi kulovitých kuliček. Používají se ke snímání zápchů a drážek v otvorech, u kterých není možné využít hvězdicového doteku. Měření je náročné na úhlové nastavení, a to především kvůli metodice měření, kterou je snímání velmi malé plochy kontaktu. Některé diskové doteky jsou vybaveny malým válečkem se zaobleným koncem, který zajišťuje kalibraci. [5]

- **Válcové doteky**

Jedná se o doteky, které se využívají především pro měření lisovaných dílců, otvorů v plechu a tenkých obrobků. Dále mají také využití při měření závitů a lokalizaci středů závitových otvorů. [5]

- **Doteky s hrotem**

Jedná se o doteky používané především pro lokalizaci malých otvorů či stanovení vztažného bodu a snímání prvků. [5]

- **Půlkulové doteky**

Jedná se o doteky široce využívané při snímání hlubokých otvorů v osách X, Y, Z a to především, pokud je vyžadován vztažný bod jedné kuličky. Velké plus je, že větší průměr polokoule neguje vliv drsnosti povrchu na přesnost snímání. [5]

2.5.2 Materiály kuličky doteku

- **Rubín**

Jedná se o materiál, který vyhovuje většině měřicím požadavkům a průmyslovému využití. Rubín je jeden z nejtvrdších materiálů (Tvrdost 9) a jeho syntetická podoba se získává v podobě oxidu hlinitého s 99% čistotou v podobě krystalů pomocí Verneuilovy metody při teplotě 2000 °C. [5]

Rubínové kuličky (Obr. 2.11) se vyznačují mimořádně hladkým povrchem, velmi dobrou pevností v tlaku a vysokou odolností proti mechanickému poškození. Nedoporučuje se jej používat na hliníkové materiály kvůli adhezivnímu otěru, kdy dochází k usazování hliníku na povrchu kuličky a dále také při skenování litinových povrchů kvůli vyššímu opotřebení otěrem. [5]



Obr. 2.11: Rubínová kulička doteku

- **Nitrid křemíku**

U kuličky doteku z nitridu křemíku (Obr. 2.12) se jedná o další velmi tvrdý materiál vlastnostmi velmi blízký rubínu. Vysoké jakosti povrchu se dosahuje leštěním. Výhodou tohoto materiálu oproti rubínu je, že u něj nedochází ke vzájemnému působení s hliníkem a tím pádem nedochází k otěru adhezí. Jeho nevýhodou je ale vysoká míra opotřebení otěrem s ocelovými povrchy, proto je preferovaným materiálem hlavně pro hliníkové povrchy. [5]



Obr. 2.12: Kulička doteku z nitridu křemíku

- **Zirkonium**

Kulička doteku z oxidu zirkoničitého (Obr. 2.13) je keramický materiál, který se vykazuje vysokou tvrdostí a schopností opotřebení se velmi blíží rubínu. Tento materiál se preferuje u aplikací litinových povrchů.



Obr. 2.13: Kulička doteku z oxidu zirkoničitého

2.5.3 Materiály dříku doteku

- **Ocel**

Nemagnetická nerezová ocel je nejrozšířenější materiál dříku většinou pro hroty s průměrem 2 mm a vyšší a délkou do 30 mm kvůli zachování optimální tuhosti a hmotnosti. Dále je také nutné zvolit vhodný průměr kuličky, aby nedocházelo ke snížení tuhosti vlivem závitového spoje.

- **Karbid wolframu**

Dříky z karbidu wolframu se nejvíce využívají u průměrů kuličky pod 1 mm a délky do 50mm. Vyznačují se vysokou tuhostí, ale také hmotností a tím i nebezpečím snížení tuhosti v místě spoje.

- **Keramika**

Materiál dříku z keramiky vykazuje tuhost blízkou tuhosti dříku z ocelí a vyznačuje se rapidně nižší hmotností než dříky z karbidu wolframu. Jako sekundární funkce je i ochrana sondy při havárii, protože dojde k roztržení dříku.

- **Uhlíková vlákna**

Materiál dříku z uhlíkových vláken je specifický nízkou hmotností (zhruba o 20% nižší hmotnost než dřík karbidu wolframu) a využívá se tedy hlavně pro dlouhé dotyky.

- **Hliník**

Materiál hliníkového dříku se vyznačuje nízkou hmotností, ale je náročný na teplotní podmínky kvůli vysoké teplotní roztažnosti, a proto je doporučováno jej používat hlavně v klimatizovaných prostorech.

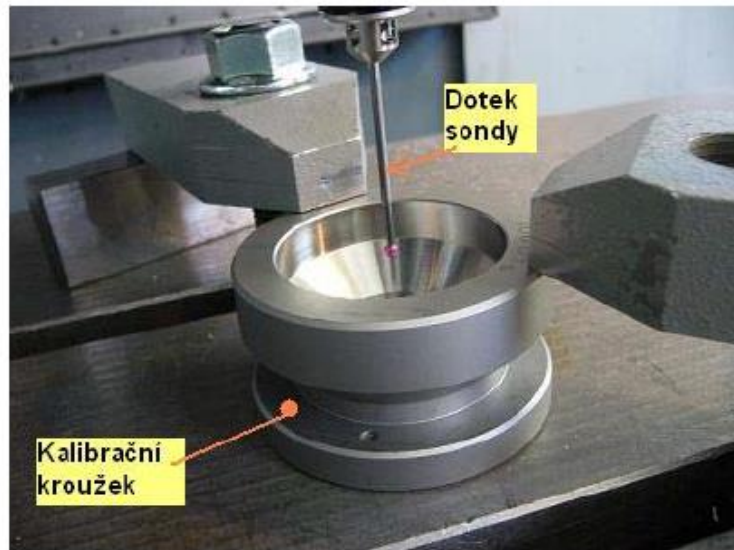
- **Titan**

Tento materiál je v porovnání s hliníkem velmi teplotně stálý a vyznačuje se také vysokou tuhostí v ohybu a nízkou hmotností. Proto je hojně využíván pro výrobu prodloužení. [5]

2.6 Kalibrace sond

Kalibrace sondy se provádí při instalaci snímací hlavy nebo při výměně dotykového elementu.

„V průběhu kalibrace je dotkový element umístěn dovnitř kalibračního kroužku (Obr. 2.14). Tento kroužek je velmi přesně obroben a kalibrován. Přesná hodnota průměru kroužku je pak vyjiskřena na jeho povrchu a zadává se do řídicího systému stroje. Po zavedení dotykového elementu dovnitř kroužku proběhne automatický cyklus, kdy dochází ke kontaktu kuličky s povrchem kroužku. Po dokončení cyklu je celé snímací zařízení pootočeno se vřetenem o 180° a celý cyklus proběhne znovu. Tím by měl být vyřešen i problém nesouososti snímací hlavy s osou vřeteníku“. [11]



Obr. 2.14: Kalibrace sondy s dotykovým elementem [11]

„Systém v průběhu kalibrace snímá velikost sil a vypočítává opravné koeficienty. Tímto způsobem je snaha eliminovat vliv deformace nástroje – snímacího elementu a nepřesnosti snímací elektroniky. Takový systém se dá považovat za pasivní, neboť k zjištění opravných hodnot dojde před začátkem měření a v průběhu měření už není možné tyto hodnoty dále ovlivňovat“. [11]

„Další variantou řešení tohoto problému je například řešení firmy Renishaw Revo Renscan (Obr. 2.15). Toto řešení využívá k detekci kontaktu mezi měřicím elementem a měřeným objektem právě deformaci stopky nástroje. Tato deformace je měřena a vyhodnocována a je tedy známa v každém okamžiku měření. Toto pak umožňuje ještě důslednější eliminaci vlivu deformace nástroje než v předchozím případě“. [11] V tomto případě můžeme říct, že systém je aktivní, neboť v průběhu měření máme stále informace o deformaci nástroje. [11]



Obr. 2.15: Snímací hlava REVO Renscan [5]

2.7 Postup kontroly strojů

V současné době je problematika kontroly pětiosých strojů poměrně komplexní, ale také občas opomíjená ze strany koncových uživatelů. Seřízení geometrie stroje se zásadně podílí na požadovaných výsledcích a zlepšení přesnosti daného stroje. V dnešní době máme již nepřeberné množství přístrojů a nástrojů, které pomáhají ať už přímo nebo nepřímo s kontrolou geometrie stroje. V této práci budou zmíněny pouze některé z nich a jejich aplikace popsána v následujících odstavcích. [16]

- Přesná libela
- Číselníkový úchylkoměr
- Přesné pravítko
- Měřicí trn
- Systémy na bázi dotykových sond

U strojů je prvotním kontrolním úkonem kontrola a seřízení ustavení stroje z hlediska vodorovnosti za pomoci libel (Obr. 2.16). Pro další postup v diagnostice je nutné zajistit vodorovnost při pohybech lineárních os v celém zdvihu a vodorovné usazení stroje. Pracuje se zde s kotevními prvky, kterými jsou spodní lože spojeny s betonovým základem výrobní haly, dále kontrola rovinnosti upínací plochy stolu stroje či palety a kolmosti osy frézovacího vřetena.



Obr. 2.16: Měření vodorovnosti ustavení stroje pomocí libely [14]

Následuje kontrola kolmosti v jednotlivých souřadných rovinách a test obvodového házení vřetena na trnu. Následně je třeba zajistit součinnost os lineárních a rotačních. Důležitou informací je znalost skutečné polohy středů otáčení rotačních os v souřadném systému stroje a zda se neliší od fyzického středu. Nesoučinnost by měla za následek neschopnost stroje správně interpolovat a sledovat danou trajektorii. V případě svislé osy se pak jedná o diagnostiku pomocí měřicího trnu či číselníkového úchylkoměru. Při kontrole osy naklápění už je potřeba využít technologii softwaru, který pomůže určit polohu středu, či zjistit, o kolik je potřeba změnit odpovídající strojní parametr. V případě praktické části této práce bylo využito funkcí PLAIN a SOUR. [16]

Moderní metody měření už využívají ke kontrole geometrických charakteristik dotykové sondy a to dokonce již od roku 1973. V této práci bude zmíněna pouze metoda za pomoci sady Renishaw axi-set (Obr. 2.17). Tato sada obsahuje výrobcem Renishaw doporučenou tenzometrickou sondu v kombinaci s prostorovým artefaktem. Jedním z možných výstupů zkoušek připravených výrobcem je například uložení kolébky a otáčení stolu v jednotlivých souřadných rovinách, úchylky nastavení kolébky a jiné.[16]



Obr. 2.17: Sada Renishaw axi-set [17]

- **Měření pomocí číselníkového úchylkoměru a měřícího trnu**

„Pomocí této metody se měří rovnoběžnost pohybu lineární osy s osou otáčení. Měření se provádí tak, že se nejdříve umístí vyrovnávací trn souose s rotační osou a na lineární osu se umístí číselníkový úchylkoměr tak, aby se dotýkal plochy trnu. Poté se pohybuje lineární osou, a z úchylkoměru se odečte hodnota odchylky. Následně se stejný postup opakuje po otočení měřícího trnu o 180°. Výslednou odchylkou rovnoběžnosti je průměrná hodnota z obou provedených měření“. [21]

- **Měření pomocí libely**

Je založeno na principu měření přímosti čar ve více směrech. Používá se především při měření rovinnosti. Pokud má být splněna podmínka rovinnosti, musí každý jednotlivý bod skutečné roviny ležet mezi dvěma rovinami, které jsou rovnoběžné s jejím hlavním směrem. Obě rovnoběžné roviny mají mezi sebou rozstup roven velikosti tolerance. [18]

- **Měření pomocí sondy metodou Renishaw AxiSet Check-Up**

„Součástí systému AxiSet Check-Up jsou měřící cykly pro měření speciálního kalibračního artefaktu (koule) pomocí obrobkové sondy. Výsledkem měření může být automatická korekce polohy středů otáčení rotačních os stroje změnou parametrů CNC systému. Výsledky měření jsou poté exportovány do počítače, kde jsou srozumitelně zobrazeny v tabulce Microsoft Excel. Graficky jsou zde vyjádřeny chyby polohy a vystředění, dále jednoduchý test „vyhovuje“ nebo „nevyhovuje“ v porovnání s předem uživatelsky definovanými tolerancemi a také historie měření, která umožňuje porovnat provozní vlastnosti rotačních os v čase“. Metoda zjišťuje odchylky ve vyrovnání a geometrii stroje a chyby středů rotačních os. [22]

3 Návrh Experimentu

Experiment byl proveden na třech strojích. Dva, které se nacházejí na hale RTI ZČU a jeden na externím pracovišti. Stroje na RTI ZČU byly DMG MORI DMU 40eVo linear a MAS MCU450V-5x. Stroj na externím pracovišti nese označení DMG MORI DMU 65 mono BLOCK. K provedení experimentu se využilo kalibračních trnů HSK A63xØ8x80, l=100 mm a HSK A63xØ12x80x110, l=100 mm a dotekových sond RENISHAW OMP 400 a HEIDENHAIN TS 642. U obou byl použit přímý ocelový dřík a rubínový dotek o průměru 6mm. Experiment na stroji DMG MORI DMU 40eVo linear probíhal za pomoci kalibračního trnu HSK A63xØ8x80, l=100mm a sondy HEIDENHAIN TS 642. Experiment na stroji MAS MCU450V-5x proběhl naproti tomu se sondou RENISHAW OMP 400 a kalibračním trnem HSK A63xØ8x80, l=100,066 mm. Na třetím stroji DMG MORI DMU 65 mono BLOCK z detašovaného pracoviště byl experiment proveden za pomoci sondy HEIDENHAIN TS 642 a kalibračního trnu HSK A63xØ12x80x110, l=100 mm. Pro lepší přehlednost byla měřidla pro jednotlivé stroje sepsána do tabulky 3.1.

Tab. 3.1: Tabulka měřidel použitých u jednotlivých strojů

| DMG MORI DMU 40eVo linear | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Kalibrační trn | HSK A63xØ8x80, l=100 mm |
| Sonda | HEIDENHAIN TS 642 |
| MAS MCU450V-5x | |
| Kalibrační trn | HSK A63xØ8x80, l=100,066 mm |
| Sonda | RENISHAW OMP 400 |
| DMG MORI DMU 65 mono BLOCK | |
| Kalibrační trn | HSK A63xØ12x80x110, l=100 mm |
| Sonda | HEIDENHAIN TS 642 |

3.1 Průběh experimentu

Experiment byl proveden na strojích DMG MORI DMU 40eVo linear a MAS MCU 450V-5x. Třetí měření bylo na vyžádání provedeno externím pracovníkem na stroji DMG MORI DMU 65 mono BLOCK. K experimentu bylo použito kalibračních trnů (viz Obr. 4.3 a 4.11) v kombinaci s koncovými měrkami a sond RENISHAW OMP 400 a HEIDENHEIN TS 642. Kalibrace sond byla provedena již před experimentem. Samotný experiment můžeme rozdělit do 4 kroků:

- 1) Srovnání stolu v souřadnicích X a Y
- 2) Nastavení nulového bodu v ose Z
- 3) Měření kalibračním trnem
- 4) Měření obrobkovou sondou

- 1) Měření začalo srovnáním stolu podle jedné z drážek obráběcího stolu za pomoci obrobkové sondy.
Na začátek bylo nutné ověřit, zda počátek souřadnic, který jsme si zvolili jako střed stolu, je opravdu v rámci tolerancí naší požadovanou „nulou“. K tomu jsme využili měření pomocí obrobkové sondy. Měření se opakovalo celkem 3x s tím, že po každém měření došlo k posunu souřadného systému o 45, 90 a 135 stupňů. U stroje s označením DMG MORI DMU 40eVo linear jsme využili k otočení souřadného systému dvou funkcí a to funkcí PLAIN a SOUR. Každá z těchto funkcí se lišila pouze přístupem k otočení souřadného systému. U dalších strojů došlo k ověření pouze pomocí jednoho cyklu, neboť na základě měření z prvního stroje jsme se přesvědčili, že rozptyl u měření sondou je tak malý nebo dokonce totožný, že nevyžaduje další opakování. Výsledky měřené jedním cyklem můžeme tedy považovat za přesné.
- 2) Po ověření bodu počátku souřadnic v souřadných osách XY bylo nutné i nastavení počátku v ose Z. To bylo provedeno za pomoci kalibračního trnu a koncové měrky. Nejdříve došlo k upnutí kalibračního trnu do vřetene stroje a pak poblíž středu stolu postupným posouváním kalibračního trnu ve směru kladných hodnot v ose Z a podsouváním koncové měrky jsme určili referenční bod nula. Ten bude absolutní nulou, od které budou dále odměřovány zvolené body v jednotlivých částech stolu.
- 3) Následovalo samotné měření pomocí kalibračního trnu a koncové měrky. Měření bylo provedeno celkem v osmi místech stolu u stolů obráběcích center MAS MCU450V-5x a DMU 6 MONO block obráběcího centra a celkem dvanáct měření u stolu obráběcího centra DMG MORI DMU40eVo linear. Čtyři poblíž středu, čtyři v krajních částech a čtyři mezi těmito dvěma hodnotami. Měření opět probíhalo tak, že za postupného posuvu suportu směrem do kladných hodnot osy Z se pod kalibrační trn podsouvala koncová měrka až k pocitové nule. Je nutné, aby všechna měření na jednom stroji prováděl jeden operátor s tím, že je potřeba zachovat onu „pocitovou nulu“ ve zhruba stejné hladině u všech měření.
- 4) Po změření všech bodů tímto způsobem následovalo měření pomocí obrobkové sondy. Opět bylo nutno nastavit sondu v ose Z a vytvoření referenčního bodu. Od referenčního bodu jsme opět za pomoci koncové měrky a obrobkové sondy naměřili odchylky v ose Z ve stejných bodech, ve kterých bylo provedeno měření za pomoci kalibračního trnu. Proces vytvoření referenčního bodu je nutné při každém opakování cyklu měření opakovat taktéž.

Měření sondou je tedy alternativou měření pomocí kalibračního trnu a koncové měrky. Velkou výhodou je vysoká přesnost a rychlost měření. Mezi nevýhody naopak patří nutnost pravidelné kalibrace a vyšší náročnost na prostředky.

4 Vyhodnocení provedeného experimentu

Všechny tři stroje můžeme generalizovat jako pětiosá obráběcí centra. K vyhodnocení dat provedeného experimentu bylo využito tabulek programu Excel a zakreslení průměrných naměřených hodnot do 3D grafu rovněž vytvořeného v programu Excel. K lepší vizualizaci byly v programu AUTODESK Inventor vytvořeny makety stolu jednotlivých strojů a do nich zakresleny souřadnice měřených bodů (Obr. 4.2), (Obr.4.7), (Obr. 4.10).

4.1 DMG MORI DMU 40eVo linear-vyhodnocení naměřených dat

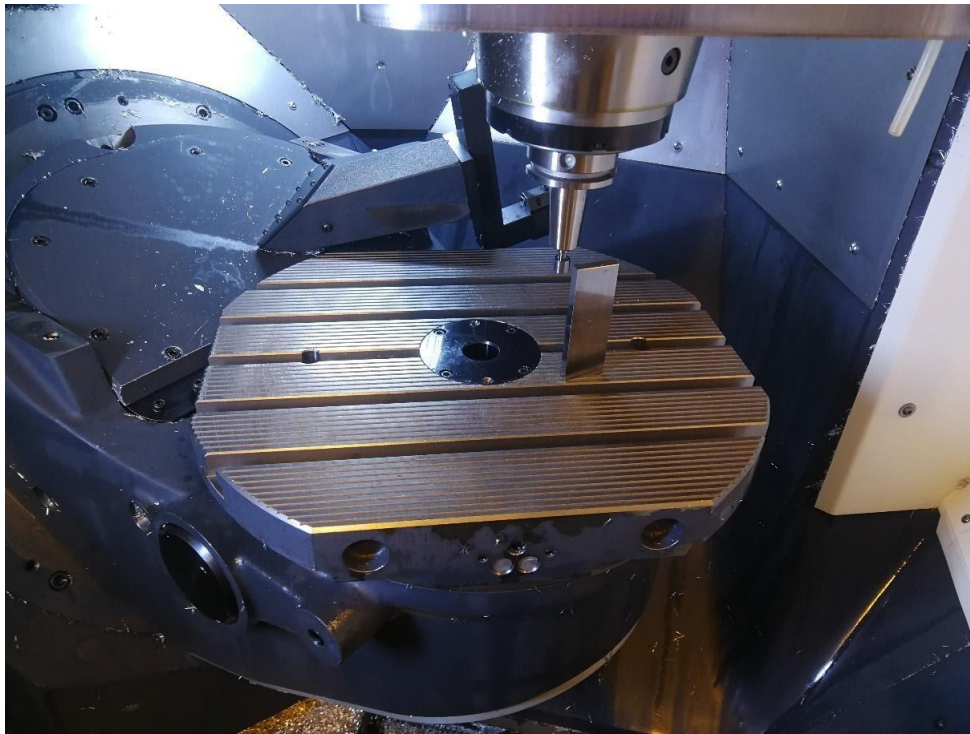
V tabulce 4.1 jsou uvedeny stručné charakteristiky stroje DMG MORI DMU 40eVo linear a souřadnice měřených bodů jsou uvedeny v tabulce 4.2. Jedná se o stroj s naklápěcím rotačním stolem (Obr. 4.1) pro pětiosé simultánní obrábění s optimalizovanou portálovou konstrukcí. Obsahuje také zásobník nástrojů s možností nastavení během obrábění. DMG MORI DMU 40eVo linear se vyznačuje skvělou dostupností a nízkými prostorovými nároky. [19]

Tab. 4.1 Charakteristiky stroje DMG MORI DMU 40eVo linear

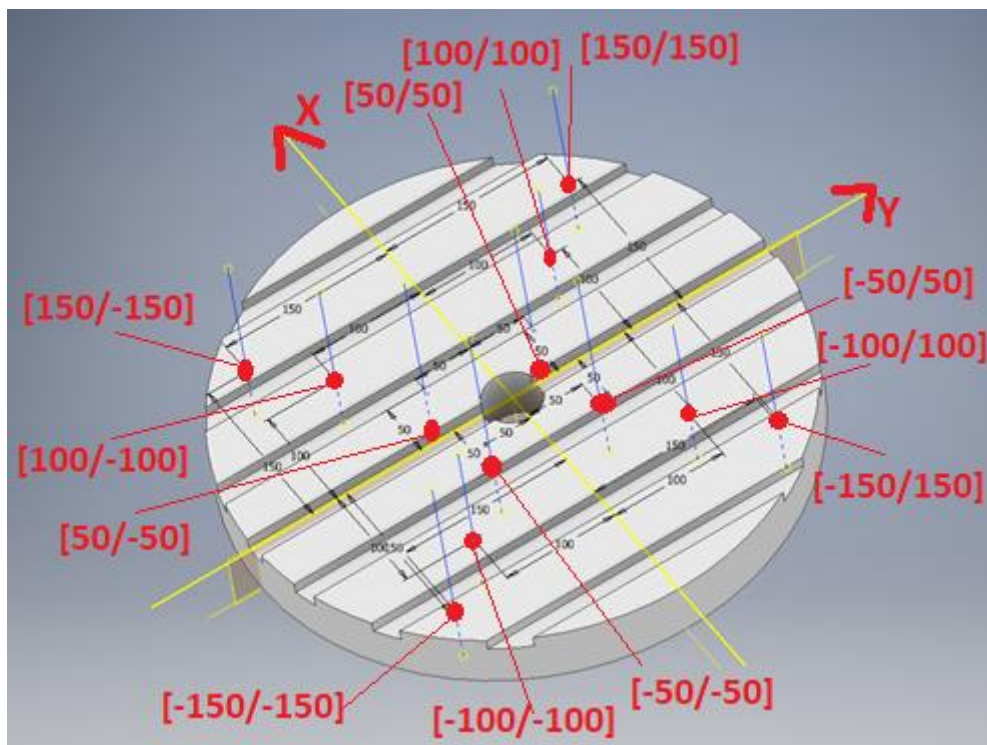
| | |
|---------------------|--------------|
| Max. pojezd v ose X | 400 mm |
| Max. pojezd v ose Y | 400 mm |
| Max. pojezd v ose Z | 375 mm |
| Max. zatížení stolu | 250 kg |
| Průměr stolu | 480 mm |
| Poziční přesnost | Od 6 μ m |

Tab. 4.2: Souřadnice měřených bodů u stolu stroje DMG MORI DMU 40eVo linear

| Souřadnice měřených bodů v osách X/Y [mm] | | | |
|---|---------|----------|-----------|
| 50/-50 | 50/50 | -50/-50 | -50/50 |
| -100/100 | 100/100 | 100/-100 | -100/-100 |
| -150/150 | 150/150 | 150/-150 | -150/-150 |



Obr. 4.1: Stůl stroje DMG MORI DMU 40eVo linear spolu s kalibračním trnem a koncovou měrkou



Obr. 4.2: Maketa stolu stroje DMG MORI DMU 40eVo linear s proměřenými souřadnicemi

U stroje DMG MORI DMU 40eVo linear bylo provedeno celkem šest kontrol referenčního bodu v souřadnicích XY. Každá kontrola proběhla stejným systémem, jak bylo popsáno v kapitole 3.1, jen jiným přístupem k otáčení souřadného systému, ať to bylo otáčení hlavy se sondou či otáčení stolu CNC centra.

Na základě naměřených hodnot v tabulce níže (Tab. 4.3) a odchylek zanedbatelných ve srovnání s odchylkami danými, ať už tuhostí stroje a přesností najetí, tuhostí a přesností obrobkové sondy či nerovností povrchu, můžeme konstatovat, že námi zvolený referenční bod os X a Y je opravdu naše teoreticky požadovaná „nula“, od které budou měřeny námi zvolené body stolu a v našem případě využít i jako střed souřadného systému, od kterého se dále bude odvíjet polohování bodů. Z toho důvodu jsou odchylky v řádech tisícin zanedbatelné.

Tab. 4.3: Kontrola referenčního bodu v osách XY

| [mm] | 45° | | 90° | | 135° | |
|--------------------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|
| | osa X | osa Y | osa X | osa Y | osa X | osa Y |
| Měření č.1 Plain 1 | 0,0029 | 0,0006 | 0,0029 | 0,0001 | 0,0034 | -0,0005 |
| Měření č.2 Plain 1 | 0,0033 | 0,0019 | 0,0042 | 0,0014 | 0,0037 | 0,0002 |
| Měření č.3 Plain 2 | 0,0031 | 0,0029 | 0,0049 | 0,0028 | 0,0047 | 0,0017 |
| Měření č.4 Plain 2 | 0,0046 | 0,0032 | 0,0049 | 0,0032 | 0,0047 | 0,0031 |
| Měření č.5 Sour | -0,0007 | 0,0058 | -0,0052 | 0,0032 | -0,005 | -0,0011 |
| Měření č.6 Sour | -0,0005 | 0,0056 | -0,0046 | 0,0031 | -0,0056 | -0,0008 |

Dalším krokem bylo proměření znázorněných bodů (Obr. 4.2) (Tab. 4.2) pomocí koncové měřky a kalibračního trnu HSK A63xØ8x80; $l_1=100.066$ mm (Obr. 4.3). Proměřování se provádělo v cyklech po čtyřech, vždy ve stejných hodnotách souřadnic, pouze posunutých do jednotlivých kvadrantů.



Obr. 4.3: Kalibrační trn HSK A63xØ8x80

Tab. 4.4: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu

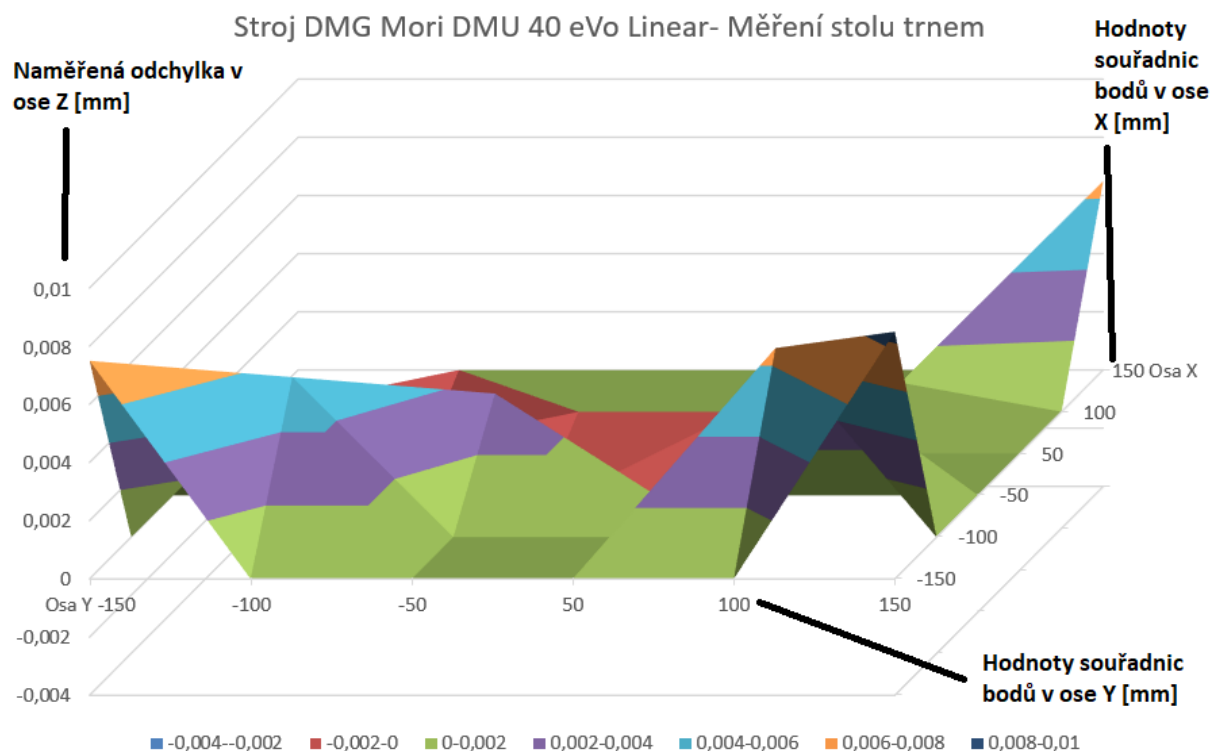
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | | | | |
|--|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
| [mm] | 50/-50 | 50/50 | -50/-50 | -50/50 |
| Měření č.1 | -0,001 | -0,003 | 0,005 | 00 |
| Měření č.2 | -0,003 | -0,003 | 0,002 | 00 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | | | | |
| [mm] | -100/100 | 100/100 | 100/-100 | -100/-100 |
| Měření č.1 | 0,009 | 0,004 | 0,002 | 0,009 |
| Měření č.2 | 0,004 | -0,002 | -0,006 | 0,002 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | | | | |
| [mm] | -150/150 | 150/150 | 150/-150 | -150/-150 |
| Měření č.1 | 0,01 | 0,009 | 0,001 | 0,01 |
| Měření č.2 | 0,007 | 0,004 | -0,005 | 0,005 |

Při měření kalibračním trnem se měření provedlo s jedním opakováním pro získání jasnějších a průkaznějších výsledků, neboť se stále jedná o měření značně ovlivněné pocitem operátora. V tabulce 4.4 můžeme vidět naměřené hodnoty v jednotlivých souřadnicích. Souřadnice s hodnotou 00 znázorňuje zvolenou nulu v ose Z, od které měření zbývajících bodů probíhalo. Na základě naměřených hodnot byl vytvořen jejich průměr (Tab. 4.5) a výsledné průměrné hodnoty byly zakresleny do grafu.

Tab. 4.5: Tabulka průměrných hodnot měření trnem, stroj DMG MORI DMU 40eVo linear

| | | | |
|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
| 50/-50 | 50/50 | -50/-50 | -50/50 |
| -0,002 | -0,003 | 0,0035 | 00 |
| -100/100 | 100/100 | 100/-100 | -100/-100 |
| 0,0065 | 0,001 | -0,002 | 0,0055 |
| -150/150 | 150/150 | 150/-150 | -150/-150 |
| 0,0085 | 0,0065 | -0,002 | 0,0075 |

Na grafu níže (Obr.4.4) jsou jasně znát odchylky v jednotlivých měřených bodech. Můžeme vidět, že největší odchylky byly naměřeny v nejkrajnějších měřených bodech. S tím, že největší odchylka byla naměřena v bodě [-150/150] a to 0,0085 mm, což je nejvzdálenější bod od uložení stolu.



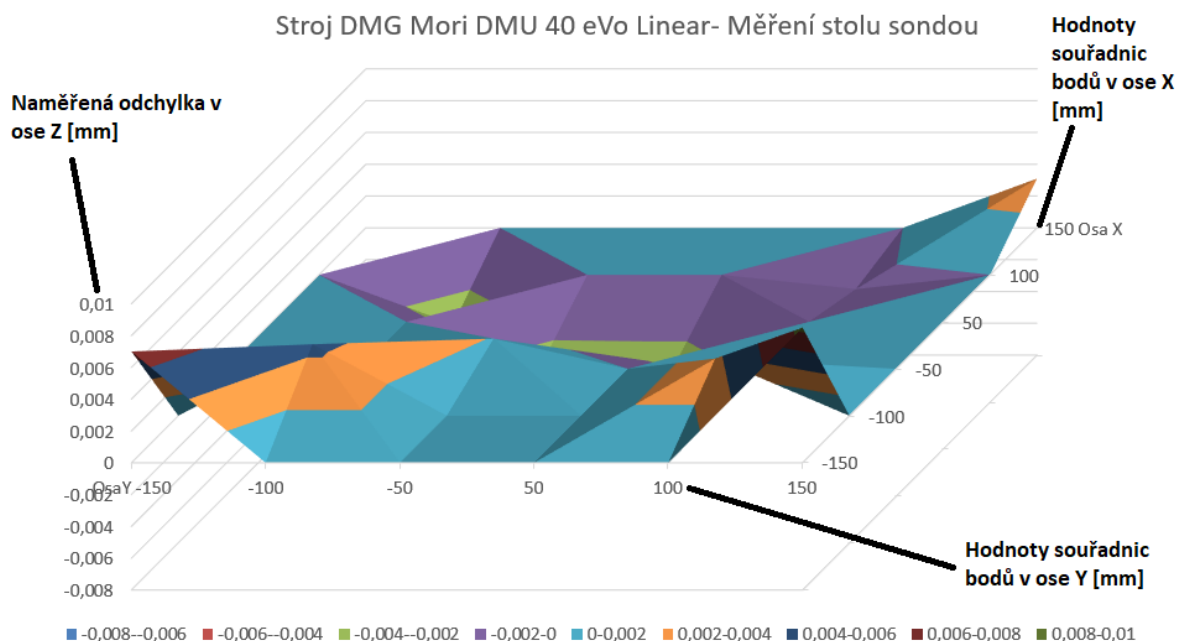
Obr. 4.4: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 40eVo linear trnem

Následovalo měření ve stejných souřadnicích pouze s rozdílem, že se k měření použila kombinace koncové měřky a dotekové sondy Heidenhein TS 642.

Tab. 4.6: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí dotekové sondy

| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
|--|----------|---------|----------|-----------|
| [mm] | 50/-50 | 50/50 | -50/-50 | -50/50 |
| Měření č.1 | -0,0028 | -0,0027 | 0,0019 | 00 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
| [mm] | -100/100 | 100/100 | 100/-100 | -100/-100 |
| Měření č.1 | 0,0036 | -0,0009 | -0,0031 | 0,0045 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
| [mm] | -150/150 | 150/150 | 150/-150 | -150/-150 |
| Měření č.1 | 0,0085 | 0,0031 | -0,0066 | 0,007 |

U měření sondou bylo využito pouze jednoho cyklu měření a to z toho důvodu, že naměřené hodnoty můžeme považovat za konečné, neboť nejsou ovlivněny lidským faktorem. Pro lepší vizualizaci byly naměřené hodnoty zakresleny do 3D grafu v programu Excel. (Obr. 4.5)



Obr. 4.5: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 40eVo linear sondou

Při srovnání grafů z měření sondou (Obr. 4.5) a trnem (Obr. 4.4) můžeme konstatovat, že měřením sondou došlo k potvrzení trendu naměřených odchylek kalibračním trnem v jednotlivých bodech.

S ohledem na systém uložení stolu můžeme říct, že stůl vetknutý v jedné podpoře měl pravděpodobně i vliv na největší naměřenou odchylku, neboť se nacházela v nejvzdálenější měřeném bodě od místa uložení ramena stolu.

4.2 MAS MCU 450V-5x-vyhodnocení naměřených dat

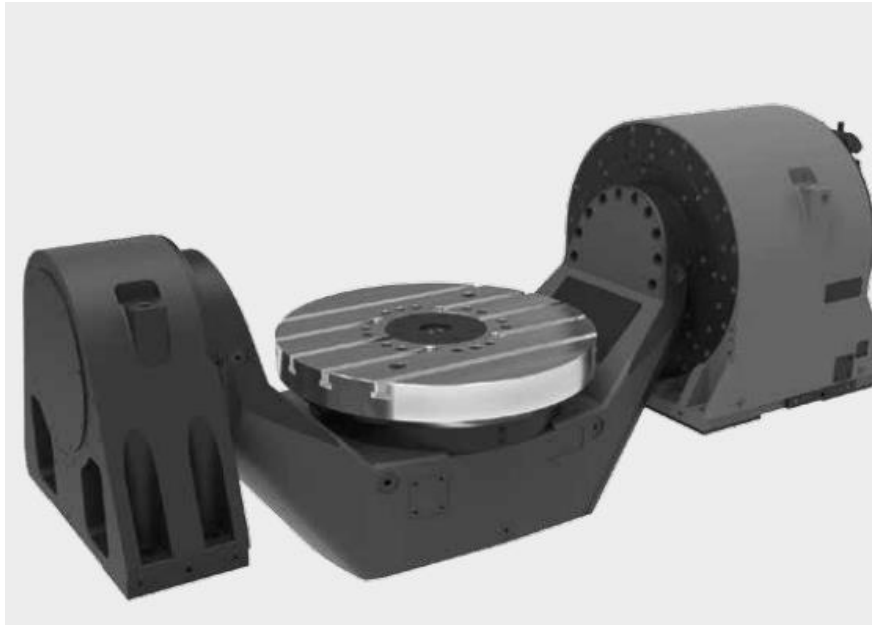
V tabulce 4.7 jsou uvedeny stručné charakteristiky stroje DMG MORI DMU 40eVo linear a v tabulce 4.8 souřadnice měřených bodů. Jedná se o stroj charakteristický širokým výběrem vřetenových jednotek a upínání. Má litinový základ. Stroj je přizpůsoben pro robotizaci a paletizaci. Dále také obsahuje modulární zásobník nástrojů. U tohoto stroje je využito uložení stolu stroje na dvou podporách (Obr. 4.6). [20]

Tab. 4.7: Charakteristiky stroje MAS MCU 450V-5x

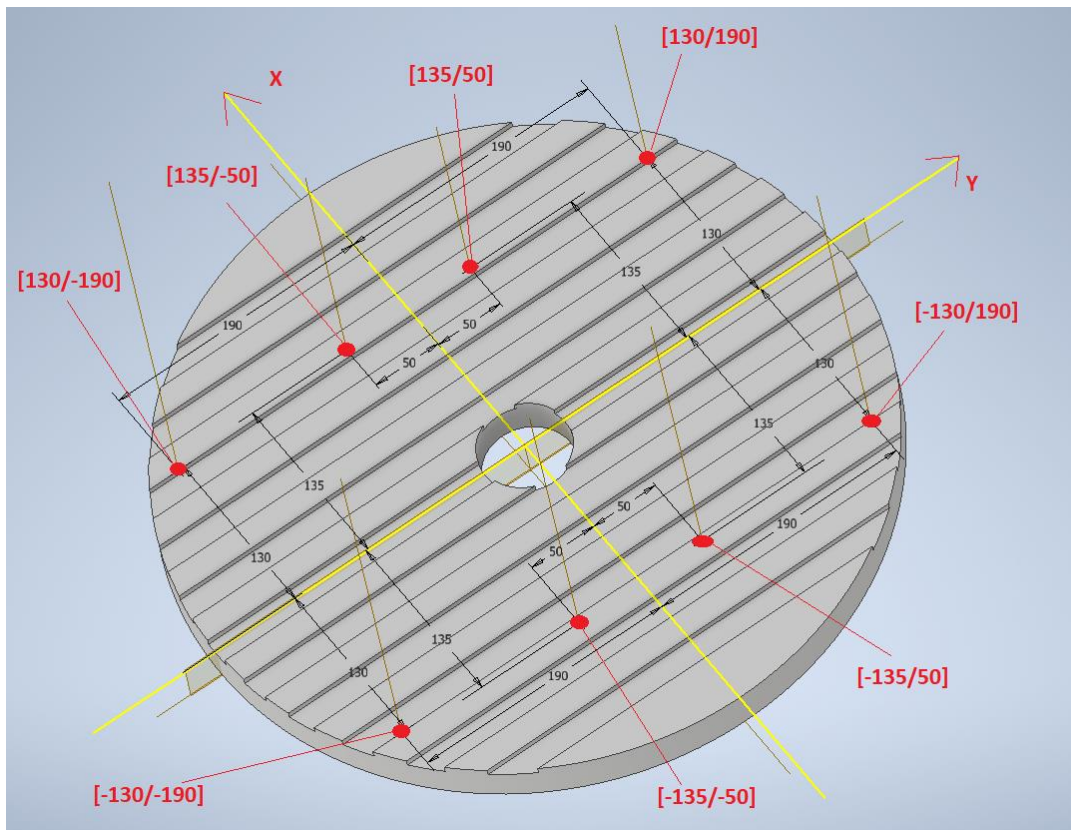
| | |
|---------------------|--------------|
| Max. pojezd v ose X | 500 mm |
| Max. pojezd v ose Y | 800 mm |
| Max. pojezd v ose Z | 520 mm |
| Max. zatížení stolu | 250 kg |
| Průměr stolu | 500 mm |
| Poziční přesnost | Od 7 μ m |

Tab. 4.8: Souřadnice měřených bodů u stolu stroje MAS MCU 450V-5x

| Souřadnice měřených bodů X/Y [mm] | | | |
|-----------------------------------|----------|-----------|----------|
| 135/50 | 135/-50 | -135/-50 | -135/50 |
| 130/190 | 130/-190 | -130/-190 | -130/190 |



Obr. 4.6: Stůl stroje MAS MCU 450V-5x



Obr. 4.7: Maketa stolu stroje MAS MCU 450V-5x s proměřenými souřadnicemi

U stroje MAS MCU 450V-5x byl proveden jeden cyklus kontroly referenčního bodu v souřadnicích XY. Na základě měření z prvního stroje jsme se přesvědčili, že rozptyl u měření sondou je tak malý, že nevyžaduje další opakování.

Na základě naměřených hodnot v tabulce níže (Tab. 4.9) a odchylek zanedbatelných ve srovnání s odchylkami danými at' už tuhostí stroje a přesností najetí, tuhostí a přesností obrobkové sondy či nerovností povrchu, můžeme konstatovat, že námi zvolený referenční bod os X a Y je opravdu naše teoreticky požadovaná „nula“, od které budou měřeny námi zvolené body stolu a v našem případě využít i jako střed souřadného systému, od kterého se dále bude odvíjet polohování bodů. Z toho důvodu jsou odchylky v řádech setin zanedbatelné.

Tab. 4.9: Kontrola referenčního bodu v osách XY

| [mm] | 45° | | 90° | | 135° | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | osa X | osa Y | osa X | osa Y | osa X | osa Y |
| Měření č.1 Stůl | -0,017 | -0,019 | -0,018 | -0,005 | -0,009 | 0,001 |

Dalším krokem bylo proměření znázorněných bodů (Tab. 4.10) (Obr. 4.7) pomocí koncové měrky a kalibračního trnu HSK A63xØ8x80; $l_1=100.066$ mm. Proměřování se provádělo v cyklech po čtyřech vždy ve stejných hodnotách souřadnic pouze pootočených do jednotlivých kvadrantů.

Tab. 4.10: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu

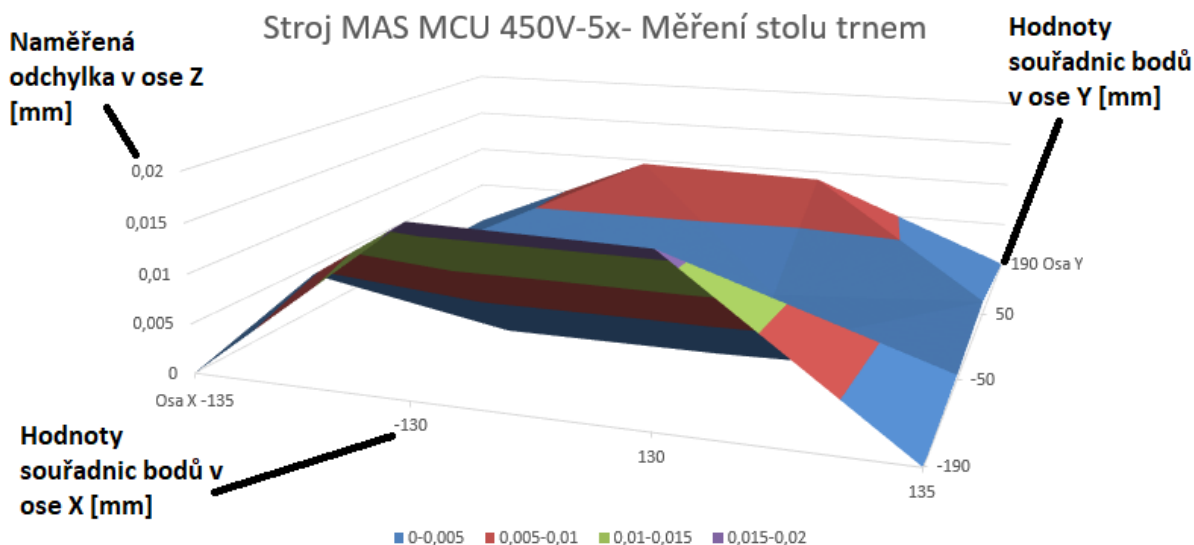
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | | | | |
|--|---------|----------|-----------|----------|
| [mm] | 135/50 | 135/-50 | -135/-50 | -135/50 |
| Měření č.1 | -0,001 | -0,003 | 0,005 | 00 |
| Měření č.1 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 00 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu | | | | |
| [mm] | 130/190 | 130/-190 | -130/-190 | -130/190 |
| Měření č.1 | 0,01 | 0,018 | 0,019 | 0,012 |
| Měření č.1 | 0,008 | 0,015 | 0,015 | 0,007 |

Při měření kalibračním trnem se měření provedlo ve dvou cyklech opakování pro získání jasnějších a průkaznějších výsledků, neboť se stále jedná o měření značně ovlivněné pocitem operátora. V tabulce 4.10 můžeme vidět naměřené hodnoty v jednotlivých souřadnicích. Souřadnice s hodnotou 00 znázorňuje zvolenou nulu v ose Z, od které měření zbývajících bodů probíhalo. Na základě naměřených hodnot byl vytvořen jejich průměr (Tab. 4.11) a výsledné průměrné hodnoty byly zakresleny do grafu (Obr. 4.8).

Tab. 4.11: Průměrné naměřené hodnoty použité k vytvoření 3D grafu

| | | | |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 135/50 | 135/-50 | -135/-50 | -135/50 |
| 0,0015 | 0,0005 | 0,004 | 00 |
| 130/190 | 130/-190 | -130/-190 | -130/190 |
| 0,009 | 0,0165 | 0,017 | 0,0095 |

Na grafu níže (Obr. 4.8) jsou jasně znát odchylky v jednotlivých měřených bodech. Můžeme vidět, že největší odchylky byly naměřeny v nejkrajnějších měřených bodech. S tím, že největší odchylka byla naměřena v bodě [130/-190] a to 0,0165mm.



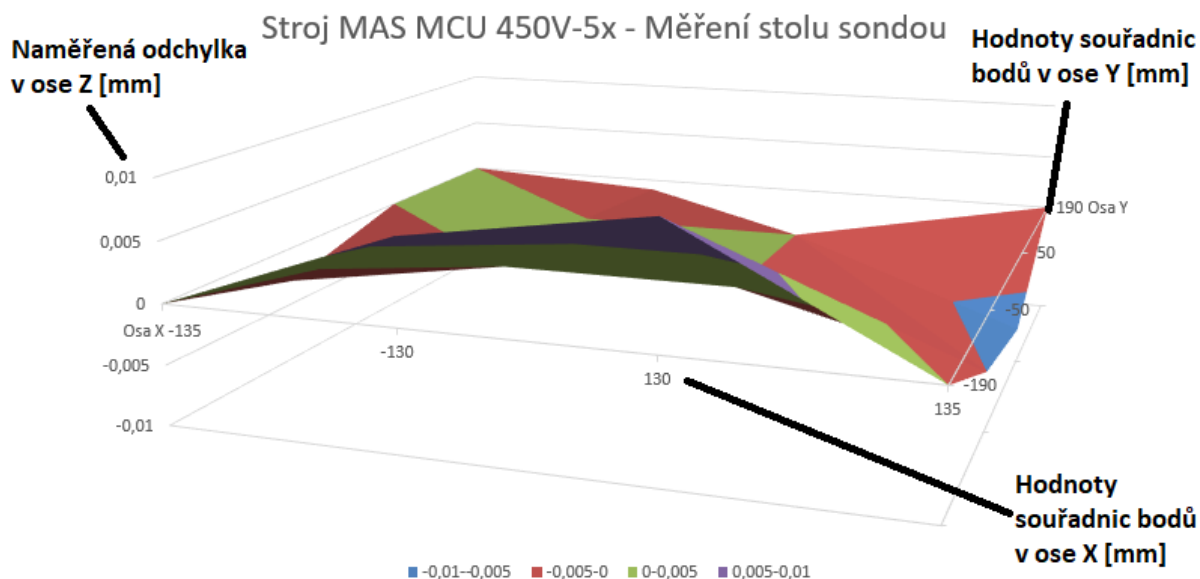
Obr. 4.8: Graf průměrných hodnot z měření na stroji MAS MCU 450V-5x trnem

U měření sondou bylo využito pouze jednoho cyklu měření a to z toho důvodu, že naměřené hodnoty můžeme považovat za konečné, neboť nejsou ovlivněny lidským faktorem. Pro lepší vizualizaci byly naměřené hodnoty zakresleny do 3D grafu v programu Excel (Obr. 4.9).

V tabulce 4.12 můžeme opět vidět buňku s 00, která nám v daných souřadnicích reprezentuje námi zvolený bod nula v ose Z, od kterého měření probíhalo.

Tab. 4.12: Měření nulové hodnoty v ose Z za pomoci dotykové sondy

| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
|--|---------|----------|-----------|----------|
| [mm] | 135/50 | 135/-50 | -135/-50 | -135/50 |
| Měření č.1 | -0,007 | -0,005 | -0,003 | 00 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
| [mm] | 130/190 | 130/-190 | -130/-190 | -130/190 |
| Měření č.1 | -0,008 | 0,01 | 0,007 | -0,001 |



Obr. 4.9: graf průměrných hodnot z měření na stroji MAS MCU 450V-5x sondou

Při srovnání grafů z měření sondou (Obr. 4.9) a trnem (Obr. 4.8) můžeme konstatovat, že měření sondou se tvarem mírně liší oproti hodnotám naměřeným kalibračním trnem. Tuto skutečnost můžeme přisuzovat rozdílu v citlivosti měření operátorem a sondou.

S ohledem na systém uložení stolu můžeme říct, že stůl na dvou podporách zajišťuje menší odchylky blíže k ose naklápění stolu, než je tomu ve vzdálenějších bodech od středu souřadného systému.

4.3 DMG MORI DMU 65 mono BLOCK-vyhodnocení naměřených dat

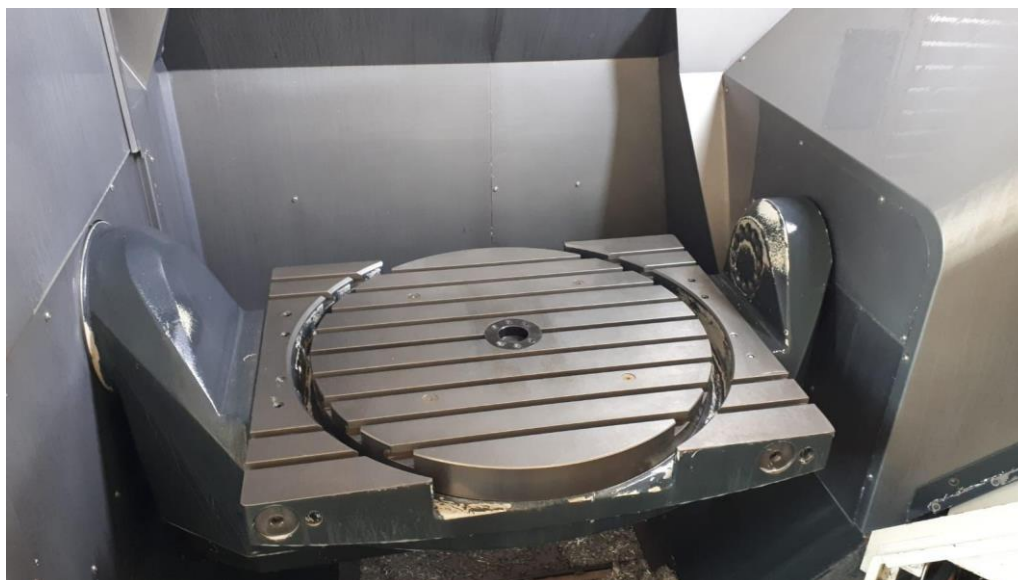
V tabulce 4.13 jsou uvedeny stručné charakteristiky stroje DMG MORI DMU 40eVo linear a v tabulce 4.14 souřadnice měřených bodů. Stroj se vyznačuje skvělou dostupností pracovního prostoru díky velkému dveřnímu otvoru. Obsahuje rozsáhlý systém chlazení a kompenzací pomocí různých snímačů. Silné vřeteno speedMASTER v základní výbavě a nabídku různých provedení stolu pro frézování a soustružení. U tohoto stroje je využito uložení stolu stroje na dvou podporách (Obr. 4.10). [9]

Tab. 4.13: Charakteristiky stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK

| | |
|---------------------|--------------|
| Max. pojezd v ose X | 735 mm |
| Max. pojezd v ose Y | 650 mm |
| Max. pojezd v ose Z | 560 mm |
| Max. zatížení stolu | 100 kg |
| Průměr stolu | 650 mm |
| Poziční přesnost | Od 5 μ m |

Tab. 4.14 Souřadnice měřených bodů u stolu stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK

| Souřadnice měřených bodů X/Y [mm] | | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| -40/-40 | -40/+40 | +40/+40 | 40/-40 |
| -220/-220 | -220/+220 | +220/+220 | 220/-220 |



Obr. 4.10: Stůl stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK

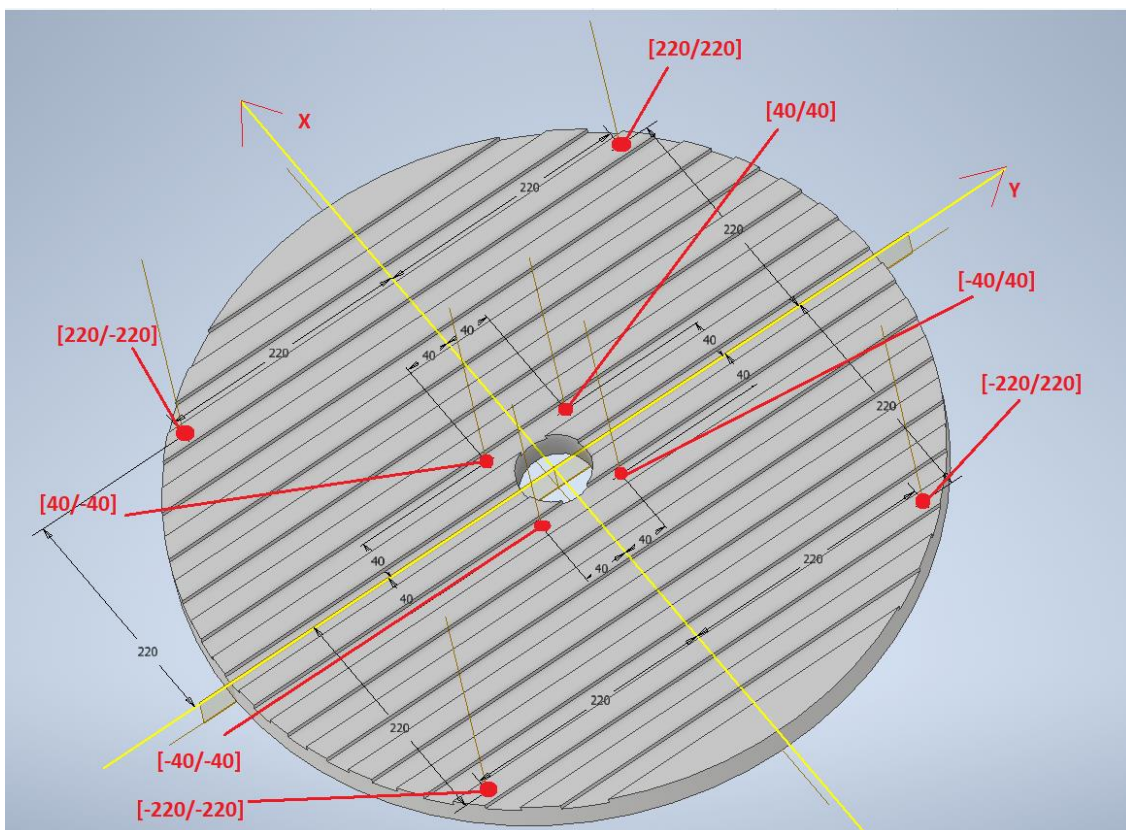
U stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK byly provedeny dva cykly kontroly referenčního bodu v souřadnicích XY. Jak již bylo zmíněno výše, na základě malého rozptylu naměřených hodnot u prvního stroje není nutné opakovat měření vícekrát.

Na základě naměřených hodnot v tabulce níže (Tab. 4.15) a odchylek zanedbatelných ve srovnání s odchylkami danými až u tuhostí stroje a přesností najetí, tuhostí a přesností obrobkové sondy či nerovností povrchu, můžeme konstatovat, že námi zvolený referenční bod os X a Y je opravdu naše teoreticky požadovaná „nula“, od které budou měřeny námi zvolené body stolu.

Tab. 4.15: Kontrola referenčního bodu v osách XY

| [mm] | 45° | | 90° | | 135° | |
|------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | osa X | osa Y | osa X | osa Y | osa X | osa Y |
| Měření č.1 | -0,001 | 0,0036 | 0,0019 | 0,0068 | 0,0058 | 0,0071 |
| Měření č.2 | -0,0009 | 0,0034 | 0,0016 | 0,0068 | 0,0051 | 0,0071 |

Dalším krokem bylo proměření znázorněných bodů (Obr. 4.11) pomocí koncové měrky a tentokrát pomocí kalibračního trnu HSK A63xØ12x80x110, l=100 mm (Obr. 4.12). Proměřování se stejně jako u předchozích dvou strojů provádělo v cyklech po čtyřech, vždy ve stejných hodnotách souřadnic, pouze pootočených do jednotlivých kvadrantů.



Obr. 4.11: Maketa stolu stroje DMG MORI DMU 65 mono BLOCK s proměřenými souřadnicemi



Obr. 4.12: Kalibrační trn HSK A63xØ12x80x110

Při měření kalibračním trnem se měření provedlo, stejně jako v předchozích dvou případech, s jedním opakováním pro získání jasnějších a průkaznějších výsledků, neboť se stále jedná o měření značně ovlivněné pocitem operátora. V tabulce 4.16 můžeme vidět naměřené hodnoty v jednotlivých souřadnicích. Souřadnice s hodnotou 00 znázorňuje zvolenou nulu v ose Z, od které měření zbývajících bodů probíhalo. Tentokrát se při každém cyklu zvolila nová nula. Na základě naměřených hodnot byl vytvořen jejich průměr (Tab. 4.16) a výsledné průměrné hodnoty byly zakresleny do grafu (Obr. 4.13).

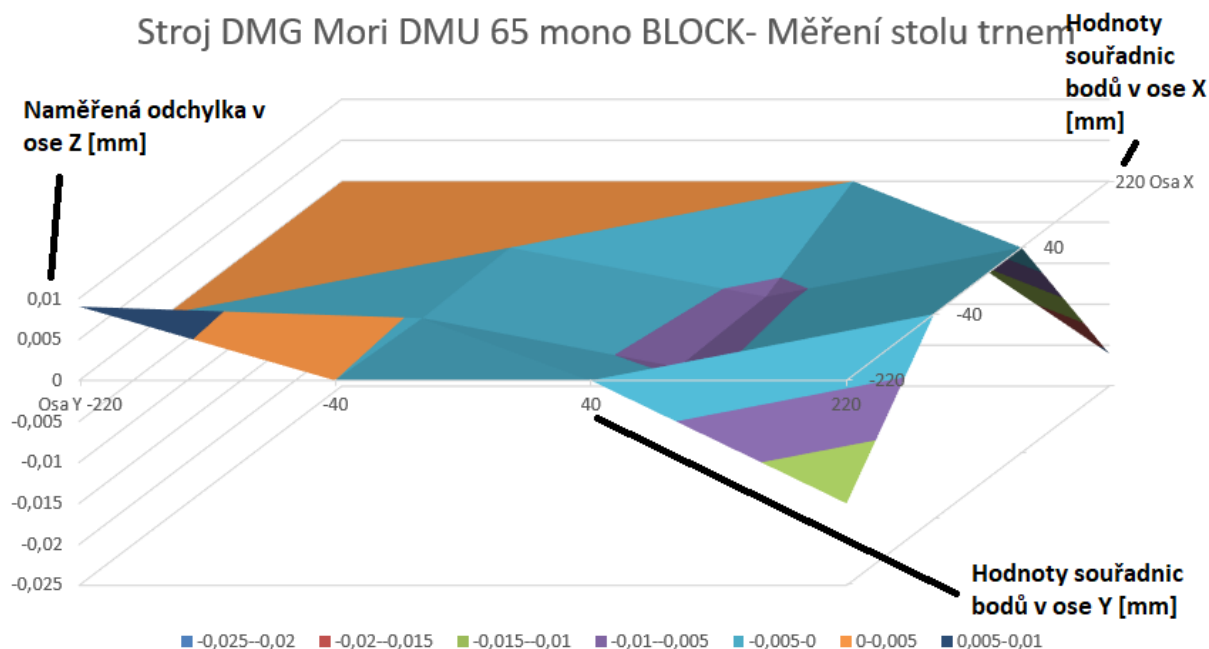
Tab. 4.16: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí kalibračního trnu

| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí koncové měřky | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
| [mm] | -40/-40 | -40/+40 | +40/+40 | 40/-40 |
| Měření č.1 | -0,001 | -0,007 | -0,006 | 00 |
| Měření č.2 | 0 | -0,006 | -0,006 | 00 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí koncové měřky | | | | |
| [mm] | -220/-220 | -220/+220 | +220/+220 | 220/-220 |
| Měření č.1 | 0,009 | -0,015 | -0,022 | 00 |
| Měření č.2 | 0,009 | -0,015 | -0,02 | 00 |

Tab. 4.17: Průměrné naměřené hodnoty použité k vytvoření 3D grafu

| | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| -40/-40 | -40/+40 | +40/+40 | +40/-40 |
| -0,0005 | -0,0065 | -0,006 | 00 |
| -220/-220 | -220/+220 | +220/+220 | +220/-220 |
| 0,009 | -0,015 | -0,021 | 00 |

Z grafu níže (Obr. 4.13) jsou jasně znát odchylky v jednotlivých měřených bodech. Je vidět, že největší odchylky byly naměřeny v nejkrajnějších měřených bodech. S tím, že největší odchylka byla naměřena v bodě [+220/+220] a to -0,021 mm.



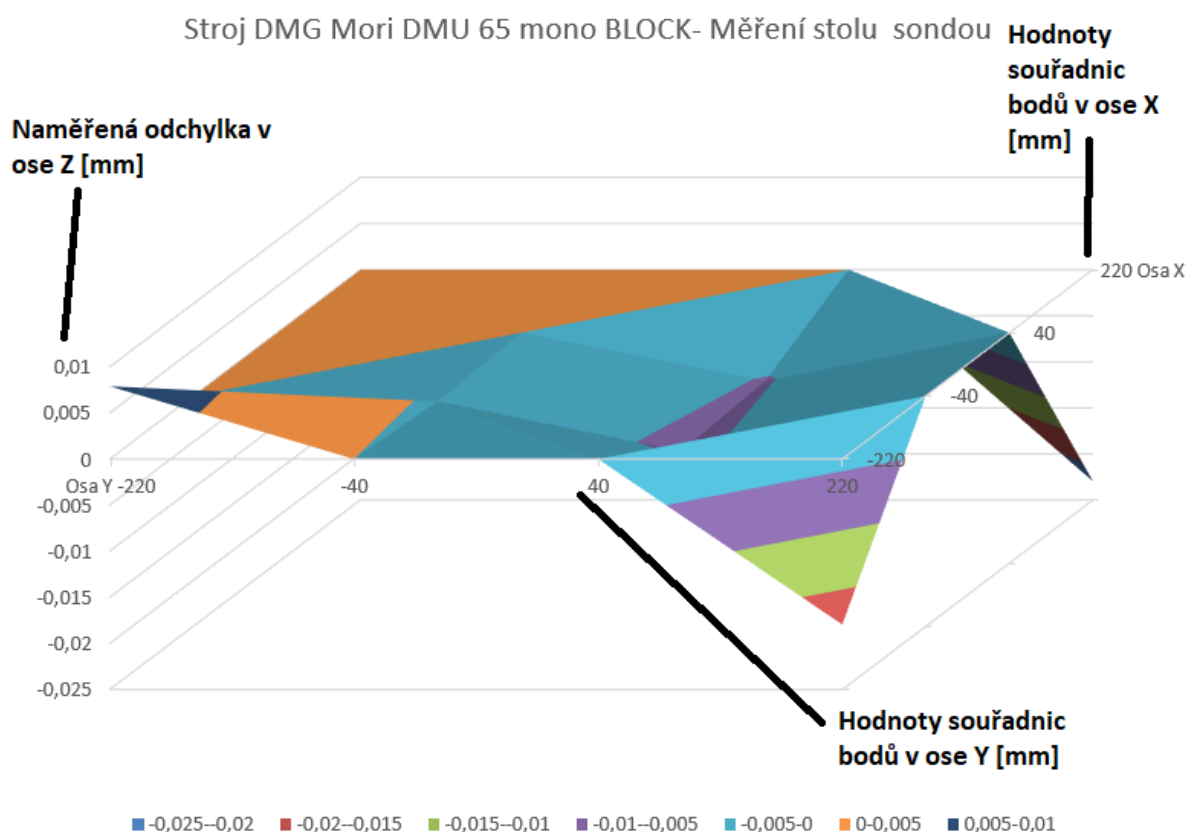
Obr. 4.13: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 65 mono BLOCK trnem

U měření sondou bylo využito dvou cyklů měření narozdíl od předchozích dvou strojů, kde jsme využili pouze měření jednoho cyklu. Z naměřených hodnot je ale patrné, že odchylky mezi jednotlivými cykly měření obrobkovou sondou jsou tak malé, že se nám potvrdilo tvrzení při měření u předchozích dvou strojů. Pro lepší vizualizaci byly naměřené hodnoty zakresleny do 3D grafu v programu Excel (Obr. 4.14).

V tabulce 4.18 můžeme opět vidět buňky s 00, které nám v daných souřadnicích reprezentují námi zvolené body nula v ose Z, od kterých měření v jednotlivých cyklech probíhalo.

Tab. 4.18: Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí dotykové sondy

| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| [mm] | -40/-40 | -40/+40 | +40/+40 | +40/-40 |
| Měření č.1 | -0,0006 | -0,0063 | -0,0051 | 00 |
| Měření č.2 | -0,0006 | -0,0057 | -0,0054 | 00 |
| Měření nulové hodnoty v ose Z pomocí obrobkové sondy | | | | |
| [mm] | -220/-220 | -220/+220 | +220/+220 | +220/-220 |
| Měření č.1 | 0,0078 | -0,018 | -0,023 | 00 |
| Měření č.2 | 0,008 | -0,0179 | -0,0229 | 00 |



Obr. 4.14: Graf průměrných hodnot z měření na stroji DMG MORI DMU 65 mono BLOCK sondou

Na závěr bylo provedeno srovnání grafů z měření sondou (Obr. 4.14) a trnem (Obr. 4.13). Na jejich základě můžeme konstatovat, že měření sondou se téměř neliší tvarově oproti hodnotám naměřeným kalibračním trnem.

S ohledem na systém uložení stolu můžeme opět říct, že stůl na dvou podporách zajišťuje menší odchylky blíže k ose naklápění stolu, než je tomu ve vzdálenějších bodech od středu souřadného systému. Stejně jako tomu bylo u měření předchozího stroje MAS MCU 450V-5x.

5 Zhodnocení poznatků a závěr

Na základě požadavků neustále se zpřesňující výroby roste i požadavek znát co nejpodrobněji informace o kinematice výrobního stroje, na kterém se výroba vykonává. Pro tyto účely bývají výrobní stroje osazeny obrobkovými sondami. Za pomoci těchto sond lze rychle a efektivně zjistit (s přesností garantovanou výrobcem sond) přesné rozměry obrobků, informace o nástroji, kvalitu povrchu a další nepřeberné množství informací.

Bakalářská práce shrnuje stručný přehled o základních principech dotykových sond, jejich funkce a oblast využití. Cílem práce bylo provedení experimentu porovnání přesnosti obrobkové sondy s ohledem na pozici vůči pracovnímu prostoru stroje, kde se provádí měření a probíhá výroba. Naměřená data byla vyhodnocena a zakreslena do 3D grafu v programu Excel.

První část práce je pojata jako rešeršní studie. Zabývá se shrnutím poznatků o měřicích sondách. Shrnuje jejich principy a základní rozdělení. Obsahuje také současné možnosti přenosu signálu a jejich příklady. Dále se práce zabývá vlastnostmi doteků a jejich rozdělením. Shrnuje aplikace jednotlivých doteků a možnosti jejich využití. Následuje stručné shrnutí možností kalibrace sond. Konkrétně za pomoci tvarového elementu a Renishaw Revo Renscan. Závěr první části se věnuje postupu kontroly CNC stroje a zmíněny jsou jednotlivé přístroje, které mohou být využity ke kontrole.

Následuje druhá část, ve které se práce zaměřuje již na samotný experiment a aplikaci sond při měření stolu námi zvolených obráběcích center. Jednalo se o tři pětiosá obráběcí centra, kde dvě se nachází na hale RTI ZČU a jedno na detašovaném pracovišti a experiment byl tedy proveden na vyžádání externím pracovníkem. Hlavní náplní druhé části je návrh postupu experimentu a popsání jednotlivých kroků. Následuje samotné měření stolů v několika cyklech za pomoci kalibračních trnů v kombinaci s koncovými měrkami a následně měření za pomoci dotykové sondy.

Závěrem se práce zabývá vyhodnocením naměřených odchylek v jednotlivých bodech. Jak z měření kalibračním trnem, tak měření obrobkovou sondou. Pro lepší vizualizaci výsledků a měřených bodů bylo využito programu AUTODESK INVENTOR k vytvoření maket jednotlivých stolů, do kterých byly zakresleny jednotlivé souřadnice bodů a programu MICROSOFT EXCEL k zakreslení naměřených odchylek do 3D grafu.

Z naměřených hodnot je patrné, že rozpětí naměřených hodnot za pomoci obrobkových sond je nižší než u měření pomocí kalibračního trnu a koncové měrky. Na základě tohoto faktu můžeme konstatovat, že měření pomocí obrobkových sond přináší přesnější a jistější výsledky měření, než proměrování za pomoci kalibračního trnu a koncové měrky.

Naměřené hodnoty, které vedly k výše popsaným výsledkům budou uplatnitelné v praxi ke zlepšení kvality a efektivity obrábění a to hlavně díky tomu, že obsluze stroje dají jasný přehled o odchylkách v jednotlivých částech stolu a tím i možnost volby, kde na základě technologických a konstrukčních požadavků součásti dosáhnou lepších výsledků, pokud budou brát v potaz i naměřené hodnoty.

Věřím, že práce má potenciál být rozšířena o další poznatky a měření k ještě přesnějším a jasnějším výsledkům, spolu s objasněním některých témat, která sahají za rámec této práce a není možné je v současné době zakomponovat a vzít v potaz. Mezi tato témata by mohla patřit přesnost pozicování a tuhost stroje a jejich vliv na výsledky měření. Dále třeba uložení stolů nebo využití software u použitých strojů, širší spektrum sond použitých k měření stolu nebo například ekonomické důsledky zjištění zmíněných v této práci.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Renishaw Pocket guide: Pocket guide to probes for CNC machine tools [cit. 2021-4-24]
- [2] KULHÁNEK, J. Aplikace měřicích sond v procesu obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [3] SLÁMA Josef. *MTP – Přehled produktů*. 1 vyd. Brno. 2006. 37 str. Databáze Renishaw.
- [4] ZAHRADNÍK, Jiří. *Elektrická výzbroj obráběcích strojů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-494-5.
- [5] Katalog doteků. *Renishaw* [online]. [cit. 2021-4-24] Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/typy-doteku—6627>
- [6] PLACHÝ, Štěpán. Měření těžkých obrobků pomocí mobilních měřicích zařízení. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117542>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Michal Holub.
- [7] Katalog sond Heidenhain. Heidenhain [online]. [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1113984-C2_Dotkov%C3%A9_sondy_cs.pdf
- [8] DMU 65 monoBLOCK - 5ti osé frézování od DMG MORI. DMG MORI Czech - CNC obráběcí stroje, kovoobráběcí stroje DMG MORI [online]. Copyright © 2021 DMG MORI. Všechna práva vyhrazena. [cit. 07.05.2021]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu-monoblock/dmu-65-monoblock>
- [9] DMU 65 monoBLOCK | Products | DMG MORI. DMG MORI [online]. Copyright © DMG MORI. CO., LTD. All rights reserved. [cit. 07.05.2021]. Dostupné z: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1445>
- [10] VLČEK, M. Integrace měření do CNC obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [11] HNÁTÍK, Jan. Vliv stroje a nástroje na přesnost digitalizace. Plzeň, 2009. Disertační práce. Západočeská univerzita.
- [12] TVARDEK, M. Možnosti měření geometrické přesnosti obrobku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 85 s., 1 příloha. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
- [13] HORÁČEK, Kryštof. Aplikace měřicích sond v procesu frézování na CNC stroji MCV1210. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/116518>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [14] VRZAL, J. Aplikace měřicích sond v procesu obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

- [15] Kontrola přesnosti CNC obráběcího centra | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kontrola-presnosti-cnc-obrabeciho-centra>
- [16] Kontrola geometrické přesnosti pětiosých strojů. MM Průmyslové spektrum [online]. 2011, 2011(3), 2 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/clanky/2011-03-22-kontrola-geometricke-presnosti-petiosych-stroju/>
- [17] Multifunkční obráběcí stroje a jejich geometrická přesnost | Technický týdeník. TT | Technický týdeník [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 18.05.2021]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/prumysl/multifunkcni-obrabeci-stroje-a-jejich-geometricka-presnost_37668.html
- [18] BUMBÁLEK, Leoš, a kolektiv. Kontrola a měření : pro SPŠ strojní. Vydání první. Praha: INFORMATORIUM, 2009. 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9
- [19] CNC obráběcí centrum DMU eVo – DMG MORI. DMG MORI Czech - CNC obráběcí stroje, kovoobráběcí stroje DMG MORI [online]. Copyright © 2021 DMG MORI. Všechna práva vyhrazena. [cit. 25.05.2021]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu-evo>
- [20] MCU 450V[T]-5x | KOVOSVIT MAS. Obráběcí stroje, CNC stroje, CNC soustruhy | KOVOSVIT MAS [online]. Copyright © KOVOSVIT MAS 2016 [cit. 25.05.2021]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcu-450vt-5x-p45.html>
- [21] ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ. Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Dostupné z: <http://jis.uvssr.fme.vutbr.cz/PDF/10/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20geometric%C3%A9%20p%C5%99esnosti%20obr%C3%A1b%C4%9Bc%C3%ADch%20stroj%C5%AF.pdf> (cit. dne 26. 5. 2021)
- [22] Brožura: Kontrolní systém axiset Check-up [online] [cit 2021-27-5] Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/e71d331275894544bb807dfc44f1003a.pdf>